



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Calidad del agua de los lagos de
Chapultepec, México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Biología

P R E S E N T A:

Sandra Ithandahui Santiago Silva



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

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno.
Santiago
Silva
Sandra Ithandahui
22356492
Universidad Nacional Autónoma de
México
Facultad de Ciencias
Biología
311194685

2. Datos del tutor
Dr.
Javier
Alcocer
Durand

3. Datos del sinodal 1
Dr.
Jorge
Ramírez
Zierold

4. Datos del sinodal 2
Dr.
Martín
Merino
Ibarra

5. Datos del sinodal 3
Dra.
Ana Cecilia
Espinosa
García

6. Datos del sinodal 4
M. en C.
León Felipe
Álvarez
Sánchez

7. Datos del trabajo
Calidad del agua de los lagos de
Chapultepec, México
78 p
2019

RESUMEN

Los lagos de Chapultepec son cuerpos acuáticos urbanos, utilizados principalmente para actividades recreativas. Su fuente de abastecimiento principal es la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Chapultepec, así como descargas irregulares de distintas fuentes en los alrededores. Lo anterior ha conllevado alteraciones en sus características físico-químicas y estado trófico lo cual ha tenido un impacto negativo en los usuarios (p.ej., aspecto desagradable, mal olor, mortandad de peces). El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua de los tres lagos de Chapultepec a lo largo de un ciclo anual mediante la medición de las variables físico-químicas y microbiológicas y verificar si cumplen con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para el uso destinado, así como con la Ley Federal de Derechos y el acuerdo CE-CCA-001/89. Se realizaron muestreos mensuales de abril de 2015 a marzo de 2016 en 6 estaciones: tres en el lago Viejo, dos en el lago Mayor y una en el lago Menor. Se midieron *in situ* profundidad, transparencia del disco de Secchi, temperatura, oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT), pH y conductividad (K_{25}). Se tomaron muestras compuestas de la columna de agua para analizar en el laboratorio: nutrientes, DBO_5 , DQO, SST, coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF). La profundidad de los tres lagos no fue mayor a 1.2 m, mostrando una baja transparencia de disco de Secchi, siendo el lago Menor el más turbio con un promedio de 6.5 ± 4.0 cm. En el lago Viejo se tuvo una temperatura promedio de 18.6 ± 2.6 °C, en el lago Mayor fue de 21.1 ± 2.6 °C, siendo este lago el de mayor temperatura promedio entre los tres, y el lago Menor de 19.0 ± 3.9 °C. Los tres lagos tuvieron sobresaturación de oxígeno disuelto. Los valores de pH variaron entre 7 y 10, siendo el lago Menor el de mayor pH (9.7 ± 0.6). La K_{25} fue moderada con valores de 330 a $669 \mu\text{S cm}^{-1}$. Los tres lagos presentaron un alto contenido de nutrientes, variando entre 0.1 a 1.5 mg L^{-1} para el P-Total, entre 0.02 a 0.6 mg L^{-1} para el PRS, entre 4.8 a 24.8 mg L^{-1} para el N- Total, entre 1.3 a 10.4 mg L^{-1} para el N- NO_3 , entre 0.003 a 2.4 mg L^{-1} para el N- NO_2 , entre 0.02 a 5.9 mg L^{-1} para el N- NH_3 y entre 1.4 a 14 mg L^{-1} para el NID, teniendo el lago Mayor las concentraciones más altas. En general, los valores de DBO_5 , DQO, SST, CT y CF fueron altos. En el lago Viejo se registraron valores de entre 11.8 a 44.6 mg L^{-1} de DBO_5 , 40 a 165 mg L^{-1} de DQO, 17 a 98 mg L^{-1} de SST, de 2 a 3,000 NMP/100ml de CT y de <2 a 2,400 NMP/100ml de CF.

En el lago Mayor la DBO_5 fue de 9.1 a 34.9 $mg L^{-1}$, DQO de 24 a 160 $mg L^{-1}$, SST de 20 a 88 $mg L^{-1}$, de 11 a 16,000 NMP/100 ml para CT y de <2 a 3,000 NMP/100 ml para CF. En el lago Menor la DBO_5 fue de 8.8 a 45.8 $mg L^{-1}$, la DQO de 153 a 697 $mg L^{-1}$, SST de 95 a 320 $mg L^{-1}$, en cuanto a los CT los valores fueron de 6 a >1,600 NMP/100 ml y de <2 a >1,600 NMP/100 ml de CF. Los lagos se clasificaron como hipereutróficos, así como no aptos para su uso recreativo de contacto secundario, ya que, a pesar de que algunos parámetros de calidad de agua estuvieron dentro de las NOMs, en la Ley Federal de Derechos y en el Acuerdo CE-CCA00/89, la mayoría excedieron los límites permisibles establecidos.

ÍNDICE

1. Introducción	12
2. Antecedentes.....	15
3. Justificación	16
4. Objetivos.....	17
4.1 Objetivo general	17
4.2 Objetivos específicos	17
5. Área de estudio.....	18
6. Metodología	19
6.1 Trabajo de campo	19
6.2 Trabajo de laboratorio	21
6.2.1 Nutrientes	21
6.2.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	21
6.2.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	22
6.2.4 Sólidos suspendidos totales (SST).....	23
6.2.5 Coliformes	23
6.3 Trabajo de gabinete	24
6.3.1 Análisis estadístico	24
6.3.2 Calidad de agua	24
7. Resultados.....	25
7.1 Parámetros físico-químicos.....	25
7.1.1 Transparencia del disco de Secchi.....	25
7.1.2 Temperatura	27
7.1.3 Oxígeno disuelto (OD) y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT) 30	
7.1.4 pH.....	35
7.1.5 Conductividad eléctrica (K ₂₅)	38
7.2 Nutrientes.....	40
7.2.1 Fósforo total (P-Total).....	41
7.2.2 Fósforo soluble reactivo (PSR).....	43
7.2.3 Nitrógeno total (N-Total)	45
7.2.4 Nitrógeno como nitratos (N-NO ₃).....	47
7.2.5 Nitrógeno como nitritos (N-NO ₂).....	49

7.2.6	Nitrógen amoniacal (N-NH ₃)	51
7.2.7	Nitrógeno inorgánico disuelto (NID).....	53
7.3	DBO ₅ , DQO, SST y Coliformes	55
7.3.1	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	56
7.3.2	Demanda química de oxígeno (DQO)	58
7.3.3	Sólidos suspendidos totales (SST).....	60
7.3.4	Coliformes	62
7.4	Análisis estadísticos.....	66
8.	Discusión	67
9.	Conclusiones	71
10.	Bibliografía	73
11.	Anexo	77

INDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Valores ambientales medidos en los tres lagos de Chapultepec durante el periodo de muestreo.
- Tabla 2.** Concentración de nutrientes en los tres lagos de Chapultepec.
- Tabla 3.** Concentración de coliformes totales, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST) en los tres lagos de Chapultepec.
- Tabla 4.** Parámetros físico-químicos de otros lagos urbanos.
- Tabla 5.** Parámetros de calidad de agua, Ley Federal de Derechos y Acuerdo CE-CCA-001/89.
- Tabla 6.** Límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-03-SEMARNAT - 1997 para el uso de agua para “servicios al público con contacto directo e indirecto u ocasional”.
- Tabla 7.** Valores indicadores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en agua superficial.
- Tabla 8.** Valores indicadores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en agua superficial.
- Tabla 9.** Valores indicadores de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en agua superficial.

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Ubicación de la Ciudad de México (CDMX) dentro de México (triángulo rojo) y del Bosque de Chapultepec (Círculo azul) en la Delegación Miguel Hidalgo y CDMX. Modificado de Diario Oficial de la Nación e Instituto Electoral Ciudad de México.
- Figura 2.** Mapa de las seis estaciones en los tres lagos de Chapultepec. Modificado de Google Earth.
- Figura 3.** Profundidad del disco de Secchi en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 4.** Profundidad del disco de Secchi en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual
- Figura 5.** Profundidad del disco de Secchi en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 6.** Temperatura promedio del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 7.** Temperatura promedio en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 8.** Temperatura promedio en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 9.** Perfil vertical de la temperatura en los tres lagos de Chapultepec.
- Figura 10.** Concentración de oxígeno disuelto en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 11.** Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 12.** Concentración de oxígeno disuelto en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 13.** Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 14.** Concentración de oxígeno disuelto en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 15.** Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 16.** Perfil vertical de oxígeno disuelto en los tres lagos de Chapultepec.

- Figura 17.** Perfil vertical del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en los lagos de Chapultepec.
- Figura 18.** pH promedio del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 19.** pH promedio del lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 20.** pH promedio del lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 21.** Perfil vertical del pH del agua por estación de los tres lagos de Chapultepec.
- Figura 22.** Conductividad promedio (K25) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 23.** Conductividad promedio (K25) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 24.** Conductividad promedio (K₂₅) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 25.** Perfil vertical de la Conductividad por estaciones en los tres lagos de Chapultepec.
- Figura 26.** Concentraciones de fósforo total (P-Total) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 27.** Concentraciones de fósforo total (P-Total) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 28.** Concentraciones de fósforo total (P-Total) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 29.** Concentraciones de fósforo soluble reactivo (PSR) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 30.** Concentración de fósforo soluble reactivo (PSR) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 31.** Concentración de fósforo soluble reactivo (PSR) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 32.** Concentración de Nitrógeno total (N-Total) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 33.** Concentración de Nitrógeno total (N-Total) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 34.** Concentración de Nitrógeno total (N-Total) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

- Figura 35.** Concentración de nitrógeno como nitratos (N-NO₃) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 36.** Concentración de nitrógeno como nitratos (N-NO₃) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 37.** Concentración de nitrógeno como nitratos (N-NO₃) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 38.** Concentración de nitrógeno como nitritos (N-NO₂) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 39.** Concentración de nitrógeno como nitritos (N-NO₂) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 40.** Concentraciones de nitrógeno como nitratos (N-NO₃) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 41.** Concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 42.** Concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 43.** Concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 44.** Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 45.** Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 46.** Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 47.** Demanda bioquímica de oxígeno del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 48.** Demanda bioquímica de oxígeno del lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 49.** Demanda bioquímica de oxígeno del lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 50.** Demanda química de oxígeno del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

- Figura 51.** Demanda química del oxígeno del lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 52.** Demanda química de oxígeno en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 53.** Sólidos suspendidos totales en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 54.** Sólidos suspendidos totales en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 55.** Sólidos suspendidos totales en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 56.** Coliformes totales por mes para el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 57.** Coliformes fecales por mes para el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 58.** Coliformes totales para el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 59.** Coliformes fecales para el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 60.** Coliformes totales para el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.
- Figura 61.** Coliformes fecales para el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

1. Introducción

Los lagos urbanos son el tipo de cuerpos de agua incorporados a las ciudades y que el mayor número de personas conoce, visita y utiliza debido al crecimiento de las poblaciones urbanas. Entre los usos más comunes que se les asigna es la recreación, así como el control de inundaciones y, en algunos casos, son fuentes de abastecimiento de agua para el consumo humano (Schueler y Simpson, 2001). Tienen un papel importante en la modulación del microclima, en la producción de oxígeno y como sumideros de dióxido de carbono y otros compuestos (Cruz y Martínez, 1999). Asimismo, permiten el establecimiento de diferentes hábitats hacia el interior de las ciudades para las especies que logran adaptarse a éstos ya sean acuáticos, terrestres, migratorios o residentes, generando un incremento en su valor paisajístico (García-Rodríguez *et al.*, 2015).

Los lagos urbanos generalmente son artificiales, poco profundos y vulnerables a la contaminación del agua a través del enriquecimiento con nutrientes, lo que incrementa su nivel trófico (Vallentyne, 1978). Algunos lagos urbanos experimentan el proceso de eutrofización (Moreno *et al.*, 2010), lo cual provoca el deterioro progresivo de la calidad del agua, originado por el aumento de nutrientes (Pollinger, 1986). Estos son elementos esenciales para el crecimiento de organismos fitoplanctónicos, principalmente, nitrógeno y fósforo, además de materia orgánica (Moreno *et al.*, 2010).

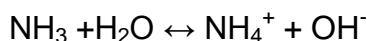
Los aportes de nutrientes pueden ser externos (alóctonos) y/o internos (autóctonos). La carga externa se genera a partir de la fuente de abastecimiento, los materiales arrastrados por la acción de la precipitación y la erosión de la cuenca; a ellos se le suma el vertimiento de efluentes industriales y domésticos. La carga interna se genera como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica en el propio sistema, la retención de nutrientes a través de mecanismos físicos y químicos en el sedimento, así como a su incorporación en la biomasa de organismos vegetales y animales (Mazzeo *et al.*, 2002).

El rápido y continuo aporte de nutrientes a los lagos ha provocado que muchos de ellos alcancen el estado de eutrofia extrema, conocido como hipertrofia (Oliva *et al.*, 2008). Este enriquecimiento favorece el crecimiento y multiplicación del fitoplancton. Estos

organismos ocupan la superficie, la cual saturan de gas (oxígeno disuelto producto de la fotosíntesis) y el exceso se escapa a la atmósfera. A su vez, el fitoplancton que muere comienza a sedimentarse, favoreciendo un incremento en la abundancia de descomponedores. Las bacterias aerobias aprovechan el oxígeno que está disponible en el agua, mientras que las bacterias anaerobias se encuentran en el fondo produciendo gases como el amoníaco y sulfuro de hidrógeno o metano, lo que se traduce en malos olores y sabores (Mazzeo *et al.*, 2002; Moreno *et al.*, 2010).

Al igual que el oxígeno disuelto (OD), el pH también se ve modificado por la eutrofización, debido a que el consumo en exceso de CO₂ por los procesos de fotosíntesis basifican el agua, esto en la superficie, mientras que en el fondo ocurren procesos de descomposición los cuales liberan CO₂ provocando la acidificación del agua (Mazzeo *et al.*, 2002).

En cuanto a los nutrientes, el fósforo y el nitrógeno son los nutrientes más importantes en los sistemas acuáticos. El fósforo disponible en el agua se encuentra en forma inorgánica como ión fosfato (PO₄⁻³) y fósforo soluble reactivo (PSR), que es como el fitoplancton puede absorberlo (Roldán y Ramírez, 2008). En cuanto al nitrógeno puede existir en estado libre como gas (N₂), como nitrato (NO₃), nitrito (NO₂) o amoníaco (NH₃) (Wetzel, 2001), así como amonio ionizado (NH₄⁺) que en solución acuosa establecen un equilibrio mediante la reacción:



Este equilibrio depende de la temperatura, el pH y la salinidad. Bajo condiciones medias de 25 °C y un pH de 7, el amonio no ionizado (amoníaco) representa el 0.6% del amonio total en el agua, mientras que a un pH de 9.5 y una temperatura de 30 °C este porcentaje puede subir hasta 72% (Cárdenas y Sánchez, 2013).

La primera definición de “calidad de agua” fue desarrollada en los Estados Unidos por la Agencia de Protección Ambiental en el llamado “Libro Rojo” (U.S. EPA, 1974), donde se proponen criterios para los principales contaminantes y las características físicas del agua con el fin de permitir mayores usos del recurso hídrico; pero fue hasta 1986 cuando se publicaron los criterios de calidad recomendados para las aguas de uso recreativo (U.S. EPA, 1986). En México la calidad del agua, según el uso a que se

destine, se establece con base en análisis de diferentes parámetros cuyos valores deben ajustarse a la Norma Oficial Mexicana (NOM) vigente. Las NOMs en cuanto al Sector Ambiental tienen el fin de establecer las características y especificaciones, criterios y procedimientos, que permitan proteger y promover el mejoramiento del ambiente y los ecosistemas, así como preservación de los recursos naturales (SEMARNAT, 2012). En este caso, protegen los cuerpos de agua para prevenir su contaminación y tener una calidad de agua buena para su uso recreativo y bienestar del ecosistema.

Por otro lado, la Ley Federal de Derechos establece los parámetros de calidad de agua de abastecimiento para uso público, como protección de la vida acuática y riego agrícola (Cámara de Diputados de H. Congreso de la Unión, 2016). En cuanto al acuerdo CE-CCA-001/89 establece criterios ecológicos de calidad de agua para su uso como abastecimiento de agua potable para actividades recreativas y para la protección de la vida acuática (Diario Oficial de la Federación, 1989).

Además, se desarrolló (SEMARNAT y CONAGUA, 2007) un sistema cualitativo llamado Índice de Calidad del Agua (ICA) que permite hacer comparaciones de nivel de contaminación en diferentes cuerpos acuáticos. Los indicadores que se utilizan muestran la influencia antropogénica desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos e industriales que por sus características producen desechos líquidos de calidad diferente.

Los métodos de indicadores de calidad de agua se han desarrollado para evaluar la contaminación por materia orgánica e inorgánica, eutrofización, aspectos de salud, sustancias suspendidas y disueltas, nivel de oxígeno, características físico-químicas y sustancias disueltas (Samboni *et al.*, 2007). Los parámetros físico-químicos dan un informe completo de la composición de las especies químicas en el agua y sus propiedades físicas, dentro de los cuales los más usados son (APHA, 2012):

- 1) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), que mide la cantidad de oxígeno consumido en la degradación de materia orgánica por organismos aerobios en una muestra de agua. Se utiliza para medir el grado de contaminación por materia orgánica.

- 2) Demanda Química de Oxígeno (DQO), al igual que la DBO₅ mide la cantidad de sustancias (disueltas o en suspensión) susceptibles de ser oxidadas en una muestra de agua, pero en este caso por medio de un oxidante químico.
- 3) Sólidos suspendidos totales (SST), que indican la concentración de sólidos en suspensión (no disueltos) presentes en una muestra de agua, se suelen separar por filtración.
- 4) Coliformes, los cuales corresponden a un grupo de especies de bacterias con características similares, bacilos gran negativos, aerobios o anaerobios facultativos capaces de fermentar lactosa con producción de gas. Las coliformes totales comprenden la totalidad del grupo mientras que los coliformes fecales corresponden exclusivamente a las coliformes de origen fecal.

2. Antecedentes

Existe información previa de los lagos de Chapultepec, siendo el lago Viejo el que ha sido más estudiado. Alcocer (1988) realizó la caracterización hidrobiológica de los tres lagos y en otra investigación, realizó el estudio preliminar del efecto que había tenido el dragado en el lago Viejo, donde concluyeron que el dragado no produjo cambios en los valores de los parámetros naturales del lago (Alcocer *et al.*, 1988).

Guzmán (1989) estudió la macrofauna béntica y su relación con la dinámica físico-química de los lagos de Chapultepec. Los caracterizó como eutróficos, con algunas características de hipertrofia. Concluye que, por las concentraciones de nutrientes, cantidad de materia flotante, color y transparencia no son lagos para aguas de uso recreativo.

Flores (1991) analizó la ictiofauna de los lagos y encontró tres familias: Goodeidae, Atherinidae y Cyprinidae. Navarrete-Salgado y colaboradores (2004) estudiaron la abundancia y estado sanitario del “mexclapique” (*Girardinichthys viviparus*) en los tres lagos de Chapultepec. Reportaron en el lago Viejo la ausencia de esta especie a pesar de que los parámetros ambientales son semejantes. En los lagos Mayor y Menor encontraron a los peces parasitados por diferentes organismos.

Muro (1994) estudió la abundancia de los cladóceros y su relación con parámetros físico-químicos en los tres lagos de Chapultepec y encontró cinco especies de cladóceros: *Moina micrura*, *M. macrocopa*, *A. costata*, *A. guttata* y *Leydigigia leydigi*. González (1995) revisó la variación espacial y temporal de los ciliados planctónicos de los lagos de Chapultepec. Por lo que evaluó parámetros físico-químicos y biológicos, determinó 30 especies y debido al número total de ciliados consideró que los lagos se encuentran eutrofizados. Cruz y Martínez (1999) analizaron la relación entre fotosíntesis e irradiación en el nanoplancton como un indicador indirecto de la salud del ecosistema en dos lagos, uno de ellos fue el lago Viejo. Evaluaron parámetros físico-químicos y reportaron 24 géneros de nanoplancton; además, encontraron que la producción fotosintética muestra un comportamiento temporal con mayores valores en la temporada de lluvias.

Palacios y Vega (2005) propusieron dos alternativas para atender el problema de la calidad del agua: la primera fue la construcción de una planta para tratamiento de aguas residuales con capacidad para suministrar el caudal de agua tratada suficiente para que por medio del vertido fuera desalojada la producción diaria de microalgas y evitar que éstas permanecieran en el sistema. La segunda fue construir una planta de tratamiento capaz de retirar la producción de algas por día por medio de la remoción, mediante el proceso de clarifloculación, a través de la adición del coagulante policloruro de aluminio. Concluyeron que la mejor opción era la primera por los bajos costos de operación y mantenimiento.

Olguín (2018) evaluó la producción primaria bruta, la producción primaria neta y la respiración durante un ciclo anual para conocer el metabolismo lacustre de los tres lagos de Chapultepec, registraron altos niveles de producción primaria y neta, así como de respiración, indicando elevada fotosíntesis y gran cantidad de materia orgánica, además de que clasificó a los lagos como hipertróficos.

3. Justificación

Los lagos de Chapultepec son cuerpos de agua urbanos que presentan problemas de eutrofización como consecuencia de estar alimentados por aguas tratadas

secundariamente, así como por recibir descargas de aguas residuales irregulares de los negocios que se asientan en la periferia. Es necesario hacer una caracterización actual del estado físico-químico y microbiológico de los tres lagos, para verificar si estos cuerpos acuáticos cumplen con los lineamientos establecidos en la Norma Mexicana de Calidad del Agua para uso de contacto directo/recreativo y para la preservación de la biota acuática, usos para los que fueron destinados.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar la calidad del agua de los tres lagos de Chapultepec a lo largo de un ciclo anual mediante la medición de las variables físico-químicas y microbiológicas y verificar si cumplen con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para el uso destinado, así como con la Ley Federal de Derechos y el acuerdo CE-CCA-001/89.

4.2 Objetivos específicos

- a) Determinar *in situ* profundidad, profundidad de disco de Secchi, temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, pH, conductividad y turbidez de los tres lagos de Chapultepec.
- b) Determinar la concentración de nutrientes presentes en los tres lagos de Chapultepec.
- c) Estimar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) de los tres lagos de Chapultepec.
- d) Estimar la concentración de coliformes totales y coliformes fecales de los tres lagos de Chapultepec.
- e) Determinar si el agua de los tres lagos de Chapultepec cumple con las Normas Mexicanas: NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, además de la Ley Federal de Derecho y el acuerdo CE-CCA-001/89, así como los indicadores de calidad de agua de CONAGUA y SEMARNAT.

5. Área de estudio

El Bosque de Chapultepec es el parque urbano más antiguo y de mayor extensión en América (Solís, 2002). Está situado al noroeste de la Ciudad de México dentro de la Delegación Miguel Hidalgo (Fig. 1). Comprende 686.01 hectáreas y está dividido en tres secciones, en dos de las cuales hay cuerpos acuáticos: el lago Viejo ($19^{\circ} 25' N$ y $99^{\circ} 11' O$) en la 1^a sección y los lagos Mayor ($19^{\circ} 25' N$ y $99^{\circ} 11' O$) y Menor ($19^{\circ} 24' N$ y $99^{\circ} 12' O$) en la 2^{da} sección del Bosque de Chapultepec (GDF, 2006).



Fig. 1. Ubicación del Bosque de Chapultepec (circulo azul) dentro de la Ciudad de México (CDMX). Modificado del Diario Oficial de la Nación e Instituto Electoral Ciudad de México. (<http://portal.iedf.org.mx/MGE2017-2018/>) (http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5249902).

El Bosque de Chapultepec se encuentra a una altitud entre los 2,240 y 2,450 m s.n.m. De acuerdo con García (1988) su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (PUEC-UNAM, 2002).

El lago Viejo es el más grande de los tres, ubicado en la 1^a sección del Bosque de Chapultepec, con forma de triángulo invertido con una estrangulación hacia el ápice. Tiene una superficie de 60,240 m² de los cuales 12,240 m² están representados por islas, con un perímetro de 1,883 m y su cuenca alberga 49,525 m³ de agua con una profundidad media de 1 m (Alcocer *et al.*, 1988). La alimentación del lago Viejo

proviene de tres fuentes: del Río Hondo, la planta de tratamiento de aguas residuales de Chapultepec (PTAR) y las pequeñas descargas de aguas residuales irregulares de los locales de la periferia.

Los lagos Mayor y Menor se encuentran en la 2ª sección del Bosque. El lago Mayor tiene forma de “ocho” (Alcocer et al., 2007), con un área total de 58,200 m², un perímetro de 1,858 m y su cuenca contiene 59,709 m³ de agua, con una profundidad media de 1.1 m (Alcocer et al., 1988). Finalmente, el lago Menor tiene forma de “S” (Alcocer et al., 2007) con área total de 27,600 m², con perímetro de 1,082 m, su cuenca contiene 26,573 m³, con una profundidad media de 1.1 m (Alcocer et al., 1988). Los lagos Mayor y Menor se alimentan mayoritariamente de la PTAR (Alcocer et al., 1988).

La fuente más importante de aporte de sedimento de los tres lagos es autóctona, derivada de la elevada productividad primaria. Presentan sedimentos de textura fina dominados por lodos (limos + arcillas), en especial el Menor que presenta un 90%, mientras que los otros dos alcanzan un 50% (Alcocer et al., 2007). El color del sedimento de los lagos Viejo y Mayor son oscuros, tersos y con mayor consistencia que los del Menor. Por otro lado, el lago Menor tiene sedimentos de color café verduzco, suaves y floculentos (Alcocer et al., 1988).

6. Metodología

6.1 Trabajo de campo

El estudio se llevó a cabo en los tres lagos del Bosque de Chapultepec con muestreos mensuales, de marzo de 2015 a marzo de 2016. Se establecieron seis estaciones de muestreo: tres en el lago Viejo (E1, E2, E3), dos en el lago Mayor (E4, E5) y una en el lago Menor (E6) (Fig. 2).



Fig. 2. Ubicación de las seis estaciones de muestreo en los tres lagos de Chapultepec, Ciudad de México. Modificado de Google Earth. (<https://earth.google.com/web/>)

En cada muestreo se utilizó una sonda multiparamétrica marca YSI (Yellow Spring Instruments, Ohio, E.U.) para obtener perfiles verticales cada 20 cm a lo largo de la columna de agua de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), concentración de oxígeno disuelto (mg L^{-1}), porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% SAT), pH y conductividad eléctrica estandarizada a 25°C (K_{25}). Se midió la profundidad en cada estación con un ecosonda manual y para medir la transparencia del agua se utilizó un disco de Secchi.

Para el análisis de nutrientes, DBO_5 , DQO, SST, coliformes totales y fecales se tomaron muestras de agua integrada de la columna de agua con un tubo muestreador, el cual se llenó hasta 5 litros. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en

oscuridad y frío dentro de una hielera y procesadas el mismo día o el siguiente a más tardar.

6.2 Trabajo de laboratorio

6.2.1 Nutrientes

Para medir el nitrógeno y el fósforo totales se realizó una digestión química utilizando persulfato de potasio en condiciones básicas (5 mL por cada 50 mL de muestra). Se introdujeron muestras de 100 mL a una autoclave durante 45 minutos a 115°C para completar la digestión. Una vez frías se procedió al análisis de nutrientes.

El nitrógeno se determinó en forma de nitratos (N-NO₃) y el fósforo en forma de fósforo soluble reactivo (PSR) ambos en mg L⁻¹, con los métodos espectrofotométricos de reducción con cadmio (Nitraver 5) y del ácido ascórbico (Phosver 5) utilizando un laboratorio portátil de calidad de agua marca HACH modelo DREL/2000 (HACH, 1993).

Se calculó el nitrógeno disuelto (NID) y el nitrógeno orgánico (N_{ORG}), donde el NID es la suma de N-NO₃, N-NO₂ y N-NH₃ y el N_{ORG} es la diferencia del N-total y el NID.

6.2.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Para llevar a cabo el bioensayo y poder estimar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) primero se neutralizaron las muestras a un intervalo de pH de 6.5-7.5. Se utilizaron diferentes concentraciones de las muestras y dos frascos de DBO (frasco A y B) con el mismo volumen de muestra para cada concentración. Todos los frascos fueron llenados con agua de disolución. Los frascos A se incubaron durante cinco días a 20°C en la oscuridad y a los frascos B se les adicionó 1 mL de álcali-yoduro-azida y 1 mL de ácido sulfúrico, soluciones que generan una reacción química en cadena (oxidación y reducción) la cual permite por medio de una titulación con tiosulfato de sodio calcular los mg L⁻¹ de oxígeno disuelto en la muestra de la siguiente manera:

$$mg L^{-1} \text{ de OD} = \frac{(mg \text{ gastados de tiosulfato} \cdot N \cdot 8000)}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde, N es la normalidad del tiosulfato de sodio.

Los frascos A después de los cinco días de incubación se hicieron reaccionar y se titularon para finalmente calcular el OD. La diferencia entre los mg L⁻¹ de OD del frasco B y el A corresponde al oxígeno consumido durante los días de incubación para oxidar la materia orgánica presente en la muestra (APHA, 2012).

6.2.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para llevar a cabo el ensayo y estimar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se colocaron 2.5 mL de cada muestra dentro de tubos de digestión (de 16 mm X 10 mm con tapa). Se adicionó a cada tubo 1.5 mL de solución digestión B (a 150 °C), 3.5 mL de ácido sulfúrico, se taparon y, posteriormente, se homogeneizaron. Luego todos los tubos incluyendo el blanco (tubo con 2.5 mL de agua en lugar de muestra) se colocaron en un digestor previamente calentado a 150°C durante dos horas. Después de que los tubos se enfriaron a temperatura ambiente se titularon las muestras con una microbureta usando sulfato ferroso amoniacal 0.025 M y ferroin como indicador. La técnica se basa en la oxidación de la materia utilizando la solución de digestión como oxidante en presencia de ácido sulfúrico y la demanda química de oxígeno se calcula a partir de la cantidad de solución de digestión añadida al blanco y la empleada en cada muestra de la siguiente manera:

$$mg L^{-1} \text{ de OD} = \frac{A-B (M) (8000)}{mL \text{ de muestra}}$$

Dónde: A: mL de solución de digestión usada en el blanco,
 B: mL de solución de digestión usadas en la muestra
 M: molaridad de la solución de digestión.

6.2.4 Sólidos suspendidos totales (SST)

Para el análisis de sólidos suspendidos totales (SST) primero se prepararon los crisoles de Gooch, lo que consistió en colocar un filtro de fibra de vidrio dentro de cada crisol, humedecer el filtro con agua para asegurar que este se adhiriera al fondo, posteriormente, calentar el crisol en un horno a 103-105 °C durante una hora, se dejó enfriar y se pesó hasta obtener un peso constante o hasta que la diferencia de peso fuera menor al 4% del peso previo. Finalmente, se procedió a filtrar las muestras al vacío, nuevamente se colocó el cristal en el horno a 105 °C por una hora y se pesó hasta un peso constante. La técnica se basa en el incremento de peso que experimenta un filtro de fibra de vidrio tras la filtración al vacío de una muestra (APHA, 2012).

Los cálculos se realizaron a partir de la siguiente fórmula:

$$mg L^{-1} \text{ de sólido suspendido} = \frac{(P2 \text{ en mg} - P1 \text{ en mg}) (1000)}{mL \text{ de muestra}}$$

Dónde: P1: peso uno del crisol
P2: peso dos del crisol

El análisis se desarrolló siguiendo los métodos estándar de APHA (2012).

6.2.5 Coliformes

Para el análisis de las bacterias coliformes se empleó la técnica del número más probable (NMP), la cual comprende dos fases: la presuntiva y la confirmativa (APHA, 2012). Durante la fase presuntiva se inocularon tubos con 1 mL de muestra a diferentes concentraciones (diluciones seriadas) con dispositivo de Durham y 9 mL de caldo lactosado como medio de cultivo, los cuales fueron incubados a 35°C por 24-48 horas. En la fase confirmativa se sembraron los tubos positivos de la prueba presuntiva en: caldo verde brillante y se incubaron a 35 °C durante 24-48 horas para coliformes totales y en medio *Escherichia coli* (EC) e incubados en baño de agua a 44.5 °C por 24 horas para coliformes fecales.

Los resultados se obtuvieron consultando tablas del Número Más Probable (NMP) de microorganismos, a partir del número de tubos positivos (se fundamentan en la capacidad de las bacterias para descomponer el medio y producir gas cuando son incubados a una temperatura específica). Estas tablas se basan en que los microorganismos están distribuidos al azar a través de toda la muestra y que es suficiente la presencia de un solo individuo para que este se desarrolle en el tubo.

6.3 Trabajo de gabinete

6.3.1 Análisis estadístico

Se capturó la base de datos y se hicieron las gráficas de los parámetros físico-químicos y microbiológicos en el programa Microsoft Office Excel (2016).

Se realizó un análisis de varianza para saber si existía diferencia significativa entre las estaciones de muestreo para cada variable con un nivel de confianza de 95%.

Se consideraron dos hipótesis:

- **Hipótesis Nula:** entre las estaciones no existen diferencias significativas.
- **Hipótesis Alternativa:** al menos una de las estaciones tiene diferencias significativas.

En los casos donde se aceptó la hipótesis alternativa, se hizo un análisis de Tukey, para especificar las diferencias significativas entre las estaciones para cada variable. Ambos análisis se realizaron en el programa Microsoft Office Excel (2016).

6.3.2 Calidad de agua

Se utilizaron los criterios dictados en la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997, la Ley Federal de Derecho, el acuerdo CE-CCA-001/89 así como los indicadores de calidad de agua de CONAGUA y SEMARNAT (2014).

7. Resultados

7.1 Parámetros físico-químicos

Los valores promedio, así como máximos y mínimos de los parámetros físico-químicos que se midieron en los tres lagos de Chapultepec se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros físico-químicos medidos en los tres lagos de Chapultepec durante el periodo de muestreo (Prom. = promedio, Máx. = valor máximo, Mín. = valor mínimo, d.e. = desviación estándar).

Estación/ Parámetro		Lago Viejo			Lago Mayor		Lago Menor
		E1	E2	E3	E4	E5	E6
Disco de Secchi (cm)	Prom. ± d.e.	18 ± 9.8	10 ± 3.6	9 ± 2.0	30 ± 5.3	16 ± 7.6	6 ± 4.0
	Máx	40	15	12.5	40	30	15
	Mín	7	3	5	20	7	2
Temperatura (°C)	Prom. ± d.e.	18.2 ± 2.7	18.9 ± 2.4	18.9 ± 2.6	21.4 ± 2.4	20.8 ± 2.8	19.0 ± 3.9
	Máx	25.8	22.5	22.4	25.2	25.7	26.7
	Mín	12.0	12.9	12.8	15.6	14.2	11.2
OD (mg L ⁻¹)	Prom. ± d.e.	10.5 ± 4.6	10.1 ± 3.6	9.2 ± 2.7	12.5 ± 5.1	14.4 ± 5.4	11 ± 5.4
	Máx	22.9	19.4	15.4	25.5	24.67	21.9
	Mín	0.9	0.5	1.1	1.20	1	1.2
OD (%SAT)	Prom. ± d.e.	139 ± 62.0	136 ± 50.2	124 ± 39.4	177 ± 71.6	196 ± 74.2	148 ± 78.36
	Máx	292.5	258.7	227.8	310.7	313.2	300
	Mín	14	7.1	15.6	18.0	14.6	15.8
pH	Prom. ± d.e.	8 ± 0.5	9 ± 0.4	9 ± 0.3	8 ± 0.7	9 ± 0.6	9 ± 0.6
	Máx	10	10	10	11	10	11
	Mín	7	8	9	7	7	8
K ₂₅ (μS cm ⁻¹)	Prom. ± d.e.	478 ± 51.5	437 ± 45.3	430 ± 46.7	509 ± 51.5	504 ± 49.2	488 ± 66.4
	Máx	614	544	520	610	599	669
	Mín	381	356	335	418	391	330

7.1.1 Transparencia del disco de Secchi

Los valores de la transparencia del disco de Secchi fueron bajos. En el lago Viejo la transparencia fluctuó entre 3 cm para el mes de septiembre y 40 cm para febrero. A lo

largo del año se comportó de manera similar las estaciones 1 y 2. La estación 3 fue donde se observó mayor profundidad con el disco de Secchi (Fig. 3)

En el lago Mayor las estaciones tuvieron un comportamiento parecido a lo largo del año, donde la transparencia fluctuó de 7 cm en julio y 40 cm en febrero. La estación 4 fue donde se hallaron los valores de mayor profundidad en el lago Mayor (Fig. 4). Y en cuanto al lago Menor la transparencia fluctuó de 7 cm a 40 cm en febrero y julio, respetivamente (Fig. 5).

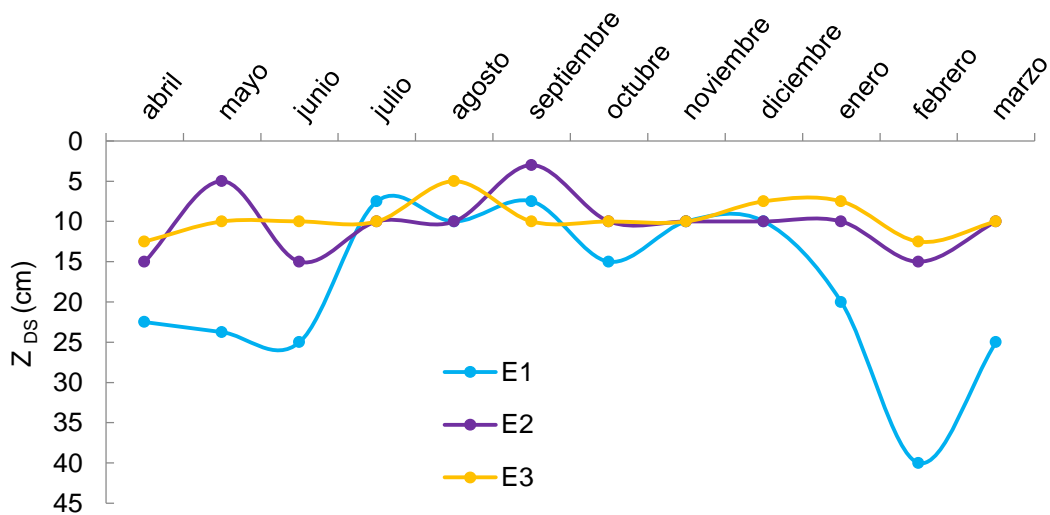


Fig. 3. Profundidad del disco de Secchi (Z_{DS}) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

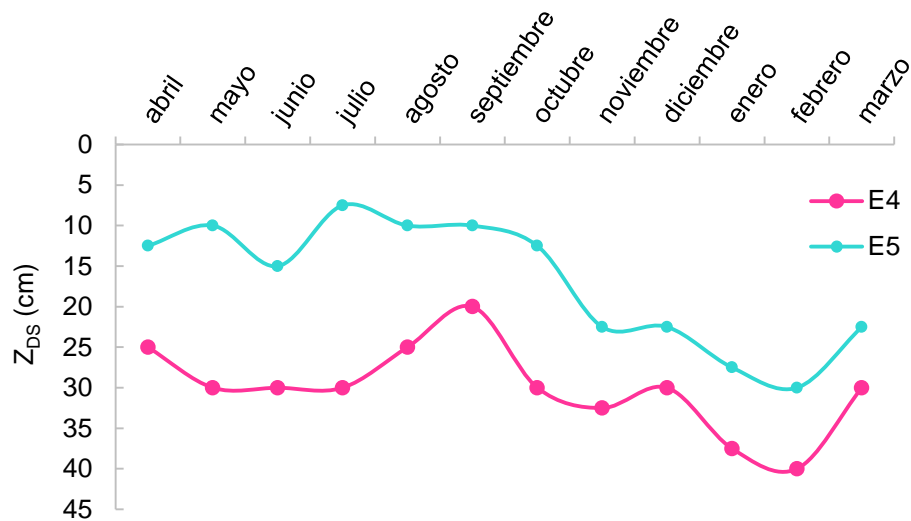


Fig. 4. Profundidad del disco de Secchi (Z_{DS}) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

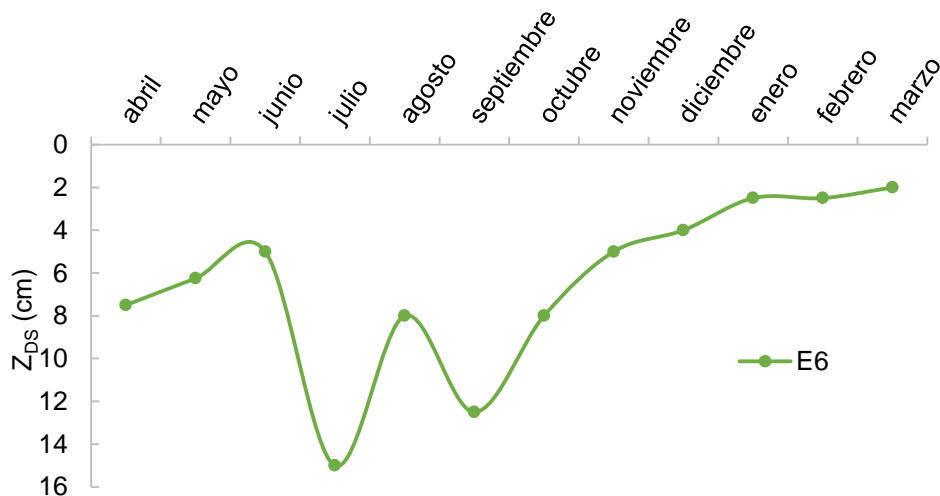


Fig. 5. Profundidad del disco de Secchi (Z_{DS}) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

La profundidad promedio del disco de Secchi fue de 23 ± 9 cm en el lago Mayor, seguido del lago Viejo con 13 ± 7 cm y 7 ± 4 cm en el lago Menor.

7.1.2 Temperatura

En el lago Viejo la temperatura del agua tuvo un intervalo de 12.0 a 25.8°C (Tabla 1). Los valores promedios mínimos fueron de $13.0 \pm 1.3^\circ\text{C}$, $13.5 \pm 0.6^\circ\text{C}$ y $13.5 \pm 0.8^\circ\text{C}$

durante el mes de enero para las estaciones 1, 2 y 3, respectivamente. En cuanto al valor promedio máximo se registró durante agosto en la E3 $22.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$ (Fig. 6).

En cuanto a la temperatura del lago Mayor se registró un intervalo entre 14.2 a 25.7°C . Las temperaturas promedio mínimas se registró en enero, al igual que en el lago Viejo, pero de $16.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$ para la E4 y $15.7 \pm 1.0^\circ\text{C}$ para la E5. Al contrario, el valor promedio máximo se encontró en abril en la estación 4 con $24.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ y para la estación 5 con $23.5 \pm 1.8^\circ\text{C}$ para agosto (Fig. 7).

Por otro lado, en el lago Menor fluctuó entre 11.2 a 26.7°C . El valor mínimo promedio se registró en enero con $16.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$, al igual que los lagos Viejo y Mayor. El valor máximo se encontró en julio con 24°C (Fig. 8).

La temperatura promedio fue de $21.1 \pm 2.6^\circ\text{C}$ para el lago Mayor seguido del lago Menor con $19.0 \pm 3.9^\circ\text{C}$ y $18.6 \pm 2.6^\circ\text{C}$ para el lago Viejo. A lo largo del año se ve que los lagos mantienen temperaturas similares entre sí.

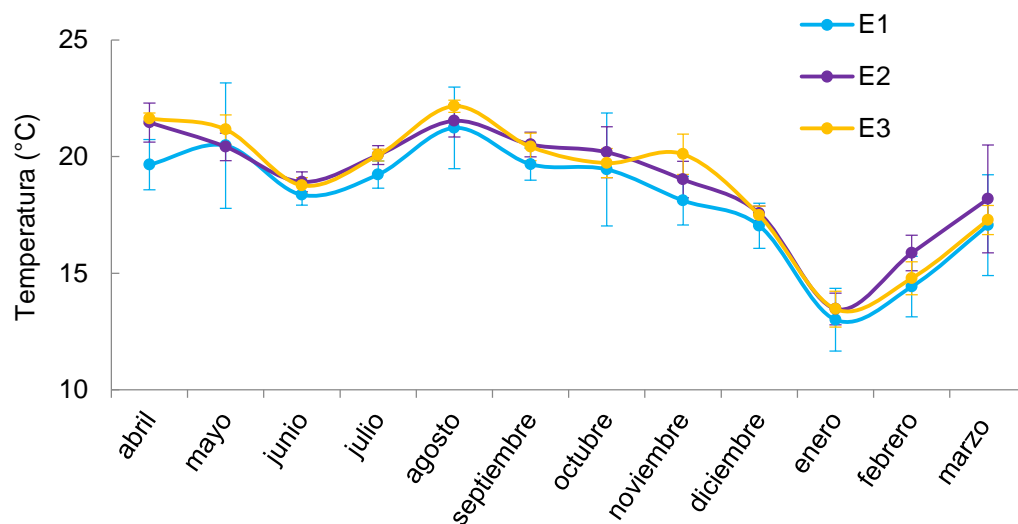


Fig. 6. Temperatura promedio del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

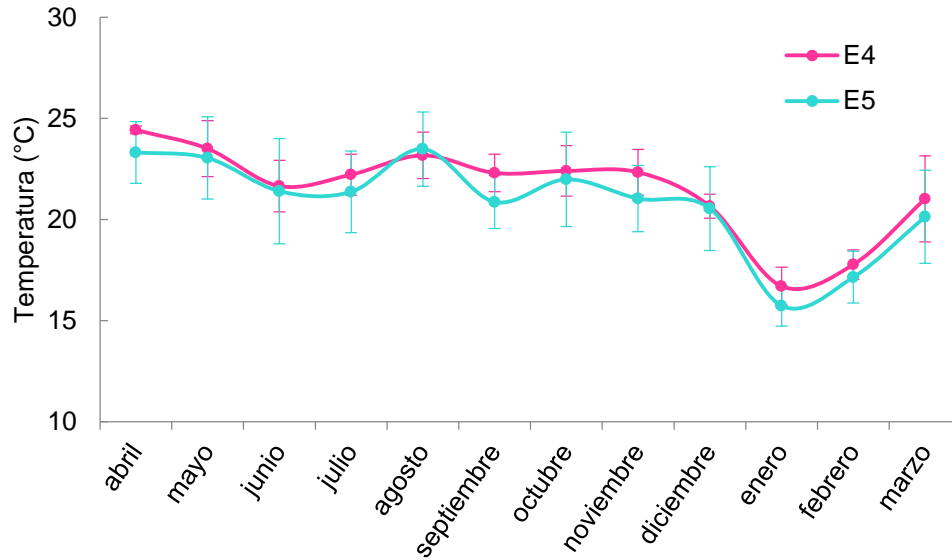


Fig. 7. Temperatura promedio en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

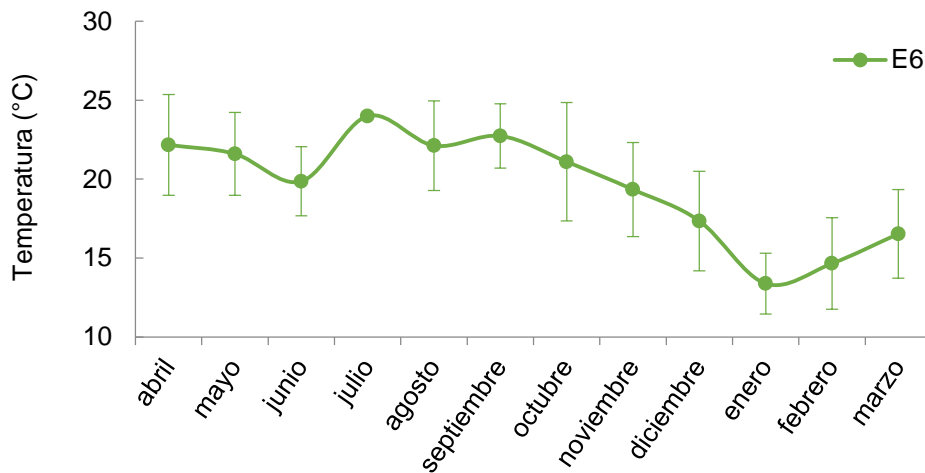


Fig. 8. Temperatura promedio en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

Se observó a lo largo del perfil de profundidad en el lago Viejo que la E2 y E3 son parecidas, mientras que la E1 mantuvo temperaturas más bajas. En cuanto a la temperatura de la E4 y E5 del lago Mayor fue más elevada que las del lago Viejo, mientras que la E6 en el lago Menor fue de temperaturas elevadas en la superficie ($22.6 \pm 3.5 \text{ }^\circ\text{C}$) y bajas en la profundidad ($15.1 \text{ }^\circ\text{C}$) (Fig. 9).

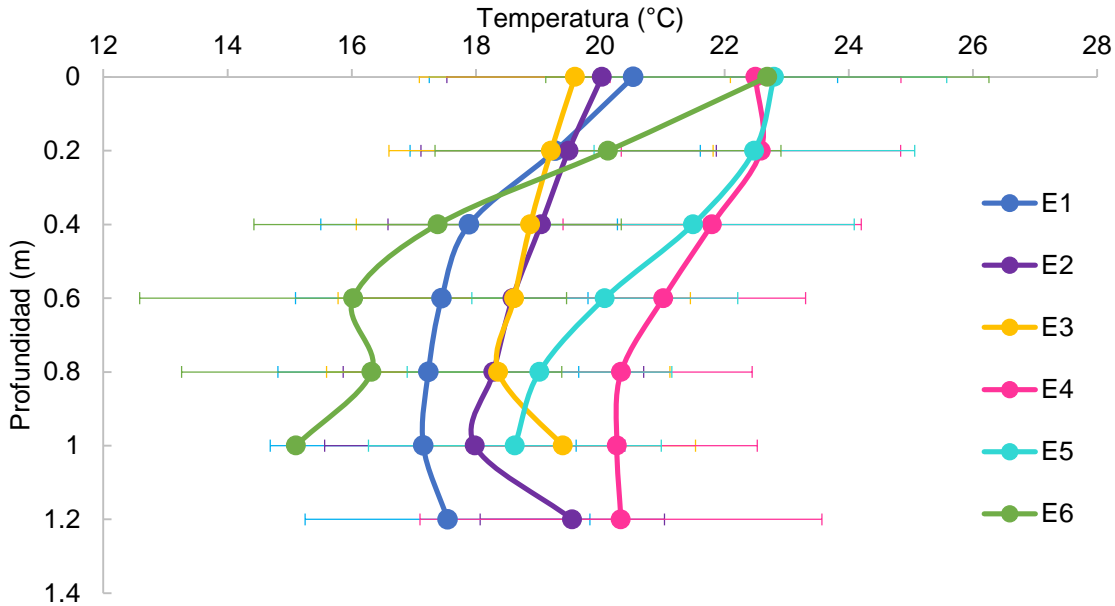


Fig. 9. Perfil de profundidad de la temperatura de los tres lagos de Chapultepec.

7.1.3 Oxígeno disuelto (OD) y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT)

Los valores de concentración de oxígeno disuelto (OD) (Fig. 10) y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT) (Fig. 11) variaron entre 0.5 y 22.9 mg L⁻¹ y 14 y 292.5 %SAT, respectivamente, para el lago Viejo (Tabla 1). Los valores promedio mínimo para la E1 se encontraron en septiembre con 7.1 ± 4.7 mg L⁻¹ y en febrero con 81.3 ± 2.6 %SAT, para la E2 en junio 7.1 ± 3.3 mg L⁻¹ y 102.4 ± 48.0 %SAT. En cuanto a la E3 se registró en junio con 6.4 ± 3.0 mg L⁻¹ y 92.39 ± 44.2 %SAT. Por otro lado, los valores promedio máximo en la E1 se registraron en abril con 14.89 ± 5.4 mg L⁻¹ y 203 ± 66.45 %SAT. En la E2 en marzo con 12.18 ± 0.5 mg L⁻¹ y 165.8 ± 46.0 %SAT en el mes de abril, finalmente en la E3 noviembre con 10.7 ± 1.4 mg L⁻¹ y 148 ± 57.8 %SAT.

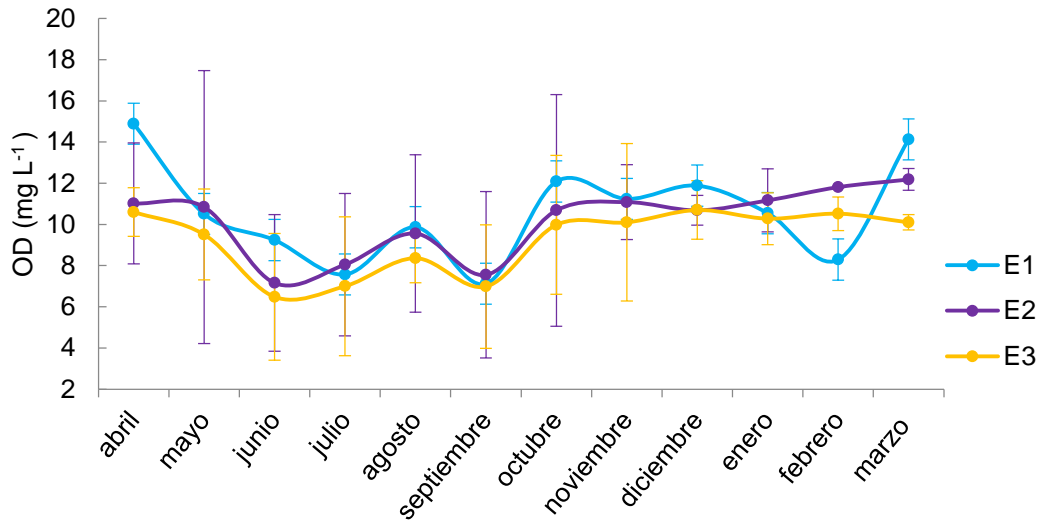


Fig. 10. Concentración de oxígeno disuelto (OD) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

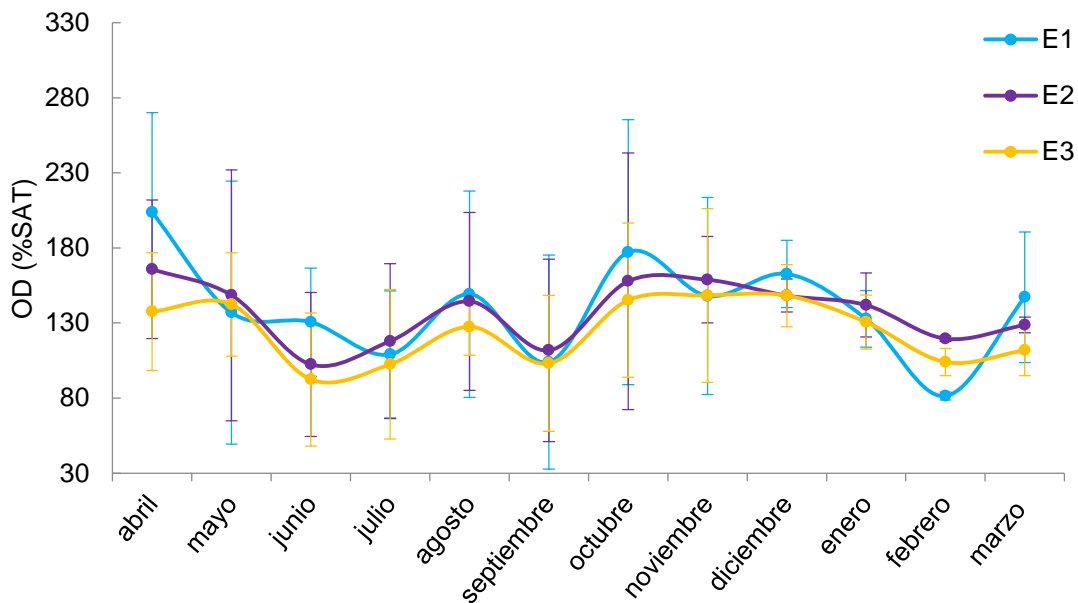


Fig. 11. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

Los valores de OD en el lago Mayor (Fig. 12) fluctuaron de 1 a 25.5 mg L⁻¹ y de %SAT de OD (Fig. 13) entre 14.6 a 3313.2 %SAT (Tabla 1). El valor promedio mínimo para la E4 se registró en 6.9 ± 4.5 mg L⁻¹ en septiembre y 106.6 ± 71.5 %SAT en febrero. En la

E5 se encontró en febrero con $9.7 \pm 0.3 \text{ mg L}^{-1}$ y $100.9 \pm 3.1 \text{ \%SAT}$. En cuanto a los valores promedio máximos en la E4 se encontró en abril con $24.41 \pm 2.1 \text{ mg L}^{-1}$ y $293.2 \pm 25.8 \text{ \%SAT}$. En la E5 se registró en abril de $18.2 \pm 7.3 \text{ mg L}^{-1}$ y en enero de $233.9 \pm 21.6 \text{ \%SAT}$.

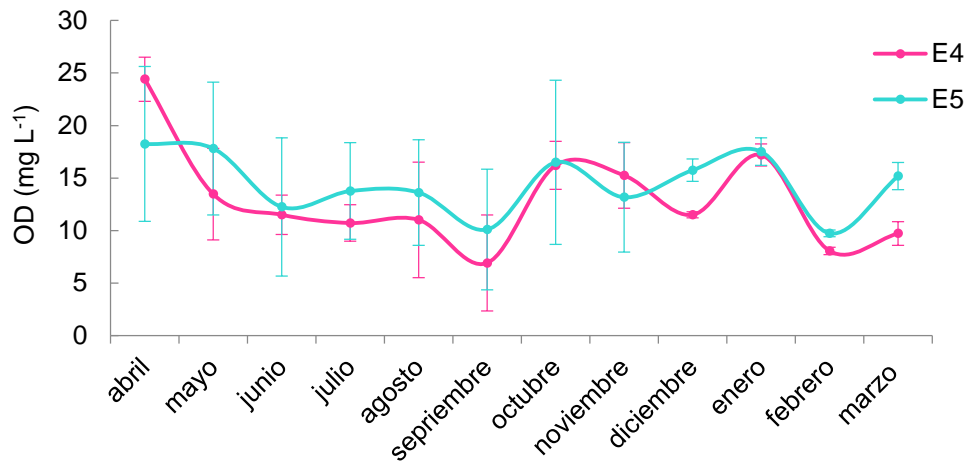


Fig. 12. Concentración promedio de oxígeno disuelto (OD) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

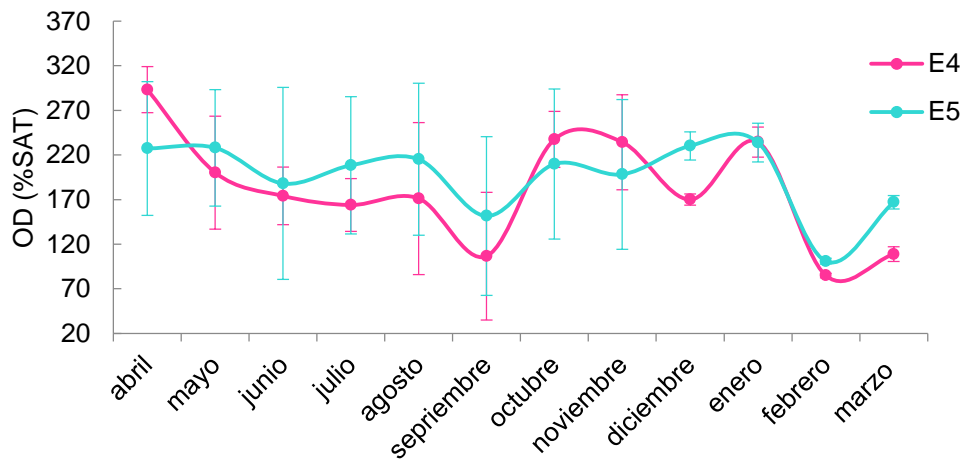


Fig. 13. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Menor los valores fluctuaron entre 1.2 a 21.9 mg L⁻¹ (Fig. 14) y 15.8 a 300 %SAT (Fig. 15). El valor promedio mínimo se registró en enero con 6.9 ± 4.7 mg L⁻¹ y 89.4 ± 64.4 %SAT. En cuanto a los valores promedio máximos se encontraron en octubre con 14.9 ± 5.9 mg L⁻¹ y 221.2 ± 97.2 %SAT en septiembre.

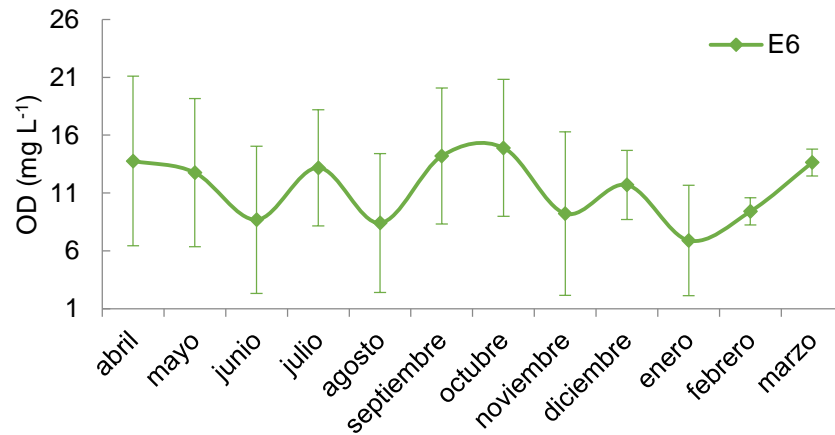


Fig. 14. Concentración de oxígeno disuelto (OD) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

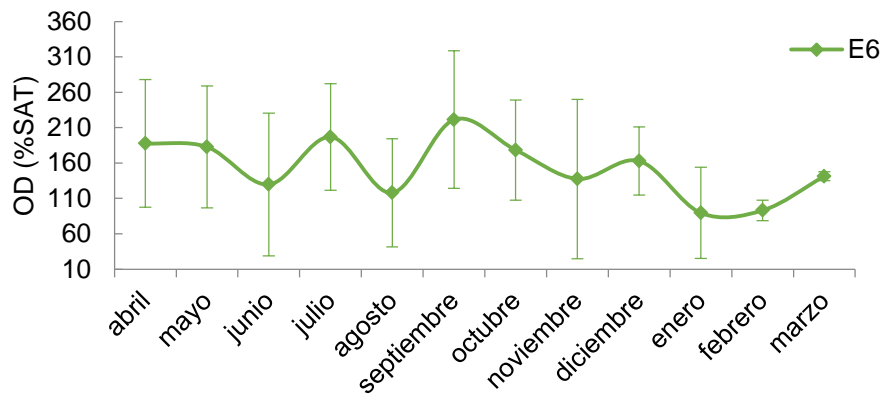


Fig. 15. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT) en el lago Menor a lo largo de un año.

Con respecto a los perfiles verticales de OD (Fig. 16), se comportaron de manera parecida en las seis estaciones de los lagos de Chapultepec, en la superficie tuvieron valores elevados y conforme aumentó la profundidad disminuyó el OD. En cuanto al %SAT (Fig. 17) se observa que se mantiene una sobresaturación de OD a lo largo del

perfil de profundidad, pero se encuentra por encima de la saturación en las capas superficiales y por debajo del 100% en las zonas más profundas en la E1, E2, E3 y 4.

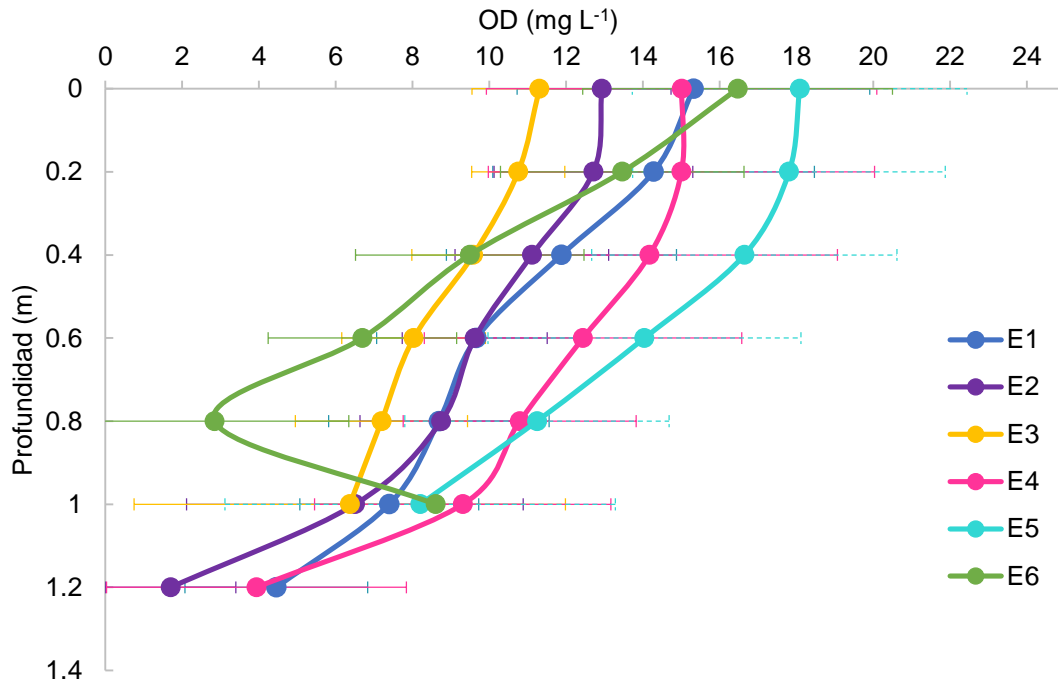


Fig. 16. Perfil vertical de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en los lagos de Chapultepec.

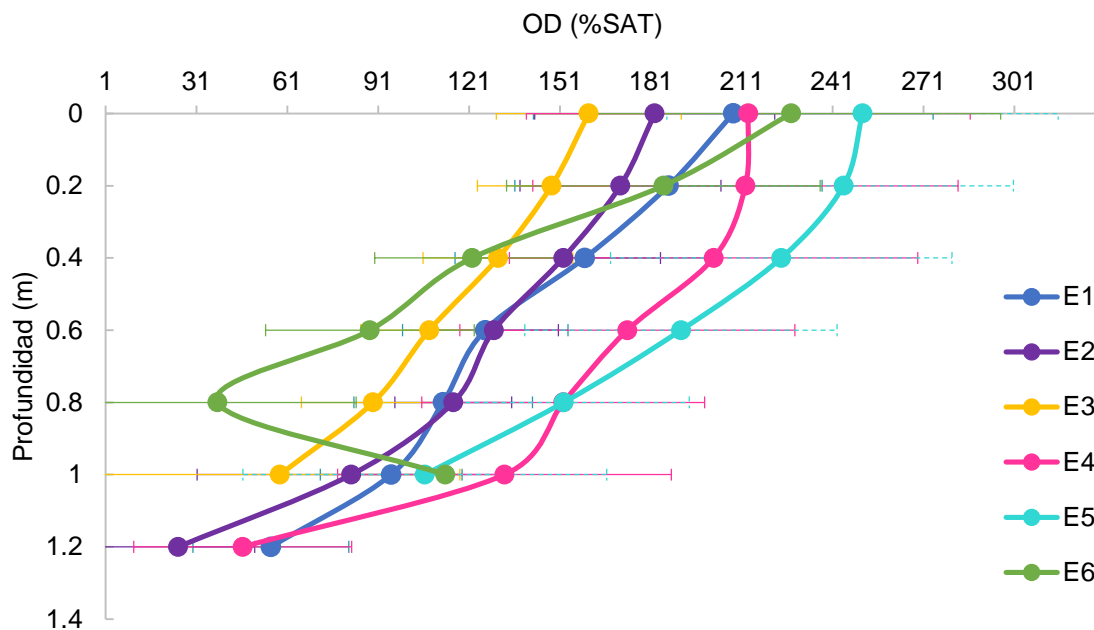


Fig. 17. Perfil vertical del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (%SAT) en los lagos de Chapultepec.

El promedio de OD y %SAT de OD por lago fue de $13.48 \pm 5.2 \text{ mg L}^{-1}$ y 186.5 ± 73.3 %SAT para el lago Mayor seguido de $10.9 \pm 5.3 \text{ mg L}^{-1}$ y 148.4 ± 78.3 %SAT para el lago Menor y $9.9 \pm 3.8 \text{ mg L}^{-1}$ y 133.7 ± 52.4 %SAT para el lago Viejo.

7.1.4 pH

El pH en el lago Viejo (Fig. 18) fluctuó entre 7 y 10 (Tabla 1). Los valores mínimos promedio se encontraron de 8.27 ± 0.6 para E1 en diciembre, 9.11 ± 0.3 para la E2 en junio y 9.1 ± 0.3 para la E3 en septiembre. En cuanto a los valores promedios máximos se observaron de 9.3 ± 0.3 en abril para la E1, 9.7 ± 0.3 en febrero para la E2 y 9.8 ± 0.3 para mayo en la E3.

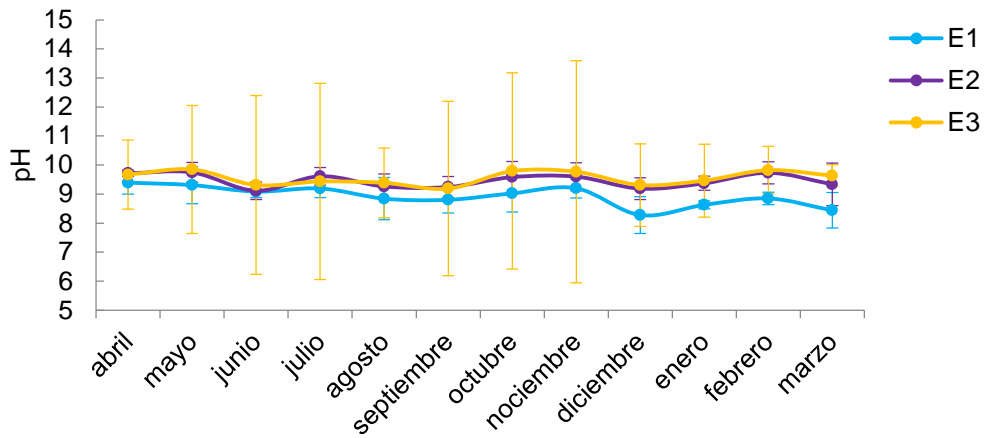


Fig. 18. pH promedio del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

El pH en el lago Mayor (Fig. 19) fluctuó entre 7 y 11 (Tabla 1). Los valores promedio mínimos se registraron de 7.6 ± 0.2 y 8.8 ± 0.7 para la E4 y E5, respectivamente en el mes de septiembre. Por otro lado, los valores promedio máximos se encontraron de 10.9 ± 0.01 en abril y 9.9 ± 0.4 en marzo para la E4 y E5, respetivamente.

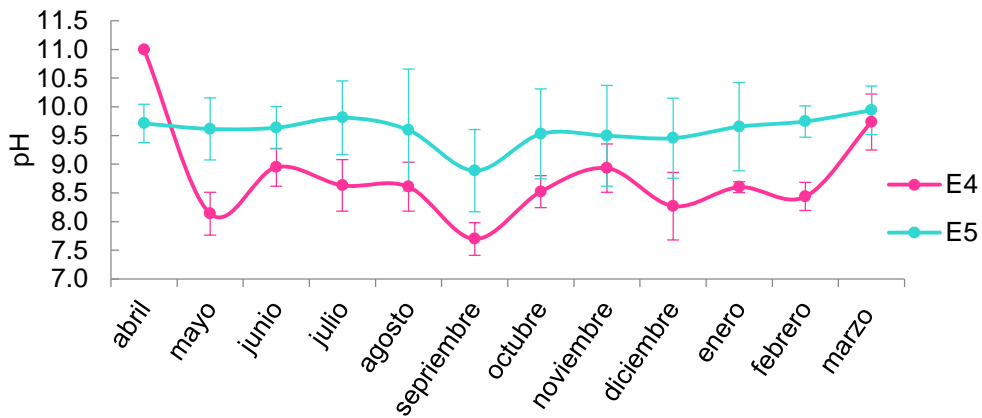


Fig. 19. pH promedio del lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Menor (Fig. 20) el pH se encontró entre 8 y 11. El valor promedio mínimo se encontró en el mes de agosto con 9.2 ± 0.5 y el valor promedio máximo en el mes de septiembre con 10.1 ± 0.4 .

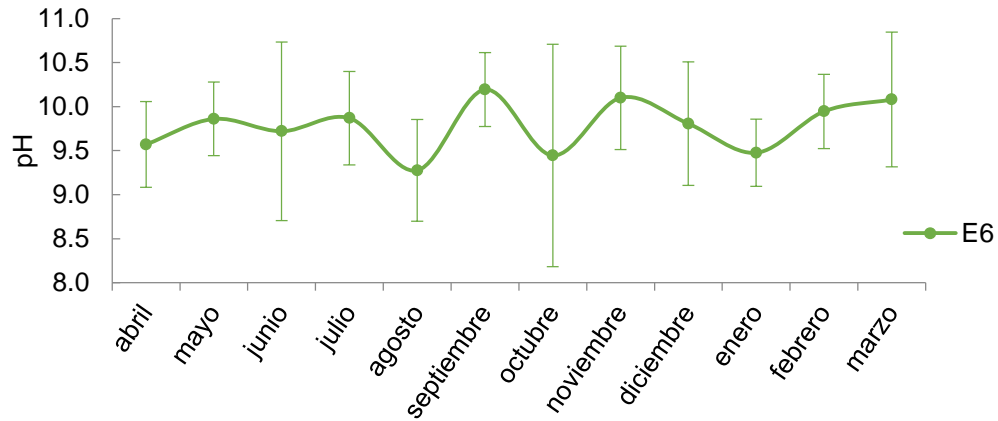


Fig.20. pH promedio del lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

El pH promedio de cada lago fue de 9.7 ± 0.6 para el lago Menor seguido del lago Viejo con 9.2 ± 0.5 y de 9.1 ± 0.8 para el lago Mayor. Se puede observar que los tres lagos tienen comportamientos parecidos. A lo largo de la columna de agua en los tres lagos de Chapultepec se puede observar que el pH va disminuyendo conforme va aumentando la profundidad, pero ninguno es menor a 7 (Fig. 21).

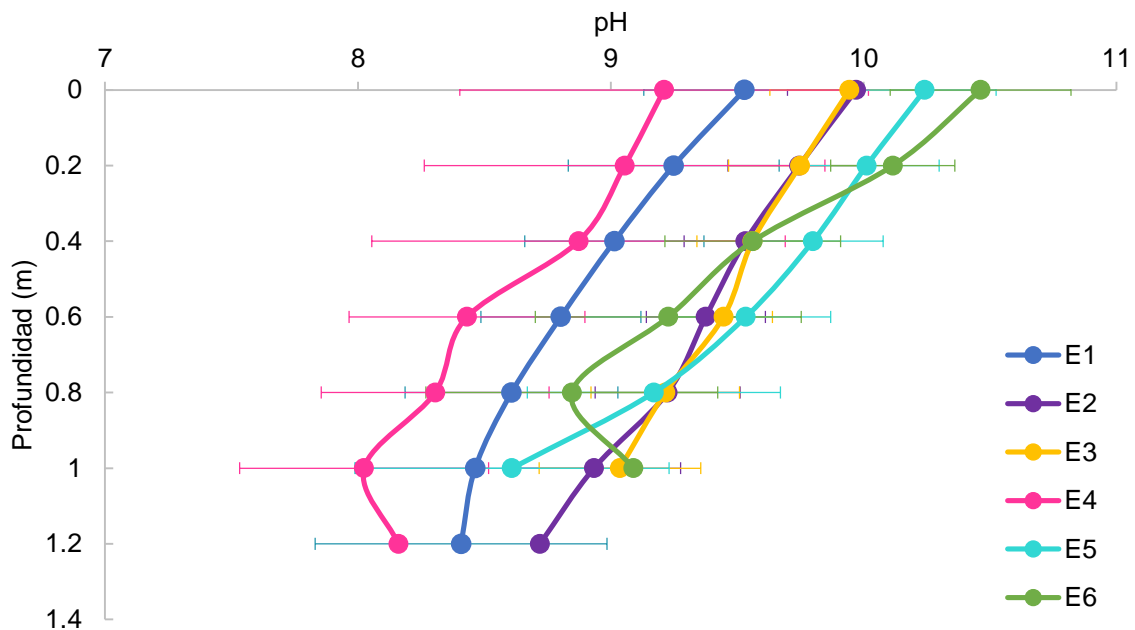


Fig. 21. Perfil vertical del pH de los tres lagos de Chapultepec.

7.1.5 Conductividad eléctrica (K_{25})

La K_{25} en el agua del lago Viejo (Fig. 22) fluctuó entre 330 a 669 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabla 1). Los valores promedio mínimos fueron en octubre de $407 \pm 24.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la E1 y $355 \pm 27.48 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la E3 y en noviembre de $381 \pm 10.13 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la E2. En cuanto a los valores promedio máximos de K_{25} se registraron en marzo de 538 ± 23.6 , 524 ± 14.2 y $514 \pm 3.7 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la E1, E2 y E3, respectivamente.

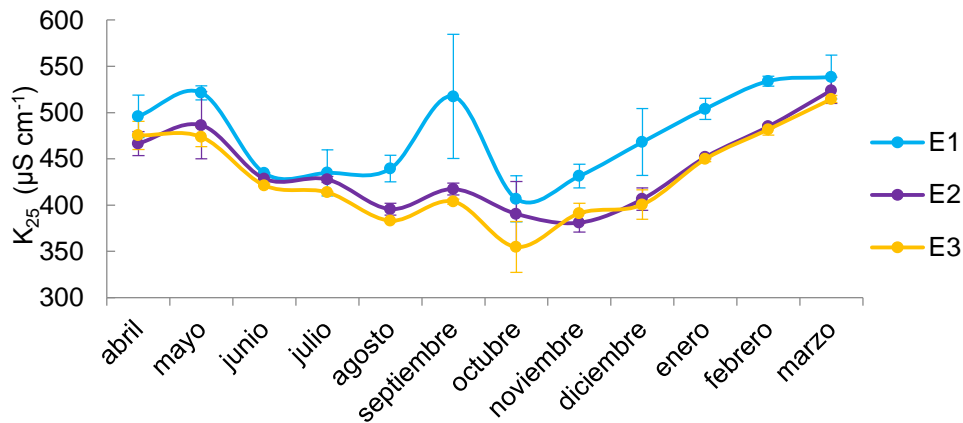


Fig. 22. Conductividad eléctrica (K_{25}) promedio en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Mayor (Fig. 23) la K_{25} fluctuó entre 418 a 610 $\mu\text{S cm}^{-1}$. El promedio mínimo se encontró en octubre con $418 \pm 0.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $427 \pm 33.7 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la E4 y E5. Los valores promedio máximo se encuentran en febrero con $581 \pm 6.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ y marzo $577 \pm 24.7 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la E4 y E5, respectivamente.

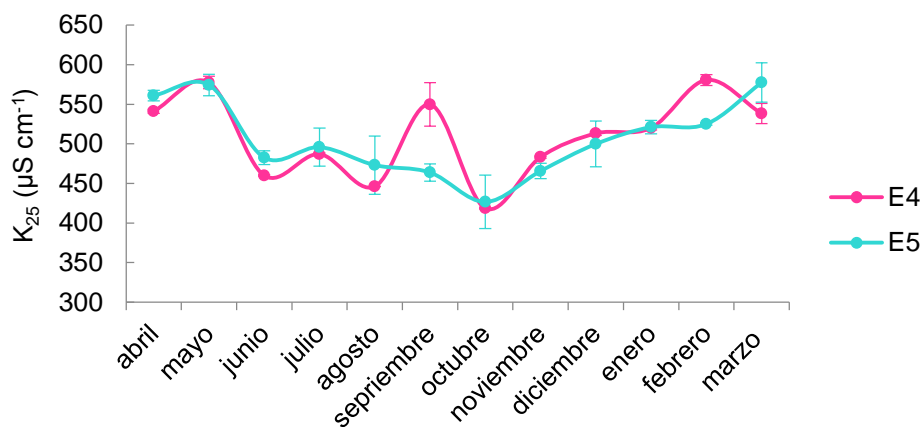


Fig. 23. Conductividad eléctrica (K_{25}) promedio en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En cuanto a la K_{25} en el lago Menor (Fig. 24) fluctuó entre 330 y 669 $\mu\text{S cm}^{-1}$. El valor promedio mínimo se observó en octubre de $404 \pm 1.26 \mu\text{S cm}^{-1}$ y el máximo en marzo de $603.6 \pm 0.7 \mu\text{S cm}^{-1}$.

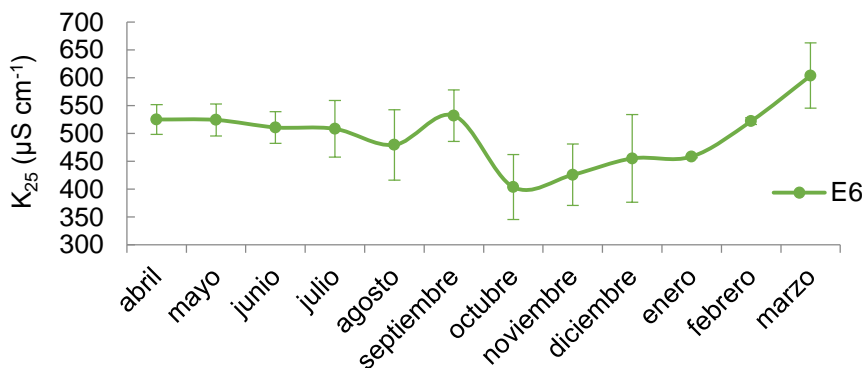


Fig. 24. Conductividad eléctrica (K_{25}) promedio en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

La K_{25} promedio por lago fue de $507 \pm 50.3 \mu\text{S cm}^{-1}$ para el lago Mayor, $450 \pm 52.4 \mu\text{S cm}^{-1}$ para el lago Viejo, y el más bajo fue de $488 \pm 66.4 \mu\text{S cm}^{-1}$ para el lago menor. Se observa que la K_{25} se mantiene parecida conforme aumenta a profundidad (Fig. 25).

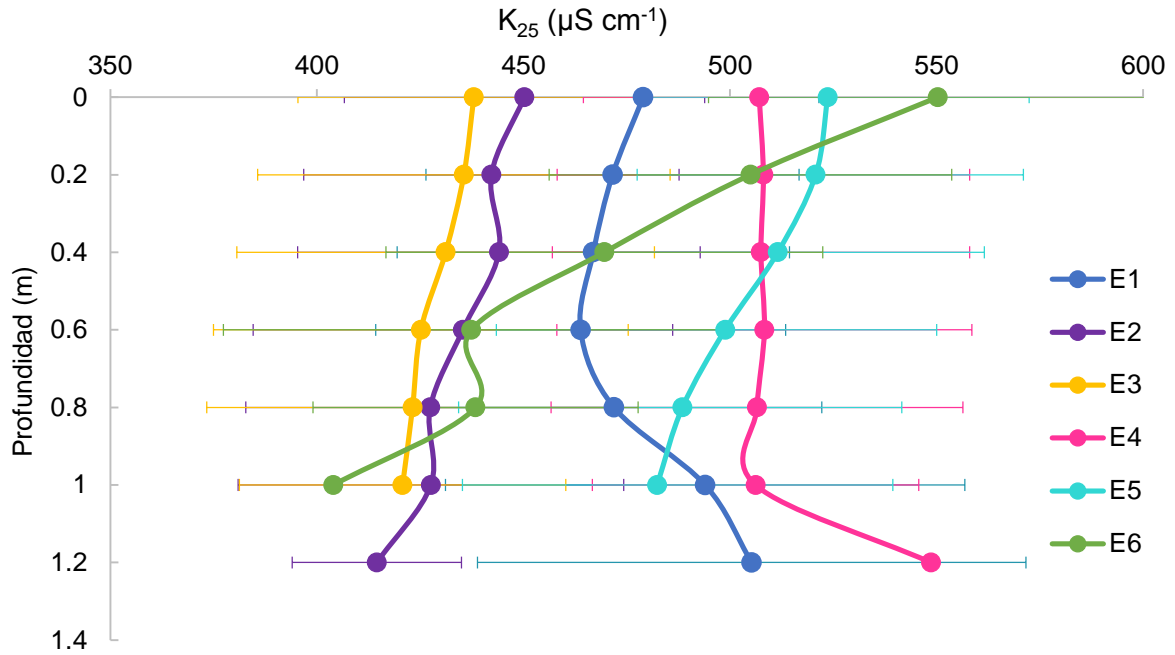


Fig. 25. Perfil vertical de la Conductividad (K_{25}) de los tres lagos de Chapultepec.

7.2 Nutrientes

La Tabla 2 se presentan los valores promedio, máximos y mínimos de las concentraciones de nutrientes que se midieron en los tres lagos de Chapultepec.

Tabla 2. Concentración de nutrientes (mg L^{-1}) en los tres lagos de Chapultepec. P-Total = fósforo total, PSR = fósforo soluble reactivo, N-Total = nitrógeno total, N- NO_3 = nitrógeno como nitratos, N- NO_2 = nitrógeno como nitritos, N- NH_3 = nitrógeno amoniacal, NID = nitrógeno inorgánico disuelto. (Prom.= promedio, d.e. = desviación estándar, Máx. = valor máximo, Mín. = valor mínimo).

Lago Estación		Lago Viejo			Lago Mayor		Lago Menor
		E1	E2	E3	E4	E5	E6
P-Total (mg L^{-1})	Prom. \pm d.e.	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.3	0.6 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.2
	Máx	0.7	0.5	1.4	1.2	0.5	0.8
	Mín	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
PSR (mg L^{-1})	Prom. \pm d.e.	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.4 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.0
	Máx	0.4	0.2	0.2	0.5	0.3	0.1
	Mín	0.1	0.02	0.07	0.1	0.07	0.03
N-Total (mg L^{-1})	Prom. \pm d.e.	10.9 ± 2.7	8.1 ± 2.1	8.2 ± 1.9	15.3 ± 2.5	14.2 ± 4.2	14.0 ± 3.6
	Máx	15.2	12.1	11.6	19.3	24.8	20.0
	Mín	6.4	5.3	4.8	10.5	9.4	8.4
N-NO_3 (mg L^{-1})	Prom. \pm d.e.	3.7 ± 1.2	2.3 ± 0.6	2.1 ± 0.6	8.1 ± 2.4	5.2 ± 0.7	1.8 ± 0.3
	Máx	6.8	3.4	3.2	10.4	6.7	2.4
	Mín	2.4	1.3	1.3	1.3	4.1	1.4
N-NO_2 (mg L^{-1})	Prom. \pm d.e.	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.6 ± 0.6	0.5 ± 0.3	0.1 ± 0.1
	Máx	0.3	0.2	0.3	2.4	1.4	0.3
	Mín	0.1	0.004	0.003	0.004	0.3	0.0
N-NH_3 (mg L^{-1})	Prom. \pm d.e.	1.6 ± 1.5	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	1.3 ± 1.8	0.3 ± 0.6	0.2 ± 0.1
	Máx	4.0	0.3	0.5	5.9	2.2	0.5
	Mín	0.2	0.1	0.02	0.1	0.05	0.002
NID (mg L^{-1})	Prom. \pm d.e.	5.6 ± 1.8	2.5 ± 0.7	2.3 ± 0.6	10.0 ± 3.1	6.1 ± 0.9	2 ± 0.5
	Máx	8.0	3.8	3.4	14.0	8.0	2.9
	Mín	3.0	1.4	1.7	1.4	4.8	1.6

7.2.1 Fósforo total (P-Total)

La concentración de P-Total en el lago Viejo varió de 0.1 a 0.7 mg L^{-1} . Los valores mínimos se encontraron en octubre para la E1 (0.33 mg L^{-1}) y E3 (0.24 mg L^{-1}) y 0.18 mg L^{-1} para la E2, en abril. Los valores máximos se encontraron en septiembre para la estación E1 (0.75 mg L^{-1}) y E2 (0.53 mg L^{-1}) y en abril para la E3 (1.47 mg L^{-1}). A lo largo del año el P-Total se comporta de manera similar en las tres estaciones (Fig. 26).

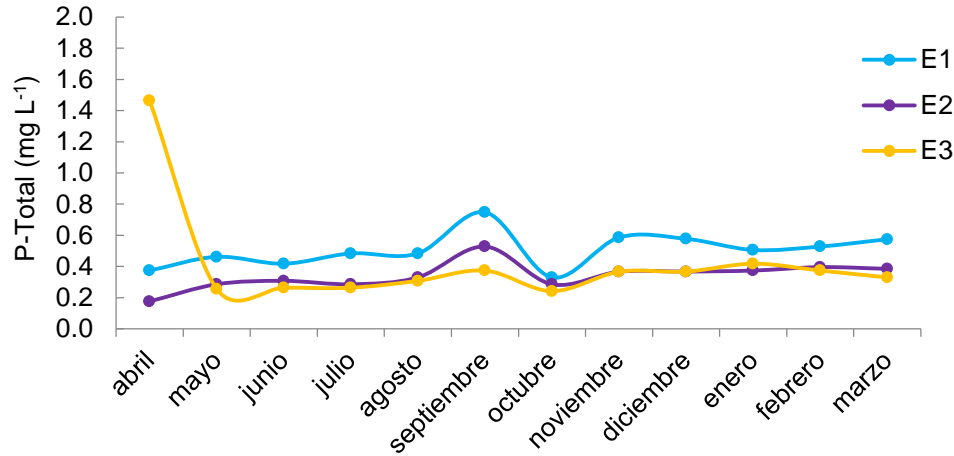


Fig. 26. Concentraciones de fósforo total (P-Total) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Mayor el P-Total varió entre 0.2 y 1.2 mg L⁻¹ (Fig. 27). Los valores más bajos fueron en marzo (2.28 mg L⁻¹) para la E4 y diciembre (0.26 mg L⁻¹) para la E5. En cuanto los valores más altos se registraron en el mes de octubre en la E4 (1.21 mg L⁻¹) y junio en la E5 (0.55 mg L⁻¹). A lo largo del año las dos estaciones se comportaron de manera similar, con excepción de octubre que fue más elevado el valor de P-Total en comparación con la E5.

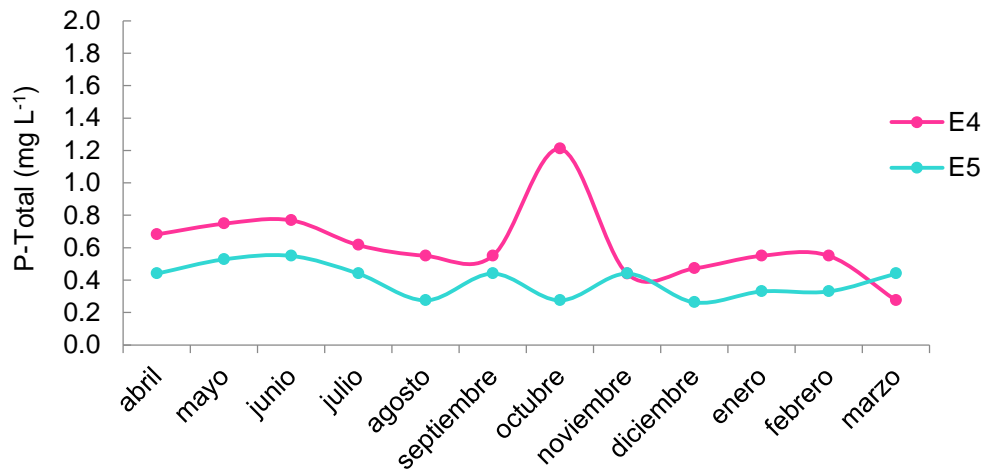


Fig. 27. Concentraciones de fósforo total (P-Total) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Menor el valor mínimo se registró en octubre con 0.22 mg L^{-1} y el valor máximo en marzo con 0.83 mg L^{-1} (Fig. 28).

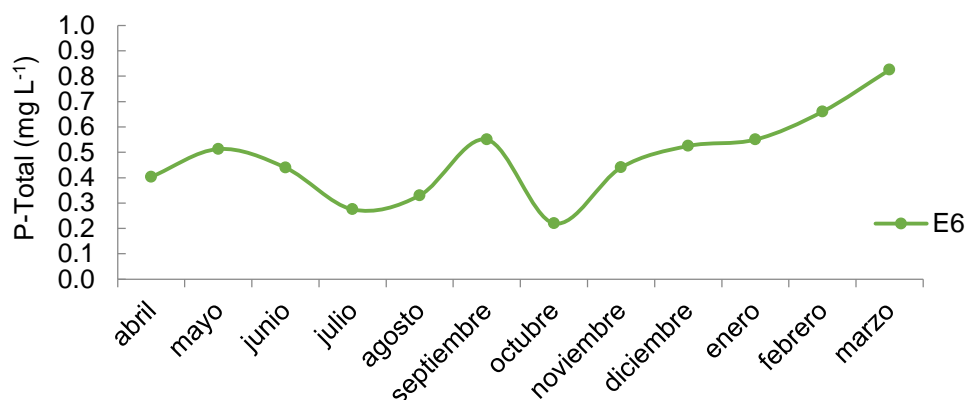


Fig. 28. Concentraciones de fósforo total (P-Total) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

El P-Total promedio por lago fue de $0.51 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Mayor, siendo el más alto seguido del lago Menor con $0.48 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ y $0.42 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Viejo.

7.2.2 Fósforo soluble reactivo (PSR)

El PSR en el lago Viejo (Fig. 29) fluctuó de 0.03 a 0.4 mg L^{-1} . Los valores mínimos se registraron en abril (0.1 mg L^{-1}) para la E1, en mayo para la E2 (0.03 mg L^{-1}) y en junio para la E3 (0.07 mg L^{-1}). Los máximos se registraron en febrero para la E1 (0.4 mg L^{-1}), en enero para la E2 (0.2 mg L^{-1}) y en la E3 durante abril (0.2 mg L^{-1}). A lo largo del año en la E1 se obtuvieron valores más altos en comparación con las otras dos estaciones.

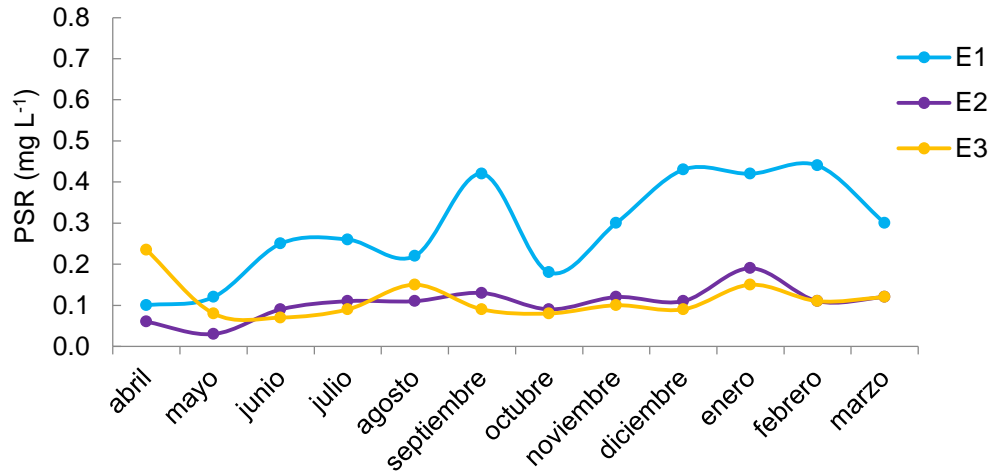


Fig. 29. Concentraciones de fósforo soluble reactivo (PSR) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Mayor (Fig. 30) el PSR fluctuó entre 0.07 y 0.5 mg L⁻¹. Los valores mínimos se encontraron en abril para la E4 con 0.1 mg L⁻¹ y en agosto para la E5, con 0.02 mg L⁻¹. Los valores máximos fueron en los meses de mayo y junio con 0.5 mg L⁻¹ y 0.4 mg L⁻¹ para la E4 y E5, respectivamente.

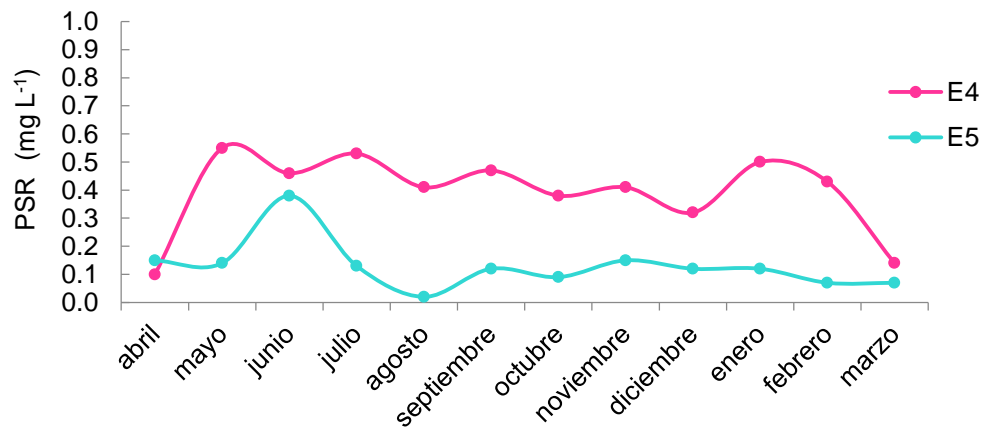


Fig. 30. Concentración de fósforo soluble reactivo (PSR) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

La concentración de PSR a lo largo del año en el lago Menor (Fig. 31) fluctuó entre 0.03 mg L⁻¹ en agosto y 0.16 mg L⁻¹ en junio.

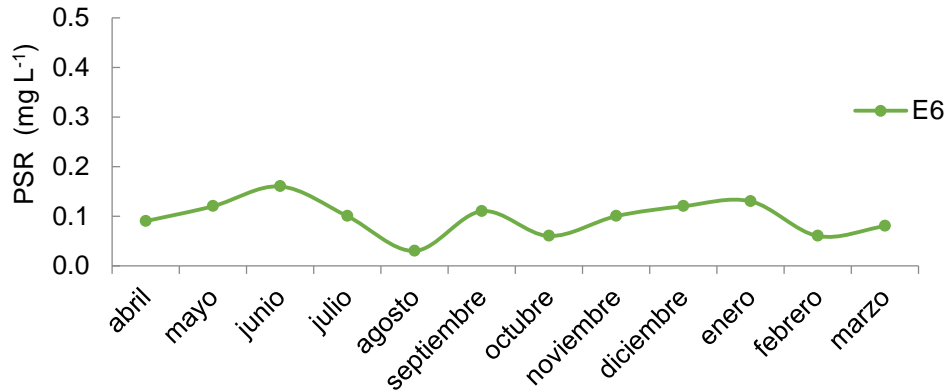


Fig. 31. Concentración de fósforo soluble reactivo (PSR) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

El PSR promedio por lago fueron de 0.26 ± 0.17 mg L⁻¹ para el lago Mayor, registrando la concentración más alta, seguido del lago Viejo con 0.17 ± 0.1 mg L⁻¹ y 0.10 ± 0.1 mg L⁻¹ en el lago Menor.

7.2.3 Nitrógeno total (N-Total)

La concentración de N-Total fluctuó de 4.8 a 15.2 mg L⁻¹ en el lago Viejo (Fig. 32). Los valores mínimos se registraron en abril para la E1 y E2 con 6.4 y 5.3 mg L⁻¹, respectivamente, y en enero para la E3 con 4.8 mg L⁻¹, en cuanto a los valores máximos se registraron en diciembre para las tres estaciones, E1 con 15.2 mg L⁻¹, E2 con 12.1 mg L⁻¹ y E3 con 11.6 mg L⁻¹. Las tres estaciones mostraron comportamientos similares.

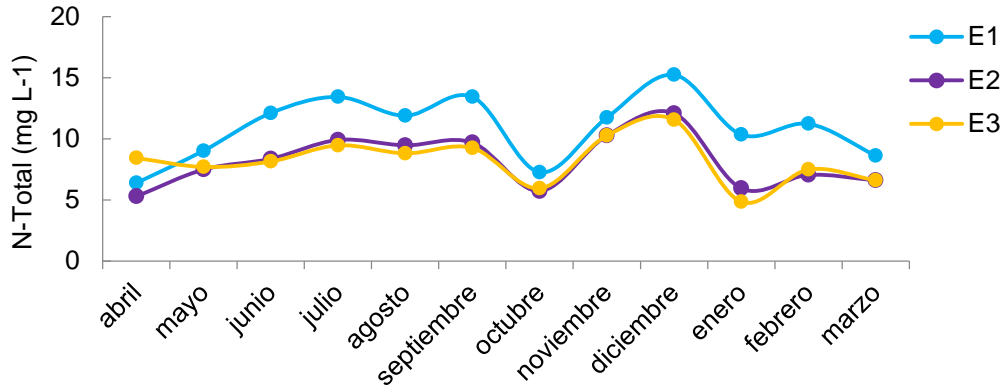


Fig. 32. Concentración de nitrógeno total (N-Total) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

Las concentraciones de N-Total en el lago Mayor (Fig. 33) fluctuaron entre 9.4 y 24.8 mg L⁻¹, ambos valores en la E5 para los meses de marzo y julio, respectivamente. En cuanto a la E4 el valor más bajo se encontró en el mes de julio con 10.5 mg L⁻¹ y el valor más alto en febrero con 19.3 mg L⁻¹.

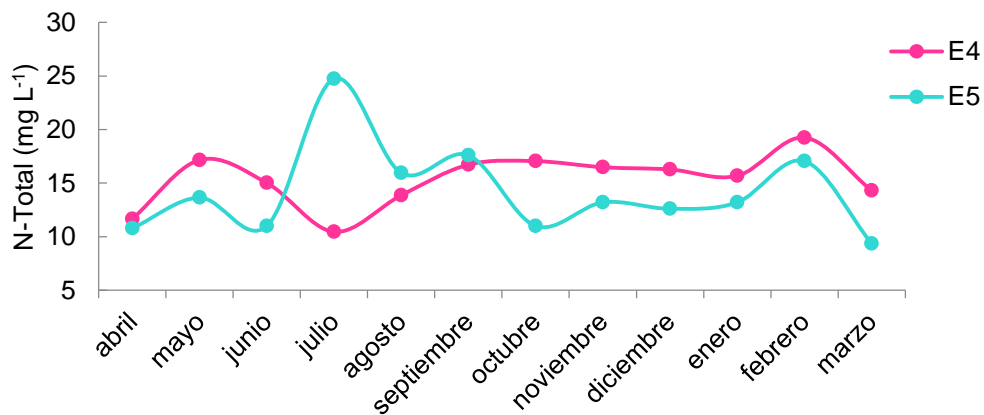


Fig. 33. Concentración de nitrógeno total (N-Total) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

Los valores de N-Total en el lago Menor (Fig. 34) variaron de 8.4 mg L⁻¹ en abril a 20 mg L⁻¹ en diciembre.

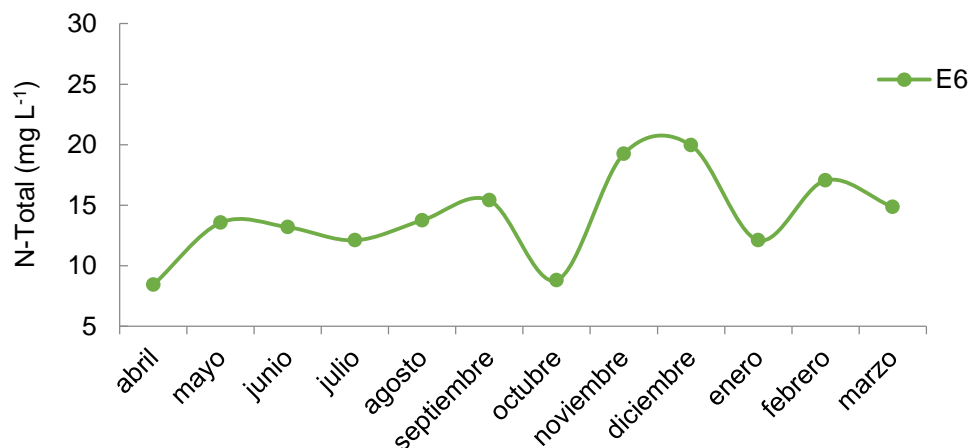


Fig. 34. Concentración de nitrógeno total (N-Total) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

El N- Total promedio para cada lago fue de $14.8 \pm 3.4 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Mayor, seguido del lago Menor con $14 \pm 3.5 \text{ mg L}^{-1}$ y 9.1 ± 2.5 para el lago Viejo, teniendo la menor concentración.

7.2.4 Nitrógeno como nitratos (N-NO₃)

La concentración de N-NO₃ en el lago Viejo (Fig. 35) varió entre 1.3 y 6.8 mg L⁻¹. Los valores mínimos se registraron en marzo para la E1 con 2.4 mg L⁻¹ y en abril para la E2 y E3 con 1.3 mg L⁻¹. Los valores máximos se observaron en junio para E1 (6.7 mg L⁻¹), en enero para la E2 (3.4 mg L⁻¹) y E3 (3.2 mg L⁻¹). La E2 y E3 se comportaron de manera similar a lo largo del año.

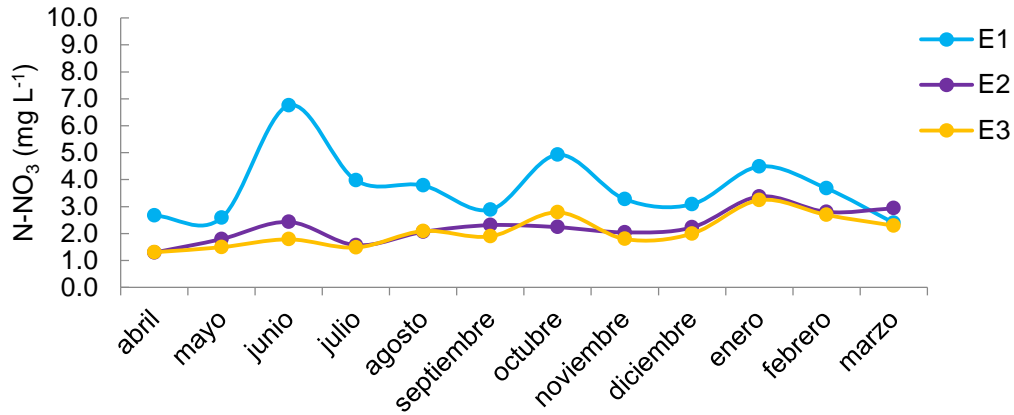


Fig. 35. Concentración de nitrógeno como nitratos (N-NO₃) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

La concentración de los N-NO₃ en el lago Mayor fluctuó entre 1.3 y 10.4 mg L⁻¹ (Fig. 36). Los valores mínimos se observaron en abril para la E4 (1.3 mg L⁻¹) y septiembre para la E5 (4.1 mg L⁻¹). En cuanto a los valores máximos se encontraron en noviembre para la E4 (10.4 mg L⁻¹) y junio para la E5 (6.7 mg L⁻¹).

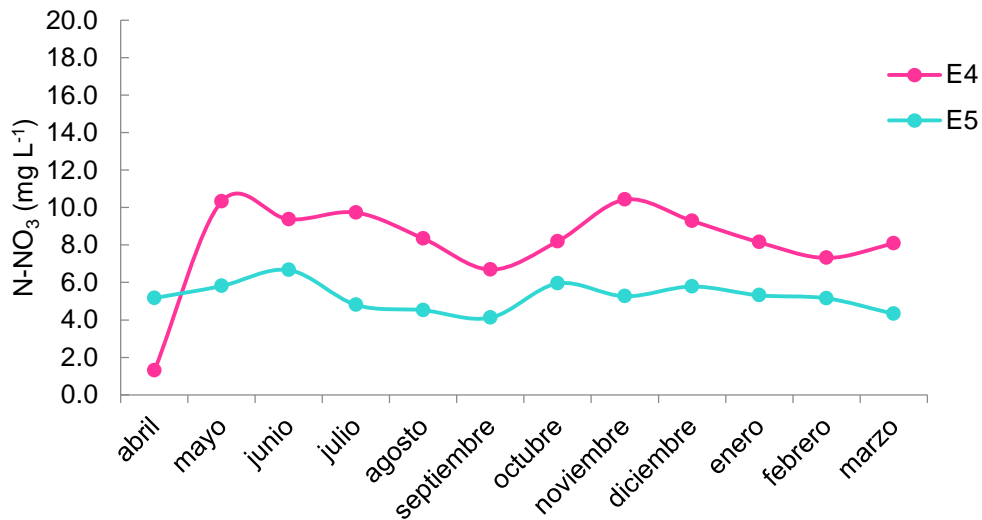


Fig. 36. Concentración de nitrógeno como nitratos (N-NO₃) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Menor (Fig. 37) las concentraciones fluctuaron entre 1.4 mg L⁻¹ en enero y 2.4 mg L⁻¹ febrero.

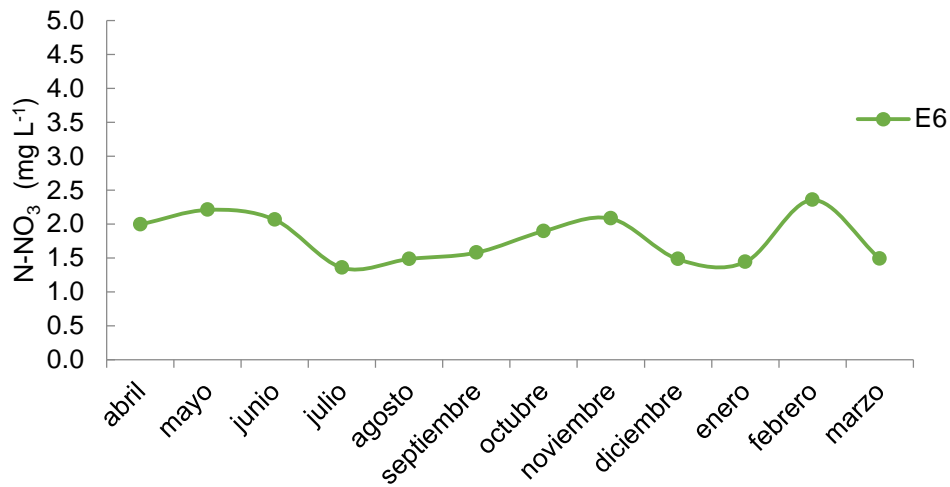


Fig. 37. Concentración de nitrógeno como nitratos (N-NO₃) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

El N-NO₃ promedio por lago fue de 6.7 ± 2.2 mg L⁻¹ para el lago Mayor, teniendo la mayor concentración, seguido del lago Viejo con 2.6 ± 1.1 mg L⁻¹ y del lago Menor con 1.7 ± 0.3 mg L⁻¹.

7.2.5 Nitrógeno como nitritos (N-NO₂)

Los N-NO₂ en el lago Viejo (Fig. 38) variaron entre 0.003 y 0.3 mg L⁻¹. Las concentraciones mínimas se registraron en los meses de abril para la E1 (0.1 mg L⁻¹), para la E2 en abril y mayo (0.004 mg L⁻¹) y en la E3 en noviembre (0.003 mg L⁻¹). En cuanto a las concentraciones más altas se registraron en junio para la E1 y E2 con 0.343 mg L⁻¹ y 0.170 mg L⁻¹, respectivamente, y en abril para la E3 con 0.326 mg L⁻¹.

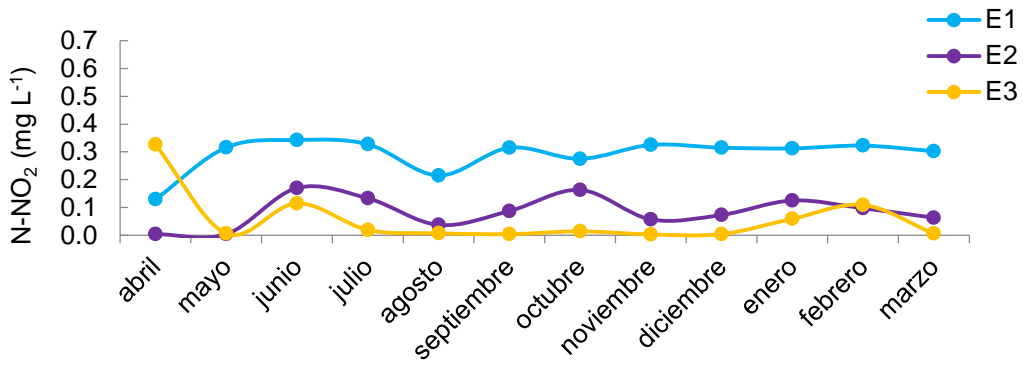


Fig. 38. Concentración de nitrógeno como nitritos (N-NO₂) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

La concentración de N-NO₂ en el lago Mayor (Fig. 39) en la E4 fluctuaron de 0.004 mg L⁻¹ durante abril a 2.4 mg L⁻¹ en marzo. En la E5 los valores fueron de 0.3 mg L⁻¹ en julio y 1.4 mg L⁻¹ en marzo. Las dos estaciones del lago Mayor se comportaron parecido a lo largo del año.

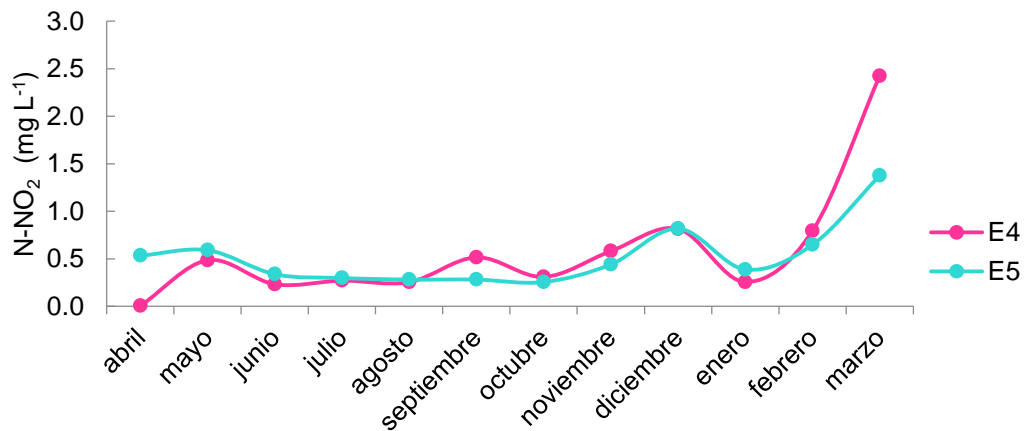


Fig. 39. Concentración de nitrógeno como nitritos (N-NO₂) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Menor las concentraciones fueron de 0.003 mg L⁻¹ en octubre a 0.3 mg L⁻¹ en junio (Fig. 40).

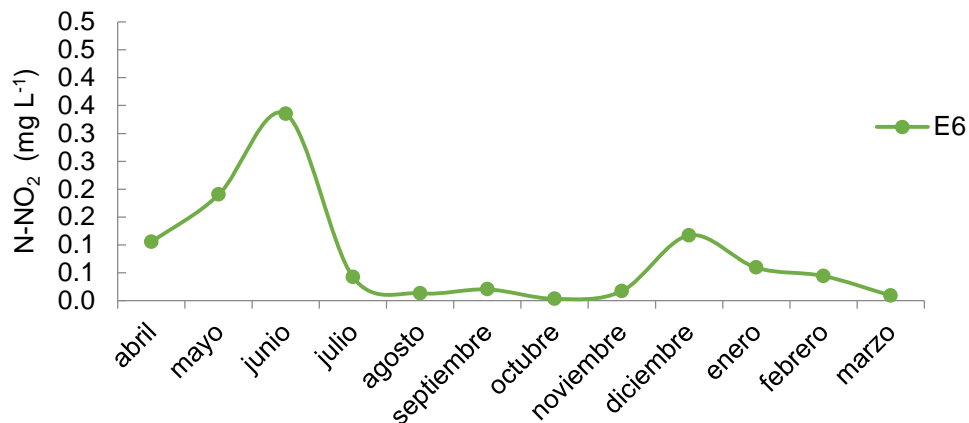


Fig. 40. Concentraciones de nitrógeno como nitratos (N-NO₂) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

Las concentraciones de N-NO₂ promedio por lago fueron de $0.5 \pm 0.4 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Mayor, seguido del lago Viejo con $0.1 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ y $0.07 \pm 0.09 \text{ mg L}^{-1}$ en el lago Menor.

7.2.6 Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)

La concentración de N-NH₃ en el lago Viejo (Fig. 41) fluctuaron entre 0.02 y 4 mg L⁻¹. Los mínimos se registraron durante junio en la E1 (0.2 mg L⁻¹), en diciembre en la E2 (0.08 mg L⁻¹) y en noviembre en la E3 (0.02 mg L⁻¹). Los valores máximos se registraron en febrero para la E1 con 0.4 mg L⁻¹ y en agosto para la E2 y E3 con 0.21 mg L⁻¹ y 0.53 mg L⁻¹, respectivamente. La E2 y E3 se comportan de manera similar en comparación a la E1 donde se registraron valores más elevados.

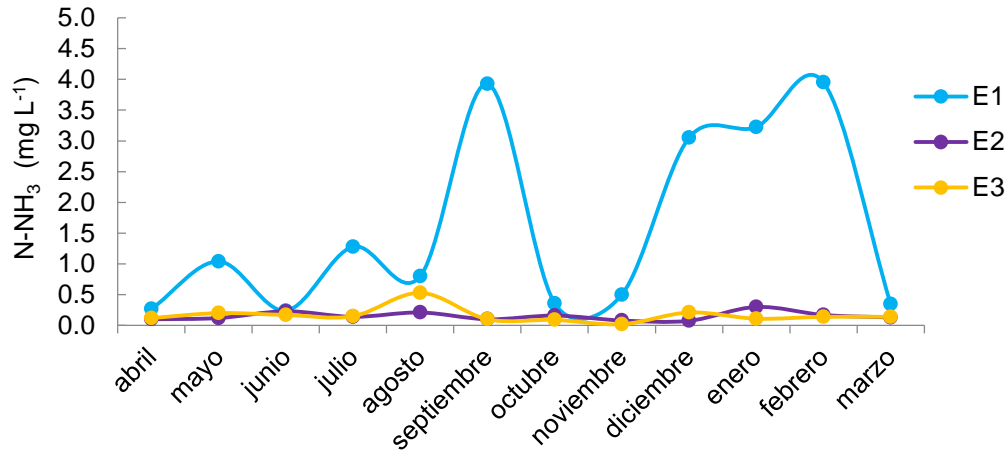


Fig. 41. Concentración de nitrógeno amoniaco (N-NH₃) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

Las concentraciones de N-NH₃ en el lago Mayor (Fig. 42) fluctuaron entre 0.004 y 5.9 mg L⁻¹. Los valores mínimos fueron registrados en noviembre para la E4 (0.05 mg L⁻¹) y E5 (0.04 mg L⁻¹). Los valores máximos se encontraron en febrero para la E4 (5.9 mg L⁻¹) y E5 (2.2 mg L⁻¹).

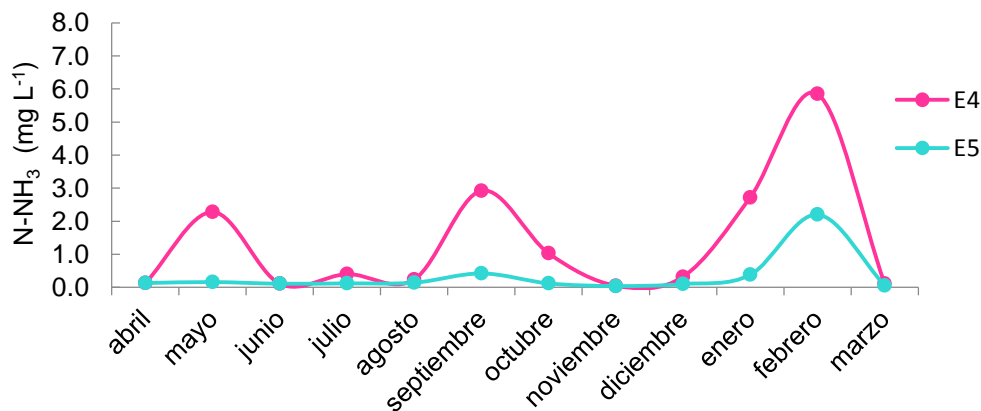


Fig. 42. Concentración de nitrógeno amoniaco (N-NH₃) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

La concentración de N-NH₃ en el lago Menor (Fig. 43) fluctuaron entre 0.02 mg L⁻¹ en noviembre y 0.5 mg L⁻¹ en junio.

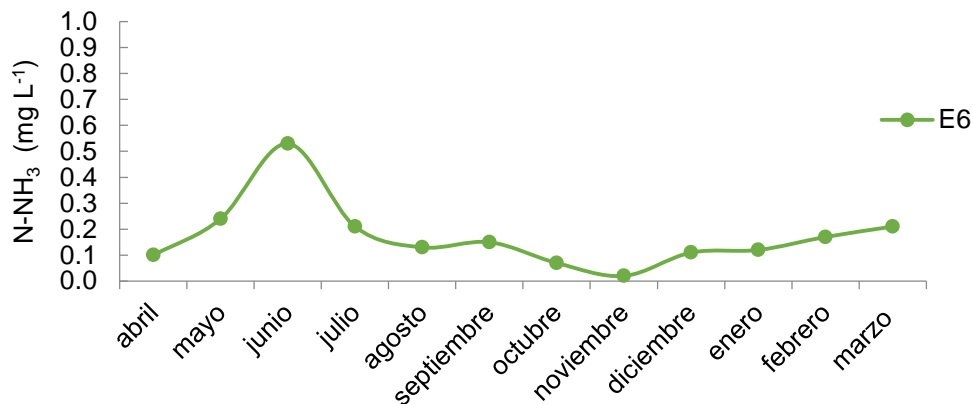


Fig. 43. Concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

La concentración de N-NH₃ promedio por lago fue de 0.8 ± 1.4 mg L⁻¹ para el lago Mayor, siendo el más alto, seguido del lago Viejo con 0.6 ± 1 mg L⁻¹ y del lago Menor 0.1 ± 0.1 mg L⁻¹.

7.2.7 Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)

La concentración de NID en el lago Viejo (Fig. 44) fluctuó entre 1.4 y 8 mg L⁻¹. Los valores mínimos se registraron en marzo para la E1 (3.0 mg L⁻¹), en abril para la E2 (1.4 mg L⁻¹) y en mayo para la E3 (1.7 mg L⁻¹). Los máximos se registraron en enero con 8 mg L⁻¹ para la E1, 3.8 mg L⁻¹ para la E2 y 3.4 mg L⁻¹ para la E3.

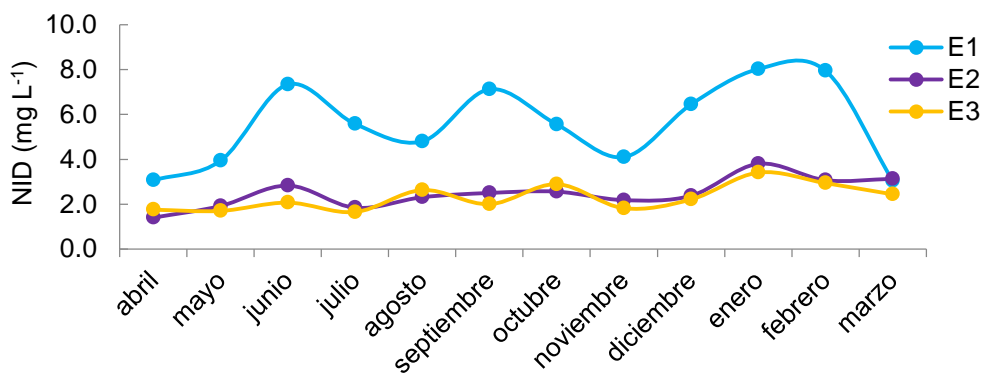


Fig. 44. Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Mayor los valores de NID fueron de 1.4 mg L⁻¹ en abril y 14 mg L⁻¹ en febrero para la E4 (Fig. 45). En cuanto a la E5 el valor mínimo se registró en septiembre (4.8 mg L⁻¹) y el valor máximo en febrero (8 mg L⁻¹).

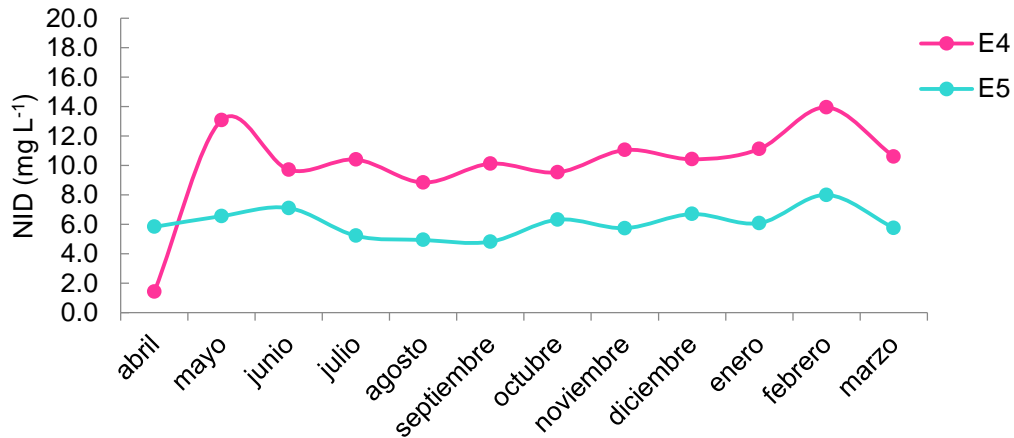


Fig. 45. Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Menor (Fig. 46) las concentraciones fluctuaron entre 1.6 mg L⁻¹ en julio a 3 mg L⁻¹ en junio.

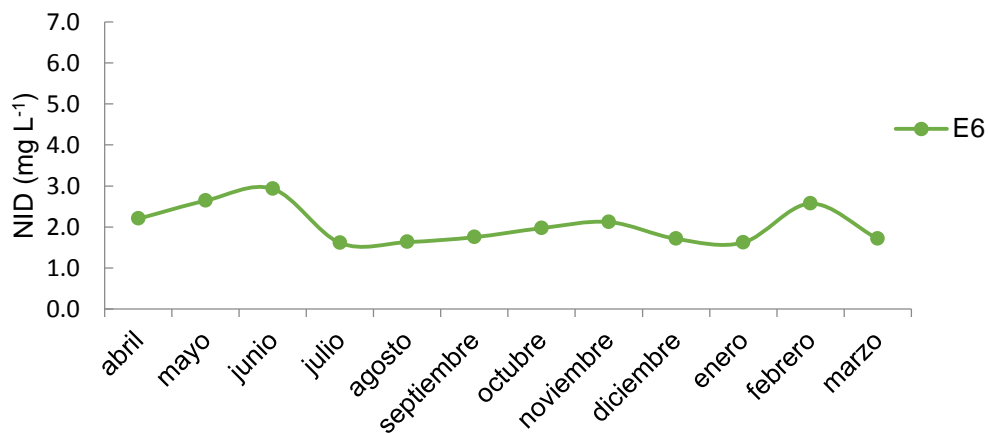


Fig. 46. Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

El NID promedio por lago fue de $8.1 \pm 2.9 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Mayor, registrando la mayor concentración, seguido de $3.4 \pm 1.8 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Viejo y $2 \pm 0.4 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Menor.

7.3 DBO₅, DQO, SST y Coliformes

Los valores promedio y los valores máximos y mínimos de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF) de los tres lagos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), concentración de coliformes totales (C. totales) y coliformes fecales (C. fecales) en los tres lagos de Chapultepec. (Prom.= promedio, d.e. = desviación estándar, Máx. = Valor máximo, Mín. = Valor mínimo).

Estación/ Parámetro	Lago Viejo			Lago Mayor		Lago Menor	
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	Prom. ± d.e.	18.8 ± 7.2	18.9 ± 9.1	16.8 ± 5.5	19.2 ± 9	15.8 ± 4.2	25.2 ± 11.2
	Máx	34.2	44.6	27.5	34.9	22.5	45.8
	Mín	11.9	11.1	11.8	9.1	9.8	8.8
DQO (mg L ⁻¹)	Prom. ± d.e.	81.8 ± 24.3	111.5 ± 31	122 ± 26.5	76.7 ± 33.6	85.6 ± 31.4	299.5 ± 173.3
	Máx	118	165	156	160	144	697
	Mín	40	50	52	24	27	153
SST (mg L ⁻¹)	Prom. ± d.e.	45 ± 17.9	67 ± 19.9	68 ± 13.7	37 ± 11.2	52 ± 20.9	151 ± 60.5
	Máx	72	98	92	58	88	320
	Mín	17	38	45	20	22	95
C. totales (NMP/100 mL)	Prom. ± d.e.	1090 ± 1014.7	75 ± 77.2	159 ± 247.6	3478 ± 4268	91 ± 111.5	299 ± 479.2
	Máx	3000	240	900	16000	300	> 1600
	Mín	50	2	6	240	11	6
C. fecales (NMP/100 mL)	Prom. ± d.e.	429 ± 660.1	27 ± 67.5	74 ± 141.4	734 ± 878.8	48 ± 88.3	192 ± 451.3
	Máx	2400	240	500	3000	300	>1600
	Mín	17	< 2	< 2	23	< 2	< 2

7.3.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La DBO₅ promedio en las estaciones del lago Viejo (Fig. 47) varían de $16.9 \pm 5.5 \text{ mg L}^{-1}$ en la E3 a $18.9 \pm 9.1 \text{ mg L}^{-1}$ en la E2 (Tabla 3). Los niveles a lo largo del año son fluctuantes, donde los valores mínimos se encontraron en abril de 11.9 y 11.1 mg L^{-1} para la E1 y E2 y en agosto para la E3 de 11.8 mg L^{-1} . Los valores máximos se encontraron en el mes de marzo con 34.2 y 44.6 mg L^{-1} para la E1 y E2, respectivamente, y de 27.6 mg L^{-1} para la E3 en febrero.

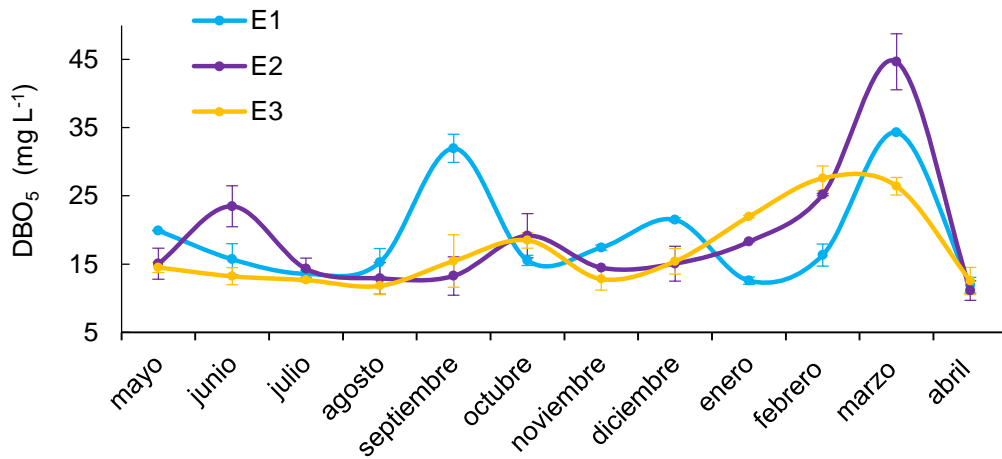


Fig. 47. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

La DBO₅ para el lago Mayor (Fig. 48) fluctuó entre $15.8 \pm 4.2 \text{ mg L}^{-1}$ y $19.3 \pm 9.0 \text{ mg L}^{-1}$ en la E5 y E4, respectivamente. Los niveles mínimos se encontraron en el mes de julio con 9.1 y 9.8 mg L^{-1} para la E4 y E5, respectivamente. Los valores máximos se obtuvieron en febrero con 34.9 y 22.6 mg L^{-1} para la E4 y E5, respectivamente.

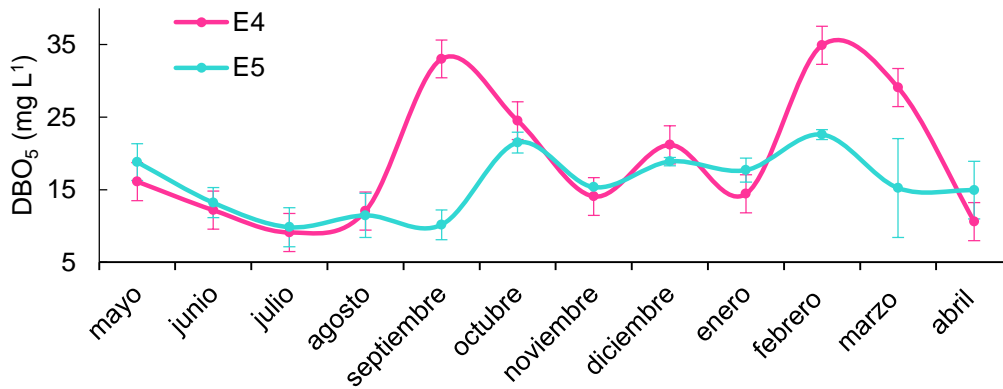


Fig. 48. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) del lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En cuanto al lago Menor (Fig. 49) la DBO₅ promedio fue de $25.22 \pm 11.3 \text{ mg L}^{-1}$. El valor mínimo se registró de 8.8 mg L^{-1} en el mes de noviembre, mientras que el valor máximo en marzo de 45.8 mg L^{-1} .

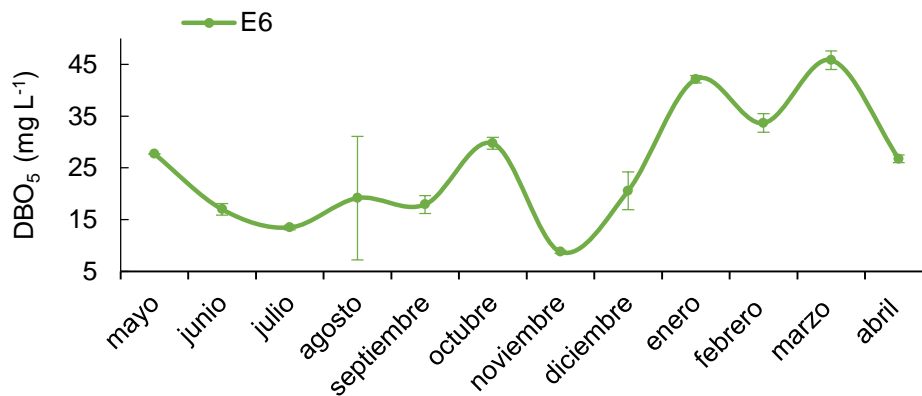


Fig. 49. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) del lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

Los valores promedio por lago para la DBO₅ fueron de $25.2 \pm 11.2 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Menor seguido del lago Viejo con $18.2 \pm 7.3 \text{ mg L}^{-1}$ y $17.5 \pm 7.1 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Mayor.

7.3.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO en las estaciones del lago Viejo (Fig. 50) varían de $81.8 \pm 24.4 \text{ mg L}^{-1}$ en la E1 a $122 \pm 26.6 \text{ mg L}^{-1}$ en la E2 (Tabla 3). Los niveles a lo largo del año son fluctuantes, donde los valores mínimos se encontraron en octubre con 40 y 50 mg L^{-1} para la E1 y E2 y en abril para la E3 (52 mg L^{-1}). Los valores máximos de encontraron en el mes de septiembre con 118, 165 y 156 mg L^{-1} para la E1, E2 y E3, respectivamente.

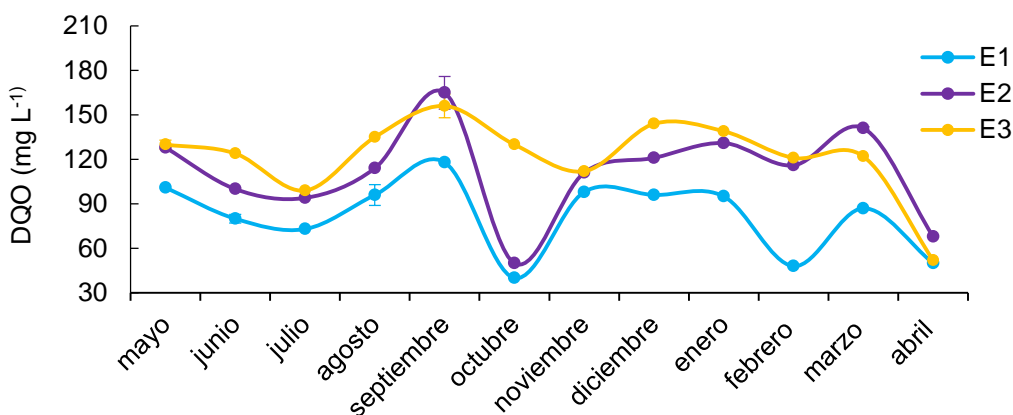


Fig. 50. Demanda química de oxígeno (DQO) del lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

La DQO para el lago Mayor (Fig. 51) fluctuó de $76.7 \pm 33.6 \text{ mg L}^{-1}$ a $85.6 \pm 31.4 \text{ mg L}^{-1}$ en la E4 y E5, respectivamente. Los niveles mínimos se encontraron en el mes de julio con 24 mg L^{-1} para la E4 y en febrero para E5 con 27 mg L^{-1} . Los valores máximos se obtuvieron en mayo con 160 y 144 mg L^{-1} para la E4 y E5, respectivamente.

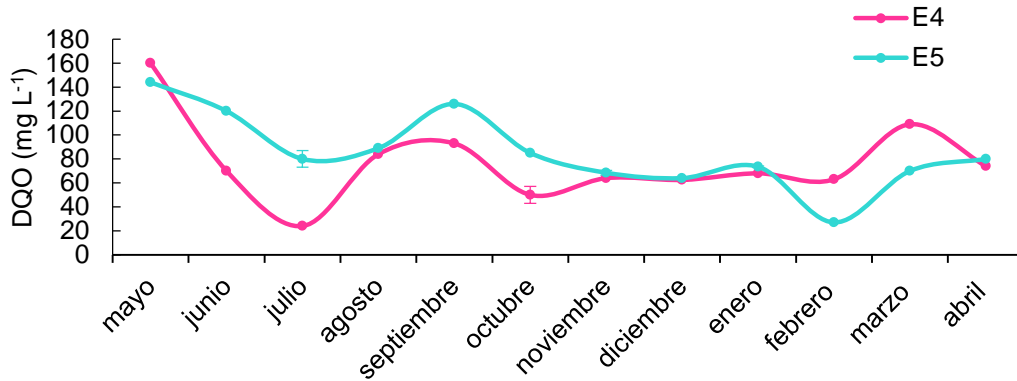


Fig. 51. Demanda química de oxígeno (DQO) del lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En cuanto al lago Menor (Fig. 52) la DQO promedio fue de $299.5 \pm 173.3 \text{ mg L}^{-1}$. El valor mínimo se registró de 153 mg L^{-1} en el mes de julio, mientras que el en valor máximo en marzo de 697 mg L^{-1} .

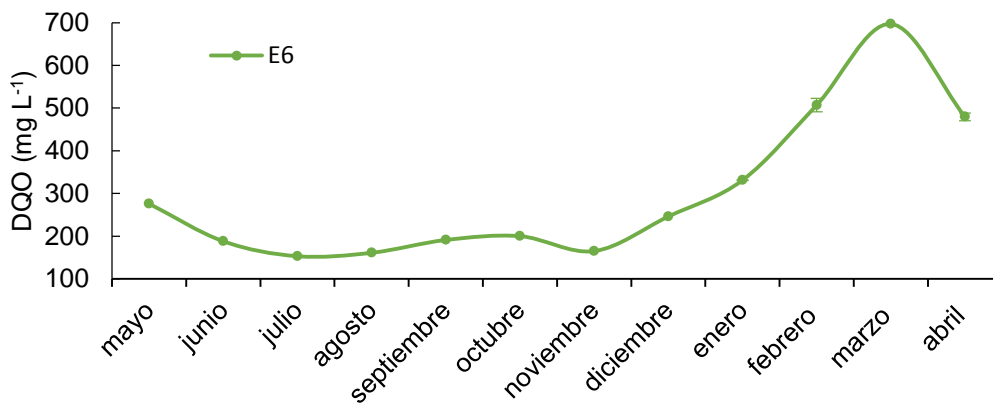


Fig. 52. Demanda química de oxígeno (DQO) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

Los valores promedio de DQO para cada lago fueron de $299.5 \pm 173.3 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Menor siendo el más elevado, seguido del lago Viejo con $105.1 \pm 31.7 \text{ mg L}^{-1}$ y el lago Mayor con $81.2 \pm 32.1 \text{ mg L}^{-1}$.

7.3.3 Sólidos suspendidos totales (SST)

Los SST en las estaciones del lago Viejo (Fig. 53) van de $45 \pm 17.9 \text{ mg L}^{-1}$ en la E1 a $68 \pm 13.7 \text{ mg L}^{-1}$ en la E3 (Tabla 3). Los niveles mínimos se encontraron en febrero en la E1 con 17 mg L^{-1} y en abril para la E2 y E3 con 38 y 45 mg L^{-1} , respectivamente. Los valores máximos registrados fueron de 72 , 98 y 92 mg L^{-1} para la E1, E2 y E3 en los meses de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente.

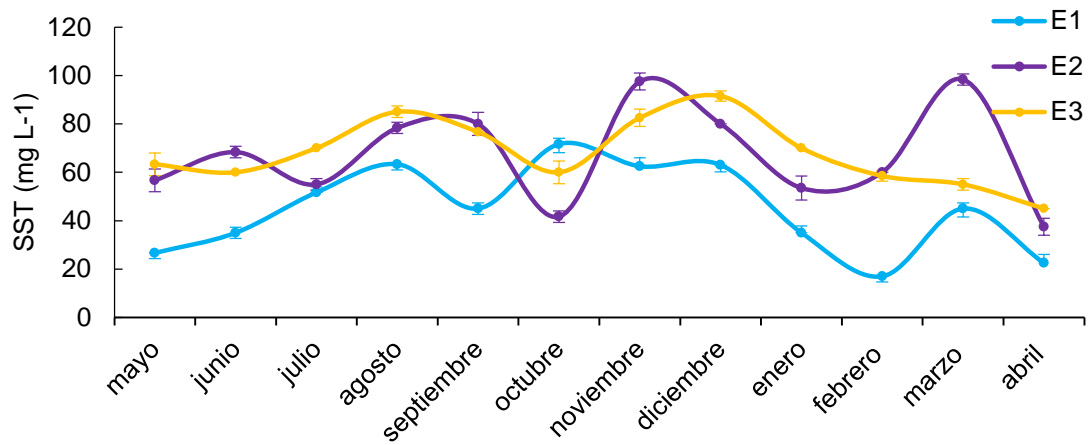


Fig. 53. Sólidos suspendidos totales (SST) en el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

Los SST en el lago Mayor (Fig. 54) fluctuaron entre $37 \pm 11.2 \text{ mg L}^{-1}$ en la E4 y $54 \pm 20.9 \text{ mg L}^{-1}$ en la E5. Los niveles mínimos fueron de 20 mg L^{-1} en el mes de julio en la E4 y 22 mg L^{-1} en febrero en la E5. Mientras que los valores máximos se registraron en octubre para la E4 (58 mg L^{-1}) y en septiembre para la E5 (88 mg L^{-1}).

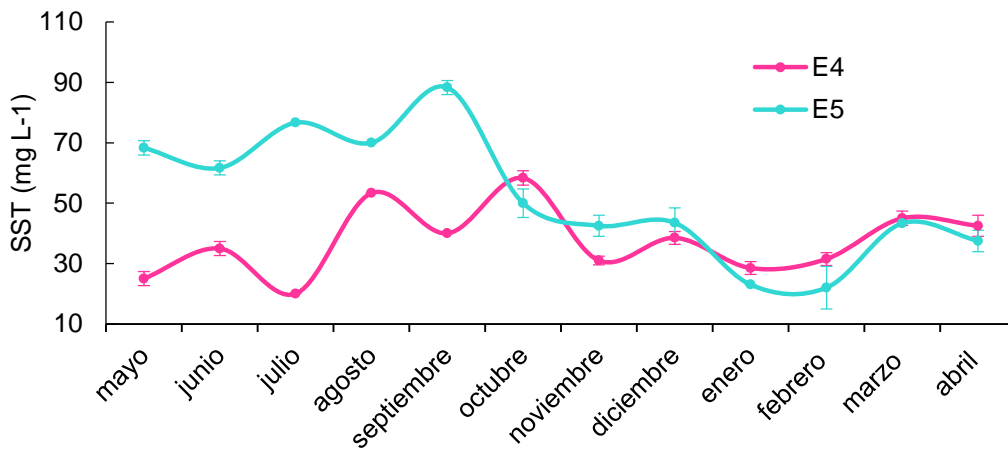


Fig. 54. Sólidos suspendidos totales (SST) en el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

En cuanto al lago Menor el promedio fue de $151 \pm 60.5 \text{ mg L}^{-1}$. El valor mínimo de SST fue de 95 mg L^{-1} en el mes de septiembre y el valor máximo en marzo de 320 mg L^{-1} (Fig. 55).

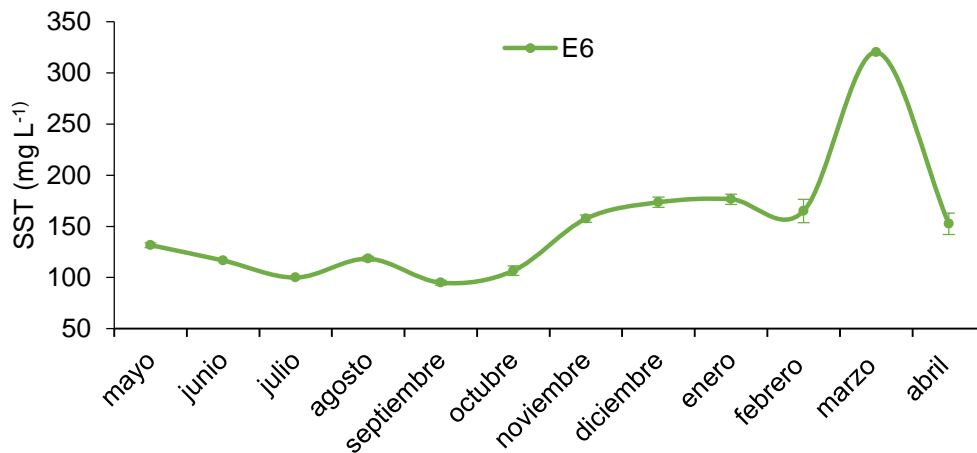


Fig. 55. Sólidos suspendidos totales (SST) en el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

Por otro lado, los SST promedio para cada lago fueron de $151 \pm 60.5 \text{ mg L}^{-1}$ para el lago Menor, seguido de $60 \pm 20.1 \text{ mg L}^{-1}$ en el lago Viejo y $45 \pm 18.0 \text{ mg L}^{-1}$ en el lago Mayor.

7.3.4 Coliformes

El promedio de coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF) para el lago Viejo fueron de 442 ± 750 y 177 ± 422 NMP/100 mL, respectivamente, de 1785 ± 3421 y 392 ± 704 NMP/100 mL para el lago Mayor y de 92 ± 479 y 193 ± 451 NMP/100 mL para el lago Menor.

En el lago Viejo los valores promedio de coliformes totales fluctuaron entre 75 ± 77.2 y $1,090 \pm 1,014.8$ NMP/100 mL y en cuanto a los coliformes fecales fluctuaron entre 27.5 ± 67.5 a 429.7 ± 660.2 NMP/100 mL en la E2 y E1, respectivamente (Tabla 3).

Los valores mínimos de CT (Fig. 56) que se registraron fueron de 50, 2, 6 NMP/100 mL (E1, E2 y E3, respectivamente) en el mes de octubre. Los valores máximos para estas estaciones fueron de 3,000 (E1), 240 (E2) y 900 (E3) NMP/100 mL para los meses de septiembre, abril y enero, respectivamente.

En cuanto a los CF (Fig. 57), los valores mínimos se registraron en octubre en la E1 (17 NMP/100 mL), en mayo, octubre y enero para la E2 (<2 NMP/100 mL) y en octubre y marzo para la E3. Los valores máximos fueron de 2,400 y 250 NMP/100 mL para el mes de abril en la E1 y E2, y 500 NMP/100 mL para el mes de enero en E3.

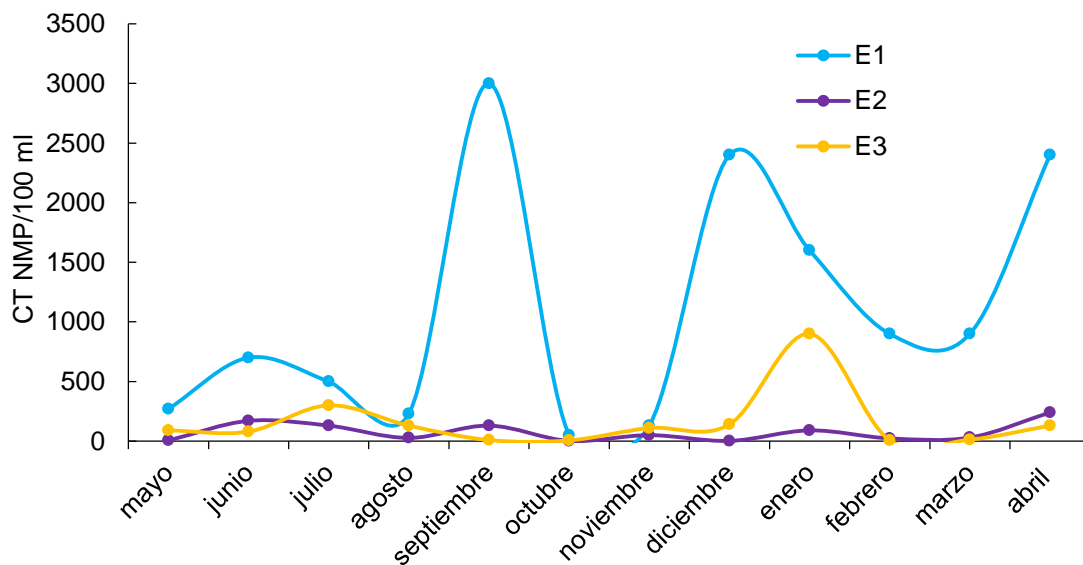


Fig. 56. Coliformes totales (CT) por mes para el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

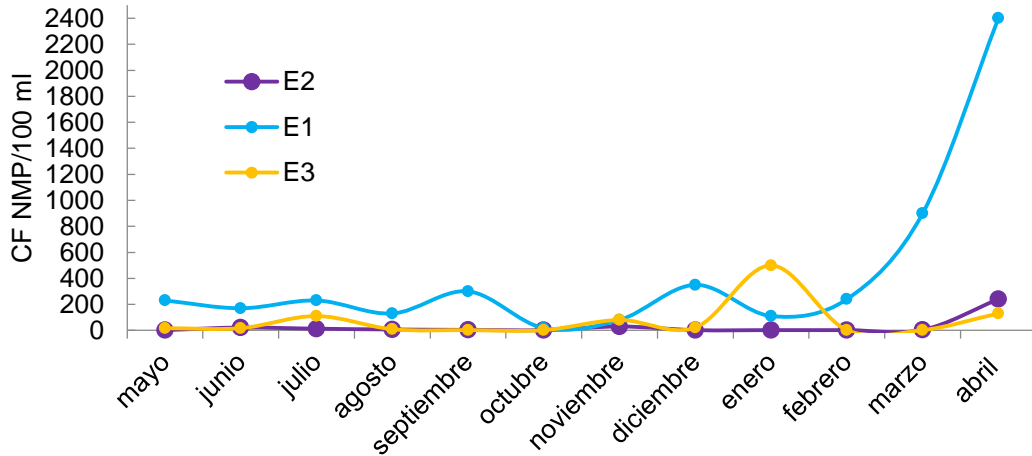


Fig. 57. Coliformes fecales (CF) por mes para el lago Viejo a lo largo de un ciclo anual.

En el lago Mayor los promedio de CT fluctuaron entre 92 ± 112 y $3478 \pm 4,268$ NMP/100 mL para las estaciones 4 y 5. Los valores de CF fluctuaron entre 49 ± 88 NMP/100 mL para la E5 y 734 ± 879 NMP/100 mL para la E4.

Los valores mínimos de CT (Fig. 58) se registraron en el mes de octubre con 240 NMP/100 mL para la E4 y en marzo con 11 NMP/100 mL para la E5. Los valores máximos se registraron en septiembre (16,000 y 300 NMP/100 mL) en E4 y E5, respectivamente.

Los valores mínimos de CF (Fig. 59) se encontraron en enero con 23 NMP/100 mL en la E4 y <2 NMP/100 mL para E5 en enero, febrero y marzo. Los valores máximos se observaron en noviembre (3,000 NMP/100mL) y septiembre (300 NMP/100 mL) en E4 y E5, respectivamente.

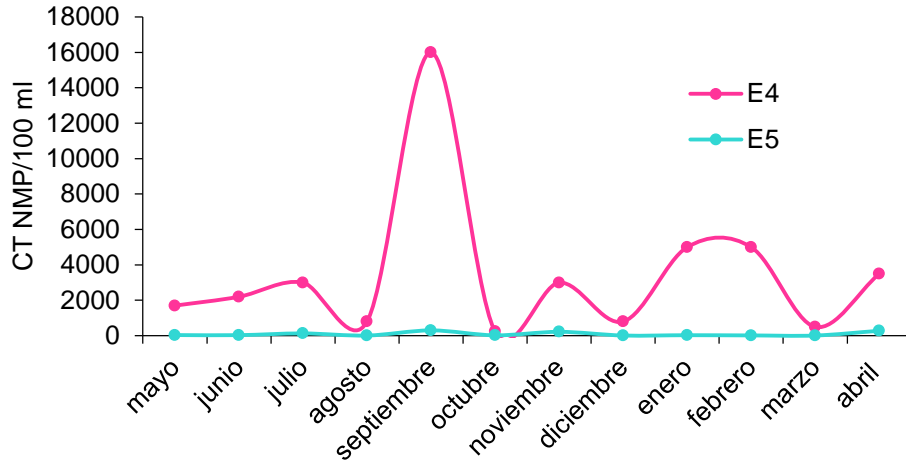


Fig. 58. Coliformes totales (CT) para el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

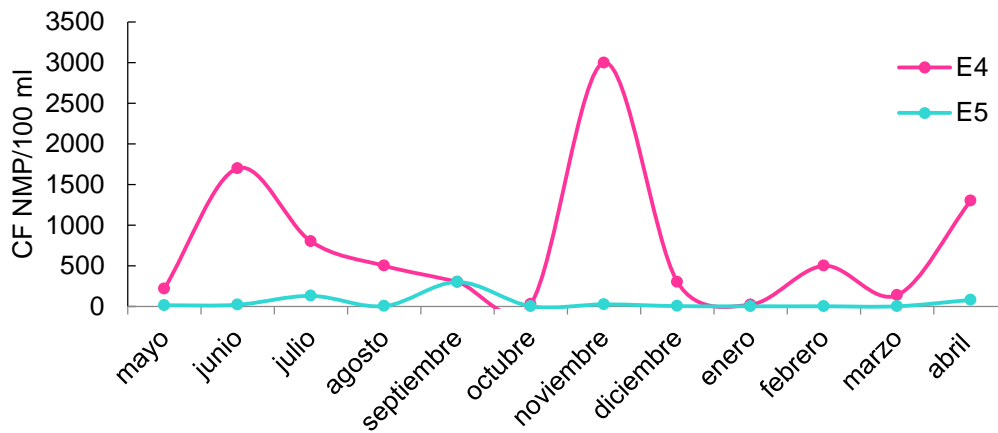


Fig. 59. Coliformes fecales (CF) para el lago Mayor a lo largo de un ciclo anual.

El valor promedio de CT en el lago Menor fue de 299 NMP/100 mL y de 193 NMP/100 mL para CF. El valor mínimo de CT (Fig. 60) fue de 6 en octubre y el valor máximo en abril con >1,600 NMP/100mL.

Los valores mínimos de CF en el lago Menor (Fig. 61) se registraron en septiembre y octubre con <2 NMP/100mL y el valor máximo fue en abril con >1,600 NMP/100mL.

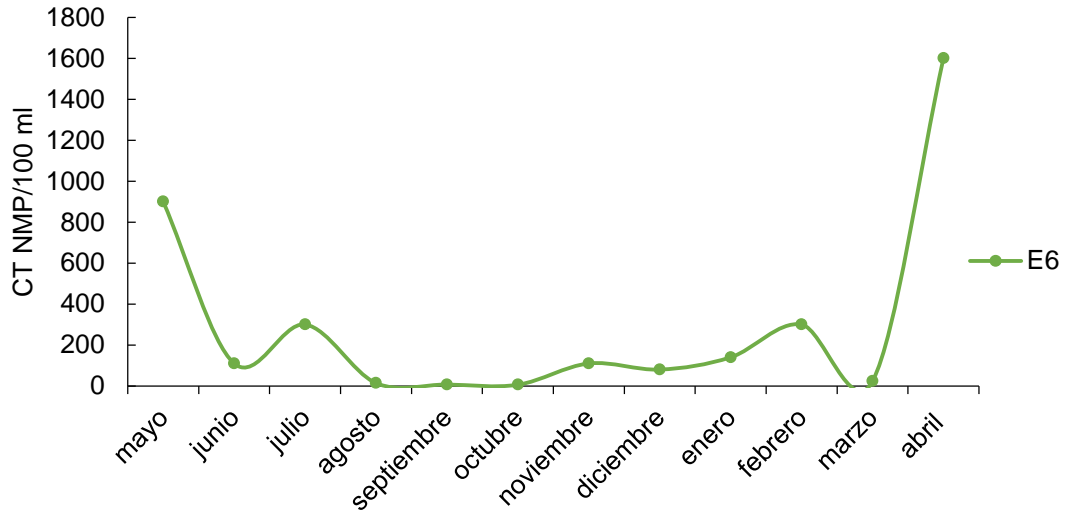


Fig. 60. Coliformes totales (CT) para el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

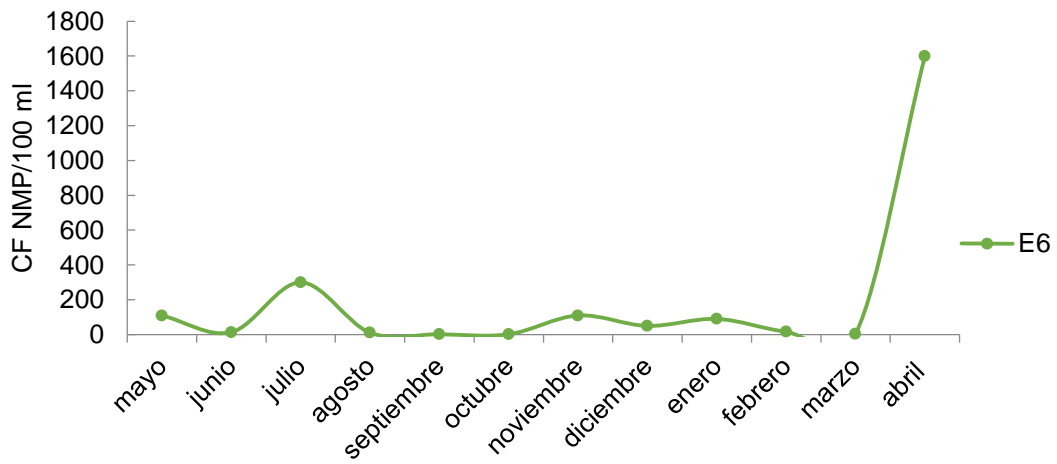


Fig. 61. Coliformes fecales (CF) para el lago Menor a lo largo de un ciclo anual.

7.4 Análisis estadísticos

a) Al interior de cada lago:

Lago Viejo

Para la temperatura, OD, %SAT, P- Total y DBO₅ no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$) en ninguna de las tres estaciones de muestreo. En cuanto a la K₂₅, CT y CF existieron diferencias ($p < 0.05$) significativas entre E1 y E3. La E1 tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a las E2 y E3 en cuanto al pH, PSR, N-Total, N-NO₃, N-NO₂, N-NH₃ y NID.

Lago Mayor

Para la temperatura, K₂₅, OD, %SAT, N-NO₂ y N-NH₃ no existen diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las dos estaciones de muestreo. Sí se registraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la E4 y E5 para pH, P-Total, PRS, N-NO₃, NID, SST, CT y CF.

b) Entre lagos:

Para la temperatura, P-Total, N-NH₃, DBO₅, y CF no se encontraron diferencias significativas ($p \geq 0.05$) entre los lagos. Para la K₂₅, OD, %SAT se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el lago Viejo y el lago Mayor, pero no para el lago Menor.

En cuanto al N-Total presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) el lago Viejo con respecto al lago Mayor y lago Menor, mientras que los N-NO₃, N-NO₂ y CT resultaron con diferencias significativas ($p < 0.05$) en lago Mayor con respecto al lago Viejo y Menor.

Con respecto al pH, DQO y SST el lago Menor resultó diferente significativamente ($p < 0.05$) del lago Viejo y lago Mayor. Finalmente, en cuanto al PSR y el NID se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los tres lagos.

8. Discusión

Los tres lagos de Chapultepec mostraron comportamientos similares con respecto a la temperatura, puesto que los valores más bajos se registraron en los meses coincidentes con la época fría de la zona, incrementándose de abril a agosto, en la época cálida. Estos lagos tropicales, poseen alta temperatura superficial, con una pequeña variación anual y un pequeño gradiente térmico en profundidad.

Estos resultados son similares a otros lagos de la Ciudad de México (Anexo-Tabla 4) como el lago Tezozómoc, Estado de México ($17.6^{\circ}\text{C} \pm 24$ en la época fría y seca y $21^{\circ}\text{C} \pm 0.9$ en la época cálida y de lluvias) (Oliva *et al.*, 2008) y Cuemanco, Xochimilco, donde se ha reportado una temperatura promedio de $21.5^{\circ}\text{C} \pm 0.68$ (Benítez *et al.*, 2014).

La concentración de OD fue alta en los lagos; mayores a los valores reportados por Oliva *et al.* (2008) para el lago Tezozómoc ($10.1 \pm 3.2 \text{ mg L}^{-1}$ en la época fría y seca y $6.8 \pm 4.7 \text{ mg L}^{-1}$ en la época cálida y lluviosa), y los reportados por Benítez *et al.* (2014) para el lago de Xochimilco (4.25 - 7.05 mg L^{-1}). Los valores altos de OD pueden ser explicados por las altas tasas de fotosíntesis en la superficie, así como los valores menores en el fondo se pueden relacionar con la degradación de materia orgánica (Wetzel, 2001). Los valores superiores al 100% de %SAT indican sobresaturación y se asocia, principalmente, a una elevada producción primaria.

Los valores de pH son comparables con los de otros lagos urbanos en la Ciudad de México, como es el caso del lago Tezozómoc (Oliva *et al.*, 2008), así como en el canal de Cuemanco, Xochimilco (Benítez *et al.*, 2014). Los valores elevados de pH son causados por la intensa actividad fotosintética que realiza el fitoplancton presente en los lagos. La fotosíntesis consume dióxido de carbono y causa que los bicarbonatos y carbonatos reaccionen con el agua y formen iones OH^{-} que incrementan el pH (Wetzel, 2000).

Los valores promedio de K_{25} obtenidos en los lagos se catalogan como moderados según los criterios de Margalef (1983), sin embargo, son menores a lo reportado para Tezozómoc (Oliva *et al.*, 2008) el cual también es alimentado con aguas residuales tratadas secundariamente.

Con respecto a la concentración de nutrientes (Anexo- Tabla 4) en los lagos de Chapultepec, independientemente de que son elevados, los valores de P-Total registrados en este estudio se encontraron menores a lo reportado para Xochimilco (Benítez *et al.*, 2014). En cuanto al PRS en este estudio se obtuvieron valores menores en comparación con lo reportado para Tezozómoc (Oliva *et al.*, 2008). En cuanto al nitrógeno (N-NO₂, N-NO₃, y N-NH₃) son mayores a los valores a lo reportado por Oliva *et al.* (2008) para Tezozómoc y por Benítez *et al.* (2014) para Xochimilco.

Por otro lado, el N-NH₃, se encontró como amonio no ionizado (amoniac) ya que hubo estaciones y meses donde el pH se encontró por encima del 9.5. De acuerdo con Cárdenas y Sánchez (2013) la concentración de esta especie de nitrógeno incrementa cuando disminuye el OD, cuando aumenta la temperatura y puede incrementarse hasta 10 veces por cada grado que aumente el pH del agua. En esta forma del nitrógeno amoniacal es extremadamente tóxico debido a su capacidad de movilizarse a través de las membranas celulares, además implica alteraciones en el cuerpo de agua, puede provocar anoxia, eutrofización y aumentar las concentraciones de NH₃ hasta niveles tóxicos para el agua, los organismos acuáticos y para el ser humano (González, 2013; Cárdenas y Sánchez 2013). Por otro lado, altas concentraciones de nitrógeno como amoniac (N-NH₃) debidas a condiciones de pH básico pueden promover su volatilización a la atmósfera liberando al cuerpo de agua de su exceso de nitrógeno e inclusive inducir indirectamente la fijación de nitrógeno, si las tasa de volatilización son muy altas (Murphy y Brownlee, 2011).

En cuanto a la normatividad, los valores de la temperatura obtenidos en este estudio se encuentran dentro del intervalo que menciona la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece que la temperatura para un embalse natural y/o artificial de uso urbano no debe exceder la temperatura máxima de 40°C.

De acuerdo con la LFD y el acuerdo CE-CCA-001/89 en este caso para la protección de la vida acuática, el pH de los lagos de Chapultepec en el presente estudio se encontró sobre el límite permisible (Anexo- Tabla 5), con excepción de la E1 y E4 que registraron un pH de 8.

Por otro lado, el P-total se registró muy por arriba del límite permisible que dicta la LFD, que se tomó en cuenta para este caso, por la protección de la vida acuática (Anexo-Tabla 5). Ninguna de las estaciones muestreadas presentó valores menores a 0.1 mg L⁻¹ de P-total y la LFD dicta como límite permisible 0.05 mg L⁻¹.

El N-NH₃ se registró por encima del máximo permisible que dicta el Acuerdo CE-CCA-001/89, que se tomó en cuenta por la protección de la vida acuática (Anexo-Tabla 5), con excepción del mes de noviembre en las estaciones 3, 4, 5 y 6 que registraron valores menores a 0.06 mg L⁻¹.

Se tomaron en cuenta la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales, así como NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se usan en servicios al público y la LFD que establece parámetros de calidad de agua en dos diferentes usos: como fuente de abastecimiento para uso público y como protección de la vida acuática. Ambas normas y la LFD se refieren a valores que se aplican a las aguas de descarga que se vierten en los cuerpos acuáticos y no a los propios sistemas. Por lo que se tomó en cuenta el Acuerdo CE-CCA-001/89 que establece criterios ecológicos de calidad de agua para evaluar los cuerpos acuáticos como aptos para su uso como fuente de abastecimiento de agua para actividades recreativas con contacto primario o para la protección de la vida acuática, pero los lagos de Chapultepec son de contacto secundario, además de que no evalúa parámetros registrados en este trabajo, con excepción del pH y el N-NH₃.

En general, los valores de DBO₅, DQO, SST, CT y CF fueron altos en los lagos de Chapultepec. Sin embargo, los valores de DBO₅ obtenidos en este estudio se encuentran por debajo del límite que establece la NOM-003-SEMARNAT-1997 (Anexo-Tabla 6), aunque en los tres lagos se encontraron meses con valores por arriba de la NOM (E1 en septiembre y marzo, en la E2 en marzo, E4 en septiembre y febrero y en la E6 en enero, febrero y marzo). Por otro lado, los niveles de los SST de los tres lagos de Chapultepec están por encima del valor dictado por la NOM, con excepción de

algunos meses donde se encontraron dentro del máximo permisible (E1: mayo, febrero y abril, E4: mayo, julio, enero y E5: enero y febrero).

De acuerdo a la Norma Mexicana de Calidad del Agua para uso recreativo de contacto directo/recreativo y para la preservación de la biota acuática (Anexo- Tabla 6), si se toma en cuenta que los usuarios tienen contacto indirecto u ocasional con el agua, los promedios mensuales de CF en los tres lagos de Chapultepec se encuentran dentro del límite máximo permisible. Aunque se encontraron valores superiores en la E1 (porción sur del lago Viejo) con 2,400 NMP en el mes de abril, en la E4 (porción norte del lago Mayor) con 1,700, 3,000 y 1,300 NMP en junio, noviembre y abril respectivamente y en el lago Menor con >1,600 NMP para el mes de abril.

La DQO no tiene un límite máximo permisible en la NOM-003-SEMARNAT-1997, por lo que se tomó en cuenta el Índice de Calidad de Agua (ICA) (CONAGUA y SEMARNAT 2014) que es un sistema cualitativo que permite hacer comparaciones de niveles de contaminación en diferentes áreas, donde se establecieron categorías con colores. En cuanto a la DQO los lagos de Chapultepec se encuentran clasificados como contaminados ya que sus valores están entre $40 < DQO \leq 200$ (Anexo- Tabla 7), con excepción del lago Menor que se clasifica como altamente contaminado ya que la mitad del año tuvo valores mayores a 200 mg/L.

De acuerdo con el ICA, los lagos de Chapultepec se determinan como aceptables con respecto a la DBO_5 ya que se encuentran entre $6 < DBO_5 \leq 30$ (Anexo- Tabla 8), aunque se encontraron valores por encima de este rango en la E1 (septiembre y marzo), en la E2 (marzo), en la E4 (septiembre y febrero) y en la E6 (enero, febrero y marzo) que se clasifican como contaminados.

En cuanto a los SST, el lago Viejo se encuentra en la categoría de buena calidad ya que se encuentran dentro de $25 < SST \leq 75$ (Anexo- Tabla 9), aunque en la E2 (agosto, septiembre, noviembre, diciembre y marzo) y E3 (agosto, septiembre, noviembre y diciembre) se registró como aceptable ya que tuvieron valores por encima de 75 mg L^{-1} . El lago Mayor se encuentra al igual que el lago Viejo en la categoría de buena calidad ya que tiene valores menores a 75 mg L^{-1} , con excepción de los meses de julio y septiembre en la E5, que registraron valores por encima de 75 mg L^{-1} categorizándolo

como aceptable. Mientras que el lago Menor (E6) se considera como contaminado ya que se registraron valores entre $150 < SST \leq 400$, aunque en seis de los meses se encontró dentro de la categoría de aceptable ya que registró valores de entre $75 < SST \leq 150$.

9. Conclusiones

1. Los lagos se caracterizan como hipereutróficos por la elevada concentración de OD, elevado pH, baja visibilidad del disco de Secchi y elevada concentración de nutrientes.
2. La temperatura de los tres lagos de Chapultepec cumple con la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece que la temperatura para un embalse natural y/o artificial de uso urbano no debe exceder la temperatura máxima de 40°C.
3. El pH de los tres lagos de Chapultepec no cumple con lo dictado en la LFD y el acuerdo CE-CCA-001/89 para la protección de la vida acuática.
4. De acuerdo con la LFD la concentración de fósforo en los lagos de Chapultepec se encuentra por encima de lo permisible para la protección de la vida acuática.
5. Los tres lagos de Chapultepec cumplen con la NOM-003-SEMARNAT-1997 con respecto a la DBO₅. De acuerdo con el ICA los tres lagos se consideran aceptables para uso de actividades recreativas.
6. Los SST no cumplen con la NOM-003-SEMARNAT-1997, a pesar de que los tres lagos sobrepasaron el máximo permisible de la NOM, en el ICA se les dio la categoría de aceptables al lago Viejo y al lago Mayor y contaminado al lago Menor.
7. De acuerdo con el ICA, la DQO de los lagos Viejo y Mayor los categorizan como contaminados mientras que el lago Menor como fuertemente contaminado.
8. Los valores promedios mensuales de coliformes fecales en los lagos de Chapultepec cumplieron con el máximo permisible de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para uso recreativo de contacto indirecto u ocasional y para la preservación de la biota acuática.

9. Con base en las NOMs, la LFD, el Acuerdo CE-CCA-001/89 y el ICA, el grado de contaminación de los lagos de Chapultepec es alto, particularmente el lago Menor.

10. Bibliografía

- Alcocer J. 1988. Caracterización hidrobiológica de los lagos de Chapultepec, México. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar. CCH, UNAM. México 87 pp.
- Alcocer J., Kato E., Robles E. y G. Vilaclara. 1988. Estudio preliminar del efecto del dragado sobre el estado trófico del Lago Viejo de Chapultepec. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 4(1): 43-56.
- Alcocer J., Lugo A., Vilaclara G., Sánchez M. y M. Chávez. 2007. Los lagos de Chapultepec, Ciudad de México. 114- 124 p. En De La Lanza G. (comp.). *Las aguas interiores de México: conceptos y casos*. AGT Editores, México.
- APHA (American Public Health Association). 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. APHA. Washington. 1,496 pp.
- Benítez M., Zamora M., Castellanos M., Garza G., Contreras R. y Flores J. 2014. Determinación de la biomasa de una comunidad zooplanctónica en el Canal Nacional de Cuemanco, Xochimilco. *Revista Digital E-Bio*. Universidad Autónoma Metropolitana. Edición 2014. 73-80 p.
- (LFD) Ley Federal de Derechos. 2016. Cámara de Diputados de H. Congreso de la Unión. *Diario Oficial de la Federación* 165- 171 p.
- Cárdenas G. y Sánchez I. 2013. Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Revista Universidad y Salud* 15(1): 72- 88.
- CONAGUA y SEMARNAT. 2014. *Estadísticas del agua en México*. Edición 2013. México. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>
- Cruz M. y Martínez M. 1999. Respuesta fotosíntesis-irradiación del nanoplancton de dos ecosistemas acuáticos urbanos. *Revista de Biología Tropical* 47: 37–42.
- Diario Oficial de la Federación. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las

- descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, DF. 35 pp.
- Diario Oficial de la Federación. 1998. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México, DF. 17 pp.
- Diario Oficial de la Federación. 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos del Calidad de Agua CE-CCA-/001/89. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989
- Flores M. 1991. Contribución al conocimiento de la ictiofauna de los tres lagos de Chapultepec México, D.F. Tesis de Licenciatura en Biología. FES Iztacala, UNAM. México. 72 pp.
- García E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana), 4ª. Edición. Offset Larios, México. 91 pp.
- García-Rodríguez J., Molina-Astudillo I., Miranda-Espinoza E., Soriano-Salazar M. y Díaz-Vargas M. 2015. Variación fitoplanctónica en un lago urbano del municipio de Cuernavaca, Morelos, México. *Acta Universitaria* 25: 3–19. doi:10.15174/au.201.
- GDF (Gobierno del Distrito Federal). 2006. Programa de rehabilitación integral del Bosque de Chapultepec. En: Memorias. Dirección General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental. Secretaría del Medio Ambiente, Dirección de Educación Ambiental. pp. 59-113 Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/librodbuea/03.pdf>
- González M. 1995. Estudio de la variación espacial y temporal de los ciliados planctónicos de los Lagos de Chapultepec, D.F. Tesis Licenciatura en Biología. FES Iztacala, UNAM. 54 pp.
- Guzmán M. 1989. La macrofauna béntica y su relación con la dinámica físico-química de los lagos de Chapultepec (época de lluvias), Bosque de Chapultepec, México. Tesis de Licenciatura en Biología. FES Iztacala, UNAM, México. 57 pp.

- HACH Company. 1993. Manual de análisis de agua. Loveland, Colorado, EEUU. 220 p.
- Margalef R. 1983. Limnología. Ed. Omega. Barcelona. 1010 pp.
- Mazzeo N., Clemente J., García-Rodríguez F., Gorga J., Kruk C., Larrea D., Meerhoff M., Quintans F., Rodríguez-Gallego L. y F. Sasso. 2002. Eutrofización: causas, consecuencias y manejo. En Perfil Ambiental del Uruguay. Editorial Nordan, 35-56 pp.
- Moreno D., Quintero J. y A. López. 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. UAM I Contactos 78: 25-33.
- Muro G. 1994. Contribución al conocimiento de la distribución y abundancia de los cladóceros en los tres lagos de Chapultepec. Tesis de Licenciatura en Biología. FES Iztacala, México. 72 pp.
- Navarrete-Salgado G., Contreras-Rivero G. y G. Elías-Fernández. 2004. Abundancia y estado sanitario de Mexiclapique (*Girardinichthys viviparus* Bustamante) en cuerpos de agua del centro de México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 9 (2): 143-146.
- Oliva M., Rodríguez R., Lugo V. y Sánchez R. 2008. Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico. Hidrobiológica 18: 1-13.
- Olgún Z., 2018. Variación espacial y temporal de la producción primaria en los lagos de Chapultepec, Ciudad de México. Tesis de Licenciatura en Biología Facultad de Ciencias, UNAM, México. 81 pp.
- Palacios A. y Vega A. 2005. Plan de acciones para atender la problemática de calidad del agua en el lago de Chapultepec, primera sección. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería, UNAM, México. 94 pp.
- Pollingher U. 1986. Phytoplankton periodicity in a subtropical lake (Lake Kinneret, Israel). Hydrobiologia 138: 127-138. DOI: 10.1007/BF00027236
- PUEC-UNAM (Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad. 2002. Proyecto ejecutivo sobre la implementación del manejo integral y desarrollo autosostenible del Bosque de Chapultepec. Universidad Nacional Autónoma de México y

- Dirección General de la Unidad de Bosques Urbanos y Educación Ambiental, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 782 pp.
- Roldán P. y J. Ramírez. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Universidad de Antioquía. Colombia. 2ª edición. 520 pp.
- Samboni N., Carvajal Y. y J. Escobar. 2007. Revisión de parámetros físico-químicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. Ingeniería e Investigación 27: 172–181.
- SEMARNAT y CONAGUA. 2007. Estadísticas del Agua en México, 1ª edición, CNA, México. Disponible en: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html
- SEMARNAT. 2012. Normas Oficiales Mexicanas. México. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/normas-oficiales-mexicanas>
- Schueler T. y J. Simpson. 2001. Why urban lakes are different. Urban Lake Management 3 (4): 747–750.
- US Environmental Protection Agency. 1974. Quality criterial for water. Office of Water and Hazardous Materials. US EPA. Washington D.C. 498 pp.
- US Environmental Protection Agency. 1986. Bacteriological Water Quality Criteria for Marine and Fresh Recreational Waters. EPA-440/5-84-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards. Cincinnati, OH. 395 pp.
- Vallentyne J. 1978. Introducción a la limnología. Los lagos y el hombre. Omega. Barcelona. 180 pp.
- Wetzel R. y G. Likens. 2000. Limnological Analyses. Springer, New York. 429 pp.
- Wetzel R. 2001. Limnology: lake and river ecosystems. Academic Press. Londres. 1,006 pp.

Anexo

Tabla 4. Parámetros físico-químicos registrados para algunos lagos urbanos.

Lagos	Chapultepec	Tezozómoc	Xochimilco
	Presente trabajo	(Oliva <i>et al.</i> , 2008)	(Benítez <i>et al.</i> , 2014)
Temperatura (°C)	11.2 - 26.7	14.1 - 22.8	21.8 - 20.6
OD (mg L ⁻¹)	0.5 – 25.5	0.1 - 18.6	4.25 - 7.05
%SAT OD	7.1 - 313.2	ND	ND
pH	07- 11	6.6 – 10.3	8.6 – 9
K ₂₅ (μS cm ⁻¹)	330 - 669	750 – 1106	ND
Profundidad (m)	0.8 – 1.2	0.5 – 2.4	0.56
P-Total (mg L ⁻¹)	0.1 - 1.5	ND	4.1 – 7.4
PRS (mg L ⁻¹)	0.02 - 0.6	0.4 – 6.48	ND
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	1.3 - 10.4	0 – 5.9	0.073 – 0.108
N-NO ₂ (mg L ⁻¹)	0.003 - 2.4	0 – 0.16	0.004 0.009
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	0.02 - 5.9	0.2	ND
NID (mg L ⁻¹)	1.4 - 14	ND	ND
N-Total (mg L ⁻¹)	4.8 - 24.8	ND	ND
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	8.8 – 45.8	ND	ND
DQO (mg L ⁻¹)	24 – 697	ND	ND
SST (mg L ⁻¹)	17 - 320	ND	ND

Tabla 5. Parámetros de calidad de agua, Ley Federal de Derechos y Acuerdo CE-CCA-001/89.

Parámetros	Uso	
	Fuente de abastecimiento para uso público	Protección de la vida acuática
Fósforo Total	0.1	0.05
N-NO ₃	5	-
N-NO ₂	0.05	-
N-NH ₃	-	0.06
pH	6 - 9	6.5 – 8.5

Tabla 6. Límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 para el uso de agua para “servicios al público con contacto directo e indirecto u ocasional”.

Tipo de reuso	Promedio mensual		
	Coliformes fecales (NMP/100ml)	DBO ₅ (mg/l)	SST (mg/l)
Servicios al público con contacto directo	240	20	20
Servicio al público con contacto indirecto u ocasional	1000	30	30

Tabla 7. Valores indicadores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en agua superficial (CONAGUA Y SEMARNAT, 2014).

Criterio (mg/L)	Clasificación
DQO ≤ 10	Excelente: No contaminada
10 < DQO ≤ 20	Buena calidad: Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.
20 < DQO ≤ 40	Aceptable: con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.

40 < DQO ≤ 200	Contaminada: Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
DQO > 200	Fuertemente contaminada: Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.

Tabla 8. Valores indicadores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) en agua superficial (CONAGUA Y SEMARNAT, 2014).

Criterio (mg/l)	Clasificación
DBO₅ ≤ 3	Excelente: no contaminada
3 < DBO₅ ≤ 6	Buena calidad: Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.
6 < DBO₅ ≤ 30	Aceptable: Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
30 < DBO₅ ≤ 120	Contaminada: Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
DBO₅ > 120	Fuertemente contaminada: Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.

Tabla 9. Valores indicadores de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en agua superficial (CONAGUA Y SEMARNAT, 2014).

Criterio (mg/l)	Clasificación
SST ≤ 25	Excelente: clase de excepción, muy buena calidad.
25 < SST ≤ 75	Buena calidad: Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.
75 < SST ≤ 150	Aceptable: aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.
150 < SST ≤ 400	Contaminada: Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Aguas con alto contenido de material suspendido.
SST > 400	Fuertemente contaminada: Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.