



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

Lagos de Chapultepec: Metabolismo lacustre.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

LIMNOLOGÍA

PRESENTA:

Mayela Yormeri Lagunas Sánchez

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. Javier Alcocer Durand - FES Iztacala, UNAM

COMITÉ TUTOR:

Dr. Alfonso Lugo Vázquez - FES Iztacala, UNAM

Dr. Javier Carmona Jiménez - Facultad de Ciencias, UNAM

Dra. Elizabeth Ortega Mayagoitia - FES Iztacala, UNAM

Dra. María Fernanda Figueroa Díaz Escobar - Facultad de Ciencias, UNAM

Ciudad de México, junio 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.



Lagos de Chapultepec: Metabolismo lacustre.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO(A) EN CIENCIAS

LIMNOLOGÍA

PRESENTA:

Mayela Yormeri Lagunas Sánchez

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. Javier Alcocer Durand - FES Iztacala, UNAM

COMITÉ TUTOR:

Dr. Alfonso Lugo Vázquez - FES Iztacala, UNAM

Dr. Javier Carmona Jiménez - Facultad de Ciencias, UNAM

Dra. Elizabeth Ortega Mayagoitia - FES Iztacala, UNAM

Dra. Ma. Fernanda Figueroa Díaz Escobar - Facultad de Ciencias, UNAM

Ciudad de México, junio 2019

Agradecimientos Institucionales

- Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente.
- Al Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, UNAM.
- Al CONACYT por la beca otorgada que me permitió la realización de este trabajo.
- Este estudio fue apoyado por el proyecto 189194 del Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del Distrito Federal *“Estudio de la productividad primaria de los Lagos Menor y Mayor de la 1ª Sección del Bosque de Chapultepec a través de imágenes satelitales en tiempo real y sobre el impacto de los tóxicos y contaminantes en especies nativas”*
- Agradezco al Dr. Javier Alcocer Durand por el conocimiento que me brindó, el tiempo dedicado a este trabajo y su apoyo a lo largo de mi formación académica.
- Asimismo, al comité académico, por cada valiosa observación, comentario y aportación a este estudio: Dra. Elizabeth Ortega Mayagoitia, Dra. Ma. Fernanda Figueroa Díaz Escobar, Dr. Alfonso Lugo Vázquez y al Dr. Javier Carmona Jiménez.
- Al Dr. Luís A. Oseguera Pérez, por su apoyo y confianza.

Dedicatoria

A mis padres, por creer en mí.

A Tady, quien estuvo en cada momento junto a mí a lo largo de este inicio de vida juntos, porque me motivó y animó siempre y que por su apoyo incondicional este logro fue posible, gracias por confiar en mí.

“Lo bueno de la ciencia es que es verdad, creas o no en ella”

NDT



ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
<i>Lagos Urbanos</i>	4
<i>Proceso de eutrofización</i>	5
<i>Productividad primaria</i>	6
<i>Biomasa fitoplanctónica</i>	7
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	10
ÁREA DE ESTUDIO	11
MATERIALES Y MÉTODOS	12
<i>Parámetros ambientales</i>	13
<i>Producción primaria</i>	14
<i>Biomasa fitoplanctónica</i>	15
<i>Análisis estadístico</i>	16
RESULTADOS	18
<i>Caracterización ambiental</i>	18
❖ Temperatura	18
❖ Oxígeno disuelto (OD)	21
❖ Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% Sat. OD.)	24
❖ Profundidad del Disco de Secchi (Z_{DS})	28
❖ Conductividad eléctrica (K_{25})	30
❖ pH	33
<i>Nutrientes</i>	37
❖ Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃)	37
❖ Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂)	39
❖ Nitrógeno de amonio (N-NH ₃)	41
❖ Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)	43
❖ Nitrógeno Total (N-Total)	45
❖ Fósforo soluble reactivo (P-PO ₄)	47
❖ Fósforo total (P-Total)	49
<i>Metabolismo Lacustre</i>	54
❖ Clorofila- α (Clor- α)	54

❖ Producción Primaria Bruta (PPB)	57
❖ Producción Primaria Neta (PPN)	59
❖ Respiración (R)	62
<i>Correlación entre metabolismo lacustre y los parámetros fisicoquímicos</i>	64
DISCUSIÓN	69
<i>Parámetros fisicoquímicos</i>	69
<i>Metabolismo lacustre</i>	73
<i>Correlación entre metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos</i>	77
CONCLUSIONES	80
LITERATURA CITADA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las estaciones de muestreo en los lagos de las dos secciones del Bosque de Chapultepec. (estaciones de muestreo E1 a E6). (Tomado de Alcocer 2015). -----	12
Figura 2. Perfil característico de temperatura (°C) de los lagos del Bosque de Chapultepec (agosto 2016). -----	18
Figura 3. Temperatura (promedio mensual \pm D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	19
Figura 4. Temperatura (promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	20
Figura 5. Perfil Característico de oxígeno disuelto (mg L^{-1}) en los lagos de Chapultepec (agosto 2015). -----	21
Figura 6. Concentración de oxígeno disuelto (OD mg L^{-1}) (promedio mensual \pm D.E.) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	22
Figura 7. Concentración de oxígeno disuelto (OD mg L^{-1}) (promedio anual \pm D.E.) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	24
Figura 8. Perfil característico del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% Sat. OD.) en los lagos de Chapultepec (agosto 2016). -----	25
Figura 9. Porcentaje de saturación de Oxígeno disuelto (% Sat. OD.) (promedio mensual \pm D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	26
Figura 10. Porcentaje de saturación de Oxígeno disuelto (% Sat. OD.) (promedio anual \pm D.E.) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-27	27
Figura 11. Profundidad mensual del disco de Secchi (Z_{DS} m) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	28
Figura 12. Profundidad del disco de Secchi (Z_{DS} m) (promedio anual \pm D.E.) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	29
Figura 13. Perfil característico de la conductividad (K_{25}) en los lagos de Chapultepec (agosto 2016). -----	30
Figura 14. Conductividad (K_{25}) (promedio mensual \pm D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	31
Figura 15. Conductividad (K_{25}) (promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	32
Figura 16. Perfil característico de pH en los lagos de Chapultepec (agosto 2016).-----	33
Figura 17. Unidades de pH (promedio mensual \pm D.E.) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	34
Figura 18. Unidades de pH (promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de muestreo de los Lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	35
Figura 19. Concentración mensual de nitrógeno de nitratos ($\text{N-NO}_3 \text{ mg L}^{-1}$) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	38
Figura 20. Concentración promedio anual del nitrógeno de nitratos ($\text{N-NO}_3 \text{ mg L}^{-1} \pm$ D.E.) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	39
Figura 21. Concentración mensual de nitrógeno de nitritos ($\text{N-NO}_2 \text{ mg L}^{-1}$) de los lagos del Bosque de Chapultepec.-----	40

Figura 22. Concentración promedio anual del nitrógeno de nitritos ($N-NO_2$ mg $L^{-1} \pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	41
Figura 23. Concentración mensual de nitrógeno de amonio ($N-NH_3$ mg L^{-1}) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	42
Figura 24. Concentración promedio anual de nitrógeno de amonio ($N-NH_3$ mg $L^{-1} \pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	43
Figura 25. Concentración mensual de nitrógeno inorgánico disuelto (NID mg L^{-1}) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	44
Figura 26. Concentración promedio anual del nitrógeno inorgánico disuelto (NID mg $L^{-1} \pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	45
Figura 27. Concentración mensual de nitrógeno total ($N-Total$ mg L^{-1}) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	46
Figura 28. Concentración promedio anual de nitrógeno total ($N-Total$ mg $L^{-1} \pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque Chapultepec (2015-2016).-----	47
Figura 29. Concentración mensual de fósforo soluble reactivo ($P-PO_4$ mg L^{-1}) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	48
Figura 30. Concentración promedio anual de fósforo soluble reactivo ($P-PO_4$ mg $L^{-1} \pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	49
Figura 31. Concentración mensual de fósforo Total ($P-Total$ mg L^{-1}) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	51
Figura 32. Concentración promedio anual de fósforo total ($P-Total$ mg $L^{-1} \pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	52
Figura 33. Concentración promedio mensual de clorofila α (Clor- α $\mu g L^{-1} \pm d. e.$) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	55
Figura 34. Concentración promedio anual de la clorofila α (Clor- α $\mu g L^{-1} \pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	56
Figura 35. Producción primaria bruta (PPB mg C $m^3 h^{-1}$ promedio mensual $\pm D.E$) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	57
Figura 36. Producción primaria bruta (PPB mg C $m^3 h^{-1}$ promedio anual $\pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	58
Figura 37. Producción primaria neta (PPN mg C $m^3 h^{-1}$ promedio mensual $\pm D.E$) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	60
Figura 38. Producción primaria neta (PPN mg C $m^3 h^{-1}$ promedio anual $\pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016). -----	61
Figura 39. Respiración (R mg C $m^3 h^{-1}$ promedio mensual $\pm D.E$) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	62
Figura 40. Respiración (R mg C $m^3 h^{-1}$ promedio anual $\pm D.E$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).-----	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables ambientales analizadas en los lagos del Bosque de Chapultepec. Se muestran los valores promedio, la desviación estándar y el rango. -----	36
Tabla 2. Concentración de nutrientes analizados en los lagos de Chapultepec por estación de muestreo. Se muestran los valores promedio, la desviación estándar y el rango. -----	53
Tabla 3. Datos del metabolismo lacustre de los tres lagos del Bosque de Chapultepec (Clor- α = clorofila α , PPB= producción primaria bruta, PPN= producción primaria neta, R=respiración). Se muestran valores promedio, desviación estándar y rango. -----	64
Tabla 4. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y los parámetros fisicoquímicos de los lagos del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos). ----	65
Tabla 5. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos para el Lago Viejo del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos). ---	66
Tabla 6. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos para el Lago Mayor del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos). -	67
Tabla 7. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos para el Lago Menor del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos). -	68
Tabla 8. Comparación de valores de parámetros fisicoquímicos de los lagos del Bosque de Chapultepec con otros sistemas eutróficos. -----	70
Tabla 9. Comparación entre concentración promedio de la concentración de Clor- α $\mu\text{g L}^{-1}$ entre los lagos del Bosque de Chapultepec y otros sistemas eutróficos. -----	74
Tabla 10. Listado de las especies de fitoplancton más importantes registradas en los Lagos del Bosque de Chapultepec (Tomado de Alcocer, 2017). -----	75
Tabla 11. Comparación entre el rango, la concentración promedio y desviación estándar (D.E.) de la productividad primaria bruta (PPB) de los tres lagos de Chapultepec con otros sistemas eutróficos. -----	77

RESUMEN

La percepción más común que tiene la población acerca de los lagos es, probablemente aquella imagen de un sistema acuático rodeado por montañas, con una alta biodiversidad, y que se encuentra en los lugares más recónditos y límpidos del planeta; sin embargo, si se toma en cuenta cuál es el tipo de lago con el que las personas tienen contacto más frecuente, inmediatamente surge el término de lago “urbano”, los cuales se definen como cuerpos de agua que están ubicados dentro de grandes desarrollos urbanos (Birch y McKaskie 1999).

La mayoría de estos sistemas acuáticos presentan graves problemas de eutrofización, ocasionado por el aumento de la productividad primaria relacionado con florecimientos algales a causa del incremento de la carga de nutrientes en el cuerpo acuático producto de la actividad humana. (Martinez-Arroyo y Jáuregui 2000, Birch y McKaskie 1999)

La estimación de la productividad primaria fitoplactónica en los cuerpos acuáticos es de gran relevancia debido a que este proceso transforma el carbono inorgánico a orgánico a través de la fotosíntesis; es realizado por organismos fototróficos que sintetizan materia orgánica e introducen carbono a la red trófica acuática (Boracio-León *et al.* 2007, Roldán y Ramírez 2008).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación de la producción primaria bruta (PPB), neta (PPN) y respiración (R) en los lagos urbanos del Bosque de Chapultepec (Lago Viejo, Lago Mayor y Lago Menor) para reconocer el papel que juegan los lagos urbanos en el ciclo del carbono. Las tasas de PPB, PPN y R se evaluaron por el método de botellas claras y oscuras.

La productividad primaria bruta promedio anual para el Lago Viejo fue de $1646 \pm 458 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, respecto al Lago Mayor fue de $1454 \pm 522 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y para el Lago Menor fue de $1500 \pm 522 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$. Referido a la productividad primaria neta, el promedio anual fue de $1148 \pm 443 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en el Lago Viejo, $944 \pm 422 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en el Lago Mayor y de $1073 \pm 307 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para el Lago Menor. El promedio anual de la respiración registrado para el Lago Viejo fue de $573 \pm 383 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, para el Lago Mayor $614 \pm 436 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y para el Lago Menor $499 \pm 315 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$. Estos valores son típicos de lagos hipertróficos y son indicadores de que los lagos del bosque de Chapultepec funcionan como sumideros de carbono durante las horas luz.

La hipertrofia es una característica indeseable para el uso destinado de los lagos de Chapultepec, en los que requieren de implementar mecanismos de control y eventual disminución de su estado trófico. La larga tradición de sitio de esparcimiento y recreación que acompaña a los lagos de Chapultepec justifica que se tomen medidas para mejorar la calidad de su agua y garantizar la seguridad de los numerosos usuarios

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas urbanos, como un todo, se pueden ver como paisajes altamente fragmentados y heterogéneos, que a menudo carecen de una cubierta vegetal sustancial, la cual consiste en unas pocas especies nativas favorecidas y numerosas especies exóticas, las áreas urbanas se caracterizan por presentar niveles de perturbación antropogénica altos (Jokimaki 1999). El desarrollo de la urbanización modifica los componentes de las cuencas hidrográficas, lo que altera la hidrología en cuanto a cantidad y calidad del agua, esto provoca que los procesos fisicoquímicos y biológico-ecológicos se modifiquen (Almanza-Marroquín *et al.* 2016). Este tipo de situaciones no sólo responde a políticas inadecuadas de manejo, sino a procesos sociales como el crecimiento demográfico, la alta densidad en las zonas urbanas y migración a zonas donde la disponibilidad de agua es baja, lo que ejerce mayor presión en acuíferos y fuentes superficiales de este recurso (Sánchez 2007).

Actualmente, la mayoría de las grandes ciudades cuenta con ecosistemas acuáticos que presentan problemas de eutrofización, derivados del incremento en la carga de nutrientes y consecuentemente el aumento en la productividad primaria, relacionados con los florecimientos algales masivos y muchas veces nocivos; es un proceso tan común, que en muchas ocasiones la sociedad no se cuestiona las razones del estado de estos sistemas, concibiendo este estado como el natural. La falta de conocimiento por parte la población acelera -aún más- estos procesos (Carole y Boyle 1993).

Lagos Urbanos

La percepción más común que tiene la población acerca de los lagos es probablemente aquella imagen de un sistema acuático rodeado por montañas, con una alta biodiversidad, y que se encuentra en los lugares más recónditos y límpidos del planeta; sin embargo, si se toma en cuenta cuál es el tipo de lago con el que las personas tienen contacto más frecuente, inmediatamente surge el término de lago “urbano”, los cuales se definen como cuerpos de agua que están ubicados dentro de grandes desarrollos urbanos (Birch y McKaskie 1999).

Los lagos urbanos son una de las características del paisaje que contribuye significativamente a aumentar la calidad de vida en los centros urbanos, al aumentar las comodidades, posibilitar actividades recreativas y educativas e incluso, contribuyen a mitigar el clima urbano (Martínez-Arroyo y Jáuregui 2000), es decir, favorecen la reducción de “islas de calor”, producen oxígeno y funcionan como sumideros de CO₂, además de aportar plusvalía a las áreas aledañas y a la ciudad. Asimismo, la cuenca hidrográfica de la que forman parte estos ecosistemas es parte del tejido urbano y, por lo tanto, enfatizan los problemas ambientales que afectan a las áreas metropolitanas, al recolectar y acumular grandes cantidades de nutrientes y contaminantes. De este modo son de los sistemas que reciben un mayor impacto dentro de las grandes ciudades (Enríquez 2012).

Al estar situados dentro de las ciudades, facilitan el desarrollo de múltiples actividades, lo que ha generado un incremento de la carga de nutrientes y materia orgánica que en ellos se vierte, acelerándose así el proceso de eutrofización, lo cual promueve el incremento de la biomasa fitoplanctónica y la turbidez en el agua (Quirós 2007). Cabe mencionar que este proceso se ve acelerado también porque el suministro de agua que alimenta los lagos urbanos frecuentemente proviene de

plantas de tratamiento secundario de aguas residuales que, si bien eliminan una buena parte de la materia orgánica, se enriquecen en nutrientes (Novoa *et al.* 2011).

Los lagos urbanos son los cuerpos de agua más visitados, conocidos y utilizados por la población. Se definen considerando su tamaño (superficie menor a 10 km²), profundidad (promedio de 6 m o menos), origen del agua (residual-tratada), tipo de cuenca de depósito y usos: recreativo, abastecimiento de agua, contenedores de lluvia o cualquier otro relacionado con actividades humanas (Schueler y Simpson 2003). Gracias a que la mayoría son de tamaño reducido, en ellos se pueden hacer estudios a escala sobre la dinámica de otros cuerpos de agua de mayor tamaño que tienen impactos ambientales y manejo similar (Labounty 1995).

Proceso de eutrofización

La eutrofización es un proceso natural que ocurre en todos los cuerpos acuáticos con el paso del tiempo, pero que se ve acelerado por las distintas actividades humanas. El aumento de la concentración de nutrientes en los lagos da lugar a un crecimiento exagerado de fitoplancton. Las principales características de dicho fenómeno son: la coloración verde del agua, la producción de malos olores y la disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto, lo que resulta en un incremento de la materia orgánica en descomposición y en la turbidez del cuerpo de agua. La descomposición de la materia orgánica remueve el oxígeno disuelto del agua haciendo difícil y a veces imposible la vida acuática; disminuye la calidad del agua, impidiendo incluso, en casos extremos, su uso recreativo, turístico y doméstico.

El rápido y continuo aporte de nutrientes hacia los cuerpos de agua en diversas regiones del mundo, ha ocasionado que muchos de ellos alcancen el estado de eutrofia extrema, denominado hipertrofia (Álvarez–Cobelas y Jacobsen 1992) que se caracteriza por concentraciones muy elevadas de nutrientes, así como de clorofila α (Clor- α), generalmente de origen fitoplanctónico. Lamentablemente, numerosos cuerpos de agua en México ya se encuentran en condiciones de hipertrofia y diversos lagos urbanos mexicanos son ejemplos típicos de este problema (Alcocer *et al.*, 1988; Quiroz del Campo 2014). Los lagos urbanos poseen características que los hacen únicos en cuanto a condiciones y problemática. Sin embargo y a pesar de ser cada vez más comunes, han recibido poca atención (Schueler y Simpson 2003), han sido escasamente estudiados y la dinámica del fitoplancton dentro de estos sistemas es poco conocida (Álvarez–Cobelas y Jacobsen 1992).

Productividad primaria

La estimación de la productividad primaria (PP) fitoplanctónica en un cuerpo acuático es de gran relevancia ya que es el proceso que transforma el carbono inorgánico a orgánico a través de la fotosíntesis, realizado por organismos fototróficos (algas y bacterias) que sintetizan materia orgánica (MO), introduciendo carbono en la red trófica acuática (Boracio-León *et al.* 2007, Roldán y Ramírez 2008).

A escala global, la evaluación de la PP es relevante, ya que tiene un papel muy importante en los ciclos biogeoquímicos (Falkowsky 1997) y en la captación de CO₂ de la atmósfera (Martínez-López *et al.* 2003). Este proceso depende de la cantidad de luz, de las fuentes de carbono, de los nutrientes y la temperatura (Kjerfve *et al.* 1994), y permite evaluar la capacidad de captación de energía de los organismos autótrofos en los sistemas acuáticos (Quiroz del Campo 2014). Este parámetro constituye la

base de la clasificación de sistemas acuáticos lacustres en distintas categorías de acuerdo con su estado trófico (Hakason y Boulion, 2002).

La producción primaria neta (PPN) se expresa como la cantidad de carbono incorporado u oxígeno disuelto liberado por unidad de superficie o volumen, es decir, la cantidad de materia orgánica resultante después de pérdidas causadas por la respiración o liberación extracelular de materia orgánica soluble. Por su parte, la producción primaria bruta (PPB) se define como la transformación autotrófica total de carbono inorgánico a formas de carbono orgánico, sin importar el destino.

La respiración (R) es la oxidación total del carbono orgánico a carbono inorgánico por acción de organismos, tanto heterótrofos como autótrofos (Cole *et al.* 2000). Los sistemas acuáticos donde la fotosíntesis supera la respiración total del plancton ($P > R$) son completamente autotróficos y actúan como productores de oxígeno y materia orgánica, considerándose sumideros de CO_2 ; por el contrario, los sistemas acuáticos donde la respiración excede la fotosíntesis ($P < R$) son heterótrofos netos y como resultado de ser consumidores de carbono orgánico, emiten CO_2 a la atmósfera, esto es, son fuentes de CO_2 (Carignan *et al.* 2000).

Biomasa fitoplanctónica

Para evaluar el estado ambiental de un sistema acuático se utilizan distintas variables, entre ellas algunas de carácter biológico relacionadas con los productores primarios. Estas variables incluyen dos tipos de estimaciones: la concentración de Clor- α y el biovolumen del fitoplancton (Hernández *et al.* 2011). La concentración de Clor- α se ha utilizado como indicador de la biomasa fitoplanctónica (Reynolds 2006)

y, por tanto, la cuantificación de su distribución resulta esencial para la determinación de la PP (Boracio-León *et al.* 2007).

La Clor- α como variable estimadora de la biomasa fitoplanctónica es utilizada comúnmente para evaluar el estado trófico de los ambientes acuáticos, ya que una de las consecuencias de la eutrofización es el crecimiento masivo de algas, lo que genera problemas de calidad de agua, en el suministro de agua potable y dificultades en los procesos de tratamiento, entre otros (Salas y Martino 2001).

JUSTIFICACIÓN

Alrededor de tres cuartas partes de la población mundial vive en ambientes urbanos que frecuentemente, se visualizan sólo como construcciones y estructuras; esto, en términos ecológicos, se conoce como “desiertos de asfalto”. Esta situación exige que se modifique la visión que se tiene de las ciudades y que se reevalúen y planifiquen en forma adecuada las áreas verdes. Por ello, es imprescindible lograr que los gobiernos y sistemas educativos enfatizen la trascendencia de tener parches/zonas de vegetación en los ambientes urbanos, no sólo por cuestiones recreativa y decorativas, sino por la importancia de los servicios ambientales que ofrecen, manteniendo bosques y lagos urbanos en buen estado (Martínez-Trinidad 2011).

Los bosques y lagos urbanos son relevantes por los muchos beneficios que proporcionan, como la sensación de bienestar al estar en contacto con ellas, la reducción de “islas de calor”, la modulación del microclima, la producción de oxígeno y como sumideros de CO₂; paralelamente a su función en la recreación, pueden también tener importancia como reservorios de agua en las ciudades (Cruz-Muñoz y Martínez-Arroyo 1999).

Las actividades urbanas actuales presentan efectos negativos que influyen directamente, tanto en la calidad del aire como del agua; la contaminación atmosférica y la eutrofización de sistemas acuáticos son la consecuencia de estos procesos (Díaz y Curiel 2012). El exceso de nutrientes puede afectar negativamente los procesos químicos y la dinámica de los sistemas acuáticos. La eutrofización de un lago tiene efectos que se perciben a simple vista, como agua turbia, mal olor, gran cantidad de productores primarios ya sean microscópicos o macroscópicos y sedimentos de color oscuro por la descomposición de la materia orgánica. En un ecosistema acuático eutrofizado ocurren dos fenómenos: se requiere más oxígeno

para descomponer la materia orgánica y aumenta la población de productores primarios (Chapa-Balcorta y Guerrero-Arenas 2010).

Los lagos urbanos del Bosque de Chapultepec presentan problemas de eutrofización debido tanto a cambios naturales como antropogénicos; a pesar de esto, no se ha realizado un análisis de la situación actual en la que los lagos se encuentran y como ha cambiado su estado trófico a través del tiempo, es entonces necesario evaluar los distintos parámetros ambientales del agua de estos cuerpos acuáticos para comprender los cambios generados en estos sistemas.

OBJETIVOS

General

Evaluar el metabolismo lacustre y la biomasa fitoplanctónica de los tres lagos urbanos del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México, a lo largo de un ciclo anual.

Particulares

- Evaluar las principales variables ambientales acuáticas (físicas y químicas) en los tres lagos de Chapultepec a lo largo de un ciclo anual.
- Evaluar las tasas de producción primaria bruta (PPB), producción primaria neta (PPN) y respiración (R) en los tres lagos de Chapultepec a lo largo de un ciclo anual.
- Determinar la biomasa fitoplanctónica (clorofila α) en los tres lagos a lo largo de un ciclo anual.
- Relacionar las variables ambientales con las bióticas.

ÁREA DE ESTUDIO

El Bosque de Chapultepec está situado al oeste de la Ciudad de México; se ubica entre los 19°24' y los 19°26' de latitud norte y los 99°11' y 99°13' de longitud oeste, a una altitud de 2,240 m s.n.m. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con valores medios anuales de precipitación entre 600 y 900 mm y una temperatura media de entre 12°C y 18°C (INEGI 2009).

Los lagos de Chapultepec son tres: el Lago Viejo en la 1ª sección y los lagos Mayor y Menor en la 2ª sección del Bosque de Chapultepec (Fig. 1). Para algunos, el Lago Viejo está conformado a su vez por dos lagos: el Lago Mayor y el Lago Menor de la 1ª sección. El mayor de los tres lagos es el Lago Viejo con un área de 60,240 m², una longitud máxima de 432 m y una profundidad máxima de 1.8 m. Le sigue el Lago Mayor con un área de 58,200 m², una longitud máxima de 442 m y una profundidad de 1.3 m. Finalmente, el Lago Menor tiene un área de 27,600 m², una longitud máxima de 264 m y 1.2 m de profundidad máxima. Los tres lagos presentan una profundidad promedio de un metro. En el Lago Viejo existen 4 islas, dos en cada porción, el Mayor presenta dos islas en la porción sur, mientras que el Menor presenta siete pequeñas islas distribuidas a lo largo de éste (Alcocer *et al.* 2007).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ubicaron seis estaciones de muestreo en los lagos de Chapultepec, tres en el Lago Viejo de la 1ª sección del Bosque de Chapultepec (estación E1 al sur, estación E2 al centro y estación E3 al norte) y tres en los dos lagos de la 2ª sección del Bosque de Chapultepec: estaciones E4 (al norte) y E5 (al sur) en el Lago Mayor y estación E6 al centro del Lago Menor (Fig. 1). Se realizaron 12 muestreos mensuales a lo largo del ciclo anual abril 2015 - abril 2016 en estas estaciones. El muestreo se realizó en un horario de entre las 10:00 y las 17:00 h.



Figura 1. Ubicación de las estaciones de muestreo en los lagos de las dos secciones del Bosque de Chapultepec. (estaciones de muestreo E1 a E6). (Tomado de Alcocer 2015).

Parámetros ambientales

Para la evaluación de los parámetros ambientales del agua de los lagos del Bosque de Chapultepec fueron muestreadas primero las estaciones E1, E2 y E3 del Lago Viejo, posteriormente las estaciones E4 y E5 del Lago Mayor y finalmente la E6 del Lago Menor, siempre en el mismo orden.

Se midió la profundidad de cada estación y la profundidad del disco de Secchi (Z_{DS}), método que indica la profundidad de visibilidad vertical de un objeto bajo el agua y provee una medida de la transparencia de los sistemas acuáticos (Boyd y Tucker 1992), es decir, la parte de la columna de agua donde es posible que ocurra la fotosíntesis.

Posteriormente, se midieron en campo y cada 20 cm de profundidad: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH y conductividad específica estandarizada a 25°C (K_{25}) con una sonda multiparamétrica marca YSI modelo 85, calibrada según manual. La concentración de oxígeno disuelto (OD mg L^{-1}) y el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto ($\% \text{ Sat. OD}$), con un oxímetro marca HACH HQ40d, con una sonda de oxígeno disuelto luminiscente (LDO) LDBO101.

En cuanto a la concentración de nutrientes, se tomaron muestras compuestas de la columna de agua con un muestreador tubular de 1m de longitud; éstas se mantuvieron en refrigeración a 4°C y se analizaron tan pronto como se llegó al Laboratorio del Grupo de Investigación en Limnología Tropical (GILT) de la FES Iztacala, UNAM. Los análisis incluyeron: concentración de nitrógeno de nitratos (N-NO_3), de nitritos (N-NO_2), de amonio (N-NH_3), nitrógeno total (N-Total), nitrógeno inorgánico disuelto (NID), fósforo total (P-Total) y fósforo soluble reactivo (P-PO_4).

Producción primaria

Para la medición de la PP se utilizó el método de botellas claras y oscuras, con el cual se evalúan las tasas de cambio en la concentración de oxígeno disuelto en un determinado tiempo. Se colocaron dos soportes sobre la superficie de las estaciones de muestreo en los lagos. Antes de que las botellas se colocaran en los soportes e iniciara la incubación, se midió la concentración de oxígeno disuelto inicial en cada una de ellas con ayuda de un oxímetro. Esta concentración se utilizó como la concentración de oxígeno disuelto (OD) al tiempo 0. Se incubaron las botellas entre 20 y 30 minutos, y posteriormente, se recuperaron y se midió la concentración de OD nuevamente al tiempo final. Con base en estas mediciones se determinó la producción primaria (Gaarder y Gran 1927, Wetzel y Likens 1979).

Las tasas de PPB, PPN y R se calcularon usando la variación en la concentración de OD en las botellas claras y oscuras, siguiendo la propuesta de Wetzel y Likens (1979). Para el cálculo se usaron las siguientes ecuaciones:

$$A) \text{ PPB (mg O}_2\text{ m}^{-3}\text{ h}^{-1}) = \frac{\text{BC final} - \text{BO final}}{T}$$

$$B) \text{ PPN (mg O}_2\text{ m}^{-3}\text{ h}^{-1}) = \frac{\text{BC final} - \text{BC inicial}}{T}$$

$$C) \text{ R (mg O}_2\text{ m}^{-3}\text{ h}^{-1}) = \frac{\text{BO inicial} - \text{BO final}}{T}$$

Donde:

BC inicial = concentración de OD en la botella clara antes de la incubación

BC final = concentración de OD en la botella clara después de la incubación

BO inicial = concentración de OD en la botella oscura antes de la incubación

BO final = concentración de OD en la botella oscura después de la incubación

T = tiempo de incubación

Para el cálculo de los valores de carbono se utilizaron los factores de corrección de 0.375 para la equivalencia entre los pesos moleculares de oxígeno y carbono, y el de 1.2 para el coeficiente fotosintético, según lo sugiere Wetzel (2001) con las siguientes formulas:

$$A) \text{ PPB (mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}) = \frac{(\text{BC final} - \text{BO final}) * (1000) * (0.375)}{1.2 * T}$$

$$B) \text{ PPN (mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}) = \frac{(\text{BC final} - \text{BC inicial}) * (1000) * (0.375)}{1.2 * T}$$

$$C) \text{ R (mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}) = \frac{(\text{BO inicial} - \text{BO final}) * (1000) * (0.375)}{T}$$

Biomasa fitoplanctónica

Para la determinación de la biomasa fitoplanctónica se tomó como indicador la concentración de la Clor- α (Arar y Collins 1997). Se tomaron muestras compuestas de la columna de agua, las cuales se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio Whatman GF/F de 13 mm de diámetro, con una apertura de poro nominal de 0.7

μm . Se utilizó un macerador de tejidos y acetona al 90% para extraer la Clor- α de los filtros, posteriormente se mantuvieron a una temperatura de 4°C durante un período entre 18 a 20 horas en oscuridad. El producto de la maceración fue centrifugado por 25 minutos a 3000 rpm.

La Clor- α extraída fue leída en un fluorómetro digital Turner Designs 10-AU. Las lecturas que se obtuvieron fueron convertidas a μg de Clor- α por litro, utilizando la siguiente fórmula incluida en el método EPA 445.0 (Arar y Collins 1997):

$$\text{Clor } \alpha = \frac{(\text{Ce} * \text{Ve} * \text{FD})}{\text{Vm}}$$

Donde:

Clor- α = concentración de Clor- α ($\mu\text{g L}^{-1}$)

Ce = concentración de Clor- α ($\mu\text{g L}^{-1}$) obtenida de la solución extractora

Ve = es el volumen (mL) utilizado para la extracción

FD = factor de dilución

Vm = volumen de la muestra de agua (mL).

Análisis estadístico

Los datos se introdujeron en una hoja de cálculo de Excel, para obtener los gráficos de cada uno de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, así como promedios anuales y desviación estándar (DE) de cada uno de ellos.

La primera parte del análisis estadístico consistió en la búsqueda de diferencias significativas a lo largo del período de estudio entre las seis estaciones de los lagos, respecto a cada parámetro analizado.

Posteriormente, para cada caso, se realizó un análisis de varianza (verificando previamente los supuestos de normalidad y homocedasticidad) y prueba de Tukey con ayuda del programa STATGRAPHICS 5. Para analizar la relación entre los parámetros fisicoquímicos y biológicos se realizó una prueba de correlación de Spearman.

RESULTADOS

Caracterización ambiental

❖ Temperatura

La temperatura de los lagos del bosque de Chapultepec presentó una tendencia a disminuir paulatinamente desde la superficie hacia el fondo de los sistemas (Fig. 2).

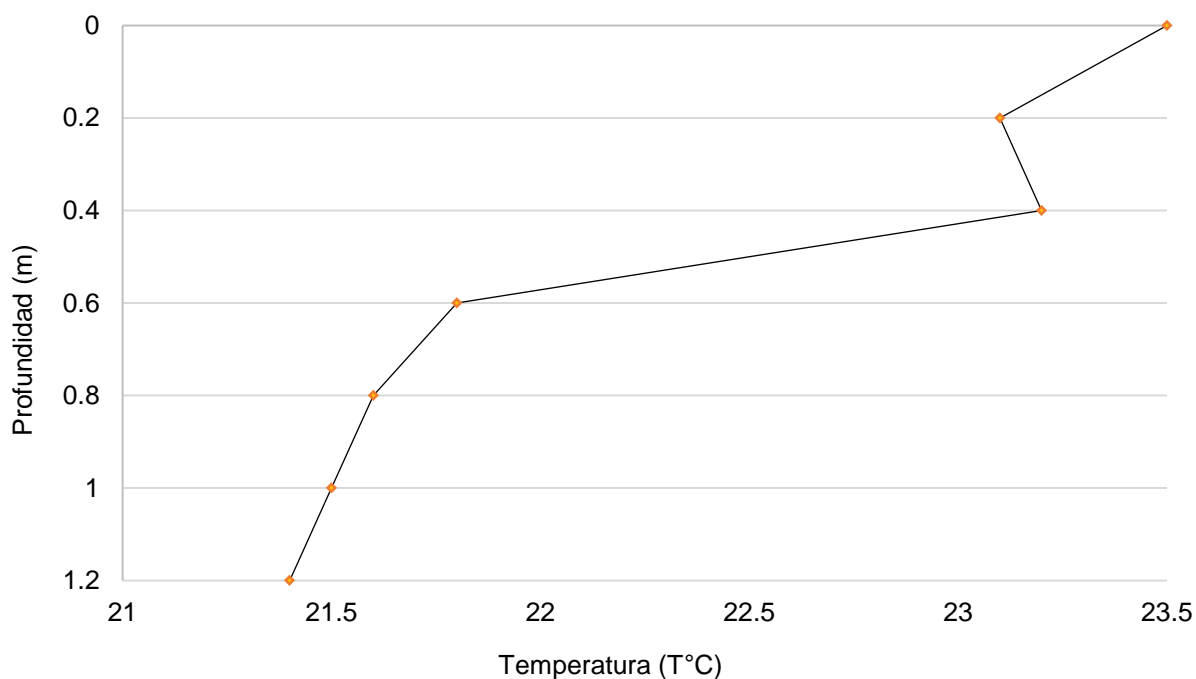


Figura 2. Perfil característico de temperatura (°C) de los lagos del Bosque de Chapultepec (agosto 2016).

La temperatura registrada en los tres lagos del Bosque de Chapultepec durante el período de estudio se ubicó entre los 11.2 y 26.7°C (Tabla 1), con un patrón estacional en el que los valores de temperatura más bajos para las seis estaciones se registraron en enero y los más elevados, en general, en el mes de agosto (Fig. 3).

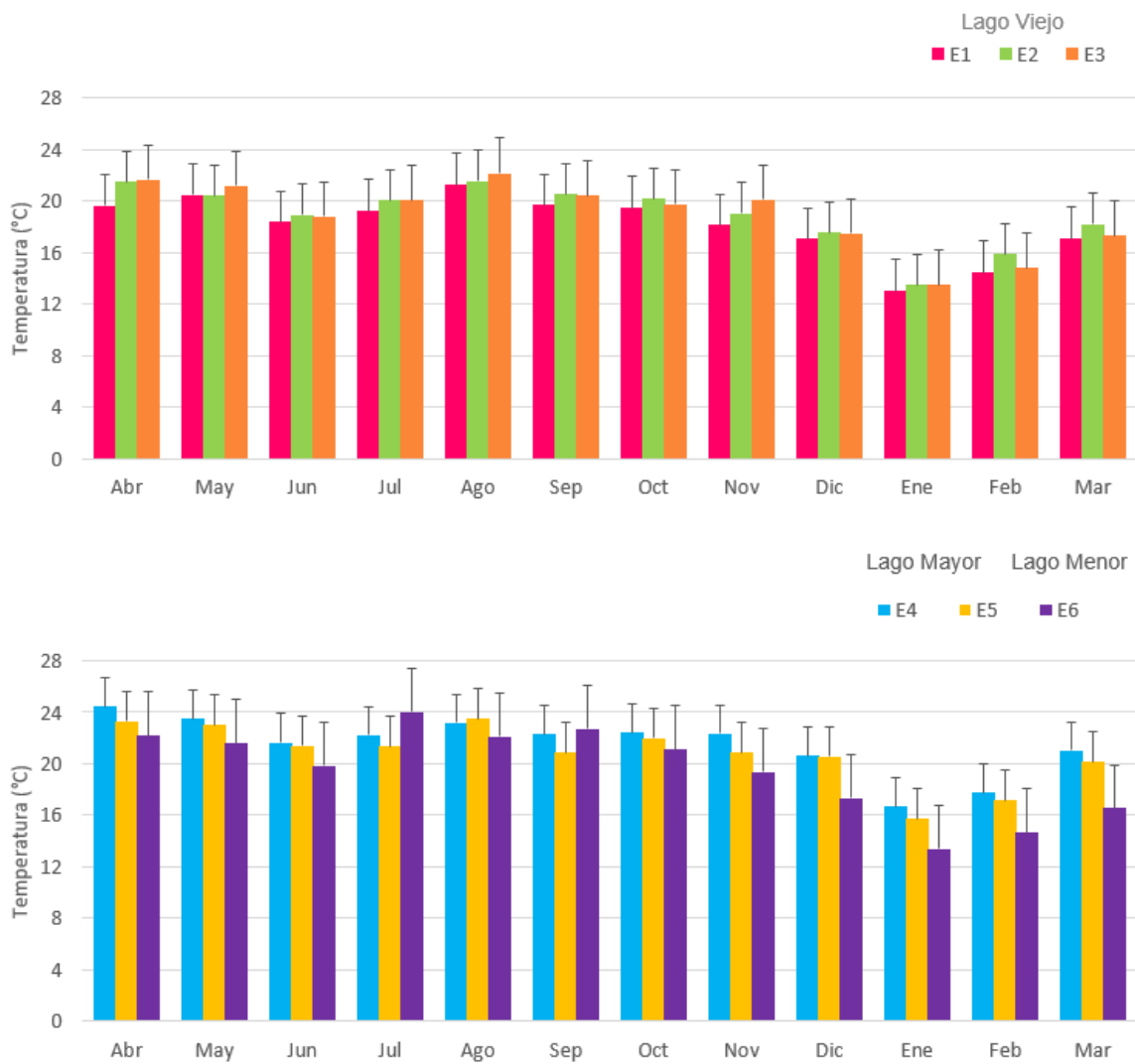


Figura 3. Temperatura (promedio mensual \pm D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El promedio anual de temperatura para las estaciones 1, 2 y 3 del Lago Viejo fueron $18.1 \pm 2.7^\circ\text{C}$, $18.9 \pm 2.4^\circ\text{C}$ y $18.96 \pm 2.6^\circ\text{C}$, respectivamente (Fig. 4). Los valores máximos de temperatura superficial para el Lago Viejo se registraron en el mes de mayo para la E1 con 25.8°C y para las E2 y E3 durante el mes de agosto con 22.4°C en ambas estaciones. Los registros de temperatura más baja se registraron hacia el

fondo de estas estaciones durante el mes de enero de 2016, cuando la E1 registró 12°C, la E2 una temperatura de 12.9°C y la E3 12.8°C.

En el Lago Mayor, el promedio de temperatura para las E4 y E5 fue de $21.4 \pm 2.4^\circ\text{C}$ y $20.8 \pm 2.8^\circ\text{C}$, respectivamente (Fig. 4). La temperatura máxima registrada fue durante el mes de mayo con 25.2°C en la E4 y para la E5 en el mes de agosto con 25.7°C ; al igual que en el Lago Viejo, la temperatura mínima en ambas estaciones se registró en el mes de enero con 15.6°C y 14.2°C , respectivamente.

En el Lago Menor (E6), el promedio de temperatura fue de $19.02 \pm 3.9^\circ\text{C}$ (Fig. 4); la temperatura máxima correspondió al mes de agosto con 26.7°C y la mínima en el mes de enero con 11.2°C (cabe resaltar que estos valores de temperatura fueron tanto el más alto como el más bajo registrados durante el período de estudio).

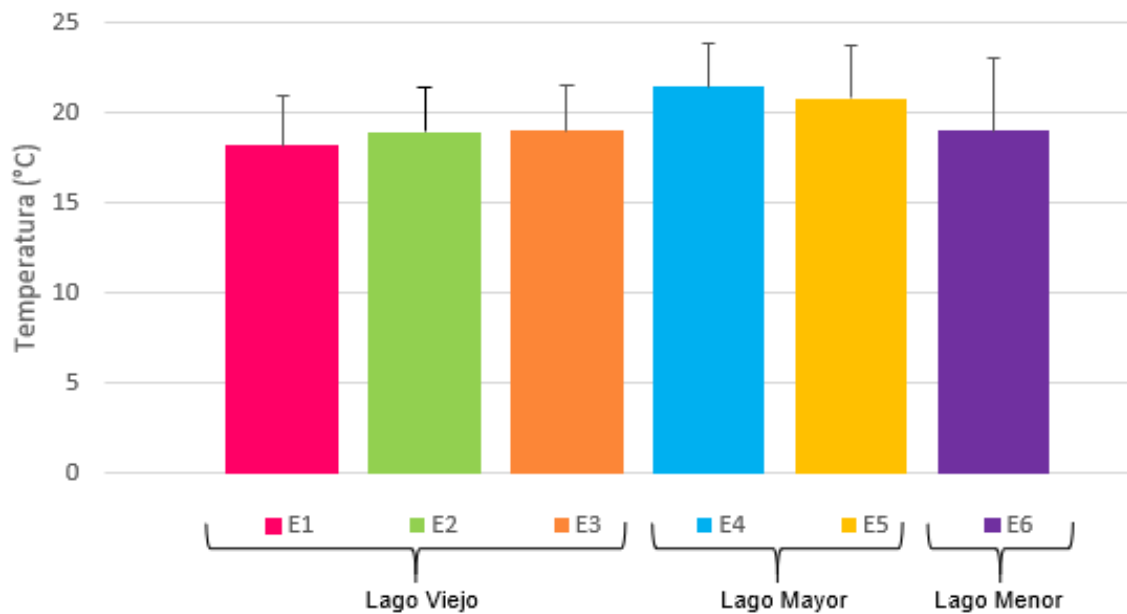


Figura 4. Temperatura (promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Se identificaron diferencias significativas en la temperatura promedio anual entre las seis estaciones de los tres lagos ($P < 0.05$); en este caso la E4 mostró mayor diferencia respecto a las E1, E2 y E3; cabe destacar que la E4 presentó en general los valores más elevados de temperatura en relación con las estaciones de los lagos Viejo y Menor.

❖ Oxígeno disuelto (OD)

A lo largo del período de estudio se observó la presencia constante de OD en toda la columna de agua en los tres lagos de Chapultepec. Aunque la tendencia de la concentración de OD fue disminuir de forma paulatina desde la superficie y hacia el fondo (Fig. 5).

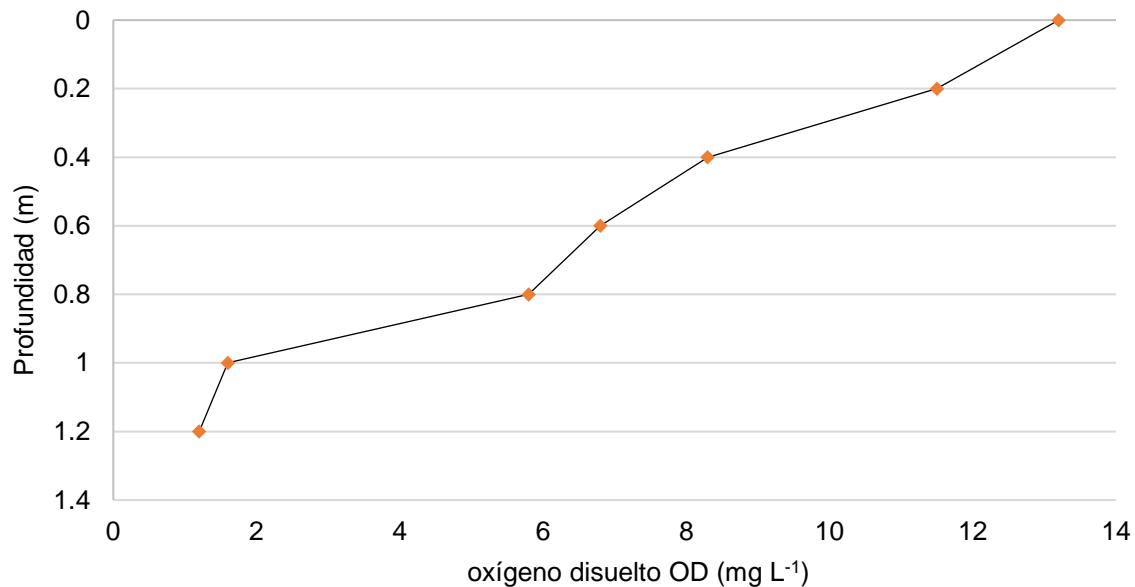


Figura 5. Perfil Característico de oxígeno disuelto (mg L^{-1}) en los lagos de Chapultepec (agosto 2015).

La concentración de OD varió entre 0.5 y 25.5 mg L⁻¹ (Tabla 1). Los valores puntuales más bajos de este parámetro se registraron en general durante el mes de septiembre y los más elevados generalmente durante el mes de mayo (Fig. 6).

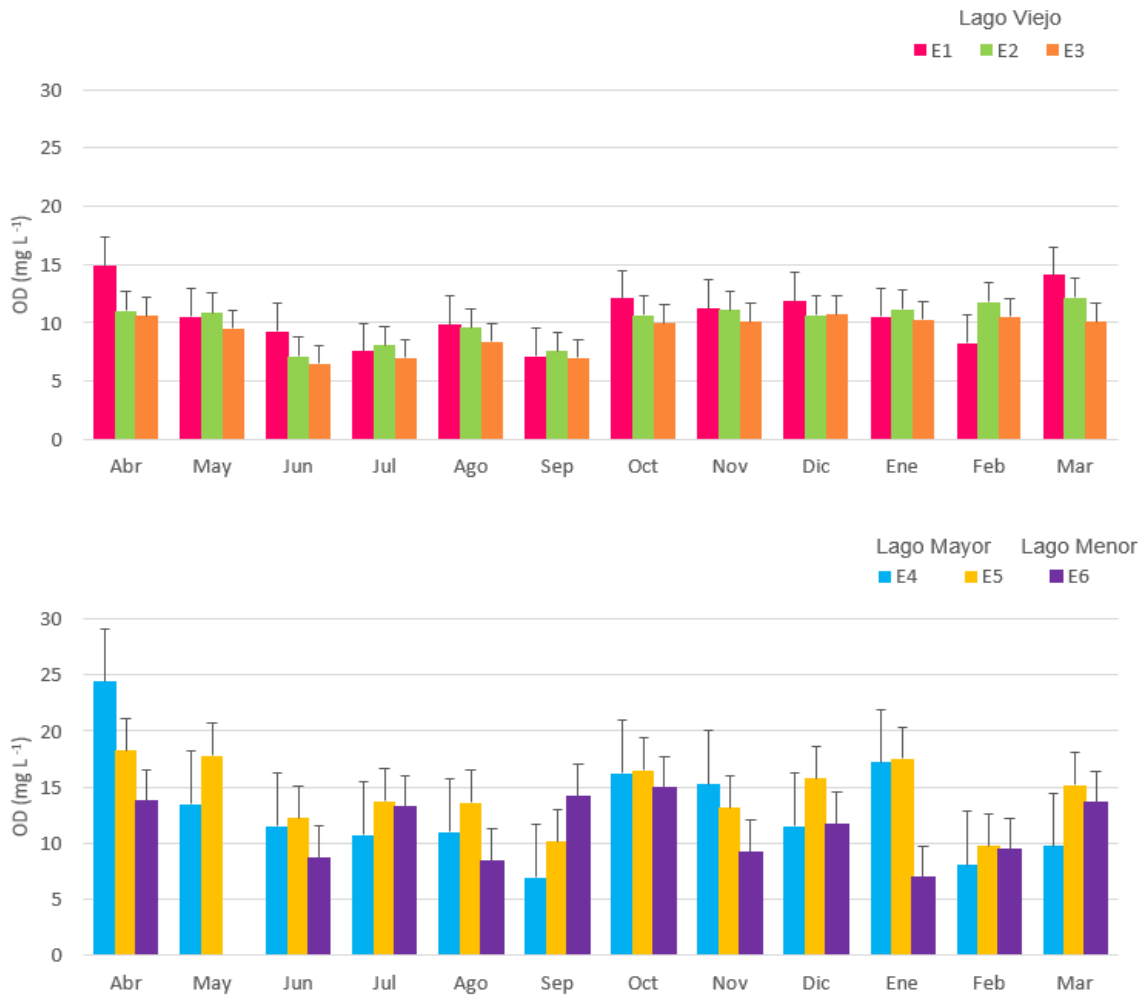


Figura 6. Concentración de oxígeno disuelto (OD mg L⁻¹) (promedio mensual ± D.E.) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El promedio anual de la concentración de OD para las E1, E2 y E3 del Lago Viejo fue de 10.5 ± 4.8 mg L⁻¹, 10.08 ± 3.6 mg L⁻¹ y 9.1 ± 2.6 mg L⁻¹, respectivamente (Fig. 7). Los valores puntuales máximos de concentración de OD para el Lago Viejo se registraron en el mes de mayo para las E1 y E2 con 22.9 mg L⁻¹ y 19.4 mg L⁻¹,

respectivamente y para la E3 en el mes de octubre con 15.4 mg L⁻¹. Los registros de concentración mínima puntual fueron durante el mes de mayo para la E1 con 0.9 mg L⁻¹, para las E2 y E3 en el mes de junio con 0.5 mg L⁻¹ (esta última fue la concentración más baja de todo el período de estudio) y 1.1mg L⁻¹, respectivamente.

Para el Lago Mayor se registró un promedio de OD para las E4 y E5 de 12.6 ± 5.07 mg L⁻¹ y 14.4 ± 5.4 mg L⁻¹, respectivamente (Fig. 7). La concentración de OD máxima puntual fue en el mes de abril con 25.5 mg L⁻¹ para la E4 (valor más elevado de OD registrado en el período de estudio) y para la E5 en el mes de mayo con 24.67 mg L⁻¹. En cuanto a los registros de concentración mínima puntuales se observaron en el mes de agosto con 1.2 mg L⁻¹ para la E4 y 1.0 mg L⁻¹ para la E5 durante septiembre.

Con respecto a la E6 el promedio anual registrado fue de 11.4 ± 5.3 mg L⁻¹ (Fig. 7); la concentración máxima puntual se registró en el mes de octubre con 21.8 mg L⁻¹ y la mínima puntual en el mes de agosto con 1.2 mg L⁻¹.

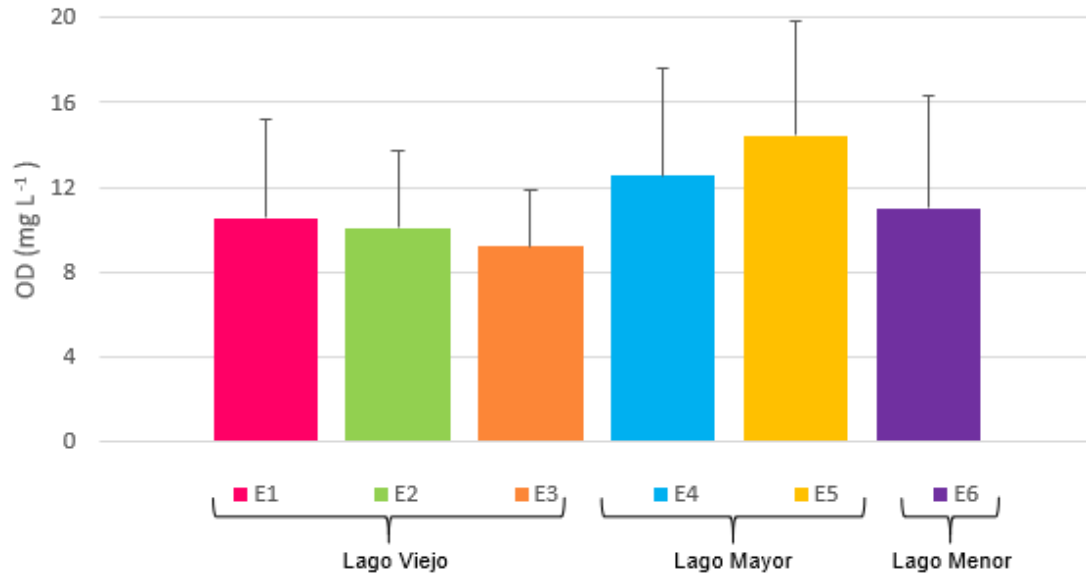


Figura 7. Concentración de oxígeno disuelto (OD mg L⁻¹) (promedio anual ± D.E.) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

La concentración anual de OD en las seis estaciones de los lagos de Chapultepec, muestran diferencias significativas ($P < 0.05$). Para este caso se muestran diferencias entre las E1, E2 y E3 con respecto a las E4 y E5 y entre la E5 y la E6. Las estaciones E4 y E5 presentaron los valores más elevados de concentración de oxígeno; es por esto, que las estaciones de los Lagos Viejo y Menor son significativamente distintas a las del Lago Mayor. Además, se presentaron, al igual que con la temperatura, los valores más elevados en la E5.

❖ Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% Sat. OD.)

La distribución vertical del % Sat. OD fue similar a la del OD; el mayor porcentaje se presentó en la parte superficial de los lagos y el menor hacia el fondo (Fig. 8).

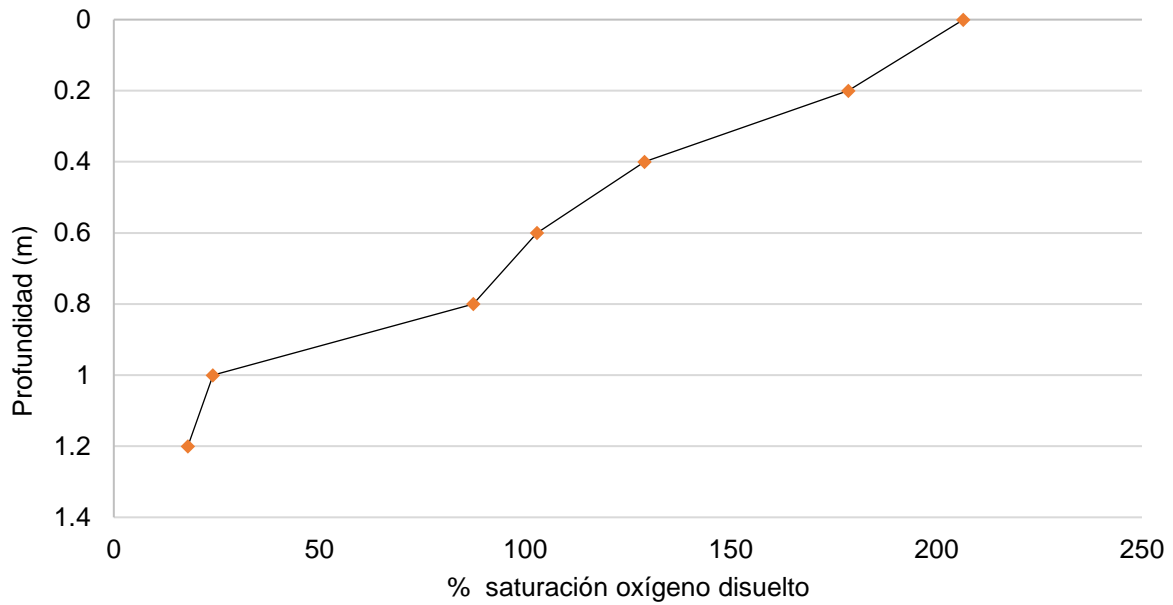


Figura 8. Perfil característico del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (% Sat. OD.) en los lagos de Chapultepec (agosto 2016).

A lo largo del período de estudio se observó un intervalo en el % Sat. OD en los tres lagos de Chapultepec de entre 7.1 y 313% (Tabla 1); el comportamiento de este parámetro es similar al de concentración de OD, en el que los valores puntuales más elevados se registraron en el mes de septiembre y los más bajos durante junio y septiembre (Fig. 9).

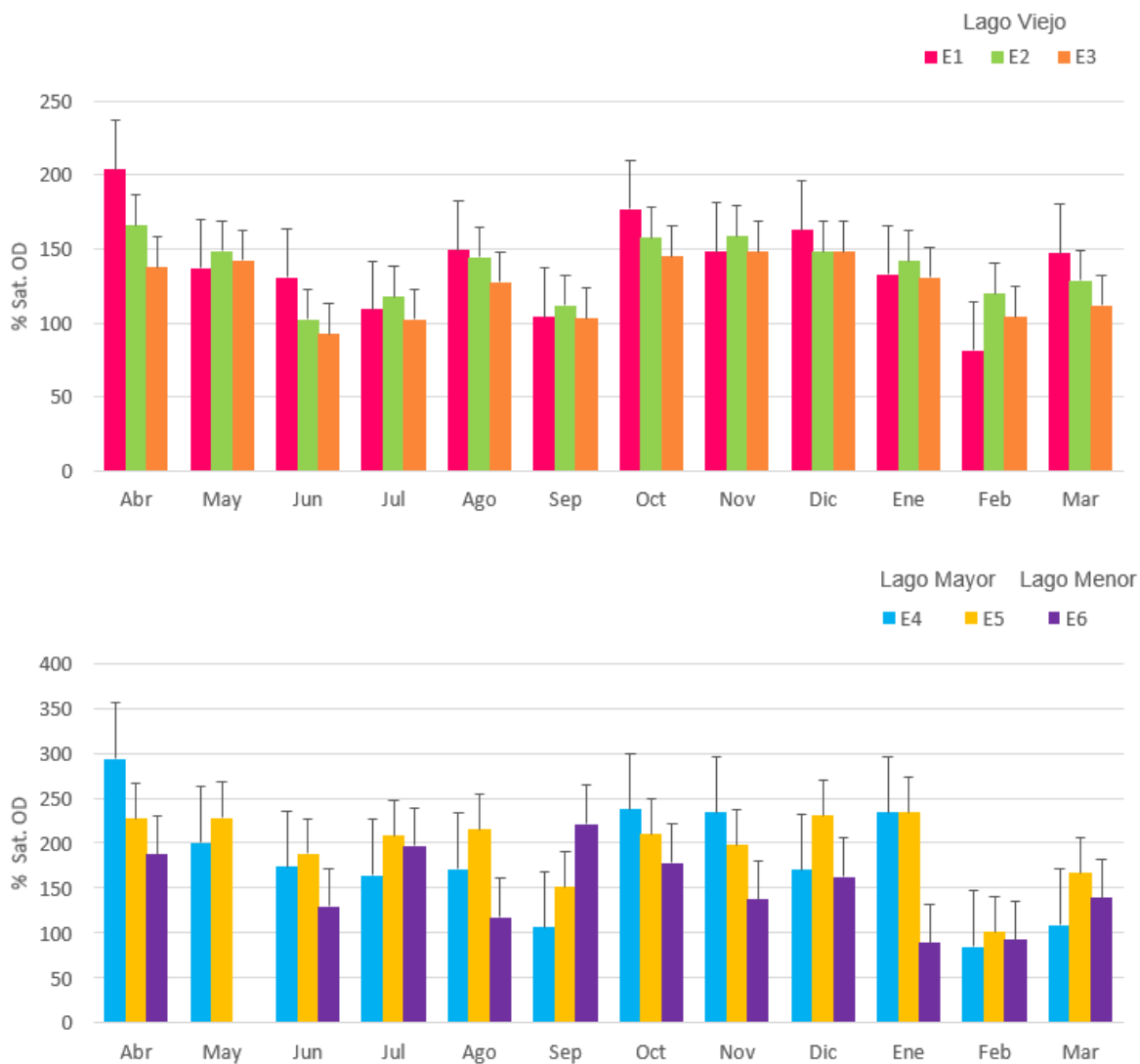


Figura 9. Porcentaje de saturación de Oxígeno disuelto (% Sat. OD.) (promedio mensual \pm D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Para el caso del Lago Viejo, en la E1 el promedio anual fue de 138 ± 62 % (Fig. 10), para la E2 el promedio anual fue de 136.4 ± 50 % y para la E3 124.07 ± 39 %. Los porcentajes de saturación máximos puntuales fueron registrados durante el mes de septiembre para las estaciones E1, E2 y E3 y fueron 292.4, 258.6 y 227.8 % respectivamente y los mínimos registrados fueron para la E1 en el mes de mayo 14 %, para la E2 y E3 durante junio con 7.1 % y 15.5 %, respectivamente.

En el Lago Mayor, el promedio anual de % Sat. OD. para la E4 fue de 177.64 ± 71 %, para la E5 el promedio anual fue de 196.1 ± 74 %. Los registros máximos puntuales para ambas estaciones fueron de 310.7 % en el mes de noviembre para la E4 y 313.2 % en el mes de agosto para la E5, este último fue el valor más elevado de las seis estaciones a lo largo del periodo de estudio. Los valores mínimos para la E4 y E5 fueron durante el mes de septiembre con 18 % y 14.6 %, respectivamente. El promedio anual de la E6 del Lago Menor fue de 148.6 ± 85 % (Fig. 10), el valor máximo fue de 300.6 % en el mes de noviembre y un mínimo en el mes de enero de 15.8 %.

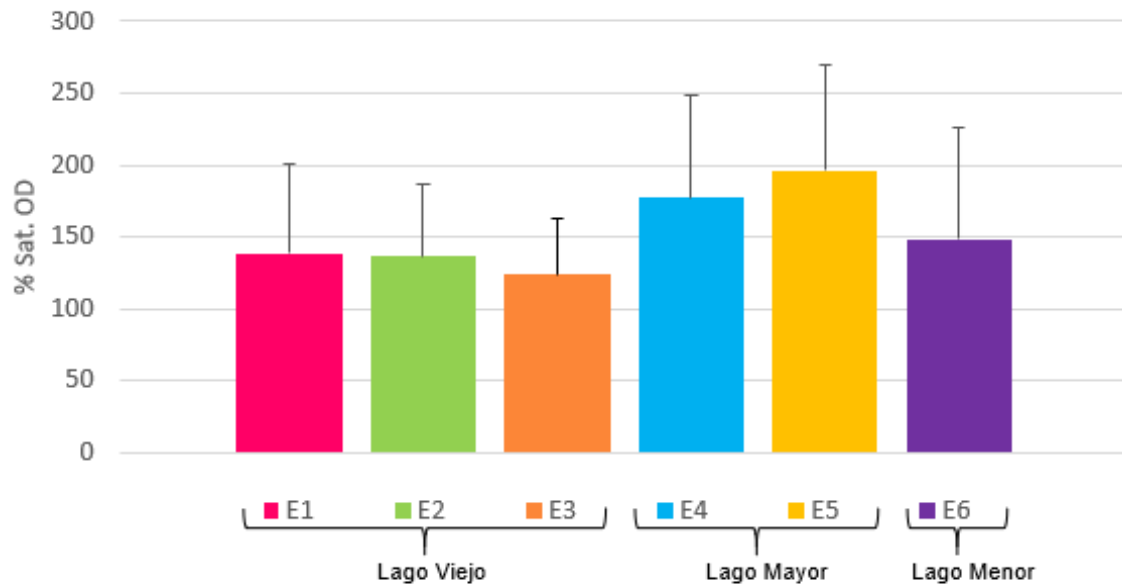


Figura 10. Figura 10. Porcentaje de saturación de Oxígeno disuelto (% Sat. OD.) (promedio anual \pm D.E.) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Entre las seis estaciones existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los valores de % Sat. OD. Se muestran diferencias entre las E1, E2 y E3 respecto a las E4

y E5, y entre las E4 y E5 con respecto a la E6, estas diferencias, son similares a las registradas para la concentración de OD.

❖ Profundidad del Disco de Secchi (Z_{DS})

A lo largo del período de estudio, la profundidad del disco de Secchi (Z_{DS}) se ubicó entre los 0.02 y 0.4 m de profundidad para los tres lagos (Tabla 1). La E1 del Lago Viejo tuvo, en general, la mayor Z_{DS} a lo largo del período de estudio al igual que la E4 del Lago Mayor (Fig. 11).

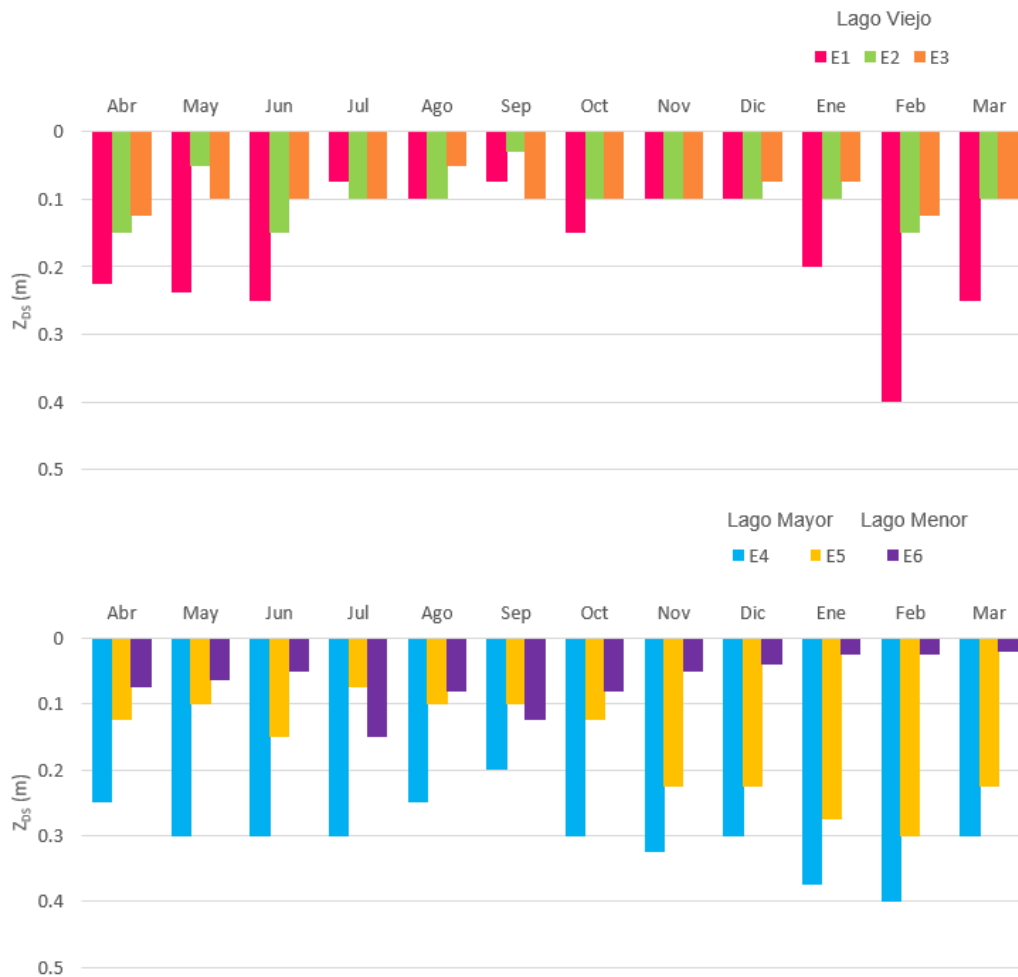


Figura 11. Profundidad mensual del disco de Secchi (Z_{DS} m) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Con respecto al Lago Viejo, en la E1 se registró una Z_{DS} máxima a 0.4 m de profundidad y una mínima de 0.07 m, para la E2 una máxima de 0.15 m y una mínima de 0.03 m. En cuanto a la E3 la profundidad máxima de Z_{DS} alcanzó los 0.12 m y una mínima de 0.05 m (Tabla 1).

En cuanto al Lago Mayor, la E4 es la que presentó una mayor Z_{DS} respecto a la E5 con 0.4 m y una mínima de 0.2 m. Para la E5 la Z_{DS} máxima fue de 0.30 m y la mínima de 0.07 m. Para el caso de la E6 la Z_{DS} se ve reducida hasta 0.02 m y una máxima de 0.15 m (Tabla 1).

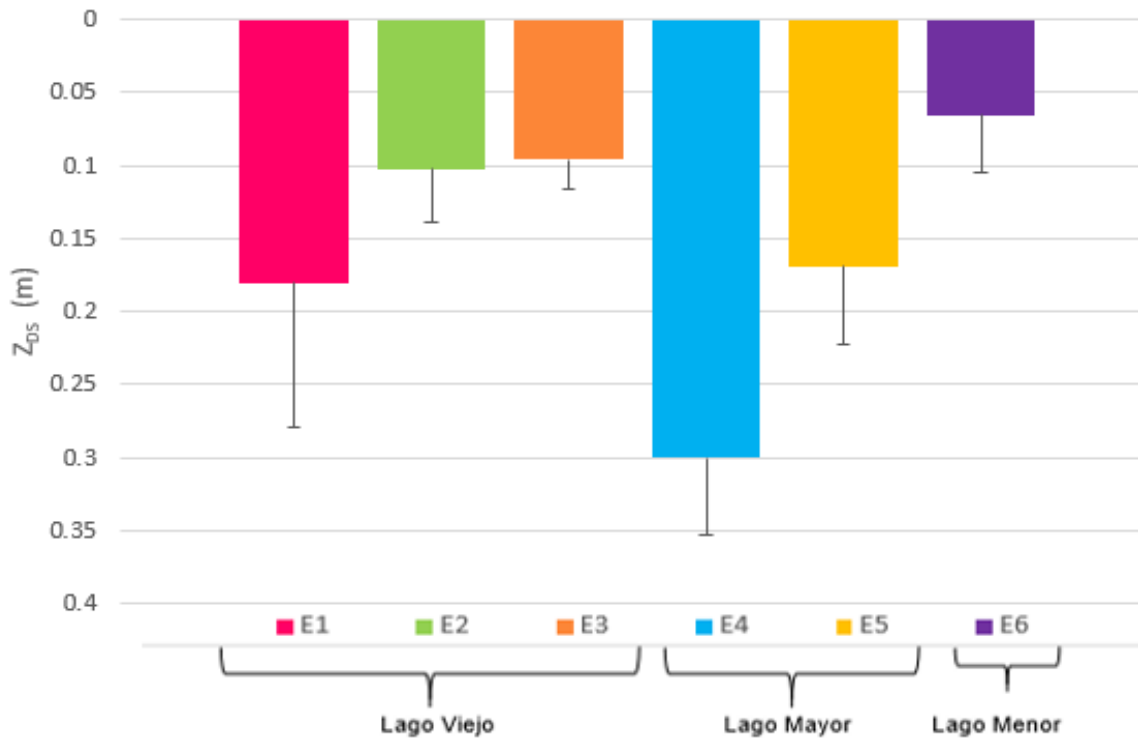


Figura 12. Profundidad del disco de Secchi (Z_{DS} m) (promedio anual \pm D.E.) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Para la Z_{DS} se observaron diferencias significativas entre todas las estaciones ($P < 0.05$).

❖ Conductividad eléctrica (K_{25})

La conductividad eléctrica, en general registró valores más elevados hacia el fondo de los lagos y más bajos en la superficie (Fig. 13).

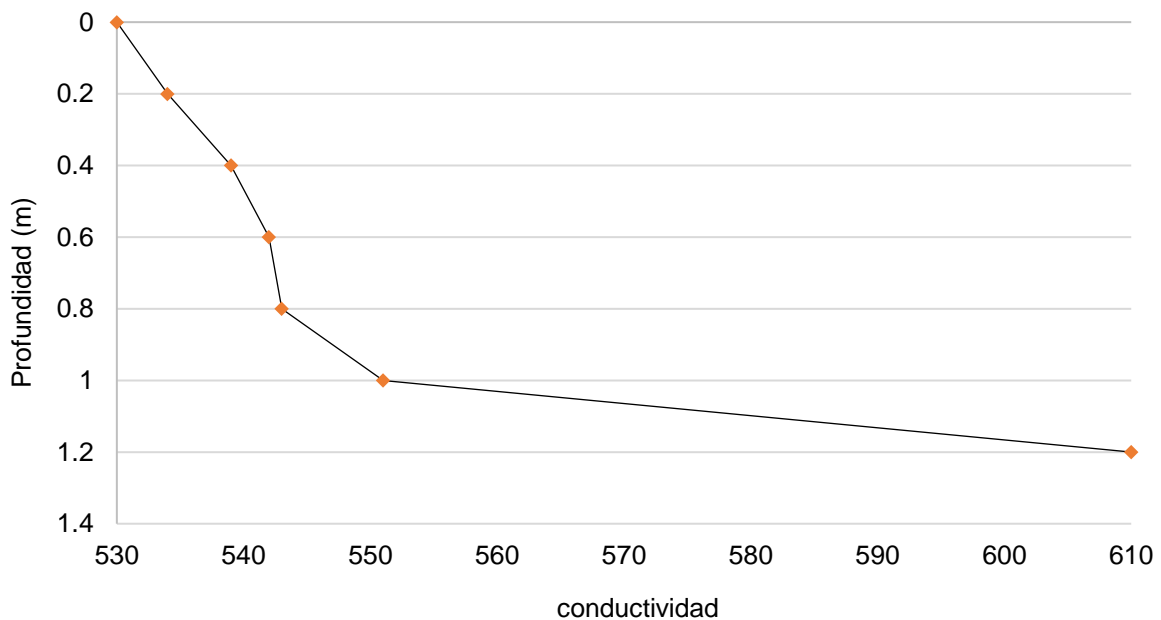


Figura 13. Perfil característico de la conductividad (K_{25}) en los lagos de Chapultepec (agosto 2016).

Este parámetro ambiental, se ubicó entre los 336 y $669 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabla 1). La variación anual de la K_{25} para las seis estaciones de los lagos no presenta, aparentemente, algún patrón temporal; sin embargo, al igual que la Z_{DS} , la E1 tuvo valores más elevados respecto a las estaciones E2 y E3, así como la E4, en general, también tuvo los valores más elevados (Fig. 14).

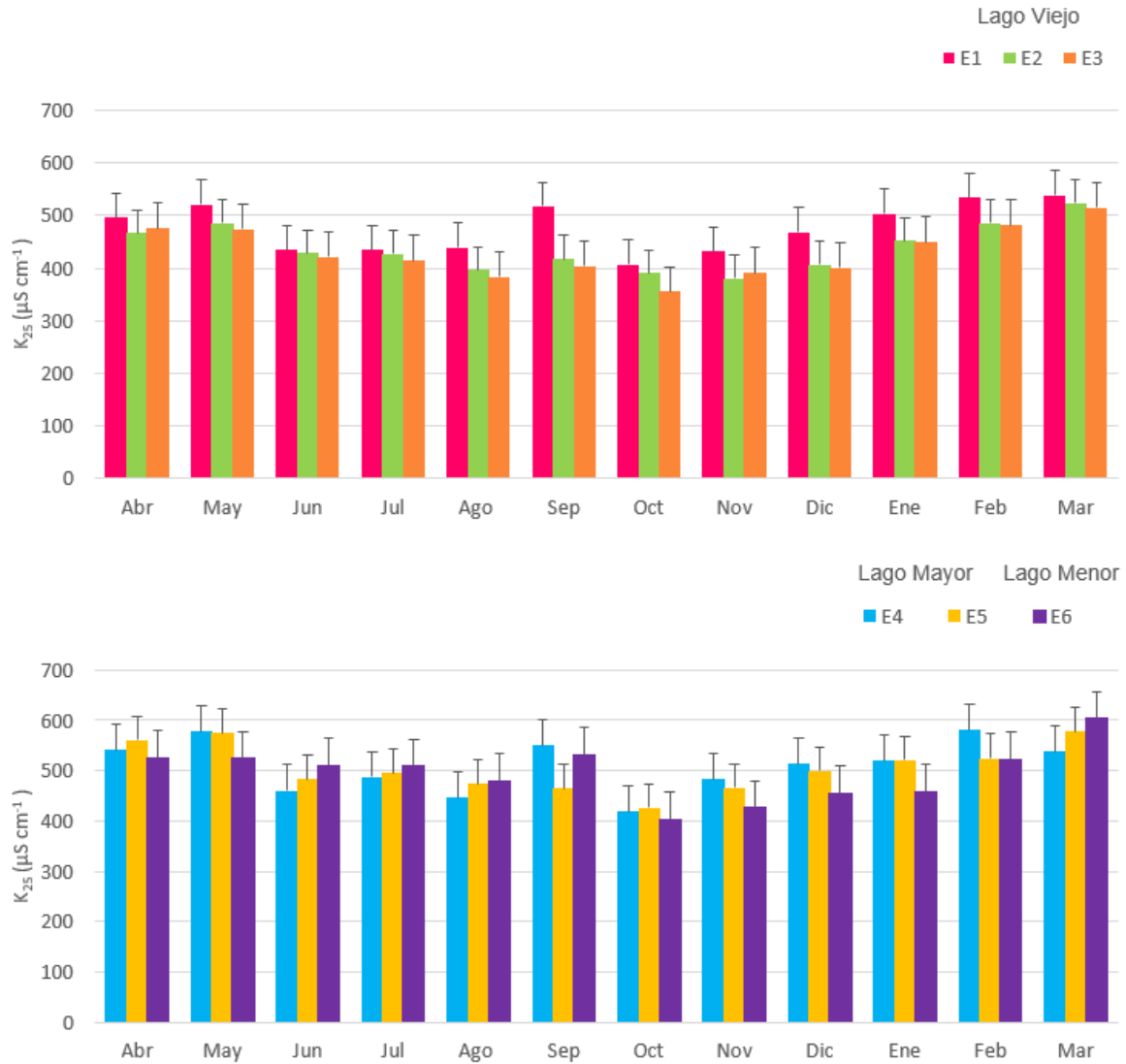


Figura 14. Conductividad (K_{25}) (promedio mensual \pm D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El Lago Viejo tuvo un promedio anual para la E1 de $477 \pm 51 \mu\text{S cm}^{-1}$, la E2 un promedio de $437 \pm 45 \mu\text{S cm}^{-1}$ y la E3 un promedio anual de $430 \pm 46 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Fig. 15). En la E1 se registró un valor de K_{25} máximo puntual de $614 \mu\text{S cm}^{-1}$ durante el mes de septiembre, para la E2 y E3 durante el mes de marzo se registraron los valores máximos de 544 y $520 \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente. Los valores mínimos para

las estaciones E1, E2 y E3 se obtuvieron en el mes de octubre con 381, 356 y 335 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente (Tabla 1).

En cuanto al Lago Mayor, el promedio anual fue de $509 \pm 51 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $504 \pm 49.2 \mu\text{S cm}^{-1}$ para las E4 y E5, respectivamente (Fig. 15), la E4 es la que presentó una mayor K_{25} respecto a la E5, con una máxima de $610 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el mes de septiembre y un mínimo de $418 \mu\text{S cm}^{-1}$ para el mes de octubre. Para la E5, el máximo registrado fue de $599 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el mes de marzo y un mínimo de $391 \mu\text{S cm}^{-1}$ para el mes de octubre.

Para el caso de la E6, el promedio anual fue de $487 \pm 66.4 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Fig. 15), el mayor valor de conductividad se registró en el mes de marzo con $669 \mu\text{S cm}^{-1}$ y el menor en el mes de octubre con $329 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabla 1).

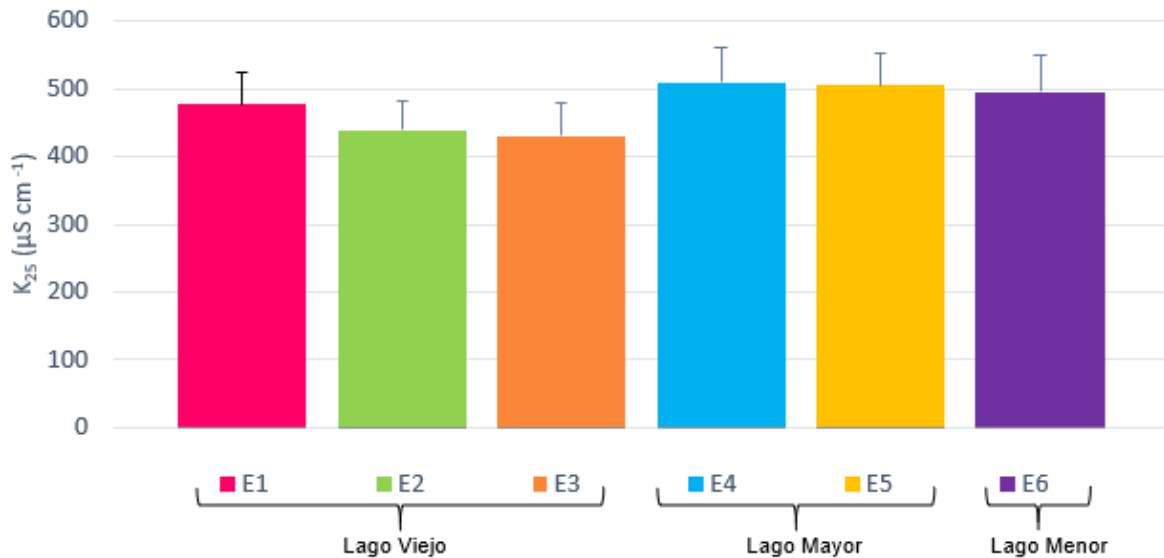


Figura 15. Conductividad (K_{25}) (promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

La K_{25} anual de las estaciones de los lagos presenta diferencias significativas registradas con el análisis de varianza ($P < 0.05$). Se observaron diferencias entre las E2 y E3 respecto a las E4, E5 y E6 y entre las E1 y E3.

❖ pH

El perfil general de pH muestra una tendencia a disminuir hacia el fondo de los lagos (Fig. 16).

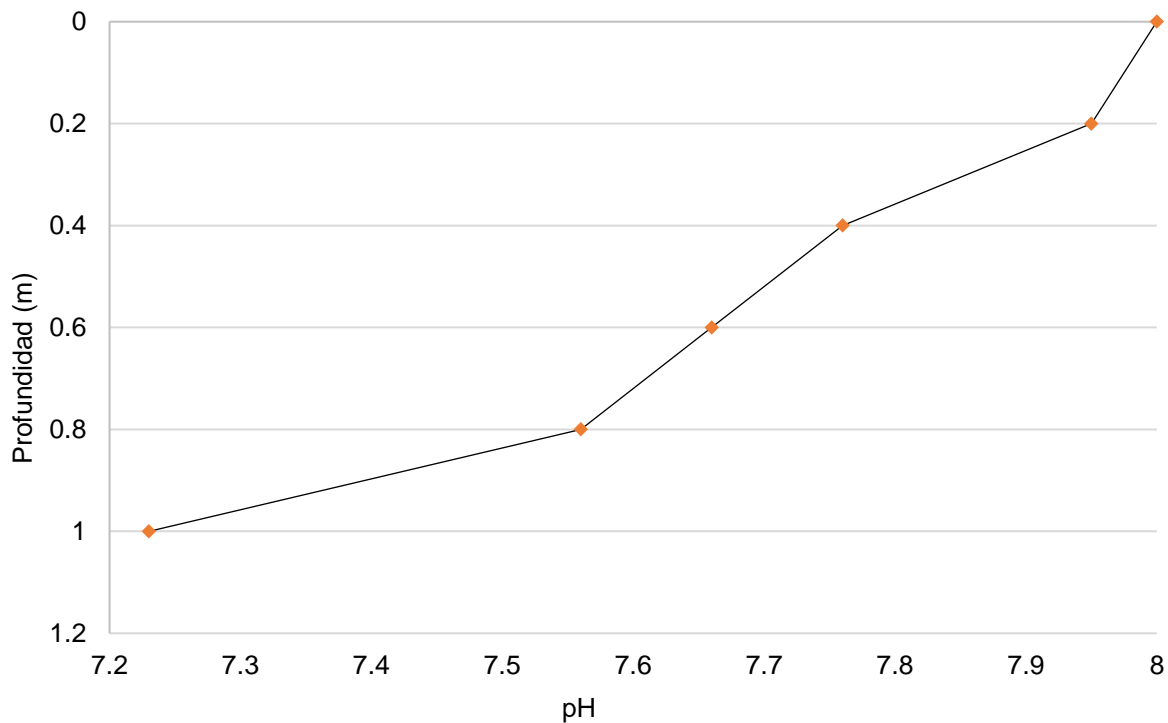


Figura 16. Perfil característico de pH en los lagos de Chapultepec (agosto 2016).

Durante el período de estudio, el agua presentó condiciones básicas en las seis estaciones de los tres lagos, con valores de pH desde 7.2 hasta 11.01 (Tabla 1), presentándose una fluctuación de 3.7 unidades de pH entre las 6 estaciones a lo largo del período anual de estudio.

Los valores de pH a lo largo del ciclo de estudio, en la E1 son más bajos que las E2 y E3, y lo mismo ocurrió con la E4 (Fig. 17).

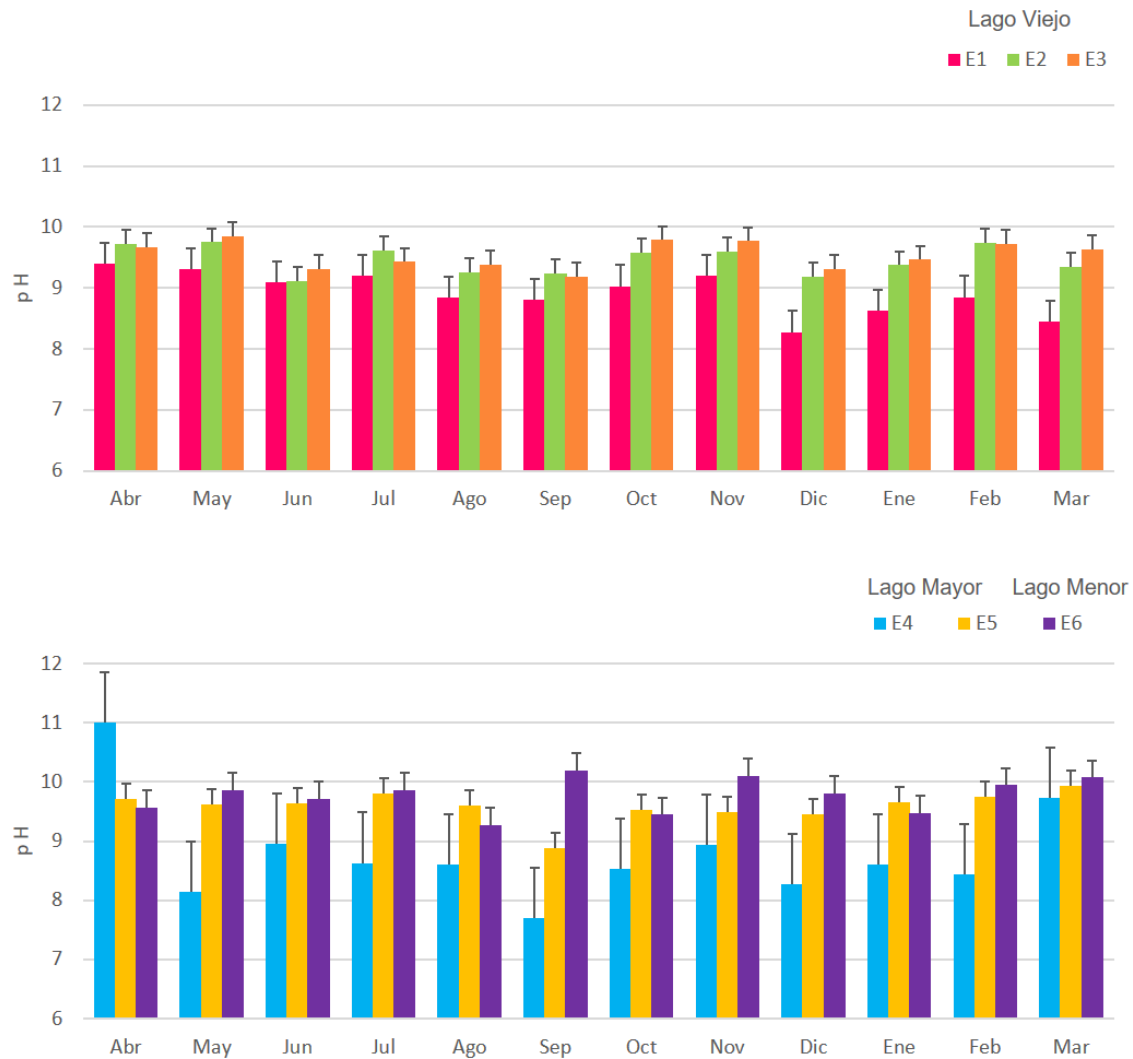


Figura 17. Unidades de pH (promedio mensual \pm D.E.) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El valor promedio anual de pH para las estaciones del Lago Viejo fue de 8.9 ± 0.54 para la E1, de 9.4 ± 0.4 para la E2 y 9.5 ± 0.38 para la E3 (Fig. 18). Los valores máximos registrados fueron para la E1 en el mes de mayo de 10.09, para la E2 en noviembre con 10.4 y la E3 en octubre con 10.45. Los registros mínimos fueron para

las E1 y E3 durante diciembre con valores de 7.3 y 8.7, respectivamente y en marzo para la E2 con 8.2.

La E4 del Lago Mayor, presentó valores elevados de pH sólo durante el mes de abril 2015, ligeramente superiores a 11 unidades; esto señala condiciones extremas de basicidad en la superficie de la porción restringida de este lago; el resto del año los valores de pH para este sitio se mantuvieron entre las 8 y 9 unidades, su valor promedio fue de 8.6 ± 0.7 (Fig. 18). En cuanto a la E5 el valor promedio fue de 9.5 ± 0.65 . Los registros de pH máximo fueron de 11.01 en el mes de abril en la E4 y 10.6 en el mes de julio para la E5.

El promedio anual de la E6 del Lago Menor fue de 9.75 ± 0.67 (Fig. 18), con un máximo en el mes de noviembre de 11.00 y un mínimo de 7.8 durante el mes de agosto.

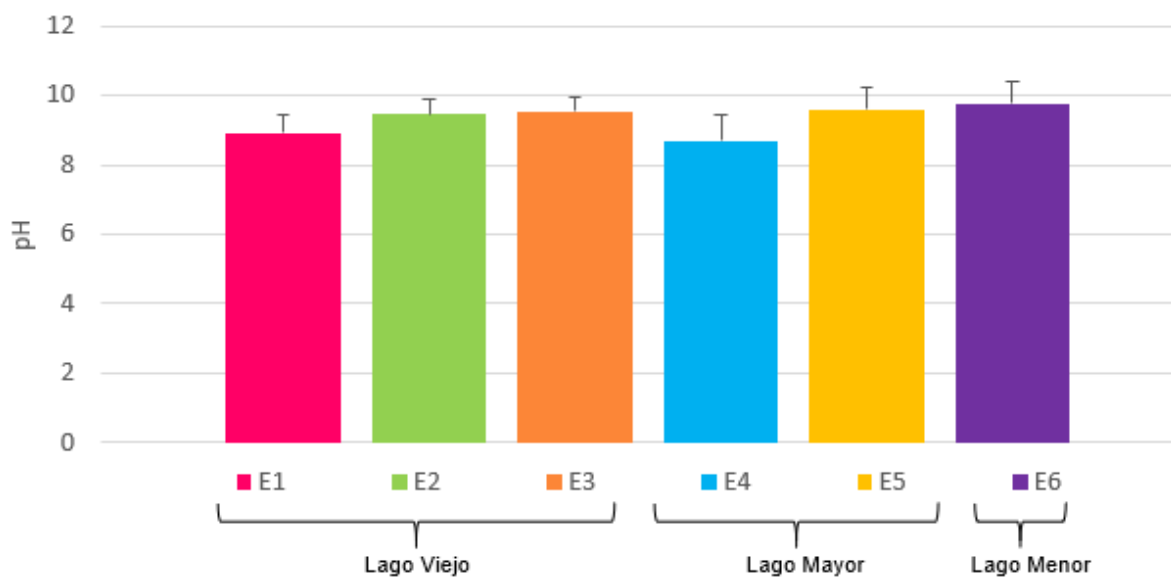


Figura 18. Unidades de pH (promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de muestreo de los Lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los valores de pH de las seis estaciones.

Tabla 1. Variables ambientales analizadas en los lagos del Bosque de Chapultepec. Se muestran los valores promedio, la desviación estándar y el rango.

Variables ambientales		E1	E2	E3	E4	E5	E6
		<i>Lago Viejo</i>			<i>Lago Mayor</i>		<i>Lago Menor</i>
Temperatura (°C)	\bar{X}	18.2	18.9	18.9	21.4	20.8	19.02
	D.E	±2.7	±2.4	±2.6	±2.4	±2.8	±4
	R	12-25.8	12.9-22.4	12.8-22.4	15.6-25.2	14.2-25.7	11.3-26.7
OD (mg L ⁻¹)	\bar{X}	10.5	10.1	9.1	12.5	14.4	10.9
	D.E	±4.6	±3.6	±2.6	±5	±5.4	±5.3
	R	1-22.9	0.5-19.4	1.1-15.4	1.2-25.6	1-24.7	1.2-21.9
% Sat. OD	\bar{X}	138.8	136.4	124	177	196.1	140.6
	D.E	±62	±50.3	±39.4	±71.7	±74.2	±85.1
	R	14-292	7.1-259	15.6-227	18-310	14.6-313	9.5-300.6
Z _{DS} (m)	\bar{X}	0.18	0.10	0.09	0.3	0.16	0.06
	D.E	±0.09	±0.04	±0.02	±0.05	±0.07	±0.04
	R	0.07-0.4	0.03-0.15	0.05-0.125	0.2-0.4	0.075-0.275	0.02-0.125
K ₂₅ (μS cm ⁻¹)	\bar{X}	477.6	437.3	430	509	504	487.8
	D.E	±51.7	±45.3	±46.7	±51.5	±49.2	±66.4
	R	381-614	356-544	335-520	418-610	391-599	329-699
pH	\bar{X}	8.9	9.4	9.5	8.7	9.6	9.8
	D.E	±0.55	±0.44	±0.38	±0.77	±0.66	±0.67
	R	7.35-10.1	8.26-10.4	8.78-10.45	7.23-11.01	7.61-10.66	7.89-11

(\bar{X} : promedio, D.E: desviación estándar, R: rango)

Nutrientes

❖ Nitrógeno de nitratos (N-NO₃)

El N-NO₃ registró una concentración mínima de 1.2 mg L⁻¹ y máxima de 10.4 mg L⁻¹ (Tabla 2). Se presenta en mayor concentración promedio anual con 8.1 ± 2.4 mg L⁻¹ en la E4 y con una menor concentración promedio anual en la E6 con 1.8 ± 0.3 mg L⁻¹.

A lo largo del período de estudio, la E1 del Lago Viejo registró los valores más elevados de N-NO₃ y, en general, la E3 los más bajos (Fig. 19), en cuanto a las estaciones del Lago Mayor, la E4 presentó valores más elevados respecto a la E5 (Fig. 19). Los valores de la E6 no presentaron amplia variación a lo largo del ciclo anual.

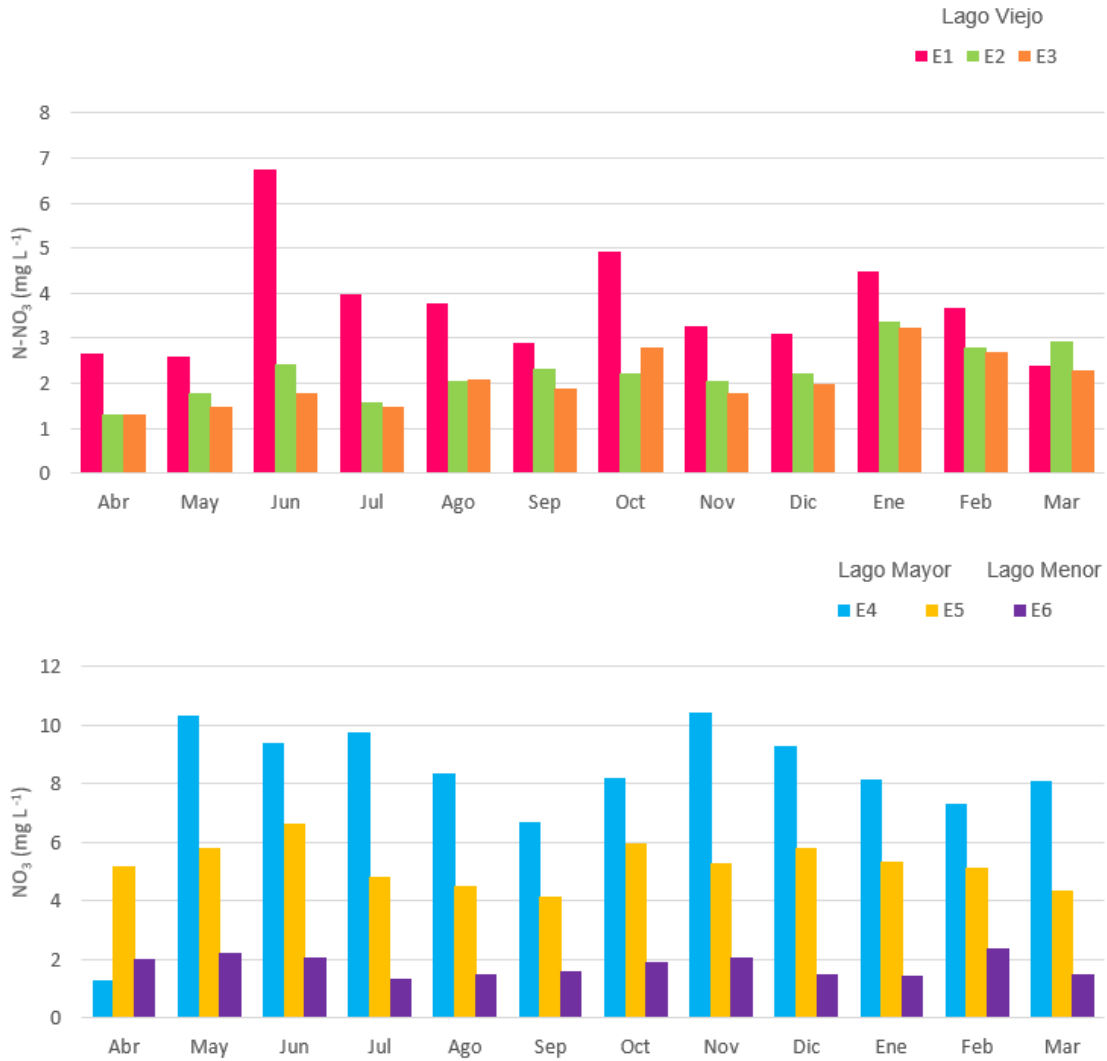


Figura 19. Concentración mensual de nitrógeno de nitratos (N-NO₃ mg L⁻¹) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

En la E1, el promedio anual fue de 3.7 ± 1.2 mg L⁻¹, y también fue el promedio más alto de las estaciones del Lago Viejo, seguidas por la E2, con 2.3 ± 0.58 mg L⁻¹ y finalmente la E3 con un promedio de 2.1 ± 0.59 mg L⁻¹ (Fig. 20).

En el Lago Mayor, la E4 fue la que presentó mayor concentración de N-NO₃ con 8.1 mg L⁻¹ y la E5 5.2 mg L⁻¹. La E6 presentó un promedio anual de 1.8 ± 0.3 mg L⁻¹ (Fig. 20).

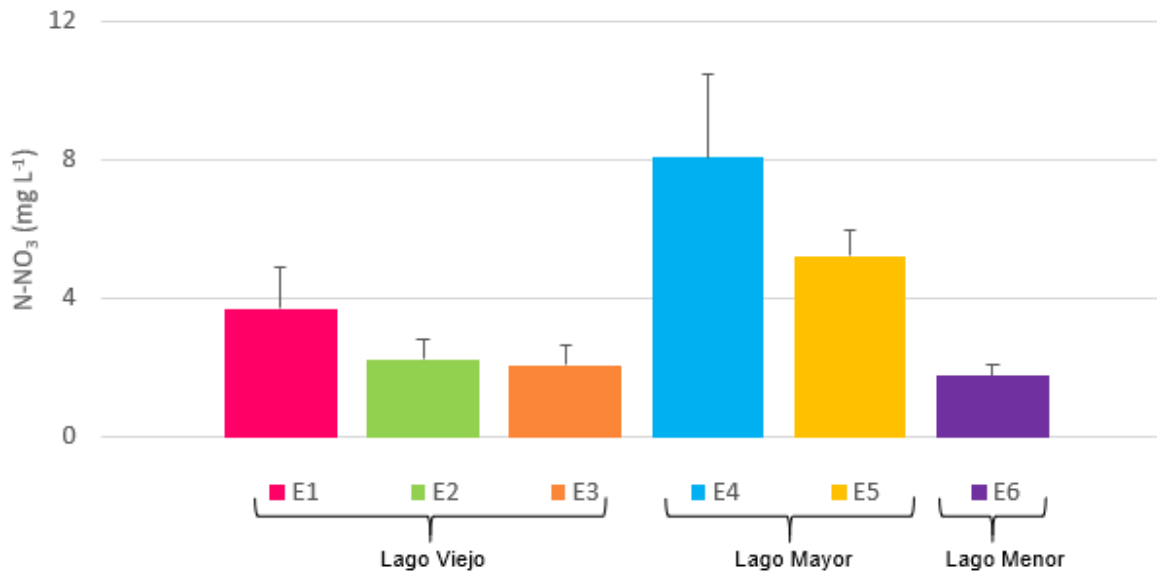


Figura 20. Concentración promedio anual del nitrógeno de nitratos (N-NO_3 $\text{mg L}^{-1} \pm \text{D.E.}$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

La concentración promedio anual del N-NO_3 presente en las seis estaciones de muestreo presentó diferencias significativas ($P < 0.05$). Se observaron diferencias entre la E1 y el resto de las estaciones, la E2 y E3 presentaron diferencias respecto a las E4 y E5, la E4 respecto a las E5 y E6 y finalmente la E5 con la E6.

❖ Nitrógeno de nitritos (N-NO_2)

En cuanto al N-NO_2 , se observó un intervalo de concentración de entre 0.003 y los 2.24 mg L^{-1} (Tabla 2) para las seis estaciones a lo largo del ciclo anual. La E1 tuvo los valores más elevados a lo largo del período de estudio y la E6 los más bajos (Fig. 21).

En la E1 el promedio anual fue de $0.29 \pm 0.06 \text{ mg L}^{-1}$, que es el valor promedio más alto de las estaciones del Lago Viejo, seguido por el de la E2 con $0.08 \pm 0.06 \text{ mg}$

L⁻¹ y finalmente el registrado en la E3 con un promedio de 0.05 ± 0.09 mg L⁻¹ (Fig. 22).

Respecto a las estaciones del Lago Mayor, la E4 registró la concentración anual promedio mayor de N-NO₂ con 0.57 ± 0.63 mg L⁻¹ y la E5 con un promedio de 0.52 ± 0.32 mg L⁻¹. En la E6 se observó un promedio anual de 0.07 ± 0.13 mg L⁻¹ (Fig. 22).

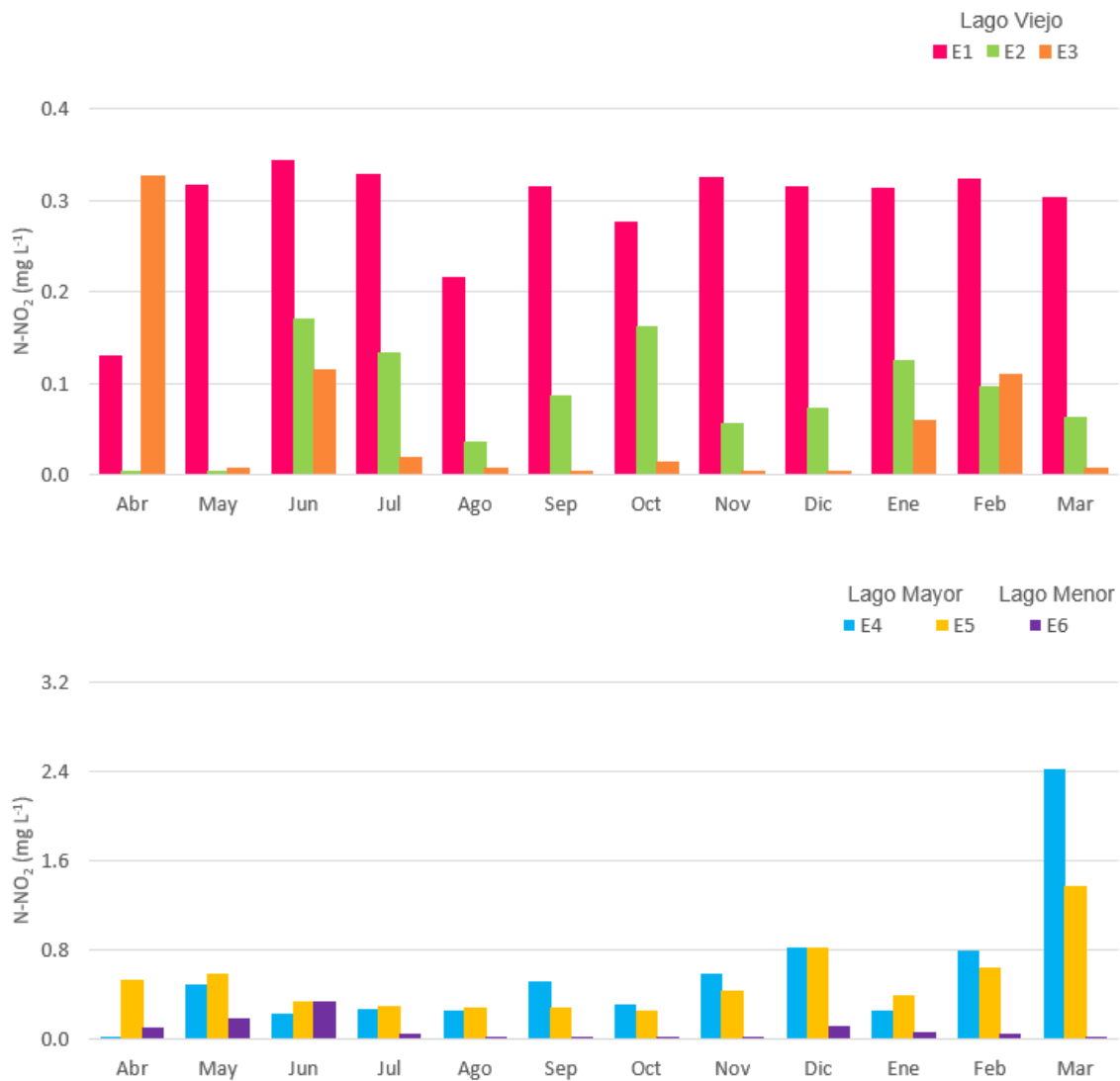


Figura 21. Concentración mensual de nitrógeno de nitritos (N-NO₂ mg L⁻¹) de los lagos del Bosque de Chapultepec.

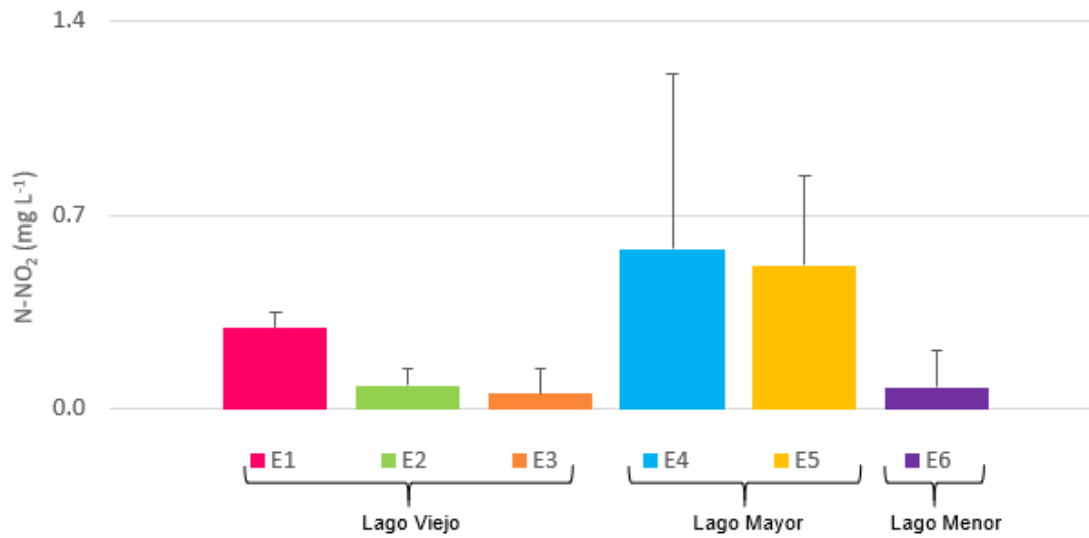


Figura 22. Concentración promedio anual del nitrógeno de nitritos ($N-NO_2$ mg $L^{-1} \pm$ D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El $N-NO_2$ anual de las seis estaciones de muestreo mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las E1 y E4, las E2 y E3 respecto a las E4 y E5 y las E4 y E5 respecto a la E6.

❖ Nitrógeno de amonio ($N-NH_3$)

Para el caso del $N-NH_3$, se observó una concentración en un intervalo entre 0.02 y 5.8 mg L^{-1} (Tabla 2); la variación de $N-NH_3$ (mg L^{-1}) fue similar al $N-NO_2$, donde la E1 presentó los valores más elevados y la E6 los más bajos (Fig. 23).

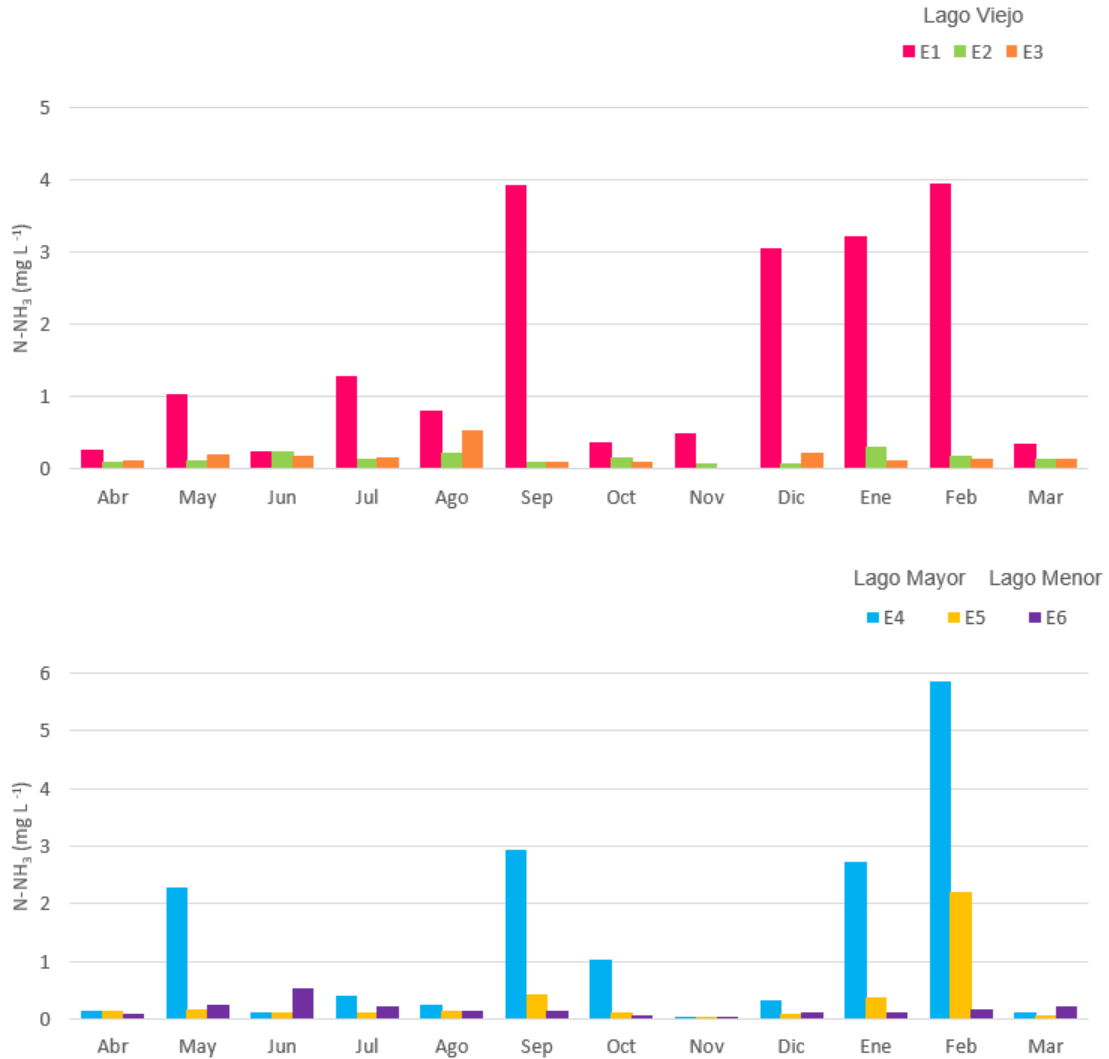


Figura 23. Concentración mensual de nitrógeno de amonio (N-NH₃ mg L⁻¹) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Para el caso de la E1 el promedio anual fue de 1.5 ± 1.5 mg L⁻¹, que representa el valor más alto de las estaciones del Lago Viejo, seguido por el registrado en la E3 con 0.1 ± 0.1 mg L⁻¹ y finalmente, por el de la E2 con un promedio de 0.1 ± 0.07 mg L⁻¹ (Fig. 24). Respecto a las estaciones del Lago Mayor, la E4 fue la que registró una mayor concentración de N-NH₃ con 1.3 ± 1.7 mg L⁻¹ y la E5 un promedio de 0.3 ± 0.6 mg L⁻¹. La E6 tuvo un promedio anual de 0.2 ± 0.1 mg L⁻¹ (Fig. 24).

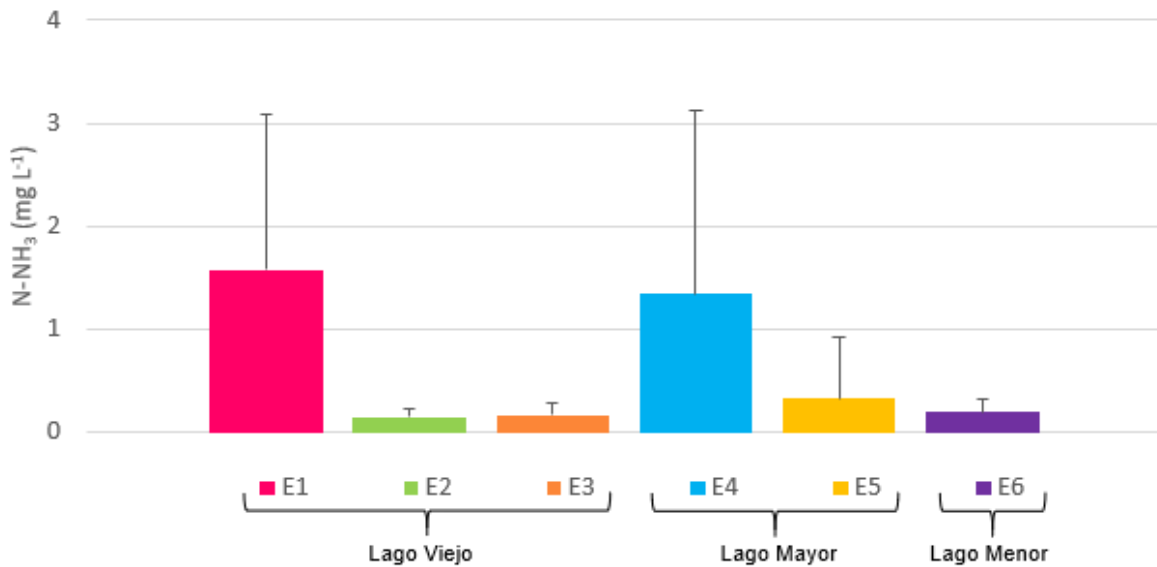


Figura 24. Concentración promedio anual de nitrógeno de amonio ($N-NH_3$ mg L⁻¹± D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

La concentración del $N-NH_3$ de las seis estaciones de muestreo presentó diferencias significativas ($P < 0.05$). Se observaron diferencias entre la E1 y las estaciones E2, E3, E5 y E6. La E2 y E3 con la E4 y la E4 con la E5 y E6.

❖ Nitrógeno inorgánico disuelto (NID)

El nitrógeno inorgánico disuelto (NID) registró concentraciones entre 1.4 y 13.9 mg L⁻¹ (Tabla 2). Los valores más elevados se presentaron en la E1 del Lago Viejo y, en general, los más bajos en la E3; la E4 en general también presentó valores elevados y la E6 mostró valores bajos, con variación reducida a lo largo del ciclo (Fig. 25).

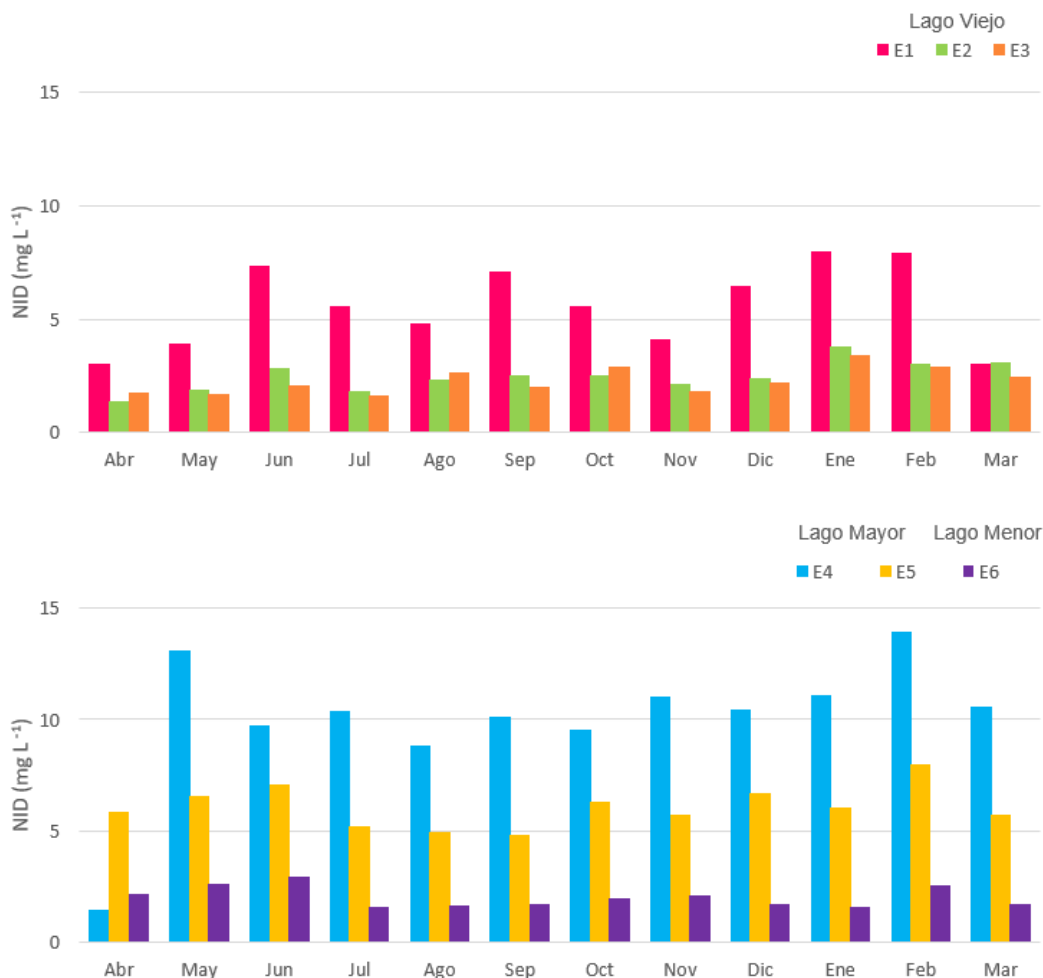


Figura 25. Concentración mensual de nitrógeno inorgánico disuelto (NID mg L⁻¹) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Para el caso de la E1, el promedio anual fue de 5.5 ± 1.8 mg L⁻¹, éste fue el promedio más alto de las estaciones del Lago Viejo, siguiendo la E2 con 2.4 ± 0.7 mg L⁻¹ y finalmente la E3 con un promedio de 2.2 ± 0.5 mg L⁻¹ (Fig. 26). Respecto a las estaciones del Lago Mayor, la E4 fue la que mostró mayor concentración de NID con 10.0 ± 3.0 mg L⁻¹ y la E5 con un promedio de 6.09 ± 0.9 mg L⁻¹. La E6 presentó un promedio anual de 2.0 ± 0.4 mg L⁻¹ (Fig. 26).

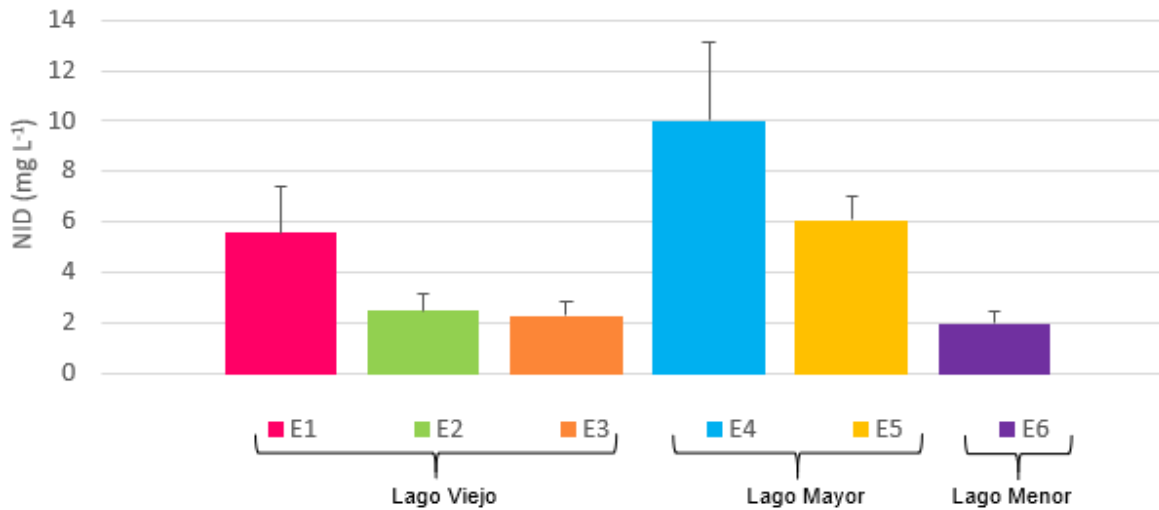


Figura 26. Concentración promedio anual del nitrógeno inorgánico disuelto (NID mg L⁻¹ ± D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El NID anual de las seis estaciones de muestreo registró diferencias significativas ($P < 0.05$), similares a las diferencias encontradas para el N-NO₃ y el N-NO₂. Se observaron diferencias entre la E1 con respecto a las E2, E3, E4 y E6. Las E2 y E3 respecto a las E4 y E5, la E4 con las E5 y E6 y las E5 respecto a las E6.

❖ Nitrógeno Total (N-Total)

Para la concentración de N-Total se observó un intervalo entre 4.8 y 24.8 mg L⁻¹ (Tabla 2). A lo largo del ciclo de estudio se observó, en general, una mayor concentración de N-Total en la E1 del Lago Viejo y las concentraciones más bajas en general en la E3 del mismo lago. En cuanto a la E4, en general, mostró valores más elevados que la E5 y la E6 no presentó variación amplia a lo largo del ciclo (Fig. 27).

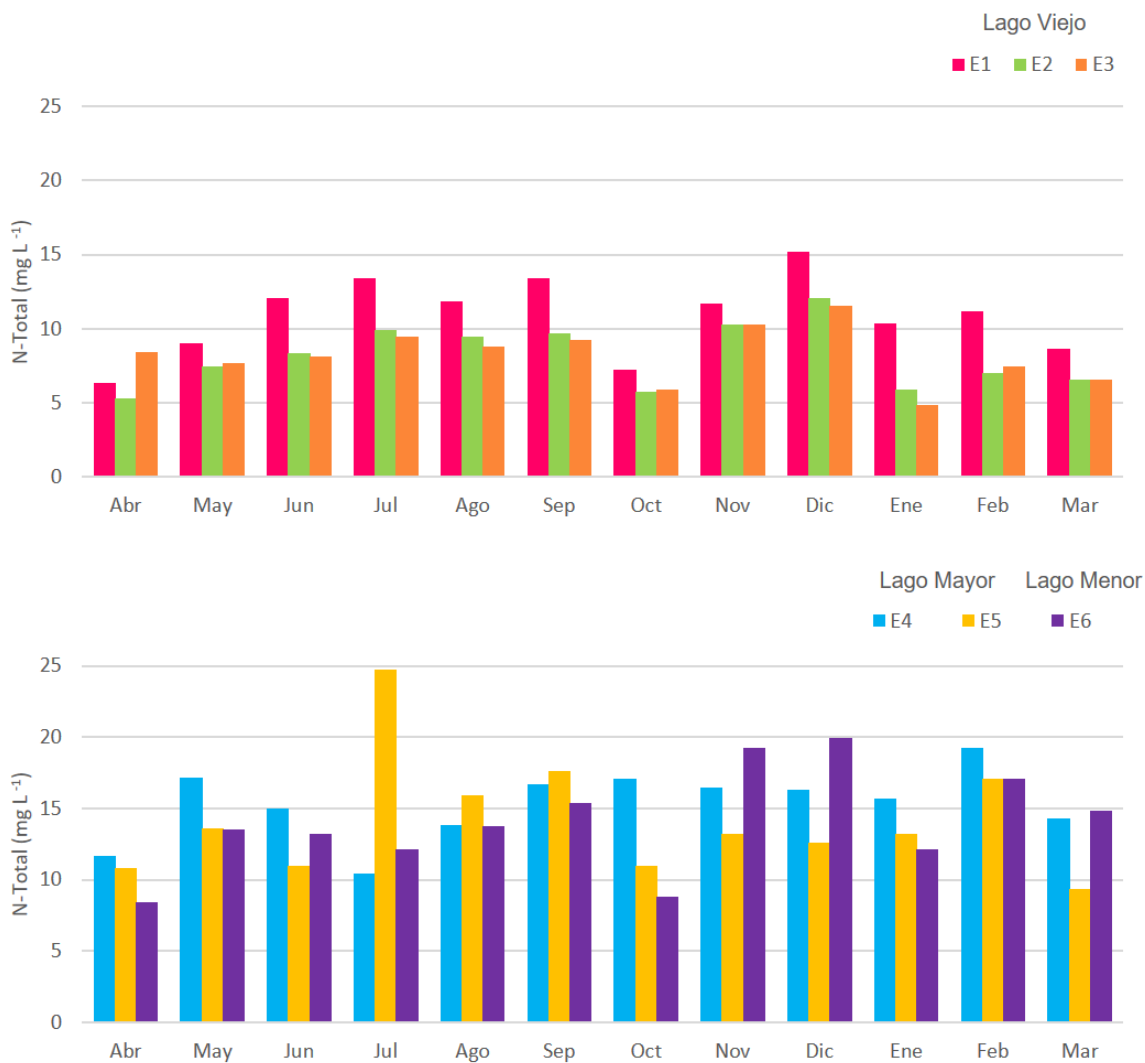


Figura 27. Concentración mensual de nitrógeno total (N-Total mg L⁻¹) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Para el caso de la E1 el promedio anual fue de 10.9 ± 2.6 mg L⁻¹; éste fue el valor promedio más alto de las estaciones del Lago Viejo, seguido de la E3 con 8.2 ± 1.87 mg L⁻¹ y finalmente, la E2 con un promedio de 8.1 ± 2.1 mg L⁻¹ (Fig. 28).

Respecto a las estaciones del Lago Mayor, la E4 fue la que presentó mayor concentración de N-Total con 15.3 ± 2.5 mg L⁻¹ y la E5 un promedio de 14.2 ± 4.2 mg L⁻¹. La E6 presentó un promedio anual de 14 ± 3.6 mg L⁻¹ (Fig. 28).

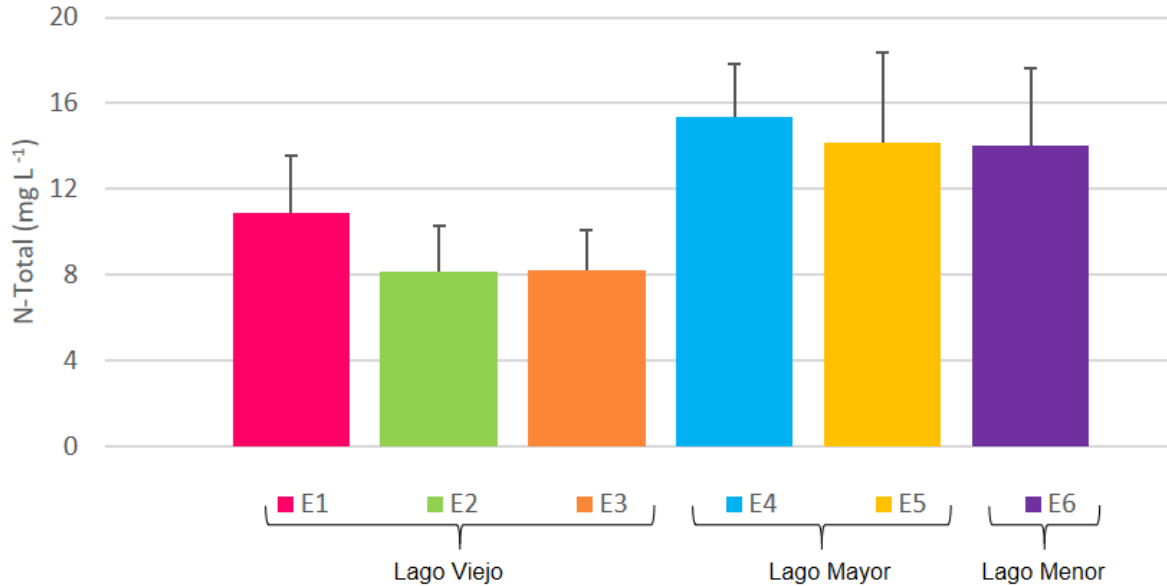


Figura 28. Concentración promedio anual de nitrógeno total (N-Total mg L⁻¹± D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque Chapultepec (2015-2016).

Se registraron diferencias significativas a través de un análisis de varianza ($P < 0.05$) en la concentración de N-Total anual de las seis estaciones de muestreo. Se observaron diferencias entre la E1 con respecto al resto de las estaciones y entre la E2 y E3 respecto a las E4, E5 y E6.

❖ Fósforo soluble reactivo (P-PO₄)

Se observó una concentración mínima de 0.02 mg L⁻¹ y una máxima de 0.4 mg L⁻¹ (Tabla 2). En este caso, las estaciones E1 y E4 presentaron los valores más altos a lo largo del ciclo de estudio (Fig. 29).

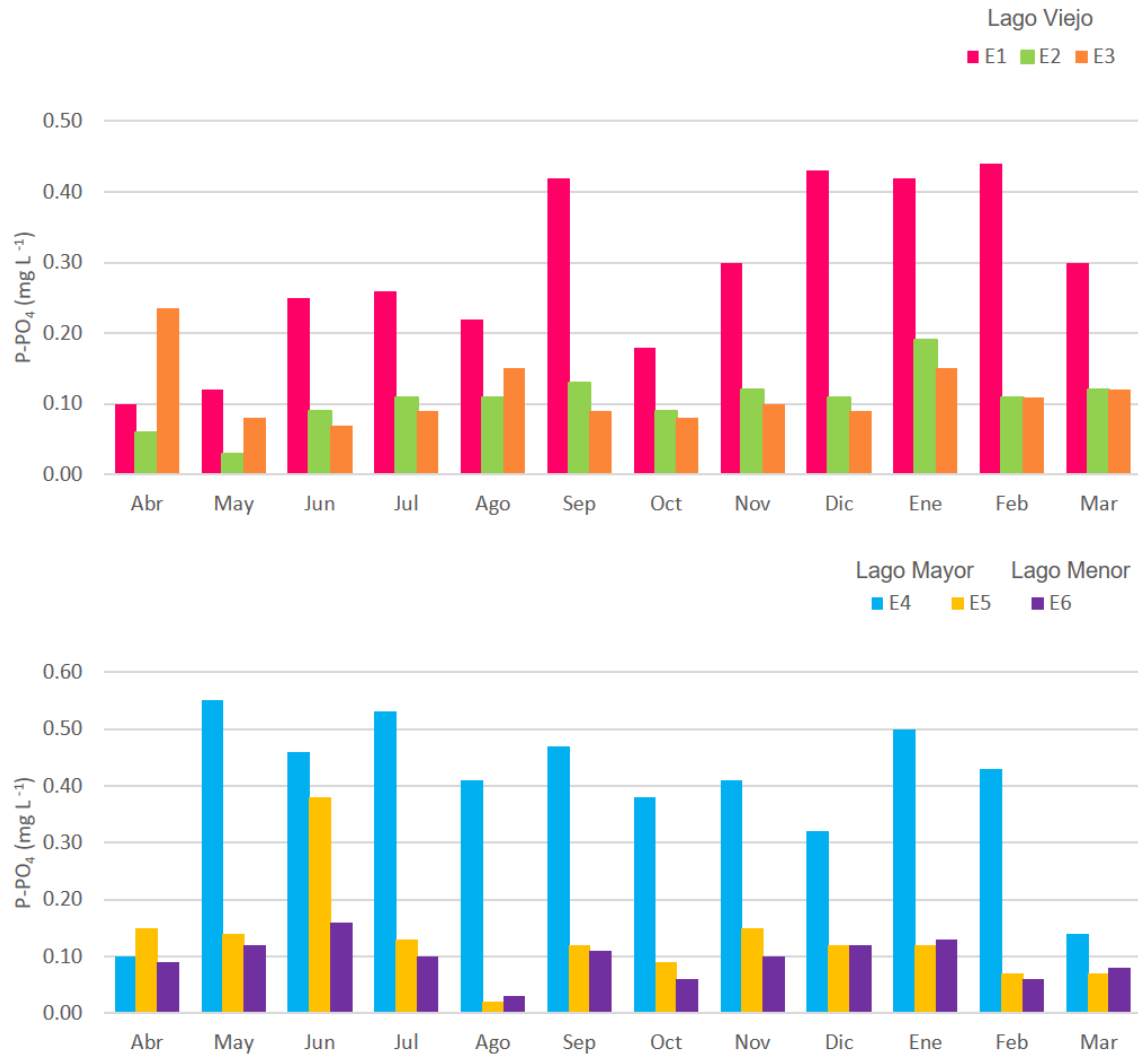


Figura 29. Concentración mensual de fósforo soluble reactivo (P-PO₄ mg L⁻¹) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

En relación con el promedio anual de las estaciones del Lago Viejo, la E1 tuvo un promedio de 0.2 ± 0.1 mg L⁻¹, que constituye el valor más alto para este lago, seguido de las E2 y E3 con 0.11 ± 0.038 mg L⁻¹ y 0.1 ± 0.04 mg L⁻¹, respectivamente (Fig. 30).

Respecto a las estaciones del Lago Mayor, la E4 presentó el promedio anual mayor con $0.3 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ y la E5 $0.1 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$. Finalmente, en la E6 se observó un promedio anual de $0.10 \pm 0.035 \text{ mg L}^{-1}$ (Fig. 30).

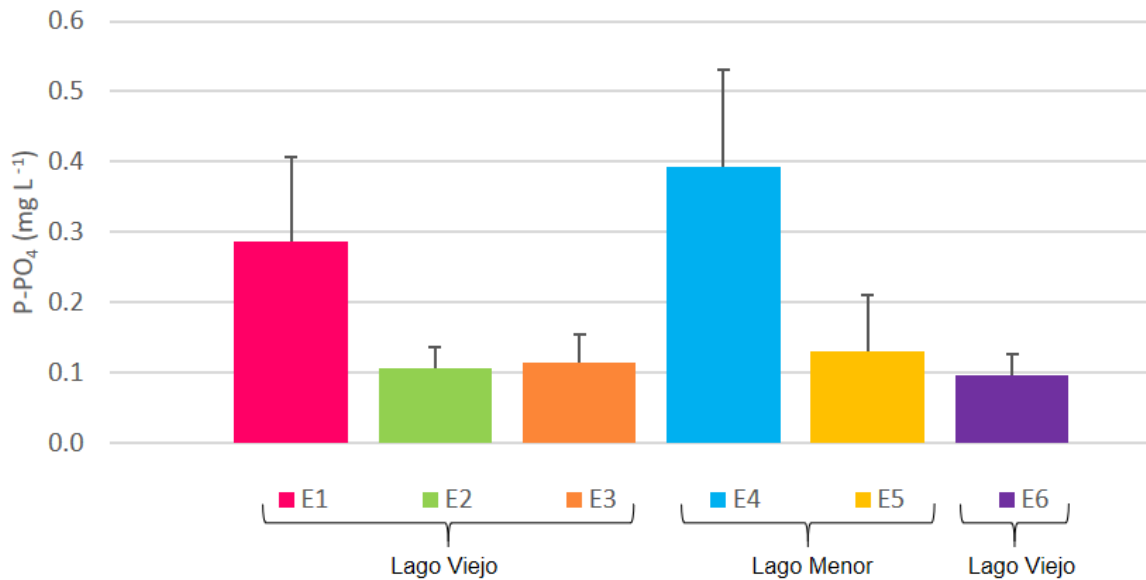


Figura 30. Concentración promedio anual de fósforo soluble reactivo (P-PO₄ mg L⁻¹ ± D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Para el P-PO₄ promedio anual de las seis estaciones de muestreo, el análisis de varianza mostró que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre la estación E1 con respecto al resto de estaciones, así como de las estaciones E2 y E3 con la E4 y de la E4 con la E6.

❖ Fósforo total (P-Total)

La concentración mínima de P-Total anual fue de 0.18 mg L^{-1} y el máximo de 1.4 mg L^{-1} (Tabla 2). La concentración de P-Total a lo largo del período de estudio presentó

dos meses con concentraciones elevadas, la primera en abril en la E3 y el segundo en octubre, en la E4 (Fig. 31).

Con respecto al promedio anual de las estaciones del Lago Viejo, la E1 tuvo un promedio de $0.5 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$, lo que constituye el valor más alto para este lago, seguido de la E3 con $0.4 \pm 0.3 \text{ mg L}^{-1}$ y para la E2 un promedio anual de $0.3 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$ (Fig. 32).

De las estaciones del Lago Mayor, la E4 presentó el mayor promedio anual con $0.6 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$ y la E5 $0.40 \pm 0.09 \text{ mg L}^{-1}$. Finalmente, en la E6 se observó un promedio anual de $0.4 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ (Fig. 32).

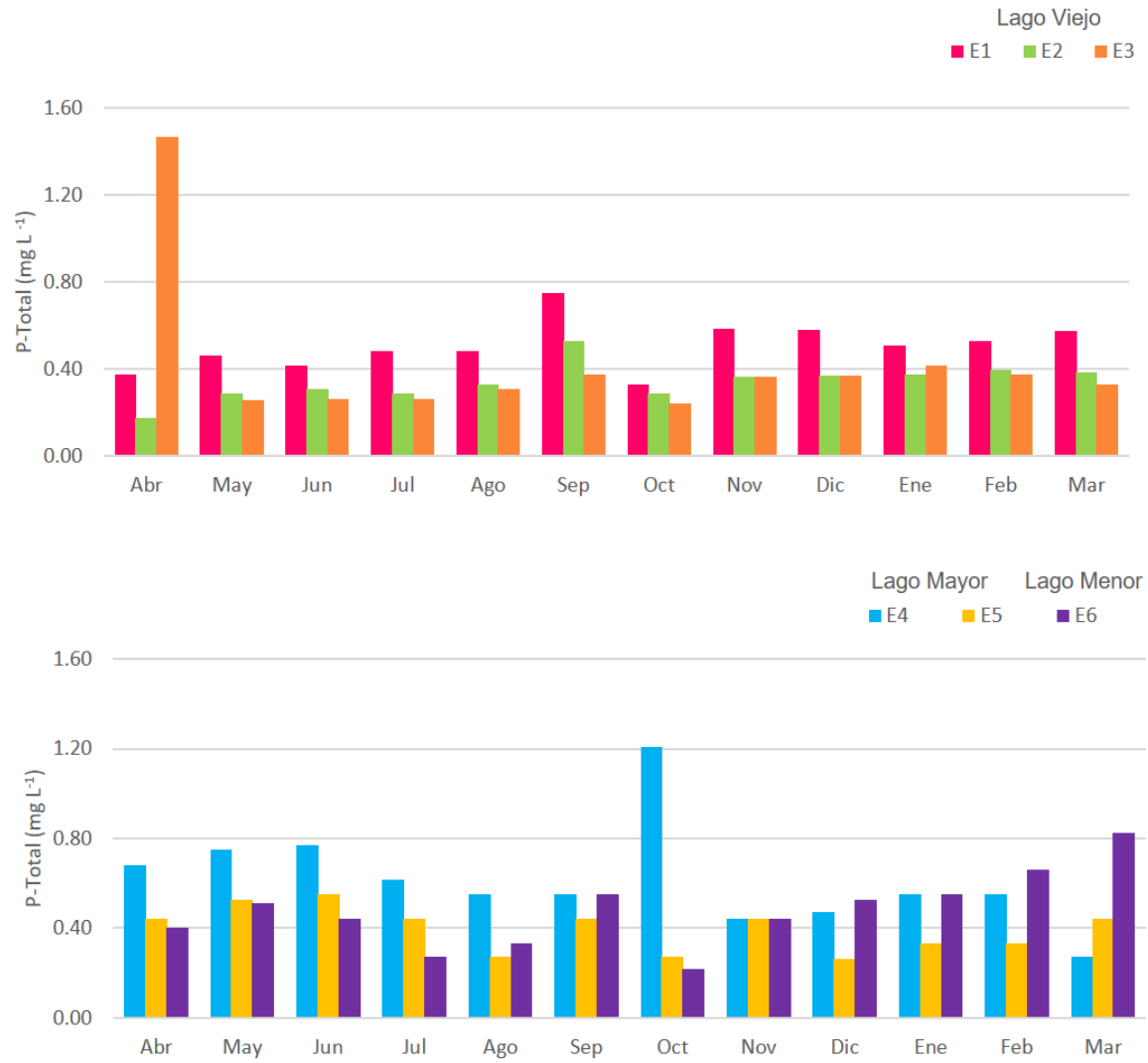


Figura 31. Concentración mensual de fósforo Total (P-Total mg L⁻¹) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

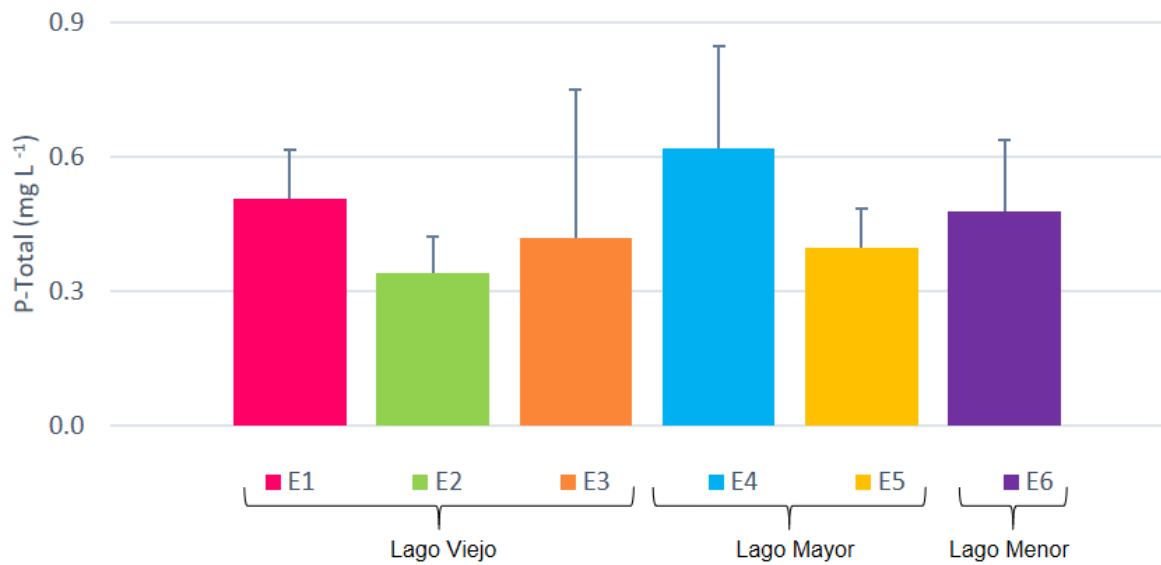


Figura 32. Concentración promedio anual de fósforo total (P-Total mg L⁻¹ ± D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$) en la concentración de P-Total entre la E4 respecto a la E2, E3 y E5 y de la E1 respecto a la E2.

Tabla 2. Concentración de nutrientes analizados en los lagos de Chapultepec por estación de muestreo. Se muestran los valores promedio, la desviación estándar y el rango.

Variables ambientales		E1	E2	E3	E4	E5	E6
		<i>Lago Viejo</i>			<i>Lago Mayor</i>		<i>Lago Menor</i>
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	\bar{X}	3.7	2.3	2.1	8.1	5.2	1.8
	D.E	±1.23	±0.58	±0.59	±2.43	±0.74	±0.3
	R	2.39-6.75	1.26-3.37	1.31-3.24	1.29-10.42	4.11-6.66	1.35-2.35
N-NO ₂ (mg L ⁻¹)	\bar{X}	0.3	0.1	0.1	0.6	0.5	0.1
	D.E	±0.061	±0.06	±0.09	±0.63	±0.321	±0.1
	R	0.129-0.34	0.004-0.170	0.003-0.326	0.004-2.42	0.255-1.37	0.003-0.335
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	\bar{X}	1.6	0.2	0.2	1.3	0.3	0.2
	D.E	±1.5	±0.07	±0.13	±1.78	±0.6	±0.13
	R	0.24-3.95	0.08-0.30	0.02-0.53	0.05-5.85	0.04-2.2	0.02-0.53
NID (mg L ⁻¹)	\bar{X}	5.6	2.5	2.3	10.02	6.1	2
	D.E	±1.81	±0.7	±0.57	±3.06	±0.92	±0.46
	R	3.05-8.03	1.4-3.8	1.7-3.4	1.43-13.95	4.82-8	1.61-2.93
N-Total (mg L ⁻¹)	\bar{X}	10.9	8.1	8.2	15.3	14.2	14
	D.E	±2.65	±2.13	±1.87	±2.5	±4.21	±3.6
	R	6.4-15.2	5.3-12.1	4.8-11.6	10.5-19.3	9.4-24.8	8.4-20
P-Total (mg L ⁻¹)	\bar{X}	0.5	0.3	0.4	0.6	0.4	0.5
	D.E	±0.11	±0.08	±0.38	±0.23	±0.09	±0.16
	R	0.33-0.75	0.18-0.53	0.24-1.47	0.28-1.21	0.26-0.55	0.22-0.83
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	\bar{X}	0.3	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1
	D.E	±0.12	±0.038	±0.04	±0.14	0.08	±0.035
	R	0.10-0.44	0.03-0.19	0.07-0.24	0.1-0.55	0.02-0.38	0.03-0.16

(\bar{X} : promedio, D.E: desviación estándar, R: rango)

Metabolismo Lacustre

❖ Clorofila- α (Clor- α)

La variación anual de la concentración de Clor- α de los tres lagos del Bosque de Chapultepec se ubicó en un intervalo entre 109 y 843 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Tabla 3). Esta variable presentó concentraciones más elevadas en la E6 en el Lago Menor y, en general, las más bajas en la E4 del Lago Mayor (Fig. 33).

El promedio anual de este parámetro en el Lago Viejo para la E1 fue de $355 \pm 102 \mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 34), en la E2 un promedio de $433 \pm 93 \mu\text{g L}^{-1}$ y para la E3 $427 \pm 81 \mu\text{g L}^{-1}$, el valor máximo para la E1 fue de $565 \mu\text{g L}^{-1}$, para la E2 fue $596 \mu\text{g L}^{-1}$ y para la E3 $556 \mu\text{g L}^{-1}$. Los valores mínimos registrados fueron $143 \mu\text{g L}^{-1}$, $214 \mu\text{g L}^{-1}$ y $254 \mu\text{g L}^{-1}$ para las E1, E2 y E3, respectivamente (Tabla 3).

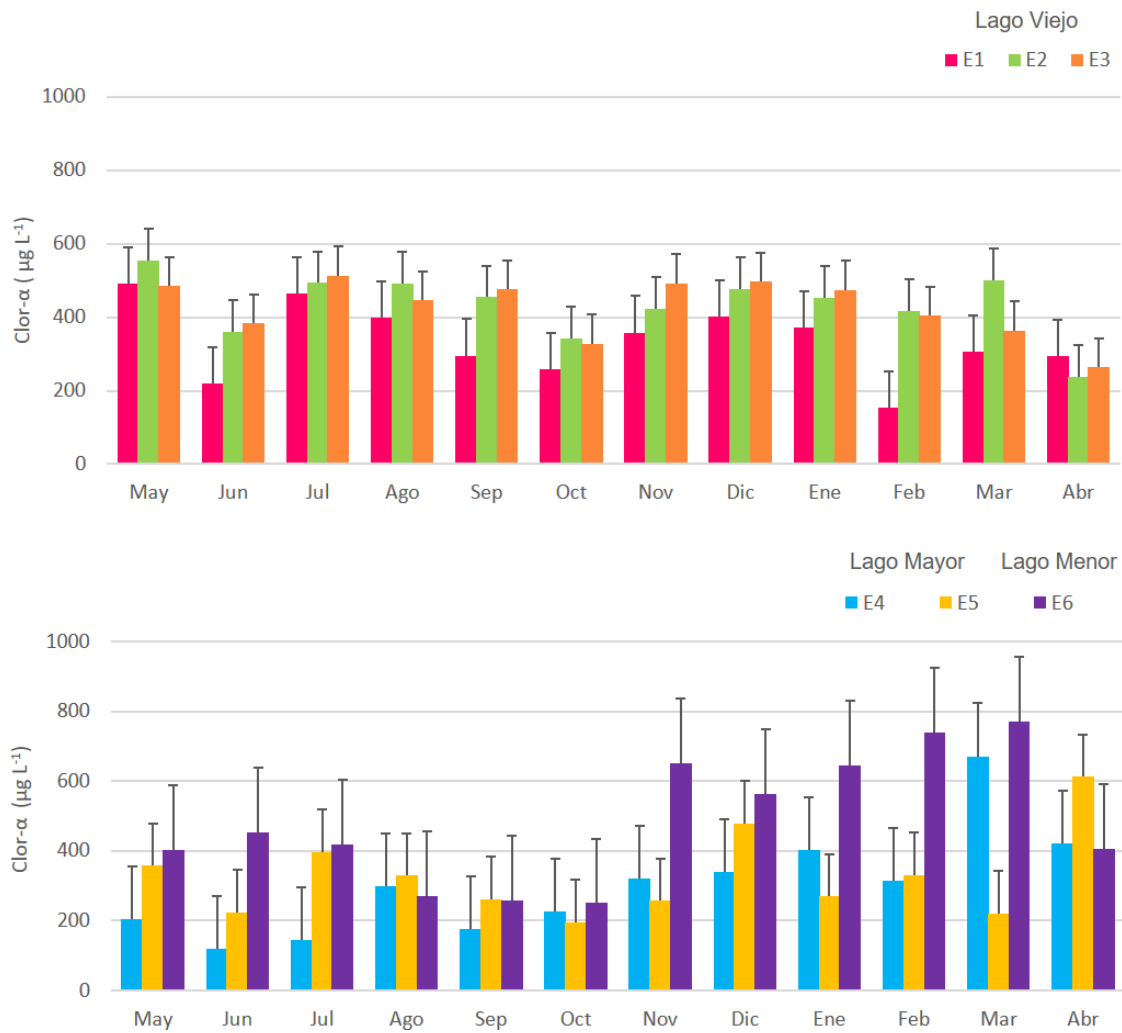


Figura 33. Concentración promedio mensual de clorofila α ($\text{Clor-}\alpha \mu\text{g L}^{-1} \pm \text{d. e.}$) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

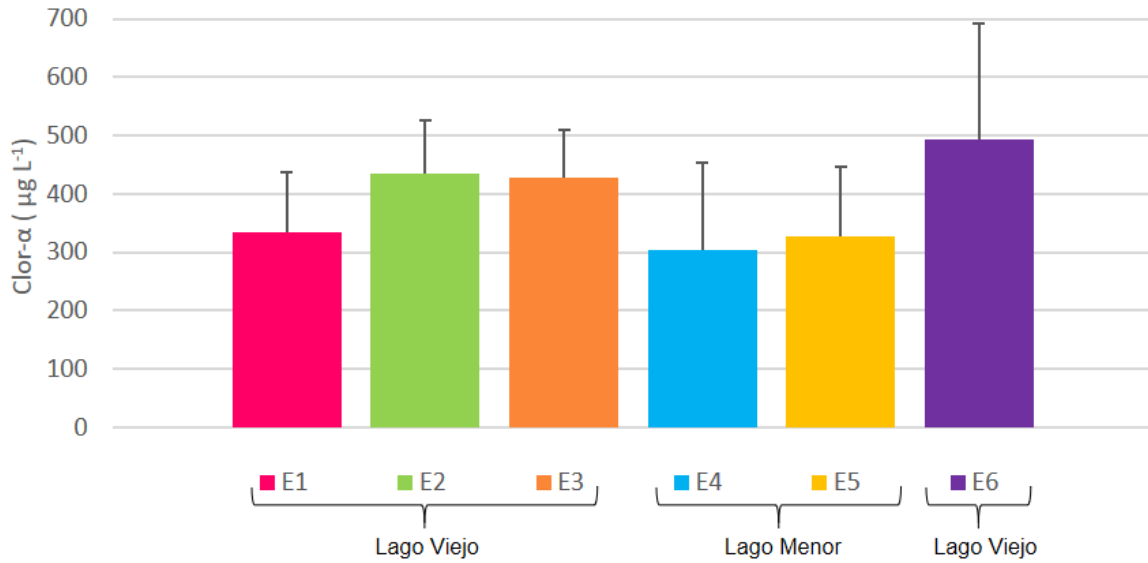


Figura 34. Concentración promedio anual de la clorofila α (Clor- α $\mu\text{g L}^{-1} \pm \text{D.E}$) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El promedio anual para el Lago Mayor en las estaciones E4 y E5 fue de $303 \pm 150 \mu\text{g L}^{-1}$ y $328 \pm 119 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente (Fig. 34), registrando valores máximos de $773 \mu\text{g L}^{-1}$ para la E4 y $647 \mu\text{g L}^{-1}$ para la E5. Los valores mínimos fueron de $109 \mu\text{g L}^{-1}$ para la E4 y de $175 \mu\text{g L}^{-1}$ para la E5 (Tabla 3).

En cuanto al Lago Menor, el promedio anual para la estación E6 fue de $493 \pm 199 \mu\text{g L}^{-1}$, el valor máximo registrado fue $843 \mu\text{g L}^{-1}$ y el mínimo de $206 \mu\text{g L}^{-1}$ (Tabla 3).

El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las estaciones E1 respecto a las E2, E3 y E6, la E2 respecto a las E4 y E5 y la E3 con las E4, E5 y E6.

❖ Producción Primaria Bruta (PPB)

La variación general de la PPB a lo largo del período de estudio para los tres lagos del Bosque de Chapultepec presentó valores en un intervalo entre 211 mg C m⁻³ h⁻¹ y 2,896 mg C m⁻³ h⁻¹ (Tabla 3). En general, en la estación E3 se registraron las concentraciones más elevadas del Lago Viejo y en la E5 del Lago Mayor en la mayoría del ciclo anual; la E6 mostró gran variación anual (Fig. 35).

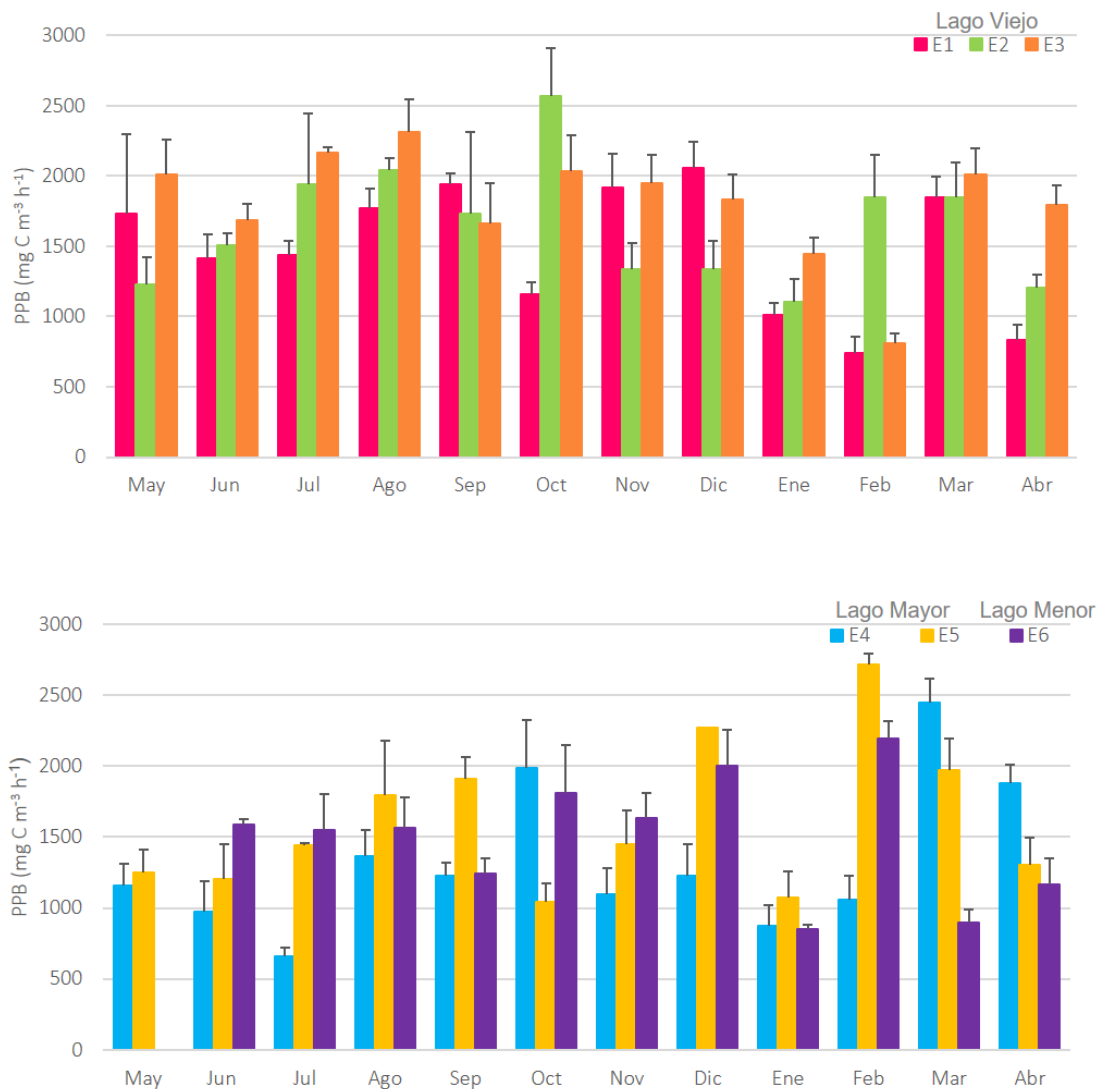


Figura 35. Producción primaria bruta (PPB mg C m³ h⁻¹ promedio mensual ± D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El promedio anual de PPB para el Lago Viejo en la E1 fue de $1,488 \pm 478$ mg C m⁻³ h⁻¹, para la E2 el promedio fue de $1,642 \pm 484$ mg C m⁻³ h⁻¹ y para la E3 de $1,809 \pm 413$ mg C m⁻³ h⁻¹ (Fig. 36). Los valores máximos registrados fueron $2,373$ mg C m⁻³ h⁻¹ para la E1, $2,890$ mg C m⁻³ h⁻¹ para la E2 y $2,584$ mg C m⁻³ h⁻¹ para la E3. Los registros mínimos para las E1, E2 y E3 fueron 605 , 919 y 750 mg C m⁻³ h⁻¹, respectivamente (Tabla 3).

Los promedios anuales en cuanto a las estaciones del Lago Mayor fueron de $1,329 \pm 526$ mg C m⁻³ h⁻¹ para la E4 y de $1,580 \pm 519$ mg C m⁻³ h⁻¹ para la E5 (Fig. 36) con valores máximos de $2,625$ y $2,803$ mg C m⁻³ h⁻¹, respectivamente y mínimos de 585 mg C m⁻³ h⁻¹ para la E4 y de 878 mg C m⁻³ h⁻¹ para la E5. La E6 tuvo un promedio anual de $1,500 \pm 443$ mg C m⁻³ h⁻¹ con un máximo de $2,292$ mg C m⁻³ h⁻¹ y un registro mínimo de 816 mg C m⁻³ h⁻¹ (Tabla 3).

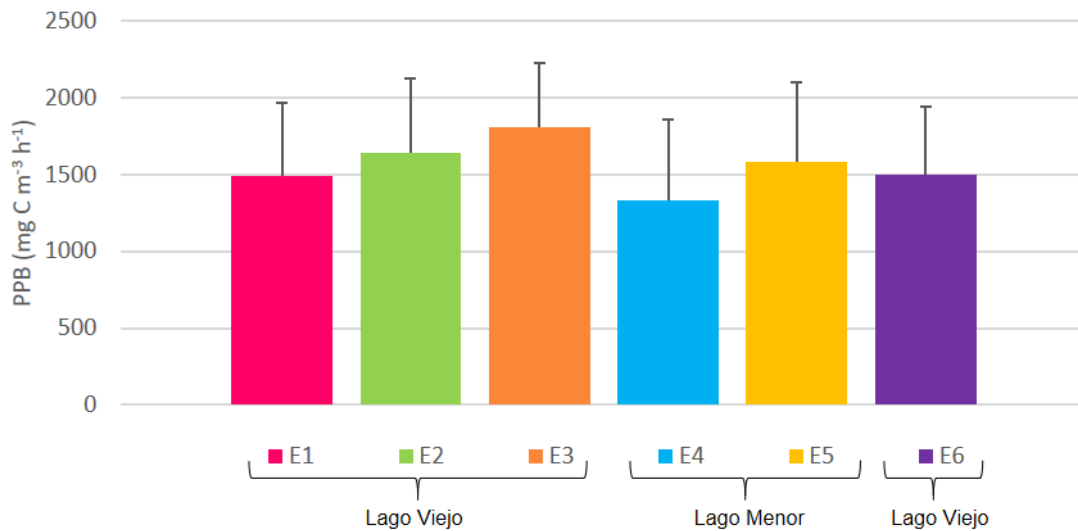


Figura 36. Producción primaria bruta (PPB mg C m³ h⁻¹ promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Se registraron diferencias significativas con el análisis de varianza ($P < 0.05$) de PPB entre las E1 y la E3, la E2 con la E4, la E3 respecto a las estaciones del Lago Mayor (E4, E5) y la del Lago Menor.

❖ Producción Primaria Neta (PPN)

La variación anual de la PPN en los tres lagos del Bosque de Chapultepec se ubicó entre 142 y 2,344 mg C m⁻³ h⁻¹ (Tabla 3). En general, el comportamiento temporal para la PPN fue similar al de la PPB; en la E3 se registraron las concentraciones más elevadas del Lago Viejo durante la mayor parte del año de estudio y, en el Lago Mayor, la E5 mostró los valores más elevados; la E6 tuvo gran variación anual (Fig. 37).

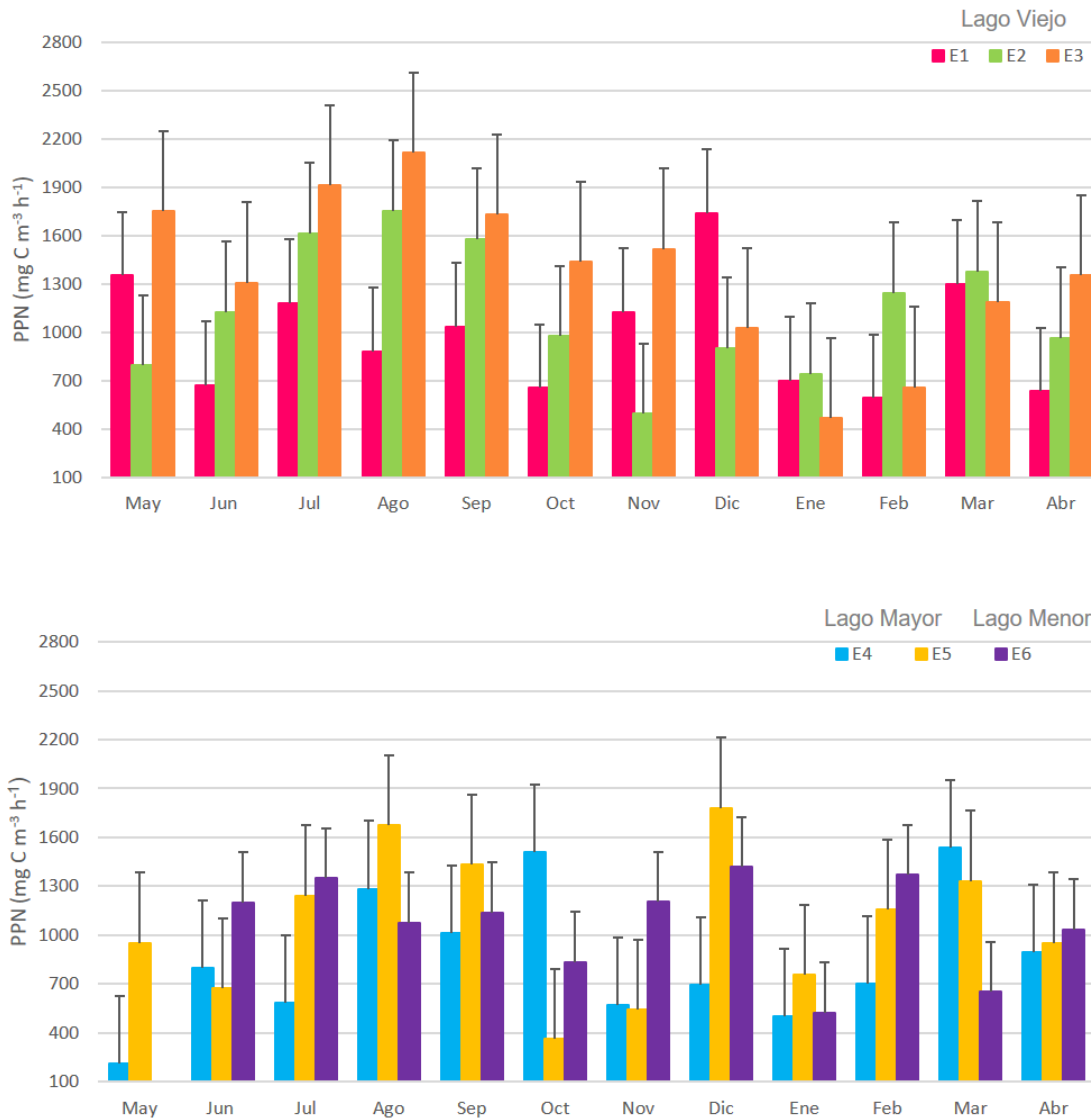


Figura 37. Producción primaria neta (PPN mg C m³ h⁻¹ promedio mensual ± D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El promedio anual de la PPN para el Lago Viejo en la E1 fue de 989 ± 395 mg C m³ h⁻¹, para la E2 de $1,129 \pm 438$ mg C m³ h⁻¹ y para la E3 fue de $1,372 \pm 497$ mg C m³ h⁻¹ (Fig. 38); los registros máximos fueron de 1,951 mg C m³ h⁻¹ para la E1, 2,290 mg C m³ h⁻¹ para la E2 y por último 2,344 mg C m³ h⁻¹ para la E3. Los valores mínimos fueron 397 mg C m³ h⁻¹ para la E2, 437 mg C m³ h⁻¹ para la E3 y 460 mg C m³ h⁻¹ para la E1 (Tabla 3).

En cuanto a las estaciones del Lago Mayor, el promedio de la E4 fue de $858 \pm 415 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y el de la E5 fue de $1,030 \pm 430 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (Fig. 38); los registros máximos fueron $1,781 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para la E4 y $2,083 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para la E5. Los registros mínimos fueron 293 y $464 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, respectivamente (Tabla 3). La E6 tuvo un promedio anual de $1,073 \pm 307 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, con un máximo de $1,581 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y un mínimo de $464 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (Tabla 3).

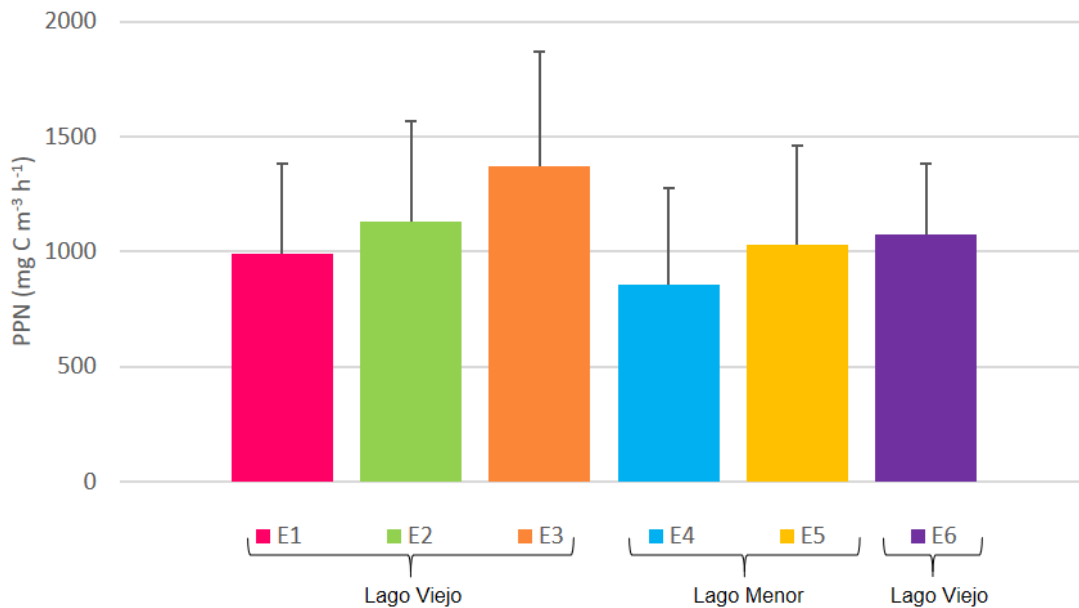


Figura 38. Producción primaria neta (PPN $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

Para el caso de la PPN, el análisis de varianza ($P < 0.05$) registró diferencias significativas entre la E1 y la E3, entre la E2 y las E3 y E4, y de la E3 respecto a las E4, E5 y E6.

❖ Respiración (R)

La variación anual de la R en los tres lagos fluctuó entre 61 y 2,425 mg C m⁻³ h⁻¹ (Tabla 3). Los valores más elevados se registraron en la estación E1 del Lago Viejo. Durante el mes de octubre, se dieron las máximas concentraciones en las tres estaciones del mismo lago. La E6 registró una gran variación a lo largo del ciclo anual de estudio (Fig. 39).

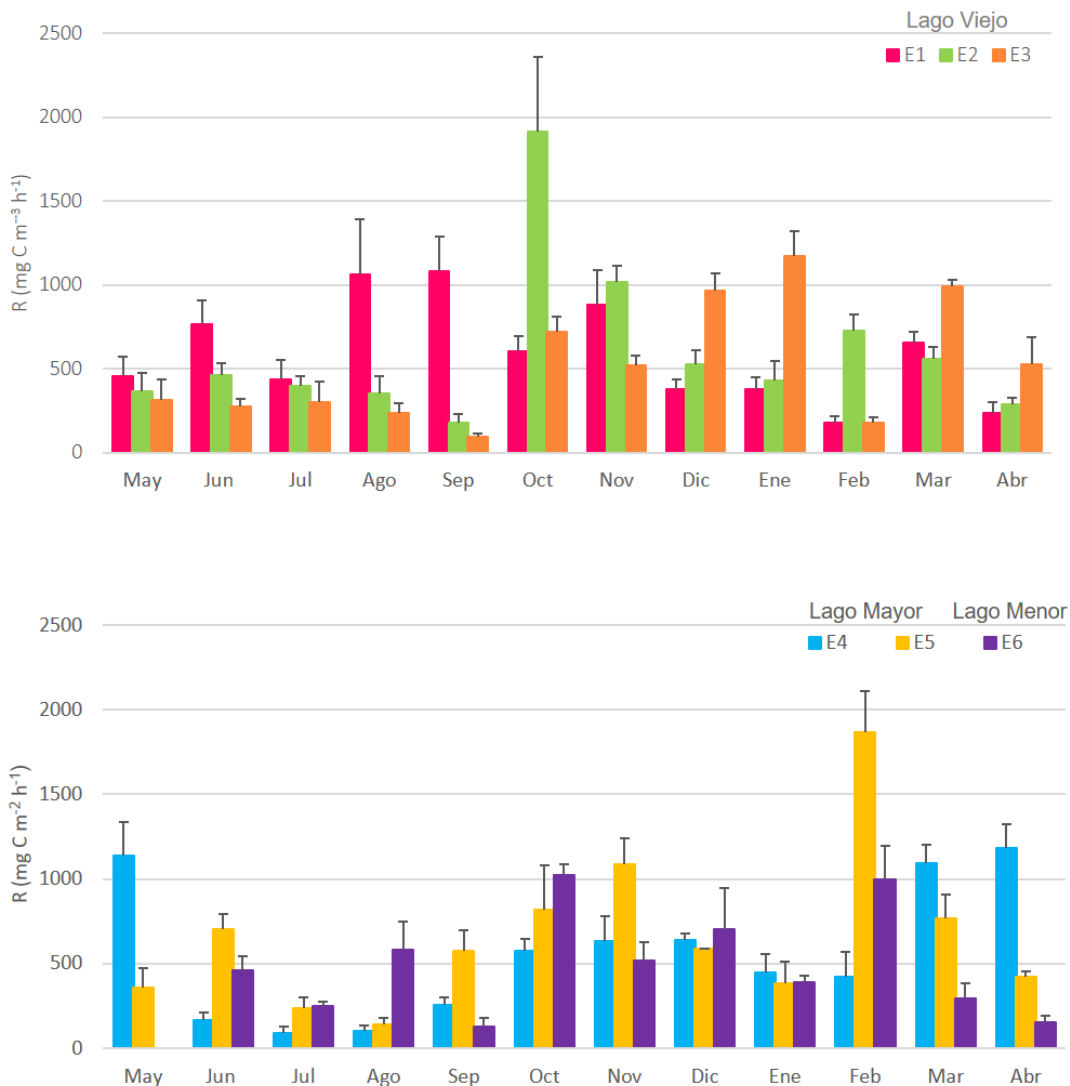


Figura 39. Respiración (R mg C m³ h⁻¹ promedio mensual ± D.E) de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

El promedio anual de R para el Lago Viejo fue de $593 \pm 320 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en la E1, de $603 \pm 471 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para la E2 y $525 \pm 358 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para la E3 (Fig. 40). Los valores máximos registrados para las estaciones E1, E2 y E3 fueron $1,410 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, $2,425 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y $1,338 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, respectivamente. En cuanto a los valores mínimos para la E1 se registró $139 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, para la E2 $137 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y para la E3 $175 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (Tabla 3).

En cuanto al Lago Mayor, la estación E4 registró un promedio anual de $562 \pm 395 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ y la E5 de $666 \pm 478 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (Fig. 40), con valores máximos de $1,358 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en la E4 y $2,149 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en la E5. Los registros mínimos fueron $61 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en la E4 y $104 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para la E5 (Tabla 3). La E6 tuvo un promedio de $499 \pm 315 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ con $1,225 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ como máximo registro anual y $77 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ como registro mínimo anual (Tabla 3).

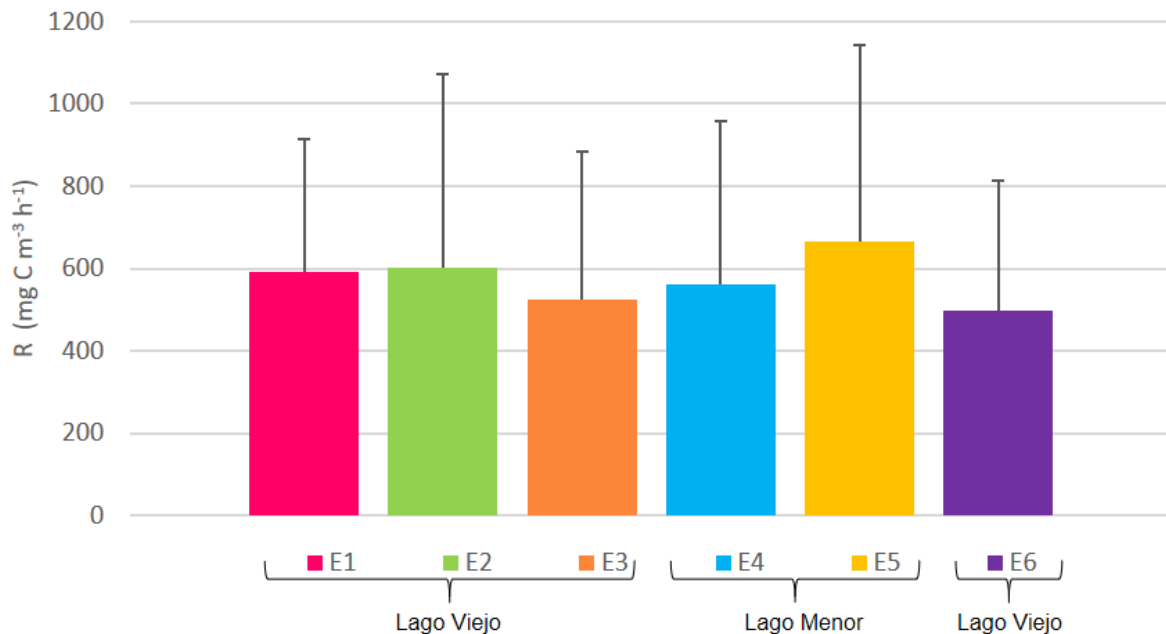


Figura 40. Respiración ($R \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ promedio anual \pm D.E) de las seis estaciones de muestreo de los lagos del Bosque de Chapultepec (2015-2016).

No se encontraron diferencias significativas entre los valores de respiración registrados en las seis estaciones.

Tabla 3. Datos del metabolismo lacustre de los tres lagos del Bosque de Chapultepec (Clor- α = clorofila α , PPB= producción primaria bruta, PPN= producción primaria neta, R=respiración). Se muestran valores promedio, desviación estándar y rango.

Variables ambientales		E1	E2	E3	E4	E5	E6
		<i>Lago Viejo</i>			<i>Lago Mayor</i>		<i>Lago Menor</i>
Clor- α ($\mu\text{g L}^{-1}$)	\bar{X}	334.1	433.6	427.2	303	327.6	485.1
	D.E	± 99.2	± 86	± 78.4	± 151.2	± 121.2	± 185.1
	R	153-491	237-555	263-513	120-671	196-612	250-770
PPB ($\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)	\bar{X}	1488	1642	1809	1329	1580	1500
	D.E	± 478	± 484	± 413	± 526	± 519	± 443
	R	605-2373	919-2890	750-2584	585-2625	878-2803	816-2292
PPN ($\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)	\bar{X}	989	1129	1327	858	1030	1073
	D.E	± 395	± 438	± 497	± 415	± 430	± 307
	R	397-1951	437-2290	460-2344	293-1781	464-2083	464-1581
R ($\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)	\bar{X}	593	603	525	562	666	499
	D.E	± 320	± 471	± 358	± 395	± 478	± 315
	R	139-1410	137-2425	175-1338	61-1358	104-2149	77-1225

(\bar{X} : promedio anual, D.E: desviación estándar. R: rango).

Correlación entre metabolismo lacustre y los parámetros fisicoquímicos

La PPB y PPN presentaron correlación positiva con la Clor- α ; sin embargo, también se registraron correlaciones negativas entre la PPN y algunos nutrientes, especialmente las formas de nitrógeno como N-NO₃, N-NO₂ y NID. En cuanto a la R, sólo se registró correlación positiva con el OD. La Clor- α , está correlacionada de forma negativa con la temperatura, la Z_{DS}, N-NO₃, N-NO₂, NID y P-PO₄ (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y los parámetros fisicoquímicos de los lagos del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos).

Variable	PPB	PPN	R	Clor- α
Temperatura (°C)				-0.356 ^a
OD	0.282 ^b		0.507 ^a	
% Sat. OD				
Z _{DS} (m)				-0.364 ^a
K ₂₅ (μ S cm ⁻¹)				
pH				
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	-0.297 ^b	-0.284 ^b		-0.392 ^a
N-NO ₂ (mg L ⁻¹)		-0.274 ^b		-0.273 ^b
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)				
NID (mg L ⁻¹)	-0.251 ^b	-0.266 ^b		-0.391 ^a
N-Total (mg L ⁻¹)				
P-Total (mg L ⁻¹)				
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	-0.249 ^b			-0.315 ^a
Clor- α (μ g L ⁻¹)	0.267 ^b	0.309 ^a		
PPB (mg C m ⁻³ h ⁻¹)		0.743 ^a	0.496 ^a	0.267 ^b
PPN (mg C m ⁻³ h ⁻¹)	0.743 ^a			0.309 ^a
R (mg C m ⁻³ h ⁻¹)	0.496 ^a			

(^aP < 0.01, ^bP < 0.05).

En cuanto a la correlación por lago (Lago Viejo, Lago Mayor y Lago Menor), la PPB y la PPN del Lago Viejo no registraron correlaciones significativas respecto a

los parámetros fisicoquímicos evaluados; pero la R estuvo correlacionada positivamente con el OD y la PPB. La Clor- α , por su parte, registró correlaciones negativas con algunos parámetros fisicoquímicos como la K_{25} , N-NO₂, N-NH₃, NID, P-TOTAL y P-PO₄ (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos para el Lago Viejo del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos).

Variable	Lago Viejo			
	PPB	PPN	R	Clor- α
Temperatura (°C)				
OD			0.544 ^a	
% Sat. OD				
Z _{DS} (m)				
K ₂₅ (μ S cm ⁻¹)				-0.394 ^b
pH				
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)				
N-NO ₂ (mg L ⁻¹)				-0.418 ^b
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)				-0.512 ^a
NID (mg L ⁻¹)				-0.402 ^b
N-Total (mg L ⁻¹)				
P-Total (mg L ⁻¹)				-0.384 ^b
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)				-0.404 ^b
Clor- α (μ g L ⁻¹)		0.405 ^b		
PPB (mg C m ⁻³ h ⁻¹)		0.732 ^a	0.388 ^b	
PPN (mg C m ⁻³ h ⁻¹)	0.732 ^a			0.405 ^b
R (mg C m ⁻³ h ⁻¹)	0.388 ^b			

(^aP<0.01, ^bP<0.05).

En el Lago Mayor, la PPB, tuvo correlación positiva con el OD y la Clor- α y de forma negativa con el N-NO₃. En cuanto a la PPN, no se registraron correlaciones

significativas con ningún parámetro fisicoquímico. La R por su parte también se correlacionó positivamente con el OD y negativa con el P-PO₄. La Clor- α , presentó correlación positiva con el OD y negativa con el P-PO₄ (Tabla 6).

Tabla 6. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos para el Lago Mayor del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos).

Variable	Lago Mayor			
	PPB	PPN	R	Clor- α
Temperatura (°C)				
OD	0.605 ^a		0.564 ^a	0.531 ^b
% Sat. OD				
Z _{DS} (m)				
K ₂₅ (μ S cm ⁻¹)				
pH				
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)	-0.471 ^b			
N-NO ₂ (mg L ⁻¹)				
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)				
NID (mg L ⁻¹)				
N-Total (mg L ⁻¹)				
P-Total (mg L ⁻¹)				
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)			-0.434 ^b	-0.443 ^b
Clor- α (μ g L ⁻¹)	0.435 ^b			
PPB (mg C m ⁻³ h ⁻¹)		0.748 ^a	0.579 ^a	0.435 ^b
PPN (mg C m ⁻³ h ⁻¹)	0.748 ^a			
R (mg C m ⁻³ h ⁻¹)				

(^aP<0.01, ^bP<0.05)

En el Lago Menor, la PPB no registró correlaciones significativas con ningún parámetro fisicoquímico. La PPN se correlacionó negativamente con la K₂₅. La R se

correlacionó negativa con la Z_{DS} . La Clor- α se correlacionó de forma positiva con la PPB y negativa con la temperatura y la Z_{DS} (Tabla 7).

Tabla 7. Coeficientes de correlación entre el metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos para el Lago Menor del Bosque de Chapultepec (Solo se muestran los coeficientes significativos).

Variable	Lago Menor			
	PPB	PPN	R	Clor- α
Temperatura (°C)				-0.868 ^a
OD				
% Sat. OD				
Z_{DS} (m)			-0.590 ^b	-0.785 ^a
K_{25} ($\mu\text{S cm}^{-1}$)		-0.608 ^b		
pH				
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)				
N-NO ₂ (mg L ⁻¹)				
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)				
NID (mg L ⁻¹)				
N-Total (mg L ⁻¹)				
P-Total (mg L ⁻¹)				
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)				
Clor- α ($\mu\text{g L}^{-1}$)				
PPB (mg C m ⁻³ h ⁻¹)		0.762 ^a	0.767 ^a	0.839 ^a
PPN (mg C m ⁻³ h ⁻¹)	0.762 ^a			
R (mg C m ⁻³ h ⁻¹)				

(^aP < 0.01, ^bP < 0.05).

DISCUSIÓN

Parámetros fisicoquímicos

Por sus características fisicoquímicas y bióticas, los lagos del Bosque de Chapultepec se definen como lagos hipertróficos. Además de verse afectados por las altas cargas de nutrientes que provienen de la planta de tratamiento secundario de aguas residuales del Bosque de Chapultepec la cual aporta grandes cantidades de fósforo y nitrógeno, forman una reserva abundante que es utilizada por el fitoplancton, lo que se ve reflejado en una alta productividad y provoca eutrofización en estos sitios. Las concentraciones de nutrientes registradas en los lagos son muy elevadas según los criterios de Wetzel (2001).

No se registró patrón alguno de estacionalidad en las condiciones acuáticas; es decir, la época cálida-lluviosa y la época fría-seca no tuvieron correlación alguna con las variables, lo cual pudo ser causado por el manejo de entrada y salida de agua el cual se hace sin patrón alguno. No obstante, lo anterior, las características fisicoquímicas registradas en los lagos del Bosque de Chapultepec son comparables con las de otros cuerpos de agua urbanos, eutróficos y de uso recreativo; pese a estas similitudes, las concentraciones de nutrientes registradas en los Lagos del Bosque de Chapultepec resultaron más elevadas que las de otros lagos equivalentes (Tabla 8).

Tabla 8. Comparación de valores de parámetros fisicoquímicos de los lagos del Bosque de Chapultepec con otros sistemas eutróficos.

Cuerpo acuático	Temp. (°C)	pH	OD mg L ⁻¹	N total mg L ⁻¹	P total mg L ⁻¹	Referencia
Parque ecológico, Alameda Oriente, CdMx	20	10.74	5.70	0.60	4.40	Pineda Mendoza <i>et al.</i> 2011
Pista olímpica de remo y canotaje, Cuemanco Xochimilco, CdMx	20	10.28	8.70	0.70	1.62	Pineda Mendoza <i>et al.</i> 2011
Lago del Parque Alameda Solidaridad, Cuernavaca Mor.	17.5-27	8.3-10.20	5.70-6.70	0.61-16.4	1.36-8.01	García-Rodríguez <i>et al.</i> 2014
Lago de la Universidad del Edo. de Lousiana	27.20-33.20	—	3.10-17.10	—	0.080-0.392	Burden y Malone 1985
Lago Liuyin, Beijing	—	—	—	1.9	0.19	Qiong-Wu <i>et al.</i> 2014
Lago Lianhua, Beijing	—	—	—	4.0	0.14	Qiong-Wu <i>et al.</i> 2014
Lago Tezozómoc, CdMx	13.50-22	8-9	0-24.30	—	—	Morlán 2010
Lagos de Chapultepec CdMx						
Lago Viejo	15.50	8.76	7.8	—	1.57	Alcocer <i>et al.</i> 2007
Lago Mayor	18.00	9.20	13.5	—	2.78	
Lago Menor	16.10	9.97	12.5	—	1.44	
Lagos de Chapultepec CdMx						
Lago Viejo	18.66	9.31	9.99	9.08	0.42	Este estudio
Lago Mayor	21.17	9.57	13.73	14.75	0.51	
Lago Menor	19.57	9.78	11.40	14.03	0.48	

De acuerdo con la clasificación de Hutchinson (1957), los lagos de Chapultepec pueden catalogarse como subtropicales y tropicales, ya que se sitúan sutilmente por debajo del intervalo que este autor propone para lagos tropicales, que es entre 20 y 30°C, pues los lagos de Chapultepec presentaron temperaturas entre 11.25 y 26.7°C, de acuerdo con la variación en la columna de agua. Lo anterior se debe a la influencia que tiene la altitud de la Ciudad de México sobre el clima (aprox. 2,300 m s.n.m.).

Según Lewis (1996), estos lagos describen un típico comportamiento de lagos someros polimícticos cálidos continuos, en los que la estratificación vertical no permanece por más de algunas horas. Es importante destacar que Alcocer *et al.* (1988) reportó valores de temperatura similares para los tres lagos (promedio Lago Viejo 15.5 °C, Lago Mayor 18 °C y Lago Menor 16.1 °C), así como Verver y Vargas (2004) para el lago urbano Tezozómoc con temperaturas entre 18 y 23°C. Las diferencias encontradas en este parámetro en los lagos del Bosque de Chapultepec seguramente son efecto de la hora del día en la que se realizaron los muestreos, el lago Mayor por ejemplo, fue donde generalmente se registraron las temperaturas más altas, debido a que el muestreo se realizó entre las 15 y 17 hrs., lo que pudo tener un papel determinante en la presencia de estas diferencias reportadas, en el caso de los Lagos Viejo y Menor, el muestreo se realizó cuando la intensidad de radiación solar era más baja.

Los valores de transparencia del disco de Secchi fueron muy bajos en todas las estaciones de los lagos de Chapultepec (0.02-0.4 m). Estos valores indican que menos de un tercio de la columna de agua posee condiciones de luz apropiadas para efectuar el proceso de fotosíntesis, debido a que las cantidades excesivas de fitoplancton provocan bioturbidez en el agua y frenan el paso de la luz a la zona más

profunda de los lagos, resaltando un permanente florecimiento algal en la E6 (Lago Menor).

El OD estuvo presente en las seis estaciones de los tres lagos del Bosque de Chapultepec. Por un lado, en la superficie, las concentraciones fueron elevadas (sobresaturación) producto del proceso fotosintético activo y persistente durante las horas luz del día, además, el horario en el que se realizaron las mediciones de OD en las seis estaciones fue muy variado, entre las 10:00 horas y las 17:00 horas, lo que influyó de manera directa en el resultado final de las concentraciones de este parámetro, debido a que a mayor temperatura, este gas es menos soluble, que concuerda con las bajas concentraciones (subsaturación) de este gas hacia el fondo de los cuerpos acuáticos, por el otro lado, la gran cantidad de materia orgánica que se deposita en el fondo de los lagos demanda oxígeno para su descomposición y provoca también el abatimiento de este gas en el fondo de los lagos. Lo anterior indica que existen procesos activos de síntesis (PP) y descomposición (R) de materia orgánica. Los valores de concentración de este gas se comparan con el de otros cuerpos acuáticos similares (Tabla 8). Las variaciones extremas de este parámetro son típicas de lagos someros eutróficos (Alcocer y Lugo 1995).

El pH es considerado como un parámetro estable, principalmente por el sistema de amortiguamiento asociado con las formas de carbono presentes en los sistemas acuáticos. La hidrólisis de carbonatos y bicarbonatos puede ser un mecanismo de regulación que puede generar un aumento en la concentración de OH⁻, incrementando así los valores de este parámetro (Armienta *et al.*, 2008). Los valores de pH fueron siempre básicos durante el ciclo de muestreo. La variación espacial del mismo fue mínima; sin embargo, se registraron variaciones temporales entre las seis estaciones de los lagos. La variación alta en las tasas fotosintéticas pudo causar la variación temporal, en la cual se consume CO₂ en gran medida y de esta

forma aumenta el pH, o bien a los tiempos de inicio y conclusión de cada muestreo, ya que finalizaban en horas de mayor insolación, este ligero aumento en la temperatura aumenta la solubilidad de sales, lo que incrementa la concentración de iones en el agua y por ende el pH es más elevado, los valores de pH que se obtuvieron en este trabajo, a pesar de la hora de toma de la muestra son poco variables y muy parecidos a los registrados en otros lagos urbanos (Tabla 8).

Los resultados de las concentraciones de nutrientes indican que los lagos son reflejo de ser alimentados con agua residual que no es tratada terciariamente para la remoción de nutrientes, lo que propicia elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo, presentándose las condiciones más extremas en las estaciones E1, E4 y E5 asociado a las entradas de las aguas tratadas.

Metabolismo lacustre

Se considera que la biomasa fitoplanctónica en los sistemas acuáticos es limitada por las concentraciones de nitrógeno y fósforo (Howart y Marino 2006). En este caso, la concentración de Clor- α se utilizó como indicador de biomasa fitoplanctónica, los valores registrados de Clor- α en el presente trabajo fueron inferiores a los reportados por Alcocer *et al.* (1988) quién encontró concentraciones entre 329 y 502 $\mu\text{g L}^{-1}$ y superiores a los reportados para el lago urbano Tezozómoc (Morlán 2010), quien reportó concentraciones entre 43 y 364.8 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación entre concentración promedio de la concentración de Clor- α $\mu\text{g L}^{-1}$ entre los lagos del Bosque de Chapultepec y otros sistemas eutróficos.

Lago	Clor- α $\mu\text{g L}^{-1}$	Fuente
Lagos de Chapultepec CdMx		
Lago Viejo	502	Alcocer <i>et al.</i> 2007
Lago Mayor	336	
Lago Menor	329	
Tezozómoc, CdMx	43-364	Morlán 2010
Lago de la Universidad Lousiana	64-394	Burden y Malone 1985
Lago Liuyin, Beijing	107.9	Qiong-Wu <i>et al.</i> 2014
Lago Lianhua, Beijing	68.6	Qiong-Wu <i>et al.</i> 2014
Lago Zeekaevle, Sudáfrica.	171-433	Harding 1997
Lagos de Chapultepec CdMx		
Lago Viejo	398.32	Este estudio
Lago Mayor	315.32	
Lago Menor	485.12	

La variación tan amplia en la concentración de Clor- α a lo largo del ciclo de estudio es típica de lagos hipertróficos (Barica 1992). La OCDE (1982) clasifica como hipertróficos a los cuerpos de agua que registran concentraciones de Clor- α iguales o mayores a $100 \mu\text{g L}^{-1}$, la concentración en estos lagos varió entre 109 a $843 \mu\text{g L}^{-1}$, lo que refleja las condiciones dominantes de los sistemas donde, los florecimientos algales son considerables y característicos de estos tipos de sistemas eutróficos.

Esta biomasa en general está representada por distintas especies de fitoplancton que dominaron en los lagos del Bosque de Chapultepec. De acuerdo con Alcocer (2017), están presentes 39 especies fitoplanctónicas, entre las cuales, las

de la familia *Chlorophyceae* representaron el mayor número, que representa el 69%, *Cyanobacteria* con 20%, *Bacillariophyceae* con 8% y *Cryptophyceae* con 3% (Tabla 10).

Tabla 10. Listado de las especies de fitoplancton más importantes registradas en los Lagos del Bosque de Chapultepec (Tomado de Alcocer, 2017).

1. <i>Actinastrum hanschii</i>			
2. <i>Acutodesmus acuminatus</i>			
3. <i>Acutodesmus dimorphus</i>			
4. <i>Carteria</i> sp.			
5. <i>Chlamydomonas globosa</i>			
6. <i>Chlorogonium</i> sp.			
7. <i>Coelastrum astroideum</i>			
8. <i>Desmodesmus maximus</i>			
9. <i>Desmodesmus protuberans</i>			
10. <i>Dimorphococcus</i> sp.			
11. <i>Eudorina elegans</i>			
12. <i>Gonium pectorale</i>			
13. <i>Golenkinia radiata</i>			
14. <i>Kirchneriella lunaris</i>	Chlorophyceae		
15. <i>Micractinium pusillum</i>			
16. <i>Monoraphidium arcuatum</i>			
17. <i>Monoraphidium griffithii</i>			
18. <i>Monoraphidium irregulare</i> **			
19. <i>Monoraphidium minutum</i> **			
20. <i>Monoraphidium nanum</i>			
21. <i>Oocystis</i> sp.			
22. <i>Pectinodesmus pectinatus</i>			
23. <i>Pseudopediastrum boryanum</i>			
24. <i>Pteromonas aculeata</i>			
25. <i>Pteromonas angulosa</i> **			
26. <i>Scenedesmus bicaudatus</i>			
27. <i>Scenedesmus quadricauda</i>			
			1. <i>Merismopedia tenuissima</i> **
			2. <i>Microcystis aeruginosa</i> **
			3. <i>Microcystis flos aquae</i> **
		4. <i>Microcystis novacekii</i> **	
		5. <i>Microcystis panniformis</i> **	
		6. <i>Microcystis</i> sp. **	
		7. <i>Pseudanaabaena mucicola</i> **	
		8. <i>Pseudanaabaena limnetica</i> **	
		1. <i>Cyclotella meneghiniana</i> **	
		2. <i>Nitzschia amphibia</i>	
		3. <i>Nitzschia palea</i>	
		1. <i>Cryptomonas ovata</i>	

** especies dominantes en las seis estaciones

La biomasa fitoplanctónica estuvo ampliamente dominada por Chlorophyceae y Cyanobacteria, grupos indicadores de ambientes eutróficos. La elevada concentración de nitrógeno y fósforo disponibles induce a la proliferación de cianobacterias tales como *Microcystis*, que es uno de los géneros más importantes causantes de florecimientos algales en los lagos de Chapultepec.

Los valores que se describen en este trabajo respecto al metabolismo lacustre son evidencia de las elevadas tasas del PP asociadas a la alta carga de nutrientes que aportan el agua tratada con la que son llenados los lagos (Alcocer, 2017).

La Tabla 9 muestra valores de PPB medidos en sistemas acuáticos de estado trófico similar al de los lagos de Chapultepec; por ejemplo, en el lago hipertrófico Tezozómoc, Ciudad de México, se registraron valores muy elevados de PPB de entre 452 y 11,958 mg C m⁻³ h⁻¹, los cuales son incluso mayores a los registrados para el presente estudio.

Harding (1997) analizó la PPB del lago Zeekaevle (Tabla 11), ubicado al sur de África que, como ya se mencionó, presenta un estado trófico similar a los Lagos de Chapultepec y corresponde a un lago somero tropical, en el cual se registraron valores entre los 439 y 1,524 mg C m⁻³ h⁻¹. Los valores de PPB más elevados se registraron durante los meses en los que la temperatura fue más elevada, de forma similar a lo encontrado en los lagos de Chapultepec.

Tabla 11. Comparación entre el rango, la concentración promedio y desviación estándar (D.E.) de la productividad primaria bruta (PPB) de los tres lagos de Chapultepec con otros sistemas eutróficos.

Lago	PPB (mg C m ⁻³ h ⁻¹)	Fuente
Tezozómoc, CdMx	452-11,958	Morlán 2010
Lago Zeekaevle, Sudáfrica	525-1,524	Harding 1997
Lago Apopka, Florida EE. UU.	400-1,050	Gale y Reddy 1994
Lagos de Chapultepec, CdMx		
Lago Viejo	1,646 ± 437	Este estudio
Lago Mayor	1,473 ± 528	
Lago Menor	1,500 ± 429	

Los tres lagos del Bosque de Chapultepec funcionan como sumideros de carbono, al menos durante las horas luz del día; su condición autotrófica se debe a que la PPB anual en los tres lagos excede entre 2 y 3 veces a la R (LV: 2.9, LMA: 2.4 LME: y 3.0).

Correlación entre metabolismo lacustre y parámetros fisicoquímicos

La PPB y la PPN presentaron correlación positiva con la Clor- α lo cual implica la relación existente entre las grandes cantidades de biomasa fitoplanctónica generada, que son producto de la elevada tasa fotosintética como resultado en una PP muy elevada, alimentada por la gran disponibilidad de nutrientes (Tabla 4). Se encontraron correlaciones negativas entre PPN y los nutrientes analizados, especialmente las formas de nitrógeno como N-NO₃, N-NO₂, NID; éstos disminuyen al ser consumidos por el fitoplancton en el proceso fotosintético. La Clor- α se

correlacionó de forma negativa con la temperatura, la Z_{DS} , $N-NO_3$, $N-NO_2$, NID y $P-PO_4$. La elevada turbidez biogénica explica claramente la relación inversa con Z_{DS} y como se explicó arriba, la concentración de los nutrientes se ve disminuida al aumentar la biomasa fitoplanctónica en los ecosistemas (Tabla 4).

En cuanto a la correlación por lago, la PPB y la PPN del lago Viejo no registraron correlaciones significativas respecto a los parámetros fisicoquímicos evaluados, para el caso de la respiración, se presentó correlación positiva con el OD y la PPB. La Clor- α por su parte, registró correlaciones negativas con algunos parámetros fisicoquímicos como la K_{25} , $N-NO_2$, $N-NH_3$, NID, P-TOTAL y $P-PO_4$ (Tabla 5).

Respecto al Lago Mayor, la PPB, tuvo una correlación positiva con el OD y la Clor- α y de forma negativa con el $N-NO_3$. En cuanto a la PPN, no se registraron correlaciones significativas con ningún parámetro fisicoquímico. La R por su parte también se correlacionó positivamente con el OD y negativa con el $P-PO_4$. La Clor- α , presentó correlación positiva con el OD y negativa con el $P-PO_4$ (Tabla 6).

En el Lago Menor, no se encontraron correlaciones significativas con ningún parámetro fisicoquímico en cuanto a la PPB. La PPN se correlacionó negativamente con la K_{25} y la R se correlacionó negativamente con la Z_{DS} . La Clor- α se correlacionó de forma positiva con la PPB y negativa con la temperatura y la Z_{DS} (Tabla 7).

Es conveniente realizar estudios más finos referentes al metabolismo lacustre, que incluyan tanto análisis en horas luz y sin ella, ya que estos pueden revelar el funcionamiento real de un ciclo de 24 horas de este proceso biológico en los lagos del bosque de Chapultepec, para poder comprender la relación funcional entre las bacterias y las variables limnológicas, de igual forma, podría observarse de manera más específica la influencia que tiene el hombre en el manejo de estos sitios.

Los valores obtenidos en este trabajo pueden ser usados como línea base para un posible manejo o restauración de los lagos del Bosque de Chapultepec, una mejoría en el estado trófico de estos sitios, puede contribuir a un uso eficiente del paisaje urbano y a una mejoría en la calidad de vida de los visitantes de estos sitios.

CONCLUSIONES

1. Los valores registrados de las variables ambientales medidas (p.ej., OD elevado –sobresaturación- en superficie y bajo –subsaturación- en el fondo, pH básico, reducida visibilidad del disco de Secchi, elevada concentración de nutrientes y de clorofila “a” así como las tasas de producción primaria elevadas) caracterizaron a los lagos de Chapultepec como sistemas hipertróficos. Para resolver el problema de eutrofización de los lagos se requeriría, como primer paso, la eliminación o al menos la reducción del aporte de nutrientes en la fuente de abastecimiento.
2. Debido a su tamaño reducido y someridad, los lagos son horizontalmente homogéneos tanto en las variables ambientales como en la concentración de nutrientes y de clorofila “a”, así como en las tasas de producción primaria. Sin embargo y a pesar de tener la misma fuente de alimentación, los tres lagos resultaron diferentes entre sí tanto en la concentración de nutrientes y de clorofila “a”, como en las tasas de producción primaria. El LMA presentó mayores concentraciones que el LV y éste mayores que el LME. Lo anterior sugiere que cada lago constituye un ecosistema individual que requeriría de la aplicación de acciones individuales/particulares para dar solución a su problemática particular.
3. El metabolismo lacustre de los lagos de Chapultepec expresado por la relación PPB/R (LV: 2.9, LMA: 2.4, LME: 3.0) indica éstos son importantes sumideros de carbono, al menos durante las horas de luz, es decir, tienen una condición autotrófica neta. Lo anterior implica su importancia como

proveedores de bienes y servicios a nivel local/regional como actores de control de cambio climático.

4. Los Lagos de Chapultepec son lagos urbanos con características de ambientes hipertróficos, mismas que resultan indeseables para el uso destinado, en este caso, uso recreativo de contacto secundario y de preservación de flora y fauna acuática, que requieren de implementar mecanismos de control y eventual disminución de su estado trófico. La larga tradición de sitio de esparcimiento y recreación que acompaña a los lagos de Chapultepec justifica que se tomen medidas para mejorar la calidad de su agua y garantizar la seguridad de los numerosos usuarios.

LITERATURA CITADA

- Alcocer, J. 2017. Estudio de la productividad primaria de los Lagos Menor y Mayor de la 1ª Sección del Bosque de Chapultepec a través de imágenes satelitales en tiempo real y sobre el impacto de los tóxicos y contaminantes en especies nativas 189194. Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del Distrito Federal 3er INFORME DE AVANCE TÉCNICO marzo 2017. 40 pp.
- Alcocer, J. 2015. Estudio de la productividad primaria de los Lagos Menor y Mayor de la 1ª Sección del Bosque de Chapultepec a través de imágenes satelitales en tiempo real y sobre el impacto de los tóxicos y contaminantes en especies nativas 189194. Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del Distrito Federal 1er INFORME DE AVANCE TÉCNICO abril 2015. 10 pp.
- Alcocer, J., A. Lugo, G. Vilaclara, Ma. Sánchez y M. Chávez. 2007. Lagos de Chapultepec, Ciudad de México. pp. 114-124. En: De la Lanza, G. y Hernández, P. 2007. Las aguas interiores de México: conceptos y casos. AGT editor.
- Alcocer, J., y A. Lugo. 1995. The urban lakes of Mexico City (Lago Viejo de Chapultepec). *LakeLine* 15: 14-31.
- Alcocer, J., E. Kato, E. Robles y G. Vilaclara. 1988. Estudio preliminar del efecto del dragado sobre el estado trófico del Lago Viejo de Chapultepec. *Revista de Contaminación Ambiental* 4: 43-56.
- Almaza-Marroquín, V., R. Figueroa, O. Parra, X. Fernández, C. Baeza, J. Yáñez y R. Urrutia. 2016. Bases limnológicas para la gestión de los lagos urbanos de Concepción, Chile. *Latin America Journal of Aquatic Research* 44(2): 313-326.

- Álvarez-Cobelas, M. y B.A. Jacobsen. 1992. Hypertrophic phytoplankton: an overview. *Freshwater Forum* 2: 184-199.
- Arar, E. y G. Collins. 1997. Method 445.0. In vitro determination of chlorophyll *a* and pheophytin *a* in marine and freshwater algae by fluorescence. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati. EEUU.
- Armienta, M., G. Vilaclara, S. de la Cruz-Reyna, S. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo y F. Arcega-Cabrera. 2008. Water chemistry of lakes related to active and inactive mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178: 249-258.
- Balmford A., A. Bruner, P. Cooper, R. Costanza, S. Farber, R. E. Green, M. Jenkins, P. Jefferiss, V. Jessamy, J. Madden, K. Munro, N. Myers, S. Naeem, J. Paavola, M. Rayment, S. Rosendo, J. Roughgarden, K. Trumper y R. K. Turner. 2002. Economic reasons for conserving wild nature. *Science*: 297: 950-953.
- Barica, J. 1992. Sustainable management of urban lakes: a new environmental challenge. *Central Canadian Symposium on Water Pollution Research*. Burlington, Ontario. 211 pp.
- Birch, E. y J. McKaskie. 1999. Shallow urban lakes: a challenge for lake management. *Hydrobiologia* 395/369: 365-377.
- Boracio-León, O., R. Millán-Núñez, E. Santamaría y A. González- Silvera. 2007. Productividad primaria del fitoplancton en la zona eufótica del sistema de la corriente de California estimada mediante imágenes del CZCS. *Ciencias Marinas* 33(1): 59-72.

- Boyd, C.E. y C.S. Tucker. 1992. Water quality and pond soil análisis for aquaculture. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn Univerity, Alabama. 3(11): 183 pp.
- Burden, D. y R. Malone. 1985. Instability in a small hypereutrophic urban lake. Environmental Monitoring and Assessment 9: 13-24.
- Carignan, R., D. Planas y C. Vis. 2000. Planktonic production and respiration in oligotrophic Shield lakes. Limnology and Oceanography 45: 189-199.
- Caro-Borrero A. 2012. Evaluación del pago por servicios ambientales hidrológicos: una perspectiva socioambiental en la cuenca del Rio Magdalena, México, D.F. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM.
- Carole, L. y B. Boyle. 1993. Population and land use in developing countries. National Academy Press. Washington, D.C. 170 pp.
- Castillo, C. 2010. La organización del espacio lacustre. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Chapa-Balcorta, C. y R. Guerrero-Arenas. 2010. Eutrofización: abundancia que mata. ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la Universidad Nacional Autónoma de México. 12(134):22-25.
- Cole, J.J., M.I. Pace, S.R. Carpenter y F. Kitchell. 2000. Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulation. Limnology and Oceanography 45: 1718-1730.
- Cruz-Muñoz, M. y M.A. Martínez-Arroyo. 1999. Respuesta fotosíntesis-irradiación del nanoplancton de dos ecosistemas acuáticos urbanos. Revista de Biología Tropical 47 (1): 37-42.

- Díaz, J. y A. Curiel. 2012. Bosques urbanos para enfriar las ciudades. *Acedemia Mexicana de ciencia. Ciencia-Cambio Climático*. 63(4):6.
- Enríquez, C. A. 2012. El bosque de Chapultepec y la transformación de su entorno. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México D.F.
- Falkowsky, P.G. 1997. Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean. *Nature* 387: 272-275.
- Gaarder, T. y H. Gran. 1927. Investigations of the production of plankton in the Oslo Fjord. *Rapports et Proces-verbaux des Réunions. Conseil International pour l'Éxploration de la Mer* 42: 1-48.
- Gale, P. y K. Reddy. 1994. Carbon flux between sediment and water column of a shallow, subtropical hypertrophic lake. *Journal of Environmental Quality* 23: 965-972.
- García-Rodríguez, J., I. Molina, E. Miranda, M. Soriano y M. Díaz. 2014. Variación fitoplanctónica en un lago urbano del municipio de Cuernavaca Morelos, México. *Acta Universitaria*. 25(1): 3-11.
- Hakanson, L. y V. Boulion. 2002. The lake foodweb – modeling predation and abiotic/biotic interactions. Backhus Publishers, Leiden, 344 pp.
- Harding, W. 1997. Phytoplankton primary production in a shallow, well-mixed, hypertrophic south African lake. *Hydrobiologia* 344: 87-102.
- Hernández, E., N. Jaime-Aguirre y J. Alberto-Palacio. 2011. Relación del pigmento Clorofila *a* y el bio-volumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénega de Ayapel, Córdoba-Colombia) *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Antioquia* 60:159-169 pp.

- Howart, R.W. y R. Marino. 2006. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. *Limnol Oceanogr.* 51:364-367.
- Hutchinson, G.E. 1957. *A Treatise on limnology. Geography, physics and chemistry of lakes.* Vol. 1. John Wiley & Sons. Nueva York. 1015 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos.* Distrito Federal Consultado 17-05-2016. En <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825292973>
- Jokimaki, J. 1999. Occurrence of breeding bird species in urban parks: effects of park structure and broad-scale variables. *Urban Ecosystems* 3: 21-31.
- Kjerfve, B. 1994. Coastal lagoon processes. *Elsevier Oceanography Series.* 60: 557 pp.
- Labounty, J. 1995. What's an urban lake worth? *Lakeline* 15: 6-7.
- Lewis, W. M. 1996. Tropical Lakes: how latitude makes a difference. Pp. 43-64. En Schiemer, F. y K. T. Boland (eds). *Perspectives in Tropical Limnology.* SPB. Amsterdam.
- Martínez-Arroyo, A. y E. Jáuregui. 2000. On the environmental role of urban lakes in Mexico city. *Urban Ecosystems* 4: 145-166 pp.
- Martínez-López, E.R., Mata, J.J. y Martínez, A. 2003. Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un cambio climático global. *Chapingo. Ciencias Forestales y del ambiente.* 9:57-67 pp.
- Martínez-Trinidad, T. 2011. Bosques urbanos, los pulmones de la Ciudad. *Postgrado Forestal. Urbanatura. Colegio de postgraduados.* 26-27 pp.

- Morlán, J. 2010. Producción primaria del fitoplancton en un lago hipertrófico durante la época de sequía. Tesis de pregrado. UNAM. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. 52 pp.
- Novoa, M., A.L. M. de Fabricius, M.L. Luque y D. Lombardo. 2011. Distribución temporal del fitoplancton en un lago urbano del centro de Argentina (Rio Cuarto, Córdoba). *Biológicas*, 13(2):1-14 pp.
- OCDE (Organization for Economic Cooperation and Development). 1982. Eutrophication of waters: Monitoring, Assessment and Control. Final Report. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control). Environment Directorate, OECD, Paris. 154 pp.
- Oliva-Martínez, M. G., A. Rodríguez Rocha, A. Lugo Vázquez y M. R. Sánchez Rodríguez. 2008. Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico. *Hidrobiológica* 18 (1 Suplemento): 1-13 pp.
- Pineda-Mendoza, R., F. Martínez, G. Garduño y R. Olvera. 2011. Caracterización morfológica y molecular de cianobacterias filamentosas aisladas de florecimientos de tres lagos urbanos eutróficos de la ciudad de México. *Polibotánica*. 31:31-50 pp.
- Pollinger, U. 1986. Phytoplankton periodicity in a subtropical lake (lake Kinneret, Israel). *Hydrobiologia*. 138:127-138 pp.
- Qiong, W., X. Xinghui, L. Xiaohan y M. Xinli. 2014. Impacts of meteorological variations on urban lake water quality: a sensitivity analysis for 12 urban lakes with different trophic states. *Aquat. Sci.* 76:339-351 pp.

- Quirós, R. 2007. Manejo y recuperación de lagos urbanos. Serie de documentos de trabajo del área de sistemas de producción acuática. Facultad de agronomía. Universidad de Buenos Aires, 6: 1-16 pp.
- Quiroz del Campo, N.N. 2014. Variabilidad de la productividad fitoplanctónica en el sistema Lagunar Navachiste. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional (IPN). Centro Interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional. Sinaloa. 115 pp.
- Reynolds, C. 2006. The ecology of phytoplankton. Cambridge. University Press. Cambridge. Nueva York. 535 pp.
- Roldán G., J. Ramírez. 2008. Fundamentos de Limnología neotropical. Editorial de la Universidad de Antioquia. 2da ed. 440 pp.
- Salas, J.H. y P. Martino. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. Programa Regional CEPIS/HPE-OPS. 63 pp.
- Sánchez, O. 2007. Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. pp. 11-36. En: O. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (eds). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. SEMARNAT, INE, USDWS, UCAC y UMSNH. México. 293 pp.
- Schueler, T. y J. Simpson. 2003. Why urban lakes are different?. Water Protection Techniques 3(4): 747-750.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366).

- Verver y Vargas, G. 2004. Dinámica espaciotemporal de los parámetros físicos y químicos y su relación con la clorofila a en un lago urbano eutrófico. Tesis de Biología. UNAM. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. 55 pp.
- Wetzel, G. 2001. Limnology. Lake and river ecosystems. 3rd ed. Elsevier Science. San Diego. 1006 pp.
- Wetzel, G. y G.E. Likens. 1979. Limnological analyses. Ed. Saunders. Filadelfia. 391 pp.