



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Caracterización fisicoquímica y microbiológica del efluente de la  
PTAR-Chapultepec y sus efectos sobre los cuerpos receptores**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**Licenciado en Ciencias de la Tierra**

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

**Miriam Moranchel Mendoza**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Dr. Javier Alcocer Durand**

**2020**

**Ciudad Universitaria, CDMX**





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.

**Tutor**  
**Dr. Javier Alcocer Durand**  
**Facultad de Estudios Superiores Iztacala**

**Sinodal**  
**Dra. Ana Cecilia Espinoza García,**  
**LANCIS, Instituto de Ecología**

**Sinodal**  
**Dr. Jorge Ramírez Zierold**  
**Instituto de Ciencias del Mar y Limnología**

**Sinodal**  
**Dra. Vilma Soledad Ardiles Gloria**  
**Facultad de Estudios Superiores Iztacala**

**Sinodal**  
**Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar**  
**Facultad de Ciencias**

Citar este trabajo

Moranchel, M., 2020. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del efluente de la PTAR-Chapultepec y sus efectos sobre los cuerpos receptores, Ciudad de México. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 55.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue generado a partir del proyecto Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del Distrito Federal 189194 “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” y el Proyecto de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, UNAM.

Agradezco la guía, esfuerzo y apoyo del Dr. Javier Alcocer Durand por brindarme la posibilidad de trabajar con él para realizar este proyecto: aprendí mucho y lo disfruté de igual forma.

A la Dra. Vilma Ardiles, por el tiempo que dedicó en la revisión y corrección de este texto y de la información procesada.

A la Dra. Cecilia Espinoza y al Dr. Jorge Zierold por sus comentarios de este trabajo y por aceptar ser mis sinodales.

A nuestro profesor y coordinador de la carrera, el Dr. Omar Arellano, por darse el tiempo de revisar mi escrito.

A mi mamá, a mi papá y a mi hermana: por ser incondicionales. Gracias por haberme dado ánimos cuando yo no tenía, por su paciencia y su cariño.

A mis abuelos y tíos, por haberme apoyado en todos los aspectos durante mi carrera como estudiante, me han influenciado más de lo que pueden imaginar.

Mis más antiguos amigos, Vale, Fri y los Luises, porque nuestro apoyo y amistad trasciende milenios. De la prepa, Cos, Jesi, Diana, los llevo conmigo siempre. Axel por ayudarme a recordar los temas que no recordaba bien. Les agradezco

Querido equipo *Osho*, hicieron de la carrera toda una aventura y un trayecto más llevadero en los momentos complicados, los quiero infinitamente. Sam, Ari, Marito y también Alex: ¡Por más risas juntos! A los ambientales y a los no tanto: Mina, Jacobin: lo prometido es regla, a mis compañeros de aventuras y amigos de ambientales y a todos aquellos que me ayudaron durante la carrera y compartieron momentos conmigo. Los quiero *terrólogos*

A todos mis maestros y especialmente al Dr. Gio, por darme mi primer empleo, no tengo palabras para mostrarle mi agradecimiento.

*A la UNAM, por abrirme un mundo de posibilidades y a todos aquellos profesores e investigadores, que aun sin conocerme, me demostraron lo valioso que es compartir nuestros conocimientos con otras personas.*



## Índice General

1.	Resumen .....	9
2.	Introducción .....	11
	2.1 Importancia de los parques y lagos urbanos .....	11
	2.2 Calidad del Agua .....	11
	2.3 Normatividad .....	13
	2.4 Tratamiento de Aguas Residuales .....	16
3.	Marco Histórico .....	18
3.1	Propuesta de una nueva PTAR para los Lagos de Chapultepec .....	22
4.	Antecedentes .....	24
5.	Justificación .....	25
6.	Objetivos .....	25
	6.1 Generales .....	25
	6.2 Particulares .....	25
7.	Área de Estudio .....	26
8.	Materiales y Métodos .....	28
9.	Resultados .....	32
	9.1 pH .....	34
	9.2 Conductividad eléctrica .....	35
	9.3 Nitrógeno Total ( $N_{TOT}$ ) .....	36
	9.4 Fósforo Total ( $P_{TOT}$ ) .....	37
	9.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST) .....	38
	9.6 Coliformes fecales .....	39
	9.7 Coliformes totales .....	40
	409.8 Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) ...	41
	9.9 Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	42

10. Discusión	.....	43
11. Conclusiones	.....	49
12. Referencias	.....	51

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Límites máximos permisibles de Coliformes fecales y Demanda Bioquímica de Oxígeno.	14
<b>Tabla 2.</b> Límites máximos permisibles de concentración de nitrógeno y fósforo total.	14
<b>Tabla 3.</b> Límites máximos permisibles para conductividad eléctrica, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y coliformes totales establecidos por el Criterio SACM-1999.	15
<b>Tabla 4.</b> Límites máximos permisibles de fósforo total ( $P_{TOT}$ ), pH, nitratos ( $NO_3$ ), nitritos ( $NO_2$ ) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) aplicados al efluente de la PTAR Chapultepec (Ley Federal de Derechos, 2016).	15
<b>Tabla 5.</b> Límites máximos permisibles de Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), nutrientes, temperatura y pH, para las descargas de aguas residuales en embalses naturales y artificiales de uso público urbano y calidad del agua para fuente de abastecimiento para uso público y protección de la vida acuática (Ley Federal de Derechos, 2016).	16
<b>Tabla 6.</b> Tratamientos considerados para la nueva PTAR de Chapultepec (Suez México, s.f).	23
<b>Tabla 7.</b> Parámetros fisicoquímicos y biológicos registrados para la PTAR y en los lagos de Chapultepec.	33
<b>Tabla 8.</b> Comparación entre los parámetros determinados en el efluente de la PTAR <i>Chapultepec</i> y el agua de los <i>Lagos de Chapultepec</i> .	42
<b>Tabla 9.</b> Comparación de los valores analíticos del efluente de la PTAR-Chapultepec respecto a la PTAR-Montecito Sanctuary District, la PTAR-Santa Rosa Laguna y la PTAR-Atotonilco	48
<b>Tabla 10.</b> Comparación de las concentraciones de los parámetros medidos en efluente de la actual PTAR de Chapultepec respecto a los valores estimados para la nueva PTAR de Chapultepe	48



## Índice de Figuras

<b>Fig. 1.</b> De arriba a abajo, Lago Mayor, Lago Menor y pesca deportiva en Chapultepec. Colección Villasana-Torres. Fotografías obtenidas de El Universal (2016).	21
<b>Fig. 2.</b> Tren de tratamiento de la PTAR Chapultepec (Vela, 2016).	22
<b>Fig. 3.</b> Ubicación de los Lagos de Chapultepec y la PTAR Chapultepec, CDMX.	27
<b>Fig. 4.</b> En orden descendiente, Lago Viejo, Lago Mayor y Lago Menor de Chapultepec.	27
<b>Fig. 5.</b> Variación del pH en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	34
<b>Fig. 6.</b> Variación de la conductividad eléctrica en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	35
<b>Fig. 7.</b> Variación de la concentración de nitrógeno total ( $N_{TOT}$ ) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	36
<b>Fig. 8.</b> Variación de la concentración de fósforo total ( $P_{TOT}$ ) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	37
<b>Fig. 9.</b> Variación de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	38
<b>Fig. 10.</b> Variación de la concentración de coliformes fecales en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	39
<b>Fig. 11.</b> Variación de la concentración de coliformes totales en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	40
<b>Fig. 12.</b> Variación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) del efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	40
<b>Fig. 13.</b> Variación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.	42

## 1. Resumen

Los lagos urbanos son importantes proveedores de servicios ecosistémicos para las poblaciones, sin embargo, las condiciones de salud ecosistémica de éstos pueden deteriorarse debido a que son abastecidos con aguas residuales tratadas, lo que disminuye la calidad del agua y por ende los servicios que proporcionan a los usuarios. El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar y analizar las características físicas y químicas del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Chapultepec, fuente de abastecimiento de los lagos de Chapultepec, así como identificar los efectos generados en dichos lagos. El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) proporcionó los resultados analíticos de la calidad del agua del efluente de la PTAR Chapultepec para el año 2016, datos que fueron evaluados con base en las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) y el Criterio SACM-1999. El efluente de la PTAR Chapultepec presentó concentraciones de coliformes totales, coliformes fecales y fósforo total que sobrepasaron los límites máximos establecidos por la NOM-003-ECOL-1997, Criterio SACM-1999 y NOM-001-SEMARNAT-1996, respectivamente. El resto de las variables cumplieron con las NOMs al presentar valores por debajo de los límites máximos permisibles. No se presentó un patrón general en la dinámica temporal en las variables evaluadas, solo se identificó una tendencia al incremento del fósforo total y una disminución de la conductividad eléctrica en época de lluvias, mientras que los valores de pH disminuyeron hacia los últimos meses del año. A pesar de su antigüedad (61 años), las características de calidad del agua del efluente de la PTAR Chapultepec presentan mejores condiciones de tratamiento que otras plantas de tratamiento de aguas residuales equivalentes (tratamiento secundario) e incluso con tratamiento terciario. El análisis comparativo entre el efluente de la PTAR y los lagos mostró que las concentraciones de coliformes totales, fecales y fósforo fueron más bajas en los lagos, la conductividad resultó similar mientras que la concentración de nitrógeno, sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub> y DQO fueron más elevados en los lagos. Se espera que con la puesta en funcionamiento de la nueva PTAR Chapultepec se reduzca el aporte de DQO, así como de nutrientes que, a largo plazo, generará una disminución en la productividad primaria. Sin embargo, la elevada carga interna de nutrientes extenderá el periodo en que se pueda observar la reducción de la producción primaria.

## Abstract

Urban lakes are important ecosystem services' providers to the population; however, the environmental conditions of these waterbodies can deteriorate since they are mostly fed with treated wastewater, which decreases water quality and hence the services they provide to the users. The aim of this research was evaluating the physical, chemical and microbiological characteristics of the Chapultepec's wastewater treatment plant (WWTP) effluent, which feeds the 3 lakes of Chapultepec, as well as to identify the effects produced in these lakes. The Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) provided the water quality analytical results of the Chapultepec WWTP effluent (2016). The data were evaluated according to the Normas Oficiales Mexicanas and the Criterio SACM-1999. The concentrations of total coliform, fecal coliform, and total phosphorus of the Chapultepec WWTP effluent exceeded the maximum permissible limits established by NOM-003-ECOL-1997, Criterio SACM-1999 and NOM-001-SEMARNAT-1996, respectively. The other parameters were within the NOMs. There was not the expected temporal pattern (warm/rainy and cold/dry seasons) in the evaluated variables; nonetheless there was an increment in total phosphorus and a decrement in electrical conductivity in the rainy season, while the pH values decreased during the last months of the year. Despite it was built 61 years ago, the physical, chemical and microbiological characteristics of the Chapultepec WWTP effluent showed the WWTP performed better than other secondary and even tertiary treatment plants. The comparative analysis of the physical, chemical and microbiological characteristics of the WWTP effluent and the lakes showed that the concentrations of total and fecal coliforms and total phosphorus were lower in the lakes than in the effluent, the conductivity was similar, and the nitrogen concentration, total suspended solids, BOD and COD were higher in the lakes. When the new Chapultepec WWTP starts working, it is expected that COD and nutrients will be reduced and this condition will lead, in the long term, to decreasing the high rates of primary production. However, the high internal nutrient load in the sediments will extend the period in which the reduction of primary production will be observed.

## **2. Introducción**

### **2.1 Importancia de los parques y lagos urbanos**

Los parques urbanos son áreas verdes ubicados dentro de las ciudades que frecuentemente cuentan con la presencia de cuerpos de agua superficiales. Los parques tienen una importante función en las áreas urbanas ya que brindan servicios ambientales a la población entre los que se cuentan (Chiesura, 2004; Singh y Bhatnagar, 2012; Almanza-Marroquín *et al.*, 2016): el incremento del confort térmico poblacional, la generación de sensaciones positivas en los visitantes, la filtración del aire y del agua, la regulación del clima urbano, la reducción del ruido, la belleza escénica y el drenaje de agua de lluvia. Asimismo, brindan la posibilidad de desarrollar actividades recreacionales y educativas al aire libre. Por otra parte, proveen refugio, hábitat y alimento a diversas especies migratorias y nativas.

Debido a que el origen de los lagos urbanos es comúnmente artificial tienden a ser poco profundos y presentar problemas de eutroficación (Birch y McCaskie, 1999). Esto se debe a que son alimentados comúnmente con aguas residuales tratadas - con frecuencia tratamiento secundario- que presentan altas concentraciones de nutrientes biodisponibles, lo que resulta en el incremento de la productividad primaria de los cuerpos acuáticos (Carey y Migliaccio, 2009).

Igualmente pueden presentar contaminación por metales pesados o por la presencia de bacterias de origen fecal, añadiendo la posible existencia de microorganismos –tales como cianobacterias- que pueden producir sustancias tóxicas o compuestos de olor desagradable para el visitante (Naselli-Flores, 2008). Por lo anterior, y considerando que existe una interacción importante lago-usuario, es altamente recomendable que se garantice que los lagos urbanos cuenten con la calidad del agua adecuada al tipo de servicio que brindan a la población usuaria.

### **2.2 Calidad del agua y eutroficación**

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas que ésta presenta para que pueda ser utilizada para el fin específico que le fue asignado (Meybeck *et al.*, 1996). Para saber si el agua presenta condiciones adecuadas para un uso o

proceso definido, se toman en cuenta un conjunto de parámetros medibles como son la concentración de materia orgánica y de nutrientes, los sólidos suspendidos y disueltos, características fisicoquímicas como la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto entre otros (Rodríguez, 2017).

La eutroficación es un proceso natural, frecuentemente acelerado por las actividades humanas, que se desarrolla en los cuerpos acuáticos y consiste en la proliferación excesiva de microorganismos fotosintéticos como el fitoplancton y las plantas acuáticas, debido a las altas concentraciones de nutrientes en el agua, principalmente nitratos y fosfatos (Roldán y Ramírez, 2008). En la actualidad, la eutrofización se ha agudizado y generado por procesos antropogénicos como la descarga de aguas residuales en sistemas lóticos y lénticos (Naselli-Flores, 2008).

Existen varios factores que favorecen el proceso de eutroficación; de acuerdo con Villaseñor (1998) se dividen en dos grupos:

- a. Factores físico-químicos. Son aquellas condiciones del sistema que favorecen el crecimiento de microorganismos tales como la tasa de renovación del agua, la tasa de incidencia de energía solar y la temperatura; las dos últimas dependen de la profundidad.
- b. Factores relacionados con el control de la biomasa. Es la biodisponibilidad de ciertos nutrientes limitantes para el crecimiento de los microorganismos, siendo el nitrógeno y el fósforo los más importantes.

Ansari y Singh (2013) mencionan que las consecuencias de la eutroficación son variadas; de inicio, las altas concentraciones de nutrientes en el agua generan deterioro de su calidad, en consecuencia, la proliferación de microorganismos se observa con el aumento de sólidos suspendidos que incrementan la turbidez. Esta alta productividad resulta en grandes cantidades de biomasa que se depositan en el fondo del sistema. La materia orgánica sedimentada se descompone a través de procesos químicos que consumen oxígeno y producen dióxido de carbono, provocando anoxia en el fondo de la columna de agua y acidificación de la misma.

Por otro lado, en el ámbito biológico, se presentan cambios en la estructura del fitoplancton debido a los requerimientos y a la biodisponibilidad de nutrientes; mientras la anoxia del fondo resultado de la descomposición de la gran cantidad de materia orgánica producida, conlleva la mortandad de organismos bentónicos e incluso pelágicos, resultando en cambios en la red trófica y en el favorecimiento de algunas especies de peces por competencia de alimento. Los florecimientos algales frecuentemente implican la presencia de especies tóxicas que afectan a la biota acuática, a las poblaciones humanas y a otros organismos terrestres que dependen del recurso hídrico como mascotas e incluso ganado (Ansari *et al.*, 2010).

### **2.3 Normatividad**

Con el objetivo de regular la calidad del agua para los distintos usos se generaron distintas Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que estipulan los valores y concentraciones máximas permisibles de las distintas variables empleadas para evaluar la calidad del agua en México. Para el caso específico de los lagos urbanos, aplican las siguientes.

La **NOM-003-ECOL-1997** establece *“los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”*.

Estos límites permisibles de contaminantes dependen de los dos tipos de reuso establecidos en la misma norma:

- a. En servicios al público con contacto directo: se refiere a aquellos usos donde la población está expuesta físicamente o en contacto directo con el recurso. En este caso el agua tratada servirá para rellenar cuerpos de agua artificiales donde se realicen actividades recreativas, como paseo en lancha, canotaje, remo, fuentes de ornato, así como lavado de automóviles y riego de áreas verdes.
- b. En servicios al público con contacto indirecto u ocasional: el público está expuesto de forma indirecta o incidental ya que existe acceso restringido al recurso hídrico. Dentro

de estos usos se encuentra el relleno de lagos artificiales donde no se presenten actividades recreativas, fuentes de ornato, riego de jardines y camellones en autopistas, etc.

Esta NOM define los límites máximos para los coliformes fecales y la demanda bioquímica de oxígeno, que se desglosan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Límites máximos permisibles de coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y sólidos suspendidos totales (SST) de acuerdo con la NOM-003-ECOL-1997. (NMP = número más probable).

Tipo de reuso	Promedio Mensual		
	Coliformes fecales (NMP 100 mL <sup>-1</sup> )	DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	SST (mg L <sup>-1</sup> )
Servicios al público con contacto directo	240	20	20
Servicio al público con contacto indirecto u ocasional	1000	30	30

Por otro lado, la **NOM-001-SEMARNAT-1996**, establece “*los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*”. En ésta se fijan los límites máximos de concentración de contaminantes en las descargas de acuerdo con el uso establecido del cuerpo receptor (Tabla 2).

**Tabla 2.** Límites máximos permisibles de concentración de nitrógeno total (N<sub>TOT</sub>), fósforo total (P<sub>TOT</sub>) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) de acuerdo con la NOM\_001-SEMARNAT-1996.

Parámetro	Embalses naturales y artificiales de uso público urbano	
	Promedio Diario	Promedio Mensual
N <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	25	15
P <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	10	5

DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	60	30
pH	5 – 10	-

El Criterio SACM-1999 es un documento utilizado por el Laboratorio de Control de Calidad de SACMEX para regular los parámetros (Tabla 3), medidos en las PTARs, cuyos límites máximos permisibles no están establecidos en la normatividad mexicana.

**Tabla 3.** Límites máximos permisibles para conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno (DQO) y coliformes totales establecidos por el Criterio SACM-1999.

Parámetro	Límite máximo permisible
Conductividad eléctrica (μS cm <sup>-1</sup> )	2000
Coliformes fecales (NMP 100 m L <sup>-1</sup> )	1000
Demanda Química de Oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )	50

Mientras que las dos NOMs anteriores solamente aplicarían para el o los efluentes que alimentan los Lagos de Chapultepec, la **Ley Federal de Derechos (2016)** de CONAGUA define los parámetros de calidad de agua para los lagos, como es el caso de los Lagos de Chapultepec en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Límites máximos permisibles de fósforo total (P<sub>TOT</sub>), pH, nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes fecales, aplicables a fuentes de abastecimiento para uso público y protección a la vida acuática (Ley Federal de Derechos, 2016).

Parámetro	Para uso público urbano	Protección a la vida acuática
P <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.1	0.05
pH	6.0-9.0	6.5 – 8.5
NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	5	-
NO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.05	-
SST (mg L <sup>-1</sup> )	50	30
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	1000	1000



**Tabla 5.** Límites máximos permisibles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), nutrientes, temperatura y pH, para las descargas de aguas residuales en embalses naturales y artificiales de uso público urbano y calidad del agua para fuente de abastecimiento para uso público y protección de la vida acuática (Ley Federal de Derechos, 2016).

Parámetro	Límite máximo permisible (promedio mensual)	Valores de calidad del agua	
	Descargas residuales en embalses	Fuente abastecimiento para uso público	Protección de la vida acuática
DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	30	-	-
SST (mg L <sup>-1</sup> )	40	50	-
Nitrógeno <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	30	-	-
Fósforo <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	5	0.1	0.05
Temperatura (°C)	40	-	-
pH	-	6.0-9.0	6.5-8.5

## 2.4 Tratamiento de agua residual

Las aguas residuales son producto del uso de agua para distintos fines durante los cuales se adicionan sustancias que modifican su calidad original; entre estos se presentan diferentes componentes físicos, químicos y biológicos además de contener materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos (Díaz-Cuenca *et al.*, 2012). Inicialmente el agua se extrae de una fuente natural, ya sea un río, lago o pozo; posteriormente, es tratada de forma que sea adecuada para uso público, industrial o doméstico; finalmente y después de ser usada, se modifican sus características al ser contaminada convirtiéndose en un líquido o agua residual.

Dependiendo del uso que se le da al agua serán las características que tendrá el agua residual. En el caso de las fuentes domésticas y urbanas, los principales contaminantes son los sólidos suspendidos, materia orgánica biodegradable, nutrientes, microorganismos patógenos y sólidos inorgánicos disueltos, mientras que las fuentes industriales presentan como contaminantes los mismos que las fuentes domésticas y, además, metales pesados y materia no biodegradable, con la diferencia de que las

concentraciones de estas sustancias varían de acuerdo con la actividad de la industria (von Sperling, 2007).

Con gran frecuencia, en países en vías de desarrollo como México, los sistemas de recolección y conducción de agua residual no cuentan con plantas de tratamiento y vierten el agua residual directamente en el medio natural, generando contaminación de los ecosistemas, lo que implica impactos ambientales, desequilibrio ecológico y afectaciones a la salud (Noyola *et al.*, 2013). Debido a lo anterior, el objetivo primordial del tratamiento del agua residual es permitir que los efluentes residuales industriales o humanos sean dispuestos sin ser un peligro para las personas, ni generar daños ambientales (FAO, 1992). Esto se logra eliminando o disminuyendo las concentraciones de los agentes contaminantes por debajo de valores máximos permisibles establecidos en la normatividad.

El tratamiento de agua residual se divide en cuatro niveles consecutivos (von Sperling, 2007) Secretariado Alianza por el Agua, 2008).

a. Pre-tratamiento

Consiste en la remoción de sólidos en suspensión para facilitar los siguientes niveles de tratamiento; para lo anterior, se utiliza el cribado, técnica mecánica donde se emplea una rejilla para la separación de partículas de acuerdo con su tamaño y un desarenador.

b. Tratamiento primario

A partir de un proceso de sedimentación por gravedad se logra separar y remover los sólidos en suspensión (compuestos por materia orgánica e inorgánica) de la fase líquida. Comúnmente incluye un tratamiento físico-químico al añadir sustancias químicas para reducir los sólidos en suspensión y coloidales, a través de un proceso de coagulación-floculación que aumenta su tamaño y densidad, generando su depósito.

c. Tratamiento secundario

Debido a que existen partículas de menor tamaño en suspensión que no se pueden remover a través del cribado o la sedimentación, por lo tanto, se hace uso de métodos mecánicos acoplados a biológicos. Existen variantes de este nivel en las plantas de tratamientos, sin embargo, todas trabajan con el mismo principio; el agua residual, después del tratamiento primario se vierten en tanques llamados reactores biológicos donde bacterias aerobias o anaerobias (debido a su metabolismo) transformarán la materia orgánica disuelta o en suspensión en biomasa. Se realiza la remoción del exceso de sólidos formados llamados lodos.

d. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario se emplea para la eliminación de nutrientes, compuestos no biodegradables, sólidos inorgánicos disueltos, patógenos y metales que no fueron removidos en los tratamientos anteriores. Para ello se pueden utilizar mecanismos fisicoquímicos como la osmosis inversa, la decantación, la ultrafiltración y la precipitación química, entre otros.

### **3. Marco Histórico**

El Bosque de Chapultepec ha tenido una gran importancia social a lo largo de la historia de México. Después de la fundación de la Gran Tenochtitlán en 1325, se necesitó un complejo sistema hidráulico para cubrir las necesidades de la creciente ciudad. Fueron construidos diques, canales de navegación y transporte, así como acueductos; estos transportaban al centro de la capital mexicana, agua que provenía de los manantiales circundantes. Los acueductos más importantes fueron el de Chapultepec y el de Acuecuexco cuya fuente estaba en Coyoacán (Martínez, 2018).

Chapultepec siempre fue reconocido como un sitio de importancia paisajística y esparcimiento, logrando mantener su valor aún después de la Conquista, debido principalmente, a los manantiales de agua potable que existían en el sitio.

Aunque en la época del virreinato se cercó el bosque para limitar la cacería y proteger a los cuerpos de agua y los manantiales; el caudal de estos últimos fue mermando con el paso del tiempo. En 1870 una de las tres albercas principales de Chapultepec que

compartían los mismos manantiales, se quedó sin agua, mientras que en las otras dos albercas restantes el nivel del agua bajo mucho (Campos, 1992). Chapultepec siguió siendo una de las principales fuentes de abastecimiento de la Ciudad de México hasta finales del siglo XIX, cuando el recurso de esos manantiales empezó a agotarse, obligando a las autoridades a buscar nuevas fuentes de suministro (Martínez, 2018).

Durante su mandato, Porfirio Díaz decidió remodelar y embellecer el Bosque de Chapultepec para conmemorar los cien años de la Independencia de nuestro país (Enríquez, 2012). Como parte de ese embellecimiento se restauraron entre 1903 y 1911, los remanentes de un lago ubicado en la Primera Sección del Bosque, conocido como Lago Viejo. Inicialmente este cuerpo se abastecía con agua de los manantiales y efluentes de Chapultepec y del río Hondo; sin embargo, la creciente urbanización dejó como único efluente del lago de Chapultepec al Río Hondo, cuya pobre calidad del agua, resultó en el deterioro de la calidad del agua del Lago Viejo. De acuerdo con Alcocer y Lugo (1995) el daño se volvió evidente a partir de 1935 y 1936. No obstante, Bolívar (2013) menciona que incluso en Lago Viejo es un cuerpo artificial que fue mandado a construir por Porfirio Díaz.

En 1955 los manantiales naturales se secaron como resultado de la disminución del nivel freático. Entre 1956 y 1958 se construyó la Planta de Tratamiento de Aguas residuales Chapultepec cuyo efluente fue utilizado como fuente de abastecimiento del Lago Viejo (Alcocer *et al.*, 2007; González, 2016).

La extracción de minerales diversos de las minas ubicadas en la Segunda Sección del Bosque de Chapultepec, formó diversas cavernas y galerías. Lo anterior fue aprovechado para la construcción de dos lagos más, el Lago Mayor y el Lago Menor, en los años de 1960 y 1964, respectivamente (Enríquez, 2012; Alcocer *et al.*, 2007).

El suelo de la Segunda Sección del Bosque de Chapultepec al estar minado ha propiciado la desestabilización del sustrato del fondo de los lagos con la consecuente filtración de agua. En 1968 se generó un talud por movimientos del subsuelo que derivó en la pérdida masiva de agua del Lago Mayor, flujo que alcanzó al Boulevard Adolfo López Mateos. En 2006, el fondo del Lago Mayor nuevamente presentó una fisura drenando gran parte del agua del lago por la parte norte (Enríquez, 2012).

Desde el punto de vista de la sociedad, el Bosque siempre ha sido un área de recreo muy concurrida por los capitalinos. A partir de 1908 se abrió al público el servicio de lanchas en el Lago Viejo. Desde ese momento en las cercanías de los lagos los usuarios realizaban picnics familiares y alrededor de los años 50's se practicaba la pesca recreativa del público en general, con un costo de 25 centavos la hora. (Villasana y Navarrete, 2016).

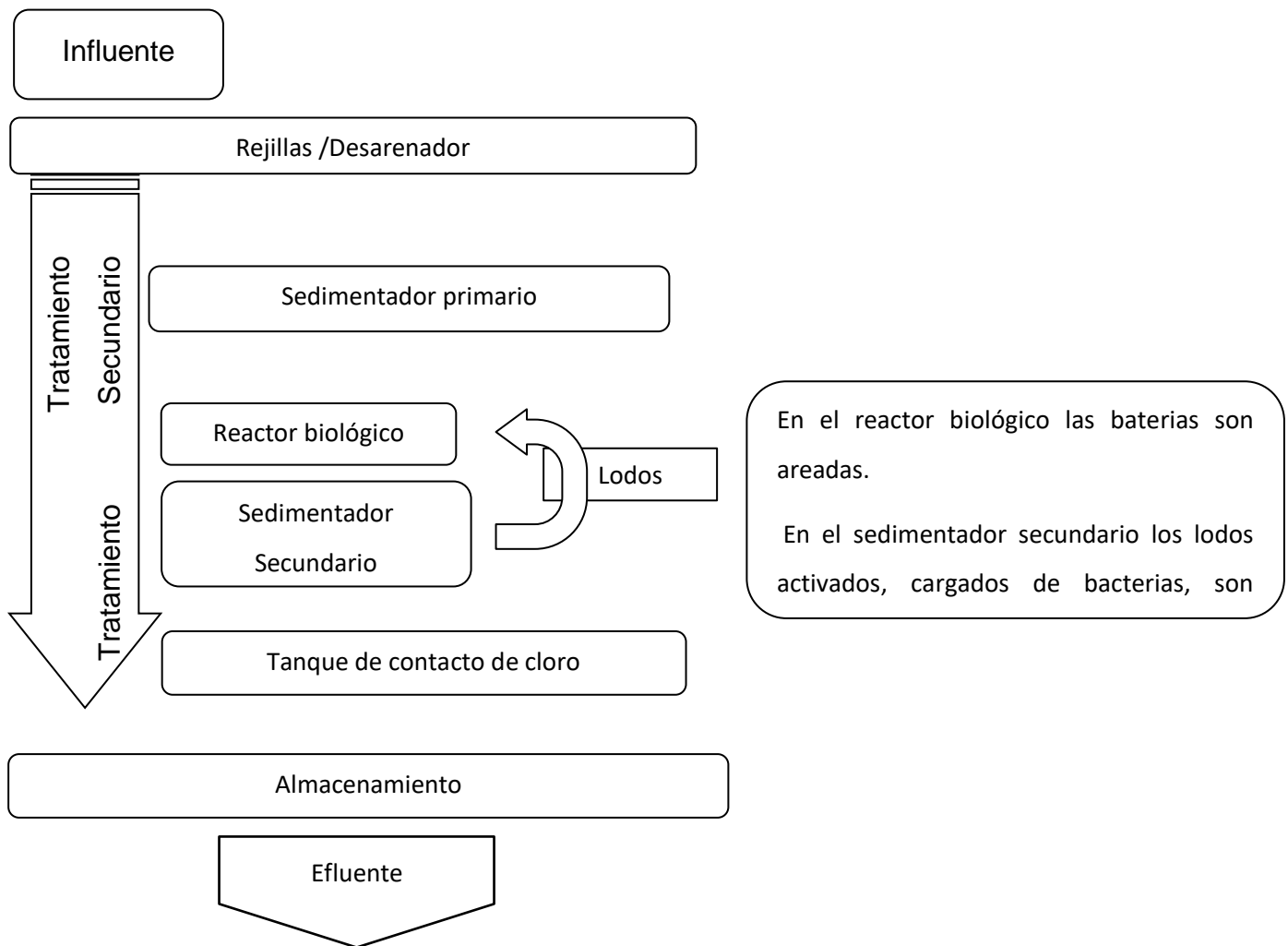
Hasta la década de los noventas, todavía los visitantes tenían la posibilidad de observar algunos de los animales nativos que habían sobrevivido a la urbanización y a las modificaciones hechas para la restauración del lago. Algunos de estos organismos son los charales, tortugas y ranas. En la actualidad, el Bosque de Chapultepec, siendo el parque urbano más grande de Latinoamérica, junto con sus lagos, continúa brindando una amplia gama de servicios a los usuarios tales como la presentación del ballet “El lago de los cisnes” que se realiza en la porción sur del Lago Viejo, o los museos de Historia El Caracol, el Castillo de Chapultepec y el Papalote o Museo del Niño, por mencionar solo algunos de los centros culturales que se encuentran en este parque (Villasana y Navarrete, 2016).





**Fig. 1.** De arriba a abajo, Lago Mayor, Lago Menor y pesca deportiva en Chapultepec. Colección Villasana-Torres. Fotos obtenidas de El Universal (2016).

Actualmente, los tres lagos del Bosque de Chapultepec son llenados con las aguas tratadas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Chapultepec que está ubicada en las Lomas de Chapultepec y cuya capacidad inicial era de  $160 \text{ L s}^{-1}$  (Díaz, 2013). La PTAR ofrece tratamiento secundario mediante la técnica de lodos activados. Sin embargo, después de 60 años de uso, la capacidad de tratamiento se ha reducido a tratar tan solo  $80 \text{ L s}^{-1}$  (González, 2016).



**Fig. 2.** Tren de tratamiento de la PTAR Chapultepec (Vela, 2016; EPA, 98).

### 3.1 Propuesta de una nueva PTAR para los Lagos de Chapultepec

A partir de una entrevista realizada a Miguel Ángel Mancera en el 2016 por El Economista (2016) se dio a conocer que la actual planta de tratamiento ya no puede ser rehabilitada y se planteó la construcción de una nueva planta en el mismo sitio. Este proyecto, representó una inversión de casi 300 millones de pesos. Fue anunciada por el Gobierno de la Ciudad de México para ser inaugurada en 2017, sin embargo, la nueva PTAR sigue aún en construcción.

La construcción de la nueva PTAR está a cargo de Suez México. Este proyecto forma parte del *Plan maestro para la rehabilitación de la 2<sup>da</sup> Sección del Bosque de*

*Chapultepec* donde se considera la construcción de la nueva PTAR (SEDEMA, 2013). Entre los objetivos específicos se planea utilizar el agua residual tratada de esta planta para satisfacer las necesidades hídricas del Bosque.

La actual PTAR tiene como finalidad limpiar el agua proveniente de establecimientos dentro del Bosque y en zonas circundantes (Lomas de Chapultepec y Lomas Virreyes). No obstante, el volumen de agua que llega de la actual PTAR no es suficiente para mantener los tres lagos y regar los parques aledaños. Por lo tanto, se planeó que la nueva planta incluya una toma de agua para el colector Barranca de Tecamachalco (Fuentes, 2015).

La nueva PTAR tendrá la capacidad de tratar  $170 \text{ L s}^{-1}$  con un efluente de  $160 \text{ L s}^{-1}$  que será utilizado para abastecer los Lagos de Chapultepec, riego de áreas verdes y recargar los acuíferos de la Cuenca de México ya que el efluente cumple con la NOM-014-CONAGUA-2003 para la recarga del acuífero de la Ciudad de México (González, 2016; Suez México, s.f).

La ruta de tratamiento de las aguas residuales consiste en tres pasos: inicia con los tratamientos de la PTAR (Tabla 5), posteriormente, se procesa el flujo en las plantas de pulimiento (Tabla 6), donde se eliminará la materia orgánica, el color y el olor, y se desinfectará el agua; el procedimiento finaliza con la recarga de acuíferos a partir de pozos de inyección, cuya ubicación aún no está definida (Suez México, s.f).

**Tabla 6.** Tratamientos considerados para la nueva PTAR de Chapultepec (Suez México, s.f).

Tratamiento	Objetivo
Pre-tratamiento (Tamices)	Quitar los desechos plásticos y semillas



Tratamiento Secundario (Proceso biológico)	Reactor Biológico Deshidratación de Lodos	Remover y reducir las concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo que generan contaminación.
Tratamiento terciario	Tratamiento con RUV Ultrafiltración Osmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evita la generación de sustancias tóxicas residuales dañinas para la biota. Y la reproducción de microorganismos.</li> <li>- Retención de sales nutrientes para asegurar la calidad.</li> <li>- Disminución de SST, microorganismos y otras sustancias.</li> </ul>

#### 4. Antecedentes

Los lagos urbanos del Bosque de Chapultepec han sido objeto de diversos estudios a lo largo del tiempo, principalmente sobre la biota acuática. Entre los que proporcionan información sobre sus características fisicoquímicas se encuentran los siguientes.

En 1995, Alcocer y Lugo brindaron una idea general de la historia, las condiciones fisicoquímicas y biológicas de los Lagos de Chapultepec. Alcocer (1988) concluyó que el dragado no es una técnica efectiva para restaurar estos sistemas lacustres ya que antes de dragarse se debe eliminar o disminuir la fuente externa de las altas cantidades de nutrientes. Alcocer *et al.* (2007) reportaron la dinámica fisicoquímica de los cuerpos acuáticos y describen al Lago Viejo con concentraciones de clorofila-a muy altas, seguido del Lago Mayor y del Lago Menor. En cuanto a nutrientes, el Lago Mayor es el que presentó las concentraciones más elevadas; además, los tres lagos presentaron un pH elevado, altas concentraciones de sólidos suspendidos y DBO<sub>5</sub>, así como una baja visibilidad.

De acuerdo con el artículo de Olguín-Flores *et al.* (2017) se conoce que el metabolismo de los tres cuerpos es autotrófico, esto significa que funcionan como sumideros de dióxido de carbono durante las horas de luz. Por otro lado, Rendón-Neydar *et al.* (2018)

realizaron un estudio de la biomasa de los organismos macroinvertebrados del bentos, concluyendo que los valores de densidad más altos se presentan de enero a marzo y que el Lago Viejo presenta la mayor biomasa, posiblemente por el sustrato natural de este sistema.

## **5. Justificación**

Los servicios ambientales de los lagos del Bosque de Chapultepec brindan a la población importantes beneficios. Sin embargo, las condiciones actuales de la calidad del agua pueden generar daños a la salud de los usuarios. Conociendo que las características limnológicas de los lagos derivan en gran medida de su fuente de abastecimiento, es fundamental identificar y evaluar las características de calidad del agua del efluente de la PTAR Chapultepec y su relación con las características de los lagos que abastece.

## **6. Objetivos**

### **6.1 Objetivo general**

Evaluar las características fisicoquímicas del efluente de la PTAR-Chapultepec y evidenciar sus efectos sobre los cuerpos receptores.

### **6.2 Objetivos específicos**

- a) Evaluar las variables fisicoquímicas del efluente de la PTAR con el que se abastecen los lagos de Chapultepec, identificando si cumplen o no con las NOMs.
- b) Comparar las características fisicoquímicas del agua del efluente de la PTAR con el del agua de los lagos de Chapultepec identificando aquellas que aumentan, disminuyen o se mantienen similares y que deben de tomarse en cuenta para el mejoramiento de la calidad del agua de los lagos de Chapultepec.

## 7. Área de estudio

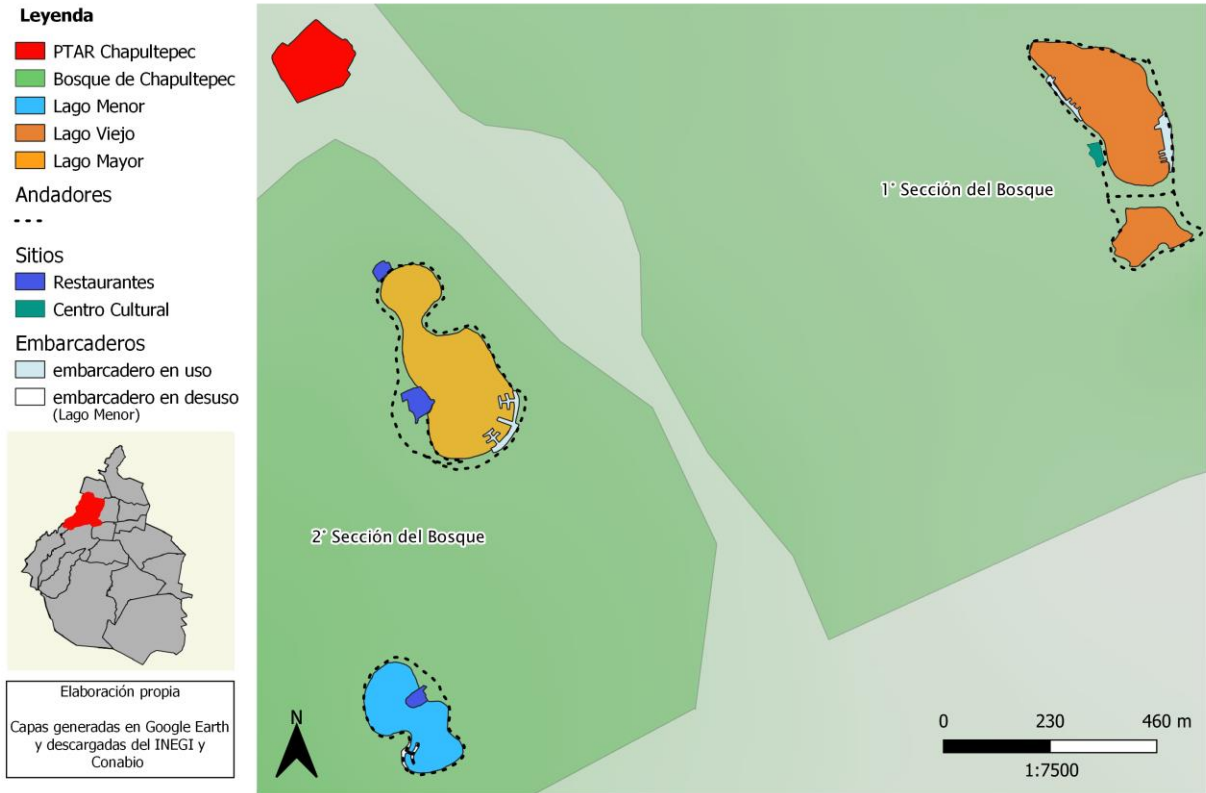
El Bosque de Chapultepec ubicado en la alcaldía Miguel Hidalgo de la Ciudad de México (Fig. 3), es un parque urbano ubicado entre los 19° 24' y 19° 26' N y los 99° 11' y 99° 12' O a una altura sobre el nivel del mar de 2,240 m. La extensión del Bosque es de 678 hectáreas y se encuentra dividido en tres fracciones diferentes: en la 1° Sección se encuentra el Lago Viejo, popularmente conocido como Lago de Chapultepec, mientras que en la 2° Sección se encuentran los Lagos Mayor y Menor (Alcocer *et al.*, 2007). En la 3° Sección no hay presencia de cuerpos acuáticos. El Bosque presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Rodríguez, 2017), que corresponde a los meses de junio a septiembre (CVCCCM, 2010).

El cuerpo de agua más antiguo del Bosque, reminiscencia del antiguo sistema de lagos y canales de la Cuenca de México, es el Lago Viejo, por su origen natural este sistema presenta fondo de tierra; a diferencia del Lago Mayor y Menor, que presentan piso de cemento debido a su origen artificial. De acuerdo con Alcocer *et al.* (1988) el Lago Viejo tiene un área de 60,240 m<sup>2</sup>, el Lago Mayor 58,200 m<sup>2</sup> y el Lago Menor 27,600 m<sup>2</sup>, todos con una profundidad promedio de 1.1 m (Fig. 4).

Alcocer y Lugo (1995) mencionan que las fuentes de abastecimiento de agua del Lago Viejo son los remanentes del Río Hondo, los efluentes de comercios cercanos al lago y la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) del Bosque de Chapultepec; ésta última es la única fuente de abastecimiento de los Lagos Mayor y Menor. El agua residual con tratamiento secundario que proviene de la PTAR, es rica en nutrientes, lo cual provoca que los tres sistemas presenten condiciones hipertróficas, siendo la razón de la alta productividad primaria.

Aunque los Lagos tienen un objetivo recreativo y de preservación de la biota acuática, estos no presentan condiciones adecuadas, de acuerdo a las NOMs, para uso recreativo de contacto secundario (Martínez, 2018). Incluso, los usuarios presentan un contacto primario esporádicamente: se caen de las lanchas o se avientan agua mutuamente, además una práctica común de los usuarios es dejar que sus mascotas se metan al agua o beban agua de los lagos. Estas actividades pueden poner en riesgo la salud de los usuarios y sus mascotas, debido a que Alcocer (2017) reportó la presencia reciente de

cianotoxinas, sustancias generadas por las cianobacterias, organismos fitoplanctónicos dominantes en los tres cuerpos que generar florecimientos algales cuasi constante.



**Fig. 3.** Ubicación de los Lagos de Chapultepec y la PTAR Chapultepec.





**Fig. 4.** En orden descendiente, Lago Viejo, Lago Mayor y Lago Menor de Chapultepec.

## **8. Materiales y Métodos**

La Planta de Tratamiento de Agua Residual de Chapultepec, a cargo del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) , proporcionó los resultados analíticos de los análisis de la calidad del agua del efluente de la Planta y que alimentan a los lagos de Chapultepec. La información corresponde a los meses de enero a diciembre del 2016.

En los tres lagos del Bosque de Chapultepec se realizaron muestreos mensuales en el periodo de abril del 2015 hasta marzo del 2016. Se establecieron seis estaciones de muestreo: 3 en el Lago Viejo, 2 en el Lago Mayor y 1 en el Lago Menor.

### **8.1 Trabajo de Campo**

En el campo se midieron *in situ* la profundidad con un ecosonda manual, con precisión de 0.2 m y exactitud de 0.1 m, el pH con un potenciómetro portátil marca Conductronic modelo PH10 con precisión de  $\pm 0.01$  y exactitud de  $\pm 1.0\%$ . Respecto a la conductividad eléctrica estandarizada a  $25^{\circ}\text{C}$  ( $K_{25}$ ), se utilizó una sonda multiparamétrica marca YSI (Yellow Spring Instruments, Ohio, E.U.) con precisión de  $0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$  y exactitud de  $\pm 0.5 \mu\text{S cm}^{-1}$ .

Se tomaron muestras integradas con una botella muestreadora de agua marca UWITEC de 5 litros de capacidad, se conservaron en oscuridad y a  $4^{\circ}\text{C}$  para el posterior análisis de SST, coliformes,  $\text{DBO}_5$  y DQO en el laboratorio del Proyecto de Investigación en Limnología Tropical de la FES Iztacala.

## 8.2 Trabajo de Laboratorio

### 8.2.1 Nutrientes

Para el procesamiento de las muestras se utilizó la metodología establecida por APHA (2012) para la obtención de fósforo total y nitrógeno total. La materia orgánica presente en las muestras fue sometida a digestión química, usando 5 mL de persulfato de potasio por cada 50 mL de muestra. Las muestras fueron colocadas en una autoclave a 115°C por 45 minutos. Después de haberse enfriado, se determinó la concentración de cada nutriente, empleando un laboratorio portátil de calidad de agua marca HACH modelo DREL/2000 (HACH, 1993) con precisión de  $\pm 1.5 \text{ mg L}^{-1}$  y + 14% y exactitud de  $\pm 1.5 \text{ mg L}^{-1}$  y + 14%.

### 8.2.2 Sólidos Suspendidos Totales

El primer paso en el procedimiento, establecido por APHA (2012), fue la preparación de los crisoles de Gooch: consistió en colocar un filtro de vidrio dentro de cada uno de los crisoles a usar, el filtro fue humedecido para evitar que se despegara. Los crisoles fueron calentados en horno de 103 a 105°C durante una hora. Cuando se hubieron enfriado, se pesaron hasta obtener un peso constante o hasta presentar una variación menor a 4% del peso previo (P1). Posteriormente, las muestras se hicieron pasar por los filtros y se secaron nuevamente a 105°C por una hora. Se dejaron enfriar y se pesaron (P2). La diferencia de los pesos del filtro, antes y después del secado, resulta en la concentración de SST:

$$\frac{mg}{L} \text{ de Sólidos Suspendidos T otales} = \frac{(P2 \text{ en } mg - P1 \text{ en } mg)(1000)}{mL \text{ de muestra}}$$

### 8.2.3 Coliformes

Para la estimación de coliformes totales y fecales, se usó el análisis del número más probable (NMP), que consta de la fase presuntiva y la confirmativa (APHA, 2012). En la primera fase se realizaron diluciones seriadas; se inocularon tubos con 1 mL de dichas diluciones, usando caldo lactosado como medio de cultivo. Los tubos fueron incubados

a 35°C durante 24 a 48 horas. En la segunda fase, aquellos tubos con dilución cuyo resultado fue positivo en la fase presuntativa, fueron resembrados en caldo verde brillante para coliformes totales, de 24 a 48 horas a 35°C y en medio EC para coliformes fecales, durante 24 horas a 44.5 °C.

El resultado fue adquirido, a partir del número de tubos positivos obtenidos, consultando las tablas del Número Más Probable de microorganismos. Esta prueba se basa en una distribución azarosa de los microorganismos en las muestras y la posibilidad de que un solo organismo pueda desarrollarse en el tubo.

#### **8.2.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

El análisis de las muestras se llevó acabo de acuerdo con APHA (2012). Previamente al bioensayo todas las muestras fueron neutralizadas a un pH entre 6.5 y 7.5, posteriormente, diferentes concentraciones de las muestras fueron colocadas en dos frascos: A y B de DBO; en cada uno de ellos fueron añadidos volúmenes iguales a la misma concentración y fueron llenados con agua de disolución. Los frascos B fueron adicionados con 1 mL de sulfato manganoso y 1 mL de alcali-yoduro-azida, la mezcla generó una reacción de oxido-reducción. Gracias a la cual, a partir de una titulación con tiosulfato de sodio, fue posible calcular los mg L<sup>-1</sup> de oxígeno disuelto (OD) en la muestra, usando la siguiente ecuación:

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

Donde N es la normalidad del tiosulfato de sodio

El mismo método se aplicó a los frascos A después de haber sido incubados en la oscuridad por cinco días a 20°C. La diferencia de las concentraciones de oxígeno disuelto en los frascos A y B dieron como resultado el oxígeno disuelto consumido por microorganismos al descomponer materia orgánica.

### 8.2.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Respecto a la DQO, 2.5 mL de cada muestra fueron colocados en tubos de digestión y adicionados con 1.5 mL de solución de digestión y 3.5 mL de ácido sulfúrico. Después de haber sido homogeneizadas, las muestras fueron colocadas en un digestor junto con el blanco de agua destilada a 150°C durante dos horas. En este procedimiento la solución de digestión y el ácido sulfúrico generan la oxidación de la materia orgánica en las muestras. Cuando los tubos se enfriaron a temperatura ambiente, se añadió ferroin a las muestras, como indicador, para titularlas con sulfato ferroso amoniacal 0.025 M.

Se determinó la concentración de oxígeno disuelto consumido en la reacción, a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{mg}{L} \text{ de DQO} = \frac{(a - b)(M)(8000)}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde **a** es la concentración en mL de sulfato ferroso amoniacal usado en el blanco, **b** son los mL de sulfato ferroso amoniacal usados en la muestra y **M** es la molaridad del sulfato ferroso amoniacal (APHA, 2012).

### 8.3 Trabajo de gabinete

Los datos de los lagos y del efluente de la PTAR fueron capturados y procesados en el programa Microsoft Office Excel (2016). Dado que el Lago Viejo y el Lago Mayor presentaron más de una estación de monitoreo, se obtuvo la media mensual y desviación estándar de los datos medidos en ambos sistemas, en cambio, del Lago Menor se obtuvo un solo dato mensual por parámetro, por lo tanto, con excepción de los SST, no se obtuvo promedio ni desviación estándar por parámetro. Se realizó el mismo procedimiento para los datos del efluente de la PTAR.

En los meses en los que no se pudo obtener media aritmética, debido a la presencia de valores por debajo o por encima del límite de detección del aparato o de la técnica analítica, se obtuvo el valor de la mediana después de suprimir los valores extremos: aquellos ubicados por encima o por debajo del límite de detección, y se eliminó el mismo número de valores en el otro extremo de la serie de valores. Respecto a los coliformes fecales y totales, aunque el documento brindado por SACMEX no especifica la razón del



(>) en los valores >100,000 y >10,000, durante la tesis se supondrá que estos valores se deben a que, durante el análisis de laboratorio, aun con la mayor dilución, resultó incontable el número más probable de coliformes

Aunque en las tablas de resultados analíticos que la PTAR brindó, no está establecida la razón de los valores > 10,000, se supondrá que esto se debe a que durante el análisis de laboratorio de coliformes, resultó incontable el número más probable de coliformes

La información proporcionada por SACMEX presentó una sola medición en los meses de noviembre y diciembre para todos los parámetros determinados. Los meses de marzo y enero también presentaron una sola medición para la mayoría de los parámetros. SST y P<sub>TOT</sub> presentaron una sola medición en abril, mientras que coliformes totales fueron analizados una única vez en febrero y SST una única vez en junio.

Fueron identificados los meses que presentaron valores por encima de los límites establecidos por la normatividad, se analizó la variación de los datos de la PTAR durante el año y respecto a los lagos. Además, se realizará una comparación de los valores analíticos de la PTAR Chapultepec respecto a dos plantas de tratamiento en California, Estados Unidos y una en México.

El mapa fue realizado con el programa QuantumGIS 3.4 Madeira, a partir de capas generadas en Google Earth Pro y capas descargadas de las páginas oficiales del INEGI y de CONABIO.

## **9. Resultados**

Los parámetros evaluados en el efluente de la PTAR de Chapultepec y en los lagos de Chapultepec se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Parámetros físico-químicos y biológicos registrados para la PTAR y en los lagos de Chapultepec. Se presentan los valores promedios  $\pm$  desviación estándar (primera fila), mínimos y máximos (segunda fila). (\*) = valores por debajo o por encima de los límites de detección, (\*\*) = valores de las medianas mensuales.

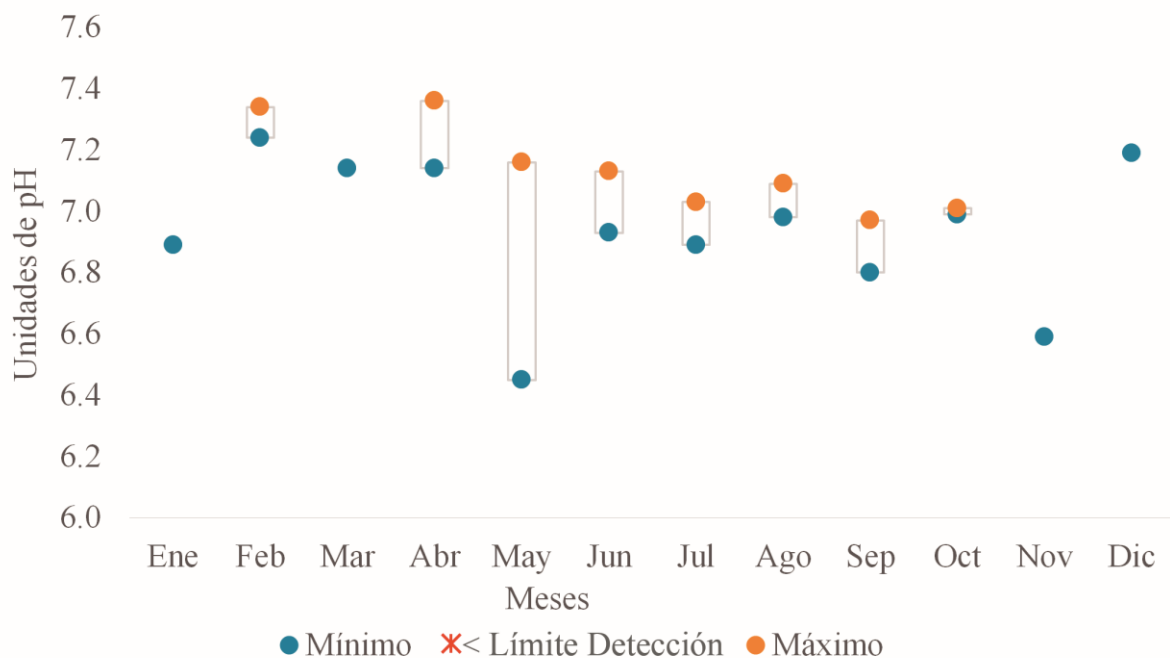
Parámetro	PTAR	Lago Viejo	Lago Mayor	Lago Menor
pH (Unidades de pH)	7.0 $\pm$ 0.2	9.3 $\pm$ 0.2	9.2 $\pm$ 0.5	9.8 $\pm$ 0.3
	6.6 - 7.3	8.9 - 9.5	8.3 - 10.4	9.3 - 10.2
Conductividad ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	500 $\pm$ 74	444 $\pm$ 55	508 $\pm$ 46	496 $\pm$ 54
	413 - 635	334 - 526	423 - 576	404 - 604
N <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	2.1**	9.1 $\pm$ 2.1	14.7 $\pm$ 2.1	14 $\pm$ 3.6
	<1.5 - 10	6.3 - 12.9	11.2 - 18.1	8.4 - 19.9
P <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	*	0.4 $\pm$ 0.1	0.5 $\pm$ 0.2	0.5 $\pm$ 0.2
	<1.0 - 10.1	0.3 - 0.7	0.4 - 0.7	0.2 - 0.8
SST (mg L <sup>-1</sup> )	*	60 $\pm$ 13	45 $\pm$ 11	151 $\pm$ 58
	<15 - 20	35 - 81	26 - 64	95 - 320
Coliformes fecales (NMP 100 mL <sup>-1</sup> )	*	22**	105**	33**
	200 – 38,000	<2 – 2,400	<2 – 3,000	<2- >1,600
Coliformes totales (NMP 100 mL <sup>-1</sup> )	53,000**	441 $\pm$ 370	1,785 $\pm$ 2171	110**
	7200 - >100,000	19 – 1,046	131 – 8,150	6 - >1,600
DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	6**	18 $\pm$ 6	17 $\pm$ 6	25 $\pm$ 11
	<1 – 8	12 - 35	9 - 29	9 - 46
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	30.2**	107 $\pm$ 25	81 $\pm$ 29	299 $\pm$ 173
	<6 – 55	52 – 146	45 – 152	153 - 697

Donde:  $N_{TOT}$  = Nitrógeno Total,  $P_{TOT}$  = Fósforo Total, SST= Sólidos Suspendidos Totales, NMP= Número Más Probable,  $DBO_5$  = Demanda Bioquímica de Oxígeno y DQO = Demanda Química de Oxígeno

### 9.1 pH

El intervalo de valores de pH del efluente de la PTAR ( $7 \pm 0.2$ ) es menor al promedio mensual y anual de los lagos ( $9.4 \pm 0.3$  unidades de pH, promedio anual de los tres lagos). Los resultados analíticos se encuentran dentro del rango establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (5 – 10 unidades de pH).

Se observa que los valores medidos en el efluente de la PTAR tienden a disminuir hacia los últimos meses mientras que los valores son, en su mayoría, más altos durante los primeros seis meses del año.

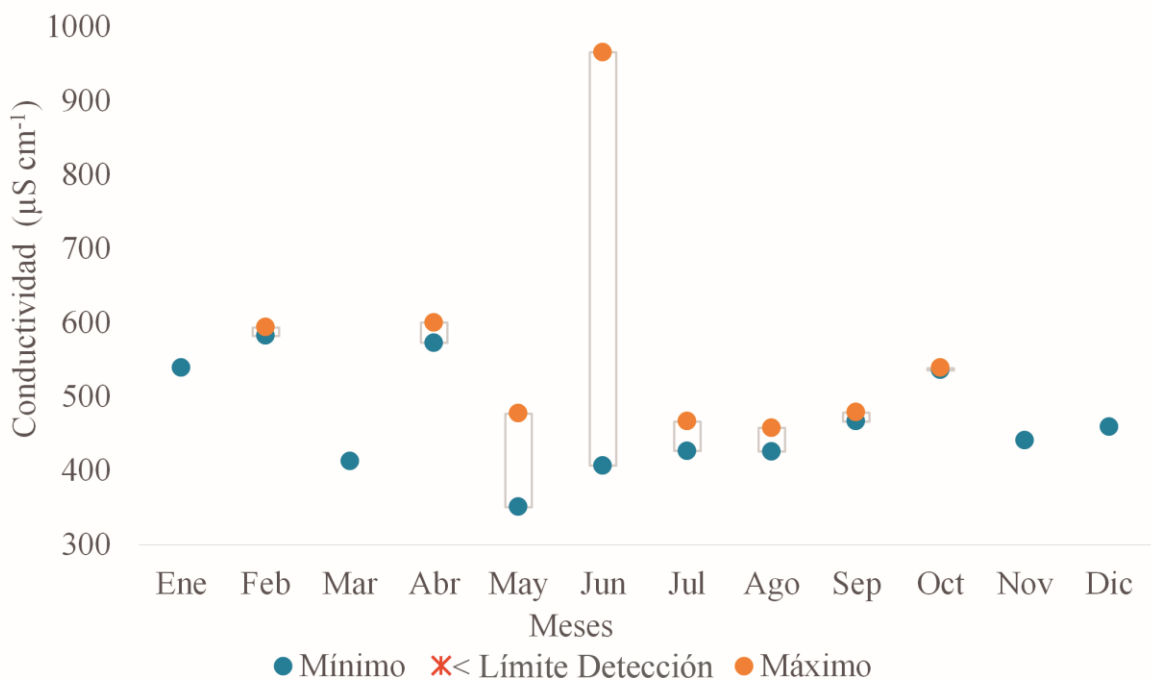


**Fig. 5.** Variación del pH en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016

## 9.2 Conductividad eléctrica

Los valores mensuales de los lagos (334  $\mu\text{S}$  – 604  $\mu\text{S}$ ) y los de la PTAR (413  $\mu\text{S}$  - 635  $\mu\text{S}$ ) presentaron un intervalo similar, con excepción del mes de junio del 2016, mes en el que se presentó un valor extremo mayor al promedio anual de conductividad de los lagos (Fig. 6). Exceptuando el mes de junio, los meses restantes no presentan fluctuaciones amplias.

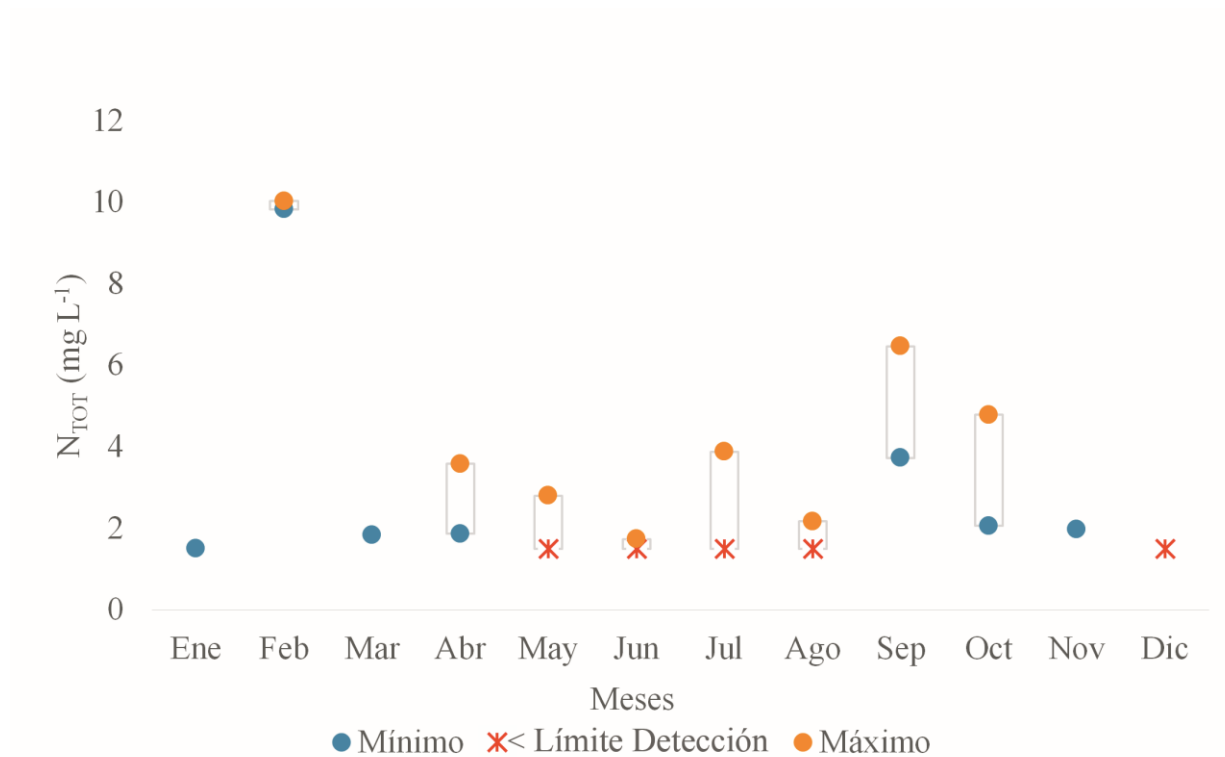
Los valores de conductividad no sobrepasan el límite establecido por el Criterio SACM-1999 (2,000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Se observa una tendencia de disminución en los valores inferiores durante los meses de mayo, julio, agosto y septiembre con respecto al resto del año, estos últimos corresponden a la época de lluvias.



**Fig. 6.** Variación de la conductividad eléctrica en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.

### 9.3 Nitrógeno Total ( $N_{TOT}$ )

El intervalo de valores del efluente de la PTAR ( $<1.5 - 10 \text{ mg L}^{-1}$ ) está por debajo de la media anual de los tres lagos ( $12.6 \pm 3 \text{ g mL}^{-1}$ ), con excepción del mes de febrero, mes en el que la concentración de la PTAR sobrepasa el promedio anual del lago Mayor y Menor ( $14.7 \pm 2 \text{ mL}^{-1}$  y  $14 \pm 4 \text{ mL}^{-1}$ , respectivamente). Los valores máximos medidos en el efluente de la PTAR no sobrepasan el límite permisible de la NOM-001-SEMARNAT ( $15 \text{ mg L}^{-1}$  promedio mensual). No se observó una tendencia temporal.



**Fig. 7.** Variación de la concentración de nitrógeno total ( $N_{TOT}$ ) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.

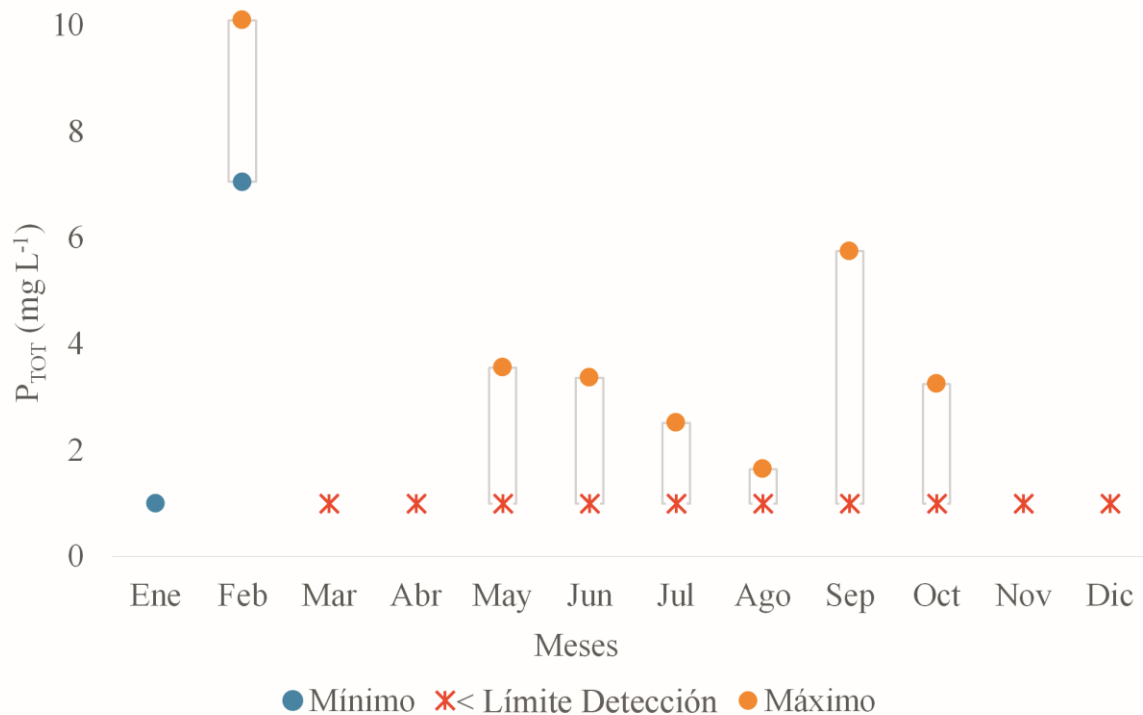
#### 9.4 Fósforo Total ( $P_{TOT}$ )

Desde marzo a diciembre, el efluente mostró valores menores al límite de detección ( $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ ). Los valores máximos de la PTAR tienen un orden de magnitud mayor al de los promedios anuales de los lagos ( $0.5 \pm 0.05 \text{ mg L}^{-1}$ ).

También se puede observar que desde mayo a octubre los valores máximos son mayores a  $1.6 \text{ mg L}^{-1}$ , mientras que, en el resto del año, con excepción de febrero, la concentración de  $P_{TOT}$  presentó valores iguales o menores a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ .

En el periodo de mayo a octubre se muestra una tendencia a presentar valores de concentración más altos en comparación con los meses restantes del año, que corresponden al periodo de secas.

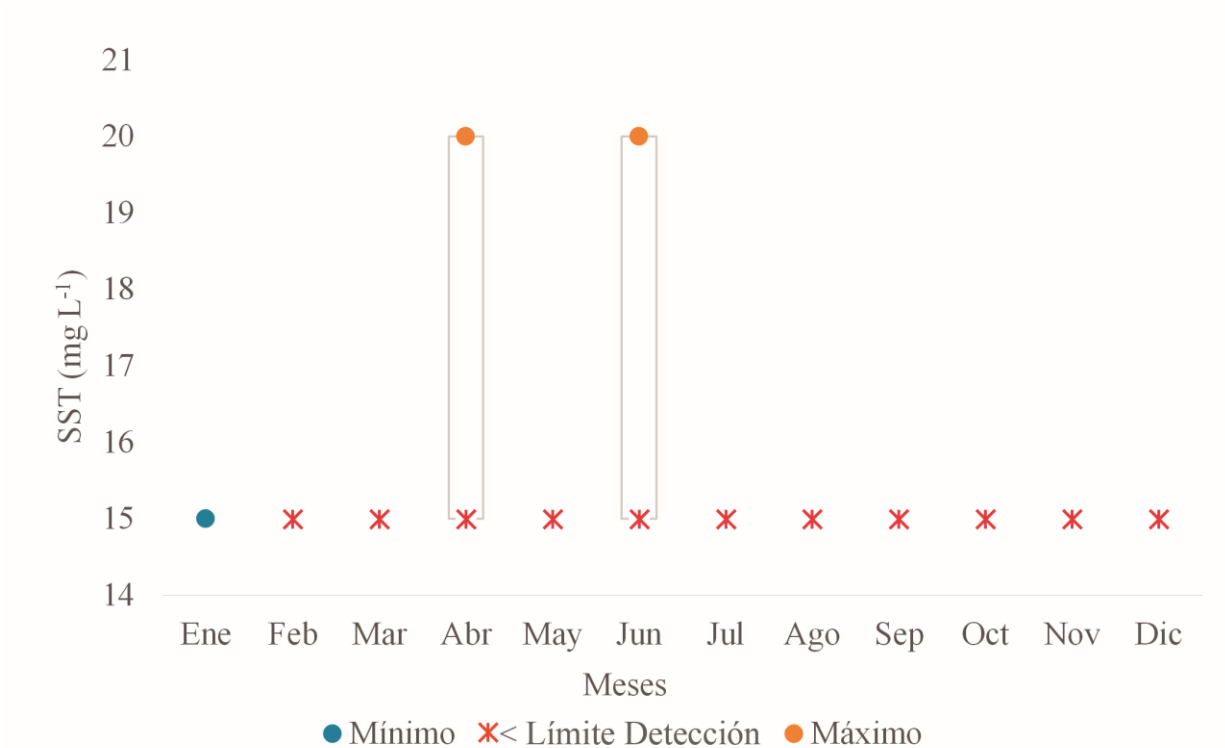
El 16% del año, que corresponde a los meses de febrero y septiembre, los valores máximos medidos en el efluente de la PTAR sobrepasaron el límite máximo permisible de  $P_{TOT}$  ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ ) establecido en la NOM 001-SEMARNAT.



**Fig. 8.** Variación de la concentración de fósforo total ( $P_{TOT}$ ) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.

### 9.5 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Las concentraciones de SST en la PTAR ( $<15 - 20 \text{ mg L}^{-1}$ ) fueron menores a las concentraciones promedio anuales de los lagos ( $85 \pm 57 \text{ mg L}^{-1}$ ) cuyos valores son más de tres veces mayores al valor máximo presentado por el efluente de la PTAR. Las concentraciones máximas de SST del efluente de la PTAR no sobrepasan los límites permisibles ( $30 \text{ mg L}^{-1}$ ) establecidas en la NOM-003-SEMARNAT. No se muestra tendencia temporal alguna.

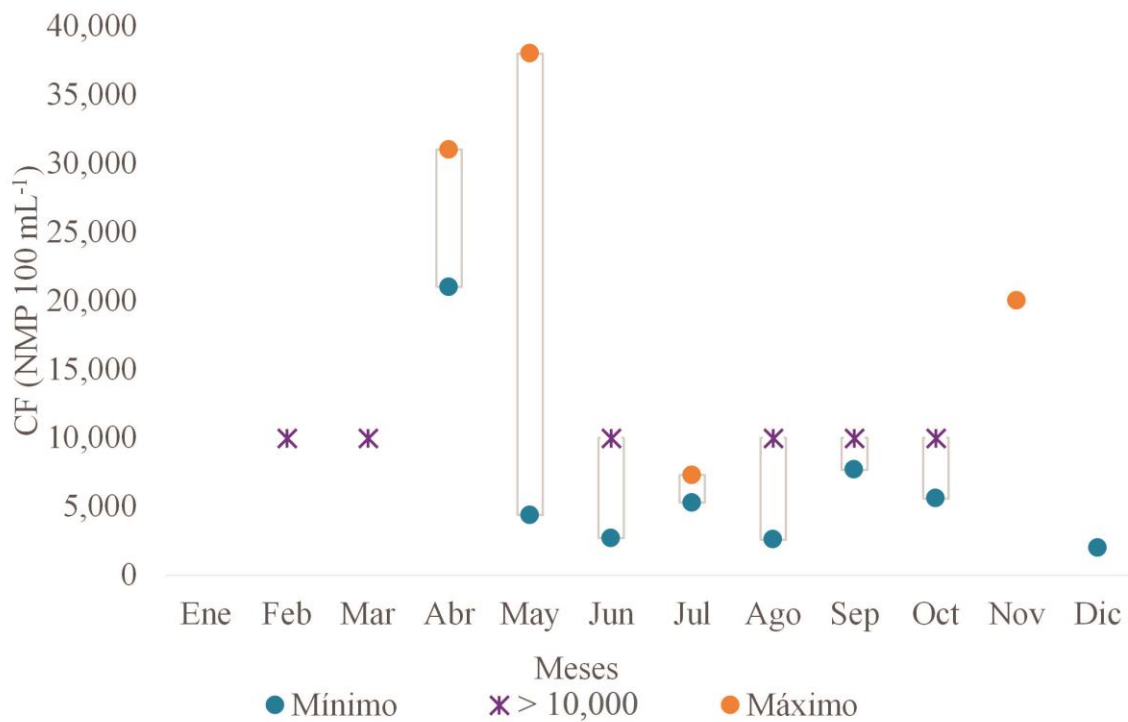


**Fig. 9.** Variación de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.

## 9.6 Coliformes Fecales

El efluente de la PTAR mostró valores mayores a 10,000 NMP 100 mL<sup>-1</sup> durante la mayor parte del año. Por otro lado, los valores medidos en el efluente de la PTAR (200 – 38,000 NMP) son varias veces mayores al intervalo de los lagos (<2 – 3,000 NMP 100 mL<sup>-1</sup>). Los valores máximos de coliformes fecales en el efluente de la PTAR sobrepasan el límite permisible para contacto indirecto (240 NMP 100 mL<sup>-1</sup>) de la NOM-003-ECOL-1997 durante todo de año.

Los valores obtenidos en el efluente de la PTAR los meses de mayo, abril y noviembre no son congruentes con el límite máximo de detección de la técnica (10,000 NMP), señalado por SACMEX, dado que los valores mensuales son mayores a límite de detección.

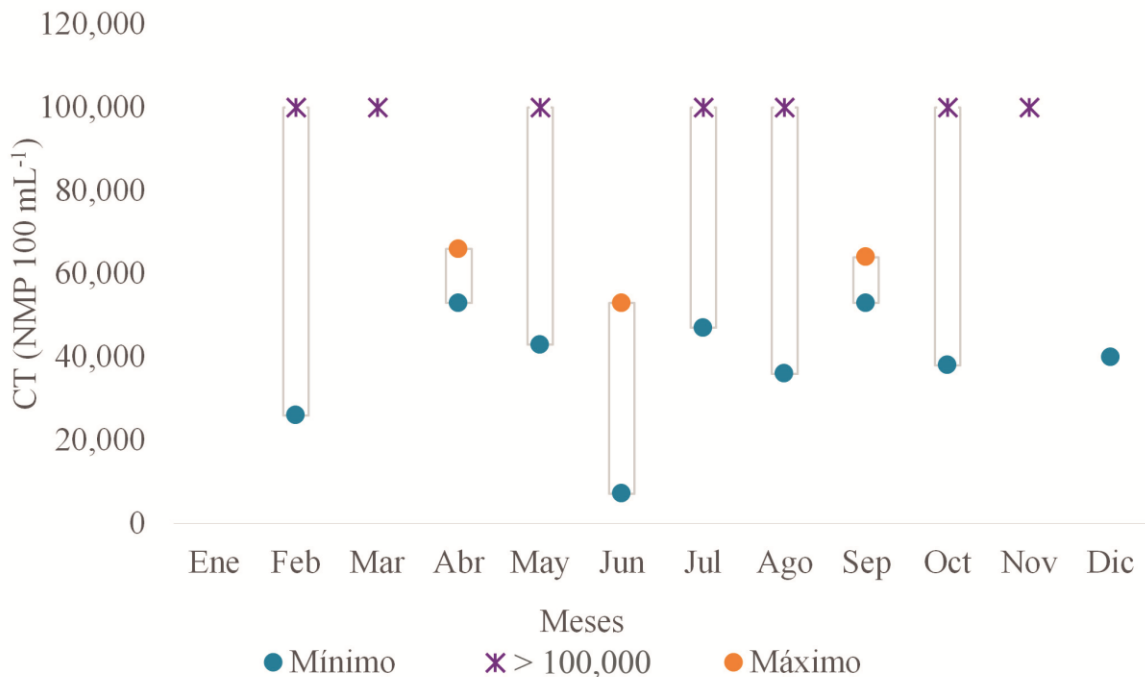


**Fig. 10.** Variación de la concentración de coliformes fecales (CF) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.



## 9.7 Coliformes Totales

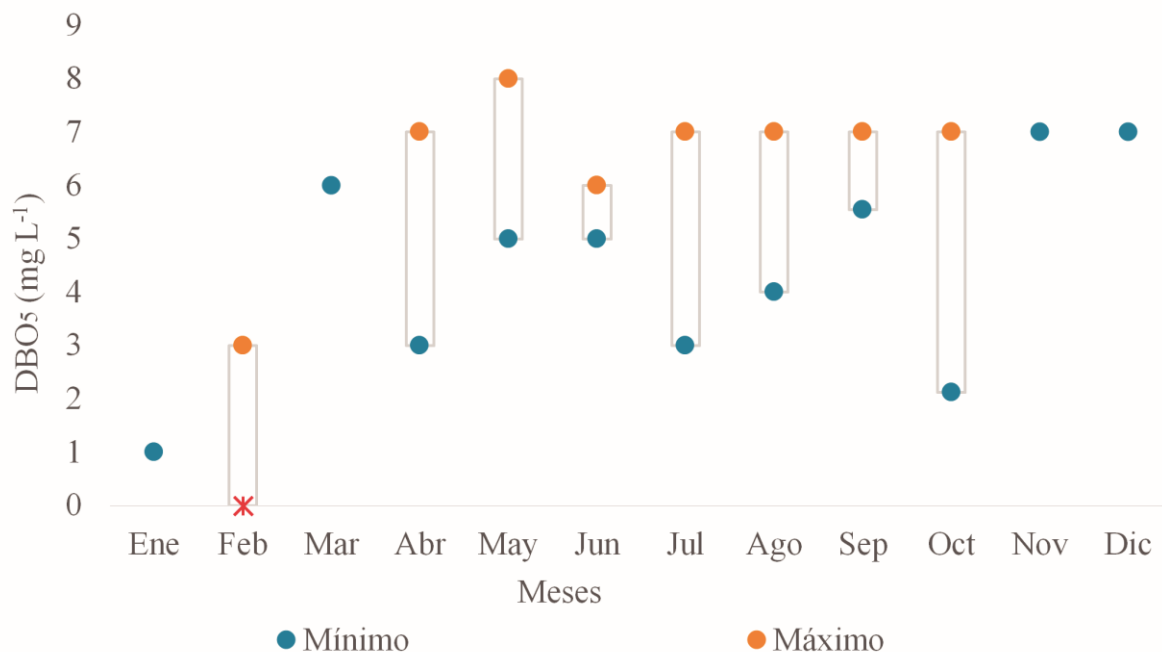
La mediana que presentó el efluente de la PTAR (53,000 NMP 100 mL<sup>-1</sup>) es varios órdenes de magnitud mayor a la medida más alta del rango de valores presentados en los lagos (6 - >1,600 NMP 100 mL<sup>-1</sup>). Los valores del efluente de la PTAR sobrepasan el límite establecido por el Criterio SACM-1999 durante todo el año (1,000 NMP 100 mL<sup>-1</sup>). No se observa tendencia anual alguna.



**Fig. 11.** Variación de la concentración de coliformes totales (CT) en el efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.

## 9.8 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

La DBO<sub>5</sub> que se registró en el efluente de la PTAR (<1 - 8 mg L<sup>-1</sup>) es menor a los rangos anuales de los lagos (9 - 45 mg L<sup>-1</sup>). Los valores máximos registrados en el efluente de la PTAR no sobrepasan los límites máximos permisibles (30 mg L<sup>-1</sup>) que la NOM-003-SEMARNAT y la NOM-001-SEMARNAT establecen. No se observó ninguna tendencia anual.

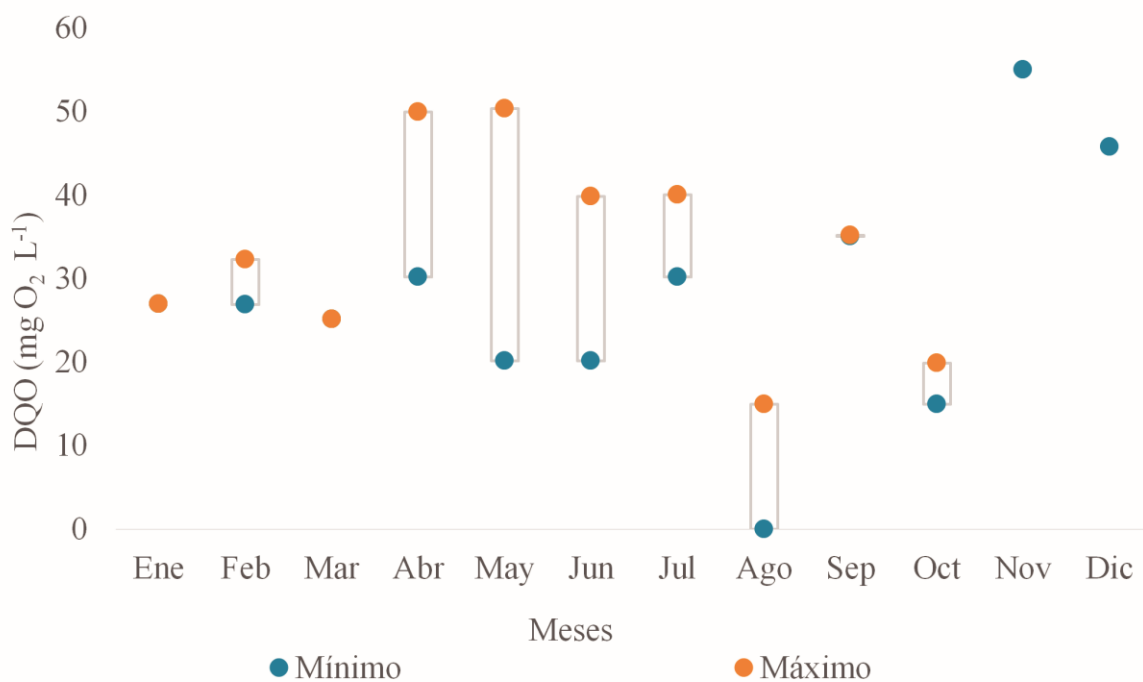


**Fig. 12.** Variación de los valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) del efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.

### 9.9 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Los valores de DQO que presentó el efluente de la PTAR son menores a la mayoría de los promedios mensuales de los lagos (Lago Viejo:  $107 \pm 25 \text{ mg L}^{-1}$ , Lago Mayor:  $81 \pm 29 \text{ mg L}^{-1}$  y Lago Menor:  $299 \pm 173 \text{ mg L}^{-1}$ ); las medias anuales de los lagos son hasta dos veces mayores que el valor máximo del efluente de la PTAR presentado en noviembre (valor máximo medido). El valor máximo mensual de mayo junto con el de noviembre sobrepasan el Criterio SACM-1999 ( $50 \text{ mg L}^{-1}$ ).

La DQO fue más de dos veces el valor de la DBO<sub>5</sub> todo el año, misma tendencia observada durante todo el año para el Lago Viejo y el Lago Menor. El Lago Mayor mostró este comportamiento para once meses del tiempo muestreado, excepto en diciembre, donde la DQO fue 1.6 veces la DBO. No se observa ninguna tendencia anual.



**Fig. 13.** Variación de los valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del efluente de la PTAR Chapultepec en 2016.

La Tabla 8 muestra el tipo de cambio (aumento, disminución, igual) de los parámetros evaluados en el efluente de la PTAR Chapultepec, así como en los lagos de Chapultepec.

**Tabla. 8.** Comparación entre los parámetros determinados en el efluente de la PTAR Chapultepec y el agua de los Lagos de Chapultepec

Parámetro	PTAR	Lagos
pH	↓	↑
CE	≈	≈
N <sub>TOT</sub>	↓	↑
P <sub>TOT</sub>	↑	↓
SST	↓	↑
CF	↑	↓

CT	↑	↓
DBO <sub>5</sub>	↓	↑
DQO	↓	↑

## 10. Discusión

De acuerdo con Martínez (2018), los parámetros físico-químicos medidos en los lagos de Chapultepec en general no siguen una clara tendencia temporal a lo largo del año. Lo anterior indica que los parámetros medidos en los cuerpos de agua no se ven influenciados de forma predominante por el clima (i.e., época cálida de lluvias y la época fría de secas).

Alcocer *et al.* (2007) mencionan que en el efluente de la PTAR la DBO<sub>5</sub> y la concentración de P<sub>TOT</sub> es mayor durante la época de lluvias, el N<sub>TOT</sub> es mayor en época de secas y los SST se mantienen constantes durante todo el año. Sin embargo, en el presente estudio solo se observó dicho comportamiento para el P<sub>TOT</sub> y en la conductividad eléctrica que disminuye en lluvias y aumenta en época de estiaje.

Por otro lado, se observó una tendencia en el pH del efluente, cuyos valores más altos se presentan a inicios del año y disminuyen hacia los meses de noviembre, diciembre. Se observó un incremento del P<sub>TOT</sub> del afluente de la PTAR durante la época de lluvias, probablemente derivado de las condiciones del agua residual que alimenta la PTAR.

Realizando la comparación entre el efluente de la PTAR y los lagos de Chapultepec, el pH de los cuerpos acuáticos es mayor al del efluente de la PTAR. De acuerdo con Olguín-Flores *et al.* (2017) esto se debe a la alta productividad primaria que se lleva a cabo en los lagos. El fitoplancton durante los periodos de alta productividad consume dióxido de carbono en exceso de manera que su concentración en el agua disminuye o se agota. En consecuencia, al disminuir el CO<sub>2</sub> disuelto, por equilibrio químico, se favorece la reacción:  $HCO_3^- \leftrightarrow CO_2 + OH^-$ . Dando como resultado el incremento de iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>) en la columna de agua y, por ende, elevando temporalmente el pH.

El intervalo de registros de conductividad eléctrica medido en el efluente de la PTAR ( $413 - 635 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) y en los lagos ( $334 - 604 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) es muy similar entre sí. El agua tratada de la PTAR presenta concentraciones bajas de iones disueltos y es poco afectado por las condiciones climáticas (evaporación y precipitación). Añadiendo que el constante llenado de los lagos con aguas del efluente de la PTAR mantienen los niveles de conductividad eléctrica en los cuerpos.

De acuerdo con Carey y Migliaccio (2009), la atmósfera es una fuente importante de nitrógeno para los sistemas epicontinentales, brindando hasta un 40% del nitrógeno del sistema. Adicionalmente, la presencia de microorganismos fitoplanctónicos fijadores de nitrógeno puede aumentar la concentración de nitrógeno en los cuerpos acuáticos (Alcocer, 2017). Finalmente, la degradación de las grandes cantidades de materia orgánica presente en los lagos también da por resultado un incremento no solo del  $\text{N}_{\text{TOT}}$ , también del  $\text{P}_{\text{TOT}}$  presente en los sistemas acuáticos. Esto seguramente explica el incremento de la concentración de nitrógeno en los lagos respecto al efluente, mientras que la disminución de fósforo en los cuerpos es posiblemente el resultado de la sedimentación de este nutriente.

Los SST de los sistemas acuáticos en general están compuestos en su mayoría por sólidos orgánicos: organismos y residuos orgánicos (Martínez, 2018) El efluente de la PTAR muestra bajas concentraciones de SST ya que durante el tren de tratamiento estos son depositados. Sin embargo, los lagos presentan elevadas cantidades de organismos fitoplanctónicos (Rodríguez, 2017) que incrementan de forma considerable la cantidad de SST en los lagos.

Las coliformes fecales y totales son enterobacterias, esto es, organismos que habitan en el tracto digestivo de animales termorregulados. Las condiciones ambientales de los lagos no favorecen su sobrevivencia propiciando su mortandad. Entre los factores adversos están: temperaturas menores a  $15^{\circ}\text{C}$  (Washington State Department of Ecology, s.f., Lechevallier, 2003), pH elevado, radiación solar ultravioleta, altas concentraciones de oxígeno, depredación, competencia, etc. (von Sperling, 2007).

Respecto a la  $\text{DBO}_5$ , debido a la alta productividad hay grandes cantidades de materia orgánica en los lagos que es propensa a la degradación por parte de los microorganismos

presentes. En cuanto al agua residual, éstas también presentan grandes cantidades de materia orgánica que es biodegradable y que las bacterias, hongos y protozoos presentes en los lodos activados de las PTARs, utilizan como alimento (Cisterna y Peña, s.f), disminuyendo la materia orgánica biodisponible en las aguas y por consiguiente la DBO<sub>5</sub>. Esta es la razón de que haya mayor DBO<sub>5</sub> en los lagos que en el efluente de la PTAR.

Los altos valores de DQO en el efluente de la PTAR y el incremento de DQO en los lagos muestran que una cantidad significativa de la materia orgánica que hay en estos sistemas no puede ser degradada por los microorganismos comunes (Woodard & Curran, Inc., 2005). La presencia de detergentes (Alcocer, 2017) y otras sustancias como medicamentos (Ramos, 2009), puede formar parte de este conjunto no biodegradable. Por lo anterior, esta materia orgánica resistente a la degradación permanece sin ser oxidada, generando altas concentraciones de DQO en los lagos por acumulación a lo largo del tiempo

Las aguas residuales que alimentan la PTAR son predominantemente de origen doméstico por lo que están cargadas de materia orgánica; los procesos biológicos de la PTAR están encaminados a la degradación de la materia orgánica biodegradable la cual se transforma en agua, dióxido de carbono, fósforo y nitrógeno biodisponibles, estos dos últimos, cuando entran a los lagos promueven una alta productividad primaria y, por ende, la eutrofización de los cuerpos acuáticos.

El fitoplancton junto con otra materia orgánica en suspensión, además de que en conjunto aumentan la turbidez, se depositan en el fondo de los cuerpos acuáticos por gravedad. Esta materia es descompuesta a través de reacciones químicas que requieren oxígeno y liberan dióxido de carbono, así como otras sustancias que pueden ser tóxicas para los organismos que habitan los lagos (Alcocer *et al.*, 2007, Alcocer, 2017). Tal es el caso de la generación de anoxia y la producción de H<sub>2</sub>S y CH<sub>4</sub> o bien la conversión de los compuestos nitrogenados a ion amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). El NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en elevada concentración ha sido la causa de mortandad de peces en el Lago Mayor.

La zona de anoxia generada por el proceso de descomposición del fondo de los cuerpos no se presenta de forma constante debido a la alta producción de oxígeno en disolución generado por el fitoplancton y a que la someridad de los lagos permite que se lleve a cabo una mezcla constante (Olgín-Flores *et al.*, 2017, Alcocer *et al.*, 1988).

Aunque los tres lagos son abastecidos por el efluente de la PTAR, la distribución del agua no es homogénea entre los cuerpos. Las autoridades del Bosque de Chapultepec encargadas de la distribución del efluente de la PTAR entre los lagos, han mencionado la preferencia por llenar primero al Lago Viejo, después al Lago Mayor y por último al Lago Menor. Siendo ésta, una de las posibles razones de las diferencias físico-químicas entre los sistemas.

A continuación, se hace un análisis comparativo de la calidad del agua de los efluentes de varias PTARs con la actual PTAR de Chapultepec. Se utilizaron como comparación los promedios anuales de la PTAR Atotonilco en Tula, Hidalgo, cuyo efluente proviene de tratamiento terciario (CONAGUA, s.f; Limón, 2013; ATVM, s,f) y datos correspondientes al año 1987 de PTARs de tratamiento secundario ubicadas en el estado de California en Estados Unidos: Santa Rosa Laguna y Montecito Sanctuary District (Asano *et al.*,1985). En este último caso no se especifica si los valores son mensuales o anuales.

Respecto a los valores de pH, la PTAR Chapultepec no presentó valores extremos comparados con los valores establecidos de pH (5-10) en la PTAR Atotonilco, incluso presentó valores menores a los de la planta de Mentecito Sanctuary District cuyo pH fue de 7.6.

Por otra parte, la PTAR Chapultepec presentó valores bajos de conductividad eléctrica respecto al efluente de la PTAR de Montecito Sanctuary District ( $1,389 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). De acuerdo con Asano *et al.* (1985), la PTAR Chapultepec presenta valores menores que PTARs de tratamiento terciario, como una ubicada en Irlanda ( $875 \mu\text{S cm}^{-1}$ ).

La PTAR Chapultepec también presentó valores menores al establecido por la PTAR de Santa Rosa Laguna, cuya concentración de  $P_{\text{TOT}}$  fue de  $12.5 \text{ mg L}^{-1}$ . Respecto a  $N_{\text{TOT}}$ , la PTAR de Sanctuary District, (que mostró una concentración de  $13 \text{ mg L}^{-1}$ ), presenta

valores menores que la PTAR Chapultepec. Sin embargo, la PTAR de Atotonilco presenta concentraciones que van de 40 a 105 mg L<sup>-1</sup>, valores mucho mayores al máximo presentado en Chapultepec.

Cabe mencionar que los resultados analíticos del 2016 brindados por SACMEX toman en cuenta el límite máximo permisible para P<sub>TOT</sub> y N<sub>TOT</sub> que establece el Criterio SACM-1999 que es de 20 mg L<sup>-1</sup> y 40 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Sin embargo, en el presente análisis se utilizaron los límites máximos permisibles indicados en la Tabla 2 y que corresponden a la NOM-001-SEMARNAT debido a que las NOMs son oficiales, mientras que el Criterio SACM-1999 es particular.

La PTAR Chapultepec presentó valores menores de SST en comparación con los medidos en la PTAR de Montecito y la PTAR de Atotonilco, cuyos valores fueron de 11 mg L<sup>-1</sup> y de 30 a 60 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Así mismo, la PTAR de Chapultepec mostró valores altos de coliformes fecales respecto a la PTAR de Atlacomulco que presenta valores anuales de 1,000 a 2,000 NMP 100 mL<sup>-1</sup>.

Es preciso señalar que los datos proporcionados por SACMEX especifican que los resultados analíticos para coliformes fecales y totales de febrero a septiembre sobrepasan los límites correspondientes. Puesto que en el presente trabajo se tomó en cuenta la NOM-003- ECOL-1997 para evaluar los resultados de coliformes fecales, se observó que los valores se encuentran por encima de sus respectivos límites permisibles durante todo el año.

La DBO<sub>5</sub> de la PTAR de Atotonilco mostró un valor de 30 mg L<sup>-1</sup> lo que corresponde a casi tres veces más que el valor máximo que se presentó en la PTAR Chapultepec. Finalmente, los valores de DQO que presentó la PTAR de Chapultepec son menores a los de la planta de Montecito, que mostró una DQO de 11 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. A pesar de la antigüedad de la PTAR Chapultepec su eficiencia era mayor que otras PTARs con tratamiento secundario.



**Tabla 9.** Comparación de los valores analíticos del efluente de la PTAR-Chapultepec respecto a la PTAR-Montecito Sanctuary District, la PTAR-Santa Rosa Laguna y la PTAR-Atotonilco

Parámetro	PTAR-Chapultepec	PTAR-Atotonilco	PTAR-Montecito Sanctuary District	PTAR-Santa Rosa Laguna
pH	6.6 - 7.3	≈	↑	
CE	413 - 635		↑	
P <sub>TOT</sub>	<1.0 -10.1			↑
N <sub>TOT</sub>	<1.5 - 20	↑	↓	
SST	<15 - 20	↑	↑	
CF	200 - 38,000	↓		
CT	7200 -100,000			
DBO <sub>5</sub>	<1 - 8	↑		
DQO	<6 - 55		↑	

Con referencia a la nueva PTAR de Chapultepec, a continuación (Tabla 10) se hace una comparación entre los valores máximos de los parámetros medidos en el efluente de la actual PTAR Chapultepec con aquellos que la empresa Suez (s.f) planteó tendrán el efluente de la nueva PTAR Chapultepec.

**Tabla 10.** Comparación de las concentraciones de los parámetros medidos en efluente de la actual PTAR de Chapultepec respecto a los valores estimados para la nueva PTAR de Chapultepec.

Parámetro	PTAR nueva	PTAR actual
DQO ( mg L <sup>-1</sup> )	<50	55
DBO <sub>5</sub> ( mg L <sup>-1</sup> )	<10	8
N <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	10	10

P <sub>TOT</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	1	10.1
--	---	------

Se planteo que la nueva PTAR presente valores de DQO y de P<sub>TOT</sub> menores a la PTAR actual lo que implicará un mejoramiento en algunos parámetros de calidad del efluente y por consiguiente una disminución de la cantidad de nutrientes que entran al sistema, debido al proceso de precipitación de nutrientes. Sin embargo, no hay que olvidar la importante reserva de nutrientes que tienen los sedimentos a largo plazo en los sistemas hipereutróficos, que seguramente retrasarán la mejora de la calidad del agua de los lagos.

Theis y DePinto (1976) mencionaron que en lagos donde altas descargas de fósforo se han mantenido durante grandes periodos, como en los lagos de Chapultepec, los sedimentos seguirán funcionando como una fuente importante de este nutriente aún después de que otras fuentes hayan sido suprimidas.

Añadiendo el hecho de que los lagos de Chapultepec presentan circulación constante de la columna, esto genera resuspensión de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que provienen, tanto de la mineralización de materia orgánica del fondo como del fósforo en los sedimentos; dando como resultado en el incremento la concentración de estos nutrientes en la columna de agua. Los nutrientes que retoman la columna desde los sedimentos son denominados carga interna (Roldán y Ramírez, 2008)

## 11. Conclusiones

Los coliformes totales, coliformes fecales y el fósforo total sobrepasaron los límites de las NOMs , los primeros dos durante todo el año de muestreo y el último durante dos meses en el año.

Aunque no se presentó una tendencia temporal generalizada en la mayoría de los parámetros de calidad de agua medidos en el efluente de la PTAR, se presentó un aumento en la concentración de P<sub>TOT</sub> y una disminución en la conductividad eléctrica en época de lluvias, así como un decremento de los valores de pH hacia los últimos meses del año.

Pese a que los coliformes fecales y totales en el efluente de la PTAR sobrepasan los límites establecidos en la normatividad, en los lagos no se refleja esta situación ya que muy probablemente las condiciones que estos cuerpos presentan eliminan la mayor parte de los coliformes que llegan en el afluente.

En los Lagos de Chapultepec, existe un aumento en la cantidad de materia orgánica no biodegradable que proviene del efluente y que no es fácilmente descompuesta por los organismos presentes ni en la planta y en los lagos. La nueva PTAR Chapultepec generaría una mejoría en esta condición al disminuir la cantidad de materia orgánica no biodegradable. Mientras que la  $DBO_5$  aumenta en los lagos debido al incremento de materia orgánica biodegradable generada por la alta productividad primaria.

Debido al gran aumento en la concentración de nitrógeno que hay en los lagos con respecto al efluente de la PTAR, éste debe proceder de otras fuentes tales como el aporte atmosférico, la fijación por parte de cianobacterias y la degradación de la materia orgánica en los lagos mismos.

Es probable que aun cuando entrara en funcionamiento la nueva PTAR, en el corto plazo no se vea una mejora marcada de la calidad de agua de los lagos de Chapultepec debido a la carga interna de fósforo y nitrógeno que mantendrían elevada la producción primaria. Asimismo, la cantidad de SST en los lagos seguirá siendo elevada ya que estos no proceden del efluente sino de la presencia de grandes cantidades de fitoplancton en los cuerpos.

Se puede considerar que el tratamiento de las aguas residuales que se lleva a cabo en la PTAR Chapultepec presenta las características esperadas, tomando en cuenta que, de todos los parámetros medidos, solo las concentraciones de nitrógeno y coliformes sobrepasaron aquellos de otras plantas de tratamiento; por otro lado, no se espera que estas variables sean removidas a través de un tratamiento secundario. Adicionalmente, hay que considerar que su deficiencia en el grado de tratamiento del agua se debe muy probablemente a su antigüedad.

## Referencias

- Aguas Tratadas Valle de México (ATVM). (s.f). Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Atotonilco: La Apuesta de Sustentabilidad en México [pdf].
- Alcocer, J., 1988. Estudio preliminar del efecto del dragado sobre el estado trófico del lago Viejo de Chapultepec. *Contam. Ambient.* 4: 43-56
- Alcocer, J. y Lugo. A., 1995. The urban lakes of Mexico City. *LAKELINE* 15 (1): 14-15-31.
- Alcocer, J., Lugo, A., Vilaclara G., Sánchez, R. y Chávez, M., 2007. Los Lagos de Chapultepec, Ciudad de México. Las aguas interiores de México: conceptos y casos. De La Lanza, G. (compilador). México: Editor, S.A: 114-124.
- Alcocer, J., 2017. Estudio de la productividad de los lagos Mayor y Menor de la 1° 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. Tercer informe técnico. 40.
- Alcocer, J., Kato, E., Robles, E., y Vilaclara, G., 1988. Estudio preliminar del efecto del dragado en sobre el estado trófico del Lago Viejo de Chapultepec. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 4(1): 43-56.
- Almanza-Marroquín, V., Figueroa, R., Parra, O., Fernández, X., Baeza, C., Yañez, J., Urrutia, R., 2016. Bases limnológicas para la gestión de los lagos urbanos de Concepción, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(2): 313-326.
- Ansari, A., Singh, A. (Editores). 2013. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control* (Vol. 2). India: Springer Science & Business Media: Capítulo III. 29-45.
- Ansari, A., Singh, A., Lanza, G., Rast, W. (Editores). 2010. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control* (Vol. 1). India: Springer Science & Business Media. 143-150.
- APHA (American Public Health Association). 2012. American Water Works Association, Water Environment Federation. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. APHA. Washington. 1496.
- Asano T., Smith R.G. y Tchobanoglous G., 1985. Municipal wastewater: Treatment and reclaimed water characteristics. *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater - A Guidance Manual*, G.S. Pettygrove and T. Asano (eds). Lewis Publishers Inc., Chelsea, Mississippi.
- Birch, S., McCaskie, J., 1999. Shallow urban lakes: A challenge for lake management. *Hydrobiologia*, 395/396: 365-378.
- Bolívar, C., 2013. Chapultepec: paseo de fin de siglo. Una experiencia decimonónica. Tesis de Maestra den Historia. Universidad Iberoamericana. México: 115.
- ~~Burlage, R., 2012. Principles of Public Health Microbiology. Canada. Jones & Bartlett Learning. Campos, I (2003) Saneamiento Ambiental. Editorial Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica, 225.~~
- Campos, R., 1992. "Chapultepec: Su Leyenda Y Su Historia". Talleres de Gráficos del Gobierno Nacional México. 11-12.
- Carey, R., Migilaccio, K., 2009. Contribution of Wastewater Treatment Plant Effluents to Nutrient Dynamics in Aquatic Systems: A Review. *Environmental Management*, 44(2): 205-217.

- Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM). 2010. Informe Final Historia del clima de la Ciudad de México: Efectos observados y perspectivas. [pdf] [http://www.cvcccm.unam.mx/documents/libros\\_cvcccm/Inf\\_Final\\_Final%20Final%20HC\\_Conde.pdf](http://www.cvcccm.unam.mx/documents/libros_cvcccm/Inf_Final_Final%20Final%20HC_Conde.pdf)
- Chiesura, A., 2004. The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68: 129–138.
- Cisterna, P., Peña, D., (s.f). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región. [pdf] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (s.f) Documentos de licitación para la construcción de la PTAR Atotonilco. [pdf] <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/PTAR/PTAR%20Atotonilco/Documento%20Completo%20Prebases%20PTAR%20Atotonilco..pdf>
- Diario Oficial de la Federación. 1996. NOM-001-SEMARNAT-1996.
- Diario Oficial de la Federación. 1997. NOM-003-ECOL-1997
- Diario Oficial de la Federación. 2016. Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016
- Diario Oficial de la Federación (2001) NMX-AA-028-SCFI-2001
- Díaz, R., 2013. CAUSAS Y SOLUCIONES DEL PROBLEMA DE OLORES EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 89
- Díaz-Cuenca, E., Alvarado-Granados, A., Camacho-Calzada, K., 2012. El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE). *Quivera. Revista de Estudios Territoriales* 14(1):78-97.
- El Economista. 2016, 22, 03. Planta de tratamiento de agua para Chapultepec costará casi 300 mdp. <https://www.eleconomista.com.mx/politica/Planta-de-tratamiento-de-agua-para-Chapultepec-costara-casi-300-mdp-20160322-0014.html>
- Enríquez, C., 2012. El Bosque de Chapultepec y la Transformación de su Entorno, Distrito Federal. Tesis de Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 117
- EPA (Environmental Protection Agency).1998. How wastewater treatment works...The basics [pdf] <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/bastre.pdf>
- EPA (Environmental Protection Agency). (s.f.). Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand. <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms52.html>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1992. Wastewater treatment <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e05.htm>
- Fuentes, V., 2015. 14 de noviembre. Rescatarán Lagos de Chapultepec. *Reforma*.
- González, I., 2016. Planta de tratamiento de aguas residuales Chapultepec, Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento. *Revista Agua y Saneamiento*. [pdf] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf>
- Lechevallier, Mark., 2003. Conditions favouring coliform and HPC bacterial growth in drinking water and on water contact surfaces. *Heterotrophic Plate Counts and Drinking-water Safety*. 177-197
- Limón, J., 2013. los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿ problema o recurso?[pdf].

[http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_limon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf)

- Martínez, M., 2018. Caracterización Físico-química de los lagos de Chapultepec, Ciudad de México. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 82.
- Meybeck, M., Kuusisto, E., Makela, A., Malkki, E., 1996. Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programme. Londres: E & FN Spon. Capítulo II. 15-37.
- Naselli-Flores, L., 2008. Urban Lakes: Ecosystems at Risk, Worthy of the Best Care. Materials of the 12th World Lake Conference. 1333-1337.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J.M., Güereca, L., 2013. Selección De Tecnologías Para El Tratamiento De Aguas Residuales Municipales, Guía de Apoyo Para Ciudades Pequeñas Y Medianas, México. UNAM. 1-7.
- Olgún-Flores, Z., Lagunas, M., Alcocer, J., Oseguera, L., 2017. Lagos del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México: Metabolismo Lacustre, México. En: Paz, F., Torres, R (Editores). Programa Mexicano del Carbono: Síntesis a 2017. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad Autónoma de Baja California. Texcoco, Estado de México, México. 656.
- Ramos, C., 2009. Aspectos sobre los residuos de medicamentos semi sólidos en el agua. Revista Cubana de Química, 20(3) 82-89 [pdf] <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543718010.pdf>
- Rendón-Neydar, V., Cortés-Guzmán D., Alcocer, J. y Oseguera, L., 2018. Biomasa de los macroinvertebrados bentónicos en tres lagos urbanos del Bosque de Chapultepec, México. En: Paz, F., A. Velázquez y M. Rojo (Editores). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Instituto Tecnológico de Sonora. Texcoco, Estado de México, México. 686 p.
- Rodríguez, L., 2017. Calidad del Agua y Productividad Primaria Fitoplanctónica en los Tres Lagos del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México, Bucaramanga. Tesis de Licenciatura en Biología. Escuela de Biología, Universidad Industrial de Santander. 12-23.
- Roldán, G., Ramírez, J., 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Colombia: Universidad de Antioquia. 240-241.
- Secretariado Alianza por el Agua, 2008. Monográficos Agua En Centroamérica [3] Manual De Depuración De Aguas Residuales Urbanas. Capítulo III. 25-43.
- Secretaria de Medio Ambiente (SEDEMA). 2013. Plan maestro de rehabilitación para la segunda sección del Bosque de Chapultepec. <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/index.php/plan-maestro-rehabilitacion-segunda-seccion-bosque-chapultepec>
- Singh, Ritu y Bhatnagar, Manu., 2012. Urban lakes and wetlands: opportunities and challenges in Indian cities - Case study of Delhi. 12th edition of the World Wide Workshop for Young Environmental Scientists (WWW-YES-2012)-Urban waters: resource or risks?.
- Suez México (s.f) PTAR Chapultepec Informe Preventivo [pdf]

- Theis T. L y DePinto, J.V., 1976. Studies on the reclamation of Stone Lake, Michigan. EPA-600/ 3-76-106. 84.
- Vela, A., 2016. Procesos Unitarios en el Saneamiento de Aguas Residuales. Proyecto Terminal. Proyecto terminal. Universidad Autónoma Metropolitana. 128 [pdf] <http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspuam/presentatesis.php?recno=17539&docs=UAMI17539.pdf>
- Villasana, C., Navarrete, A., 2016. 10 de noviembre del 2016. Cuando se iba a pescar al lago de Chapultepec. El Universal.
- Villaseñor, J., 1998. Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Castilla-La Mancha. 20-22.
- von Sperling, Marcos., 2007. Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal (Vol 1), Londres: IWA publishing: 296.
- Woodard & Curran Inc. 2005. Industrial Waste Treatment Hadbook. Elsevier Butterwoth-Heinemann. Massachusetts: 532.
- Washington State Department of Ecology (s.f) Focus on Fecal Coliform Bacteria. [pdf] <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/0210010.pdf>