

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD  
DEPARTAMENTO EL HOMBRE Y SU AMBIENTE  
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

INFORME FINAL DE SERVICIO SOCIAL POR INVESTIGACIÓN

**Evolución físico-química del corredor turístico del Canal  
Nacional y zona lacustre adyacente de Xochimilco,  
durante un período de 9 años**

QUE PRESENTA EL ALUMNO

**Berdeja Núñez Dylan Jesús**

Matrícula

2162029532

**ASESORES**

**Dr. Angeles Vázquez José Roberto (Interno)**

Laboratorio de Ecología Microbiana

No. Eco. 39325

**Dra. Ferrara Guerrero María Jesús (Interno)**

Laboratorio de Ecología Microbiana

No. Eco. 22662



## RESUMEN

Para generar medidas de conservación y de servicios ecosistémicos, el monitoreo de los parámetros físicos y químicos en cuerpos de agua tiene un papel clave, ya que proporciona información del estado de salud, comportamiento y dinámica de las redes tróficas, y balance y reciclamiento de nutrientes del ecosistema. Los valores en estos parámetros son indicadores de eutrofización, variaciones poblacionales de microorganismos y procesos de perturbación. En esta investigación se analizaron 16 variables físico-químicas obtenidos de la columna de agua (superficie y fondo) en diez sitios de muestreo de la zona chinampera de Xochimilco, con el objetivo de analizar la evolución de la calidad físico-química del agua durante 9 años de muestreo. El análisis de componentes principales mostró la formación de dos grupos por años. El primero: 2010, 2018 y 2019, asociado al pH (7.73), la temperatura (17.12 °C) y la concentración de  $\text{NH}_4^+$  (1.75 mg/L); el segundo grupo se conformó por los años 2009, 2011, 2012, 2014 y 2015 por el  $\text{O}_2$  (9.65 mg/L), el pH (7.8), la temperatura (19.6 °C) y por el  $\text{P}_{\text{total}}$  (8.65 mg/L). El año 2013 se comportó de manera diferente por sus valores altos de Eh (+290.6 mV), TOC (7.58 mg/L), transparencia (45.83 cm),  $\text{NO}_3^-$  (2.82 mg/L) y  $\text{P}_{\text{total}}$  (12.92 mg/L). El análisis por sitios de muestreo formó dos grupos, el primero formado por la Laguna del Toro, el canal de Apatlaco y la laguna de Texhuilo reunidos por una mayor transparencia (33.9 cm), altas concentraciones de  $\text{O}_2$  (11.62 mg/L), pH básicos (8.1), baja salinidad (0.53 ppm), alta concentración de  $\text{PO}_4^{3-}$  (10.66 mg/L) y  $\text{P}_{\text{total}}$  (9.37 mg/L); el segundo grupo se formó por la estación situada frente a las instalaciones de la Marina, la Laguna de Tlilac, las instalaciones del CIBAC, La Virgen y el Embarcadero Cuemanco por su baja transparencia (25.3 cm), pH (7.6), mayor salinidad (1.5 ppm) y temperatura (18.8 °C). Los sitios ubicados en la caída de las aguas semitratadas de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella y Frente al CIBAC no tuvieron similitud con el resto ya que la primera fue de las más profundas (196.3 cm), con una transparencia de 51.3 cm,  $\text{NO}_2^-$  (4.86 mg/L),  $\text{NO}_3^-$  (2.96 mg/L) y TOC (68 mg/L) y la segunda con un valor alto de  $\text{NH}_4^+$  (2.51 mg/L). El índice de

estado trófico (TSI) indicó que todas las zonas de muestreo presentaron condiciones hipertróficas.

**Palabras clave:** Humedales, estado trófico, perfil físico y químico, columna de agua.

# ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1.	Parámetros físicos y químicos .....	2
2.2.	Importancia de los parámetros físicos y químicos en cuerpos de agua dulce 4	
2.3.	Influencia de los parámetros físicos y químicos en la flora, la fauna y las bacterias .....	5
2.4.	Parámetros físicos y químicos indicadores del nivel trófico .....	5
2.4.1.	Fósforo total.....	6
2.4.2.	Nitrógeno total .....	6
2.4.3.	Clorofila a.....	6
2.4.4.	Transparencia .....	7
2.5.	Contaminación en ecosistemas acuáticos urbanos y naturales.....	7
2.6.	Impactos socioeconómicos .....	8
2.7.	Proceso de eutrofización .....	8
III.	OBJETIVOS .....	9
3.1.	Objetivo General .....	9
3.2.	Objetivos Específicos .....	9
3.3.	Hipótesis .....	9
IV.	METODOLOGÍA .....	10
4.1.	Área de estudio.....	10
4.2.	Ordenamiento de las bases de datos .....	11
4.3.	Análisis estadísticos .....	12
4.4.	Índice de estado trófico (TSI).....	12
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	13
5.1.	Perfil físico y químico de la columna de agua .....	13
5.2.	Análisis multivariados.....	17
5.2.1.	Distribución temporal.....	17
5.2.2.	Distribución espacial.....	20
5.3.	Índice de Estado Trófico (TSI) .....	24
VI.	CONCLUSIONES .....	26
VII.	REFERENCIAS .....	28

## I. INTRODUCCIÓN

Los humedales son ecosistemas en donde el recurso hídrico es el factor principal que determina sus propiedades físicas y químicas. Se pueden distinguir en ellos una amplia gama de hábitats, entre los más característicos se encuentran los costeros, los marinos y los epicontinentales; albergan una alta riqueza de especies y de diversos servicios ecosistémicos (UICN, 1992; Astudillo *et al.*, 2010; SEMARNAT, 2012).

La cuenca de Xochimilco y sus afluentes es un sistema ecológico epicontinental de gran importancia ambiental y social porque en ella se encuentra el Área Natural Protegida “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, reconocida como Patrimonio Cultural y Natural de la Humanidad por la UNESCO (Figueroa-Torres *et al.*, 2014). A pesar de lo anterior, presenta un deterioro muy marcado por la deforestación y erosión del suelo, así como por la contaminación del agua y su extracción desmedida, lo que ha causado muchos problemas como inundaciones, formación de islas de calor, enfermedades, pérdida de la biodiversidad y afectación en las actividades culturales y económicas. La creciente desecación generó la necesidad del uso de agua residual semitratada para mantener el nivel de agua en los canales, lo que conllevó a la disminución en la calidad de los cultivos de hortalizas los cuales están siendo reemplazados por la producción de flores. Otro problema de la zona ha sido la introducción de especies exóticas que desplazan a las nativas (Narchi, 2013; Figueroa-Torres *et al.*, 2014).

Debido a la relevancia ecológica, social y económica que tiene el sistema de humedales de Xochimilco, es necesario hacer un control y monitoreo de los niveles de contaminación del ecosistema, ya que su preservación ayuda a mantener la calidad y dinámica del acuífero y del suelo de conservación de la Cuenca de México y para sostener el equilibrio ecológico a nivel regional (Mendoza, 2018). Por ello en este trabajo de Servicio Social se evaluaron los cambios físicos y químicos y del nivel trófico del agua de los canales, durante nueve años de muestreos en diez sitios ubicados en el corredor turístico Canal Nacional y zona lacustre adyacente.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Parámetros físicos y químicos

Los parámetros físicos y químicos son aquellos componentes o atributos particulares de los cuerpos de agua que le proporcionan sus características biológicas y no biológicas, como por ejemplo: los sólidos suspendidos influyen en la coloración y transparencia, el olor varía en función de la cantidad y tipo de células bacterianas y algales, su densidad depende de la temperatura, pH, niveles de O<sub>2</sub>, entre otros, y cantidad de nutrientes (como el P y N) presentes en el medio (Gil-Garzón *et al.*, 2012), la conductividad eléctrica es una propiedad determinada por los niveles de compuestos inorgánicos como la concentración de sales (Salinidad) (Solís-Castro *et al.*, 2017), otra propiedad es la temperatura, determinada por la energía cinética (Ec) que permite clasificar a las aguas en tropicales o templadas (Castillo, 2016), los niveles de oxígeno disuelto influyen los tipos de organismos y la manera en la que se distribuyen estos en el agua, existiendo cuerpos de agua anóxicos, subóxicos o sobresaturados en O<sub>2</sub> (Peña-Pulla, 2007), entre muchas otras características. Todos los parámetros influyen de manera directa o indirecta unos a otros, la importancia de cada uno radica en cómo intervienen en la densidad y riqueza de especies y en la calidad de agua que sirve para consumo o para fines de esparcimiento (Barbier *et al.*, 1997).

La composición química del agua y sus propiedades físicas proporcionan información de procesos de contaminación y permite evaluar los niveles de impacto ambiental, tanto de origen antrópicos (principalmente) como naturales (Samboni-Ruiz *et al.*, 2007). El agua se comporta como un disolvente de compuestos orgánicos e inorgánicos, por lo que se pueden encontrar diferentes tipos de sustancias que modifican sus propiedades (Aznar-Jiménez, 2000). La medición de parámetros como el pH, la temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, entre otros, es una de las formas más sencillas de identificar sus variaciones composicionales, tanto en escalas espaciales como temporales, resultantes de cambios naturales como la litología, el relieve, la vegetación y el clima de la región. Asimismo, la medición de los parámetros físicos y químicos brinda recursos que

permiten hacer evaluaciones de los procesos químicos, biológicos y geoquímicos en los diferentes ecosistemas (Morell-Bayard *et al.*, 2015).

En la actualidad la calidad del agua superficial o subterránea, depende tanto de factores naturales como de origen antrópicos, los valores de los parámetros físicos y químicos varían de un ecosistema a otro, encontrando los más contaminados en aquellos lugares cerca de asentamientos humanos, ya que son más susceptibles a la modificación de su paisaje y de sus sistemas naturales de abastecimiento de agua, afectando su capacidad de resiliencia cuando existe una perturbación (Faulkner, 2004). Por ejemplo, se ha reportado que al existir pérdidas de cubierta vegetal, se altera la radiación que incide en la superficie del agua por lo que a lo largo del día la temperatura del agua cambia drásticamente, esto conlleva a que las comunidades de microorganismos que no están adaptadas a estas nuevas condiciones se tengan que desplazar. También cuando existe una fragmentación de hábitats se crean gradientes “artificiales” en el agua, porque en aquellos lugares donde se vierten residuos por lo general la concentración de oxígeno disuelto es menor por la demanda biológica de oxígeno para la degradación de la materia orgánica; por lo que existen zonas con mayor concentración de O<sub>2</sub> que en otros. Otro problema que se crea se debe a los residuos que terminan en el agua y que pueden tener una alta concentración de compuestos como metales pesados, nitrógeno y fósforo (Salgado-Rojas y Triana-Martin, 2019). Es importante medir la calidad del agua en función de la variación de los parámetros físicos y químicos ya que es común que un gran conglomerado de habitantes de un lugar específico dependan de un solo cuerpo de agua, es decir, el territorio de una urbe que sea sostenible y la calidad de vida de las personas a su alrededor es directamente proporcional al estado de salud del cuerpo de agua donde obtengan sus recursos (Castiblanco, 2015). Si esto no se cumple, existen riesgos en el aumento de enfermedades y muertes por la presencia de contaminantes tales como plomo, arsénico, fluoruro, nitratos, etc. aunado a esto, también existe un riesgo por agentes microbianos tóxicos para la salud humana (Frías y Montilla, 2016).

## **2.2. Importancia de los parámetros físicos y químicos en cuerpos de agua dulce**

Los cuerpos de agua de tipo epicontinentales (ecosistemas someros continentales o que se encuentran situados sobre la llamada plataforma continental como los lagos y lagunas) son muy importantes como fuente de recursos naturales, es necesario conocer sus características para que puedan ser aprovechados de una manera sustentable, debido a su importancia tanto para la salud pública, economía y sustento de muchas familias. Entre los usos que se les pueden dar a estos cuerpos de agua están: uso de agua para consumo humano, agricultura, pesca y recreación. Bajo esta premisa, el monitoreo continuo es fundamental para aprender más sobre su funcionamiento complejo y dinámico y para tomar mejores decisiones sobre su aprovechamiento en el mediano y largo plazo (Díaz-Vargas *et al.*, 2005).

Una alteración físico y química en un cuerpo de agua, suele provocar una alteración en la composición de especies, tal es el caso de las bacterias (que sirven como indicadores de calidad microbiológica); por ejemplo, se ha visto que al aumentar la temperatura de un cuerpo de agua se promueve también las tasas de reproducción y de actividades enzimáticas bacterianas, cuando se alteran los valores de pH, se puede promover la proliferación de microorganismos dañinos para ciertos tipos de peces y macroinvertebrados. Si existe una alta tasa de mortandad de peces, se añade una gran cantidad de materia orgánica y de nutrientes al sistema que favorece la proliferación de microalgas que realizan el proceso fotosintético, pero disminuyen bastante los niveles de oxígeno disuelto en el agua debido a la alta actividad heterotrófica de los consumidores primarios (Hahn-vonHessberg *et al.*, 2009).



### **2.3. Influencia de los parámetros físicos y químicos en la flora, la fauna y las bacterias**

Como los parámetros físicos y químicos determinan en gran medida las tasas de reproducción, crecimiento y supervivencia de prácticamente todos los seres vivos de un ecosistema, la presencia o ausencia de ciertas especies en un cuerpo de agua sirven como instrumento para la determinación del nivel de contaminación que se presenta, a estos organismos se les llaman indicadores biológicos o bioindicadores, tal es el caso de los macroinvertebrados, ya que se conoce que ciertas familias y géneros son más resistentes a perturbaciones por contaminantes orgánicos e inorgánicos, niveles de oxígeno disuelto bajos, baja transparencia y escasez de alimento, entre otros factores (Alonso-Duré, 2013).

Las bacterias implicadas en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno también se ven afectadas por los cambios en los nutrientes del agua, se ha visto que las bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico inhiben la actividad enzimática cuando existe una alta concentración de compuestos de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o amoniaco ( $\text{NH}_3^+$ ) disueltos en la columna de agua, por lo tanto ya no fijan el  $\text{N}_2$  (Atlas y Bartha, 2002).

También cuando se requiere hacer un cultivo de peces o microorganismos ya sea para consumo humano o para fines ornamentales, es importante tener un control estricto de los parámetros físicos y químicos ya que lo que se busca es tener un ambiente similar a la zona natural donde se encuentra el organismo, por ejemplo se ha reportado que la temperatura y la salinidad afectan directamente el metabolismo de los organismos de agua salada, por lo que, si existe un desequilibrio las tasas de mortalidad aumentan considerablemente (Alcalá-Carrillo *et al.*, 2016).

### **2.4. Parámetros físicos y químicos indicadores del nivel trófico**

Para determinar el estado trófico o el nivel de contaminación de un cuerpo de agua, existen diferentes índices como: el Índice de Calidad del Agua (ICA) que permite hacer comparaciones de los diferentes niveles de contaminación haciendo una clasificación sencilla, o también el Índice Universal de Calidad de Agua (UWQI) que pondera un total de 23 parámetros físicos, químicos y microbiológicos, sus usos varían dependiendo del tipo de cuerpo de agua y las características particulares del

ecosistema (Castro *et al.*, 2014; Rangel-Montalvo, 2015). Para ríos y lagos, existen cuatro parámetros que sirven como principales indicadores para determinar su estado trófico: el P y N total, la clorofila *a* y la transparencia (Madrid-Orellana, 2015).

#### **2.4.1. Fósforo total**

El P total en el agua es muy escaso, ya que las entradas naturales suelen ser pocas y la mayoría del P proviene de escorrentías. Este elemento es esencial para los organismos al ser un componente del ADN, ARN y ATP, normalmente se encuentra en forma de  $PO_4^{2-}$  que es la forma en que es asimilado por los organismos. Sin embargo, la existencia de un alto contenido de P en el ambiente indica procesos de contaminación (Solano-Peña, 2005).

#### **2.4.2. Nitrógeno total**

El N es un elemento que forma parte de los aminoácidos que conforman las proteínas y también en la composición del ADN. Sin embargo, aunque es considerado un elemento importante para la salud de los organismos, un exceso de éste en el ecosistema genera pérdidas en la biodiversidad ya que provoca enfermedades que afecta a los organismos más vulnerables a todos los niveles tróficos. A largo plazo el exceso de N puede afectar al ecosistema entero ya que una de las consecuencias es la acidificación del medio (Ochoa-Hueso, 2017).

#### **2.4.3. Clorofila *a***

La clorofila *a* es una medida indirecta de la cantidad de biomasa bacteriana autótrofa y de biomasa algal, este es un pigmento de color verde que se encuentra en los tejidos de los organismos capaces de transformar la energía luminosa de la radiación solar a energía química que se almacena en forma de ATP y NADPH, para la fabricación de hidratos de carbono (Díaz-Medina y Sotomayor-Maguiña, 2013). La concentración de clorofila *a* depende de la concentración del P y N, de la penetración de la luz y de la temperatura del agua, por ejemplo, cuando aumenta la temperatura se promueve la proliferación de bacterias autótrofas y de algas y por lo tanto de biomasa que contiene clorofila *a* (Bonansea *et al.*, 2012).

#### **2.4.4. Transparencia**

El valor de transparencia tiene relación con el nivel de penetración de luz en la columna de agua, éste a su vez se ve afectada por la cantidad de microalgas flotantes y partículas suspendidas. Este factor es un buen indicador para inferir si un cuerpo de agua puede tener niveles óptimos de oxígeno disuelto, temperatura y producción primaria, ya que los niveles de radiación afectan al primer eslabón de las redes tróficas y por consecuencia a los niveles superiores (Flores-Gómez *et al.*, 2018).

#### **2.5. Contaminación en ecosistemas acuáticos urbanos y naturales**

La creciente tendencia a la urbanización provoca la transformación del paisaje natural de los ecosistemas, formando los llamados ecosistemas urbanos. La tendencia que se ha llevado durante siglos es privilegiar el desarrollo antes que la conservación, esto conlleva a que los modelos de desarrollo urbano desde una perspectiva ambiental se enfoquen más en “mitigar” un daño en lugar de “prevenirlo”, aunque en los últimos años esta tendencia ya ha cambiado a un paradigma enfocado a la sustentabilidad, por ejemplo, en las nuevas construcciones de casas o edificios se ha intentado interferir lo menos posible en el equilibrio natural del ambiente evitando secar un cuerpo de agua o talar una menor cantidad de árboles, sin embargo, a pesar de los esfuerzos, la misma tendencia a la urbanización todavía es evidente. En el aspecto urbano, se ha visto que los niveles de contaminantes en el aire, agua y suelo son muy altas, por ejemplo, los cuerpos de agua urbanos se contaminan porque algunos desechos líquidos como detergentes o aceites que no se procesan terminan siendo vertidos en ellos (Maya y Velásquez-Barrero, 2008). En los ecosistemas naturales las actividades que provocan grandes niveles de contaminación son: la tala de árboles, pesca, turismo, incendios forestales, etc. Se ha demostrado que al eliminar la capa natural de vegetación de un terreno, éste se deja desprotegido perdiendo calidad del suelo que serviría para el cultivo de alimentos, por lo que, la gente que depende de esta actividad suele utilizar otros suelos no perturbados en áreas naturales lejos de asentamientos humanos, además el uso de fertilizantes que suelen utilizarse

empeoran la situación, ya que éstos se filtran en los acuíferos y se transportan a otros ambientes o son transportados por escorrentías a los cuerpos de agua cercanos (Zurrita *et al.*, 2015).

## **2.6. Impactos socioeconómicos**

Cuando la calidad de agua es reducida, se compromete la calidad de vida de los habitantes que dependen de este, por ejemplo al existir una alta tasa de mortalidad de peces y crustáceos que muchas veces constituyen los alimentos principales para una gran cantidad de gente, se ocasiona desnutrición y en casos extremos mortalidad, lo que inevitablemente aumenta la necesidad de medicamentos y servicios hospitalarios que en la mayoría de los casos son muy deficientes. También al ingresar una gran cantidad de fertilizantes al cuerpo de agua, algunas especies se ven favorecidas, tal es el caso de las microalgas que forman los llamados florecimientos algales nocivos (FAN), estas microalgas producen compuestos tóxicos, que al ser ingeridos provocan vómitos, calambres, náuseas, dolores de cabeza, convulsiones, fiebre y a largo plazo la muerte. Esto sin duda tiene un efecto negativo a la región ya que se debe de destinar mayores recursos a mitigar las enfermedades en vez de prevenirlas (Terán-Suárez *et al.*, 2006; Mancera-Pineda, *et al.*, 2009).

## **2.7. Proceso de eutrofización**

La eutrofización se define como el proceso de enriquecimiento de un cuerpo de agua por compuestos como N, P, Si y C donde existe más entradas que salidas de nutrientes, tienen efectos negativos como son un cambio de coloración en el agua, mal olor, proliferación de ciertos organismos como algas o lirios y sedimentos de color oscuro (Chapa-Balcorta y Guerrero-Arenas, 2010). El proceso de eutrofización conlleva un deterioro en la calidad del agua ya que generan impactos ecológicos, económicos y sanitarios negativos, generando disminución de la biodiversidad, reducción de la penetración de la luz, mortandad de peces, aumento en la concentración de microorganismos patógenos y vectores de enfermedades (Ledesma *et al.*, 2013). Las aguas al estar enriquecidas provocan un aumento de la cantidad de organismos como plantas y algas, que al morir, aumentan la

concentración de materia orgánica en el ambiente por lo que esta materia debe ser procesada en la mineralización, durante este proceso se requiere una gran cantidad de oxígeno disuelto, provocando un ambiente anóxico incompatible con la vida de la mayoría de los organismos que probablemente vivían y dependían de ese ambiente para sobrevivir por lo que no solo afecta a los productores primarios y a los consumidores (Díaz-Medina y Sotomayor-Maguiña, 2013). El proceso de contaminación de las aguas de origen antrópico por fertilizantes y materia fecal, promueve los procesos de eutrofización (Reyes-Posada, 2011).

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Descripción y análisis de la evolución de los parámetros físicos y químicos del corredor turístico de Canal Nacional y zona lacustre adyacente de Xochimilco durante un período de 9 años.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Ordenar los datos generados en los diferentes muestreos en el período de 2009 al 2019.
- Analizar la evolución de los parámetros físicos y químicos en los diferentes años y sitios muestreados a través de análisis estadísticos multivariados.
- Delimitar las zonas que han sido impactadas por actividades antrópicas en las diferentes zonas estudiadas dentro del sistema.

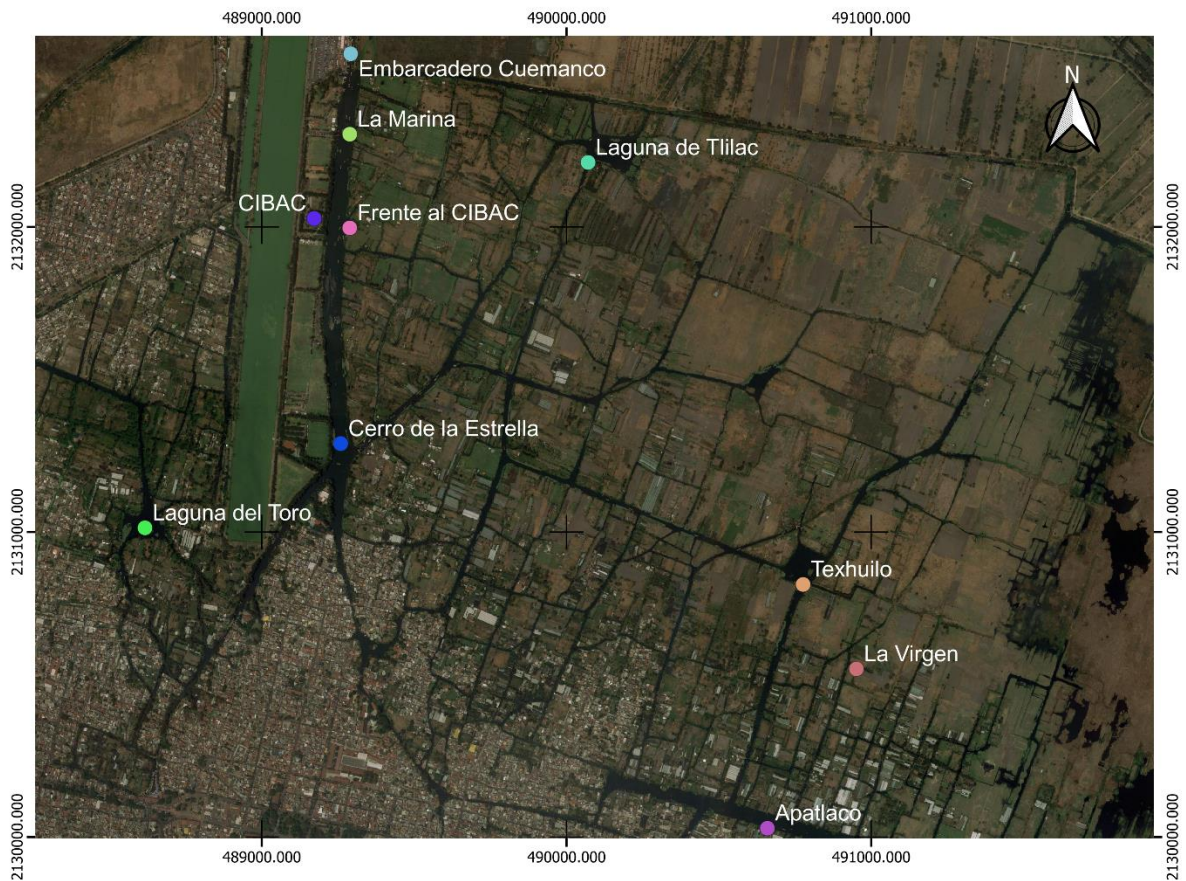
#### **3.3. Hipótesis**

Los sitios con actividad antrópica directa vierten sus aguas residuales directamente a los canales, que al estar interconectados en zonas que no presentan actividad antrópica directa se espera que contribuya a procesos de eutrofización en todos los años muestreados.

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1. Área de estudio

El Lago de Xochimilco se localiza al sur de la Ciudad de México en la Alcaldía Xochimilco, al pie de la Sierra de Chichinautzin a una altura promedio de 2240 msnm, en las coordenadas 19°15'11" y 19°15'19" Latitud Norte y los 98°58" y 99°10" Longitud Oeste. Forma parte de un antiguo remanente del Lago que cubría una gran porción de la Cuenca de México (Xolalpa, 2009; De la Lanza y Hernández, 2019). Se muestrearon 10 sitios, los cuales se ubican en la zona del corredor turístico del Canal Nacional y zona lacustre adyacente dentro del Área Natural Protegida (ANP) "Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco" (Figura 1).



**Figura 1.** Área de estudio y ubicación de las 10 estaciones de muestreo.

Elaboración propia con Qgis 3.20.1-Odense (Qgis.org, 2021).

Los datos de los parámetros físicos y químicos de la base de datos, corresponde a nueve años de muestreo, de la columna de agua (agua de superficie y agua de fondo), de la zona de estudio (Figura 1, Tabla 1), en dos épocas del año (secas y lluvias), cabe señalar que esta actividad se encuentra adscrita a los proyectos de investigación de la Dra. María Jesús Ferrara Guerrero y del Dr. José Roberto Angeles Vázquez del laboratorio de Ecología Microbiana, así como de la M. en C. María Guadalupe Figueroa Torres del Laboratorio de Ficología y Fitofarmacología del DEHA.

**Tabla 1.** Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.

<b>Estación</b>	<b>Coordenadas</b>
Apatlaco	19°15'50''N / 99°05'20''O
Cerro de la Estrella	19°16'31''N / 99°06'08''O
CIBAC	19°16'55''N / 99°06'11''O
Embarcadero Cuemanco	19°17'12''N / 99°06'06''O
Frente al CIBAC	19°16'54''N / 99°06'07'' O
La Marina	19°17'04''N / 99°06'07'' O
La Virgen	19°16'07''N / 99°05'10'' O
Laguna de Tlilac	19°17'01''N / 99°05'40.2'' O
Laguna del Toro	19°16'22''N / 99°06'30'' O
Texhuilo	19°16'16''N / 99°05'20''O

#### **4.2. Ordenamiento de las bases de datos**

Se ordenaron las bases de datos de tal manera que la mayoría de las estaciones y años tuvieran el perfil físico y químico completo (Profundidad, Transparencia, Oxígeno Disuelto, pH, Eh, Salinidad, Conductividad, Temperatura, MES, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, TOC, N y P total) para poder realizar estudios multivariados sin información errónea, con base en la recomendación de Garmendia (2018) con ayuda del programa ofimático Microsoft Office Excel 2013. Los archivos finales de Excel se guardaron en formato “delimitado por comas” con el fin de que se puedan ingresar al programa estadístico correspondiente. En la tabla 2 se señalan los años y estaciones de muestreo estudiadas.

**Tabla 2.** Categorización de cada estación por año.

Estación / Año	jun-09	feb-10	may-11	oct-12	may-13	oct-14	oct-15	oct-18	oct-19
Apatlaco			X	X					
Cerro de la Estrella		X		X	X	X	X		X
CIBAC						X			X
Embarcadero Cuemanco					X	X	X	X	X
Frente al CIBAC					X		X	X	
La Marina					X	X			X
La Virgen			X		X		X	X	X
Laguna de Tlilac		X	X	X	X		X	X	X
Laguna del Toro	X	X		X					
Texhuilo	X		X	X		X			

### 4.3. Análisis estadísticos

Para observar diferencias sobre los cambios en el perfil físico y químico en los diferentes sitios y en los diferentes años en función de la variabilidad física y química y estratos estudiados (agua de superficie y agua de fondo) se realizaron Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Conglomerados (Cluster) utilizando el criterio de Ward con ayuda del software R versión 4.0.5 (R Core Team, 2021), utilizando el complemento FactoMineR versión 1.7 (Lê *et al.*, 2020) dentro del menú R Commander versión 2.7-1 (Fox y Bouchet-Valat, 2020).

### 4.4. Índice de estado trófico (TSI)

Para evaluar el estado trófico en el agua de superficie y fondo en los diferentes sitios muestreados se determinó el Índice de Estado Trófico (TSI), este provee valores que van de 0 a 100 (desde oligotrofia hasta hipereutrofia) y que considera la transparencia, determinada por el disco de Secchi, además de otros parámetros como la Cl<sub>a</sub> y el fósforo total (Aizaki *et al.*, 1981) (Figura 2).

$$IET_{Sec} = 10 * \left( 2,46 + \frac{3,76 - 1,57 * \ln(Ds)}{\ln(2,5)} \right) \quad IET_{PT} = 10 * \left( 2,46 + \frac{6,68 + 1,15 * \ln(PT)}{\ln(2,5)} \right)$$

PT: Fósforo total en mg/L

Ds: Transparencia en metros

**Figura 2.** Fórmulas del índice de estado trófico (TSI) de Carlson modificado por Aizaki (Orquera y Cabrera, 2020).



Los valores de referencia del índice por cada indicador se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3.** Escala de referencia de los valores del TSI, tomando como indicadores la profundidad y el fósforo total (Orquera y Cabrera, 2020).

TSI	Disco de Secchi (m)	Ptotal (mg/L)
0	64	0.00075
10	32	0.0015
20	16	0.003
30	8	0.006
40	4	0.012
50	2	0.024
60	1	0.048
70	0.5	0.096
80	0.25	0.192
90	0.12	0.384
100	0.062	0.768

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Perfil físico y químico de la columna de agua

La temperatura presentó valores de entre 16 y 22 °C la salinidad entre los 0.33 a 1.58 ppm, en el caso de la conductividad el valor mínimo fue de 688  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  y el máximo de 1318.3  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , el pH varió de entre 6.8 a 8.4, el Eh tuvo valores medios electropositivos (entre 76.03 y 290.6 mV), el oxígeno disuelto varió de condiciones subóxicas (3.33 mg/L) a condiciones de sobresaturación (13.26 mg/L), la transparencia osciló entre 12.7 y 45.8 cm. Los valores de temperatura variaron mucho en función de las épocas del año: en el año 2011, perteneciente a la temporada de secas, presentó el valor más alto con 22 °C y el año 2019, perteneciente a la temporada de lluvias, presentó el valor más bajo con 16 °C, estas diferencias son similares a las reportadas por Arcos-Ramos y Vergara-Salgado (2012) quienes reportaron valores promedios de temperatura, en temporada de secas, de entre 19.76 y 21.82 °C, estos valores de temperatura están dentro del rango propuesto por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para aguas tratadas que son vertidas a cuerpos de agua. Estos autores también reportan valores de conductividad de 678 a 802  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  en temporada de secas. Los valores altos de conductividad encontrados en los años pertenecientes a la temporada de lluvias

podieron deberse a los valores bajos de temperatura registrados en esos años, ya que como mencionan Solis-Castro *et al.*, (2017), la solubilidad de los iones inorgánicos y sales presentes en el agua son mayores cuando la temperatura disminuye, además la conductividad también puede variar debido al aumento de iones inorgánicos acarreados en temporada de lluvias por escorrentías (Bojórquez-Castro, 2017). Esto podría también explicar las mayores concentraciones de oxígeno disuelto que se presentaron en esos años, ya que la disolución del oxígeno aumenta al bajar la temperatura (Muñoz *et al.*, 2015), aunque también los valores altos de oxígeno disuelto pueden estar relacionados al paso continuo de lanchas que producen movimientos en la columna de agua y permite que toda la columna de agua se mezcle de manera homogénea y la capa superficial del agua se mezcle con el aire circundante que la oxigena, esto podría explicar que no se hayan encontrado diferencias significativas entre los valores de O<sub>2</sub> en superficie y fondo (Bojórquez-Castro, 2017).

La salinidad también ha ido en aumento como ha sido reportado por Ferrara-Guerrero *et al.* (2014) debido a las escorrentías que llevan las sales provenientes de las zonas agrícolas de los alrededores. De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 los valores de pH están dentro de los límites permisibles de entre los 6.5 a 8.5, que también son valores reportados en cuerpos de agua cerca de asentamientos urbanos (Sánchez *et al.*, 2007). Los valores promedio (SD) de los parámetros físicos y químicos se muestran en la tabla 4.

Los valores de los materiales en suspensión oscilaron de entre los 0.02 mg/L y 229.7 mg/L, el amonio varió de 0.01 a 2.98 mg/L, los nitritos entre 0.01 y 8.16 mg/L y los nitratos de 0.16 mg/L a 2.82 mg/L. En el caso de los ortofosfatos los valores oscilaron de entre los 8.71 mg/L a 13.66 mg/L. El carbono orgánico total presentó valores de entre 15.62 y 76.58 mg/L, el nitrógeno total y el fósforo total tuvieron valores de 0.79 mg/L a 35.25 mg/L y de 5.73 mg/L a 12.92 mg/L respectivamente. De acuerdo con La NOM-127-SSA1-1994 los valores límites permisibles de compuestos de nitrógeno en cuerpos de agua son: NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (10 mg/L), NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (0.05 mg/L) y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (0.5 mg/L). En la zona de estudio los valores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> fueron mucho más bajos debido a que se puede estar inhibiendo el proceso de nitrificación

posiblemente por la presencia de metales pesados; ya que se ha comprobado en otros estudios que las bacterias autótrofas nitrificantes son sensibles a la concentración de metales. Los microorganismos al estar expuestos a un ambiente tóxico llevan a cabo un proceso de bioacumulación de estos metales en sus tejidos (Serrano-Jiménez *et al.*, 2004), igualmente, debido al estado hipereutrofico del agua, los productores primarios podrían utilizar el exceso de nutrientes para su proceso de fotosíntesis. Los valores altos de  $\text{NH}_4^+$  y de  $\text{NO}_2^-$  se deben al continuo vertimiento de aguas residuales contaminadas y/o a una alta tasa de mineralización de la materia orgánica por procesos heterotróficos aerobios y anaerobios. Estas altas concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  ponen en peligro la salud de este ecosistema ya que es un compuesto muy inestable y muy tóxico para el ambiente (De Miguel-Fernández y Vázquez-Taset, 2006). La concentración de fósforo total sobrepasa la concentración límite para aguas contaminadas de acuerdo al índice trófico (0.77 mg/L), esto podría ser también consecuencia de las descargas de aguas residuales que llegan a la zona y que pueden estar cargadas de materia orgánica, así como por la continua resuspensión de sedimento por el constante tráfico de trajineras (Alonso-Duré, 2013). La concentración promedio (SD) de los nutrientes se muestra en la tabla 5.

**Tabla 4.** Promedio y desviación estándar (SD) de los valores de los parámetros físicos y químicos de agua de superficie y fondo durante los nueve años de muestreo.

Año	Profundidad (cm)	Transparencia (cm)	OD (mg/L)	pH	Eh (mV)	Salinidad (ppm)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>2009</b>	77.5	30	11.13	8.01	74.37	0.42	1028.25	19.29
<b>(SD)</b>	45.96	0	2.34	0.71	12.6	0.12	285.61	1.44
<b>2010</b>	108	28.67	7.56	8.39	55.13	0.43	1139.17	16.57
<b>(SD)</b>	62.38	3.40	3.79	0.81	9.99	0.05	218.39	1.73
<b>2011</b>	115	27.5	13.26	8.06	158.79	0.87	819.5	21.98
<b>(SD)</b>	26.46	17.68	8.14	0.87	93.36	0.29	38.16	1.23
<b>2012</b>	100	ND	9.2	8.13	76.03	0.49	982	19.91
<b>(SD)</b>	64.68		4.18	0.57	83.52	0.12	231.79	0.54
<b>2013</b>	110	45.83	ND	7.36	290.55	0.33	688	21.56
<b>(SD)</b>	54.77	12.81		1.28	297.88	0.02	34.14	0.78
<b>2014</b>	ND	ND	7.37	6.79	ND	ND	857.3	19.7
<b>(SD)</b>			1.56	0.14			226.17	2.21
<b>2015</b>	85.83	33.42	8.22	7.72	ND	1.58	ND	17.83
<b>(SD)</b>	59.69	14.84	2.29	0.78		0.67		0.91
<b>2018</b>	56.12	29.62	3.33	7.56	ND	ND	1318.29	18.88
<b>(SD)</b>	30.96	4.5	0.83	0.21			264.30	0.56
<b>2019</b>	77.17	12.67	ND	7.24	121.86	3.67	ND	15.9
<b>(SD)</b>	42.57	13.47		0.37	89.37	1.69		2.03

**Tabla 5.** Promedio y desviación estándar (SD) de los valores de los nutrientes de agua de superficie y fondo durante los nueve años de muestreo.

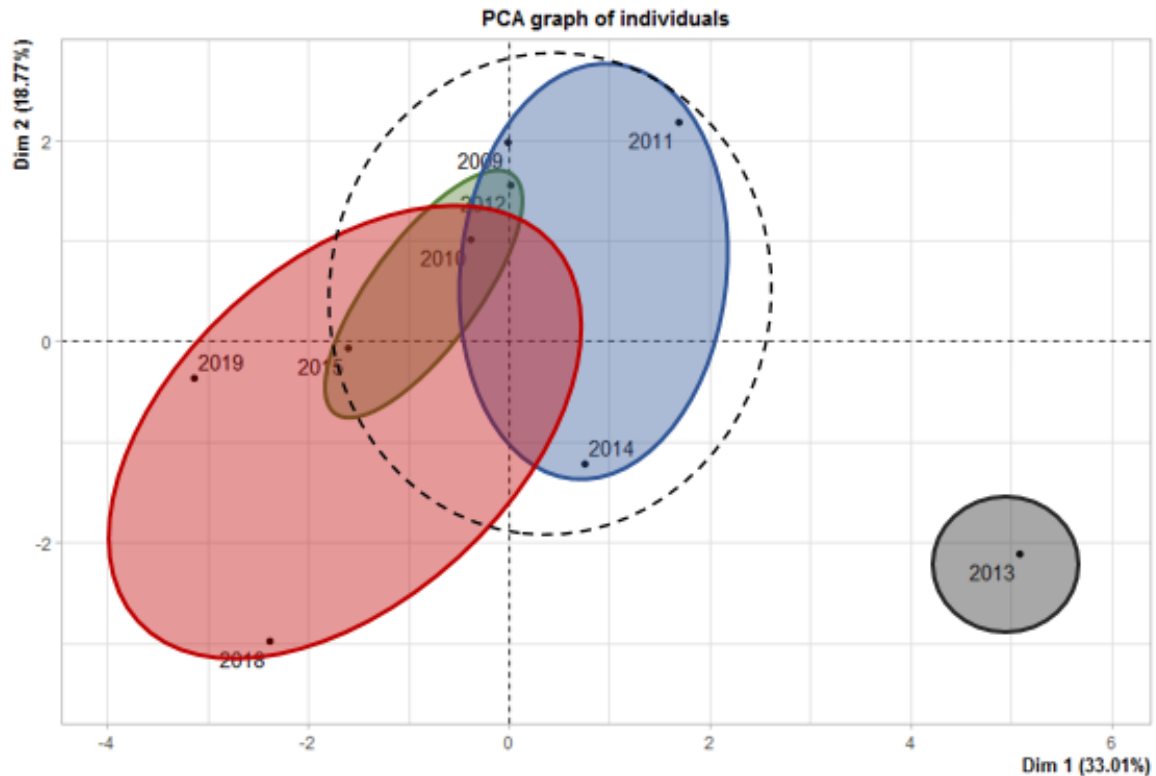
Año	MES (mg/L)	$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	$\text{NO}_2^-$ (mg/L)	$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	$\text{PO}_4^{3-}$ (mg/L)	TOC (mg/L)	Ptotal (mg/L)
<b>2009</b>	0.13	0.03	0.03	0.97	13.66	ND	9.77
<b>(SD)</b>	0.001	0.03	0.003	0.57	0.32		2.3
<b>2010</b>	0.04	0.65	8.16	1.98	9.78	ND	11.63
<b>(SD)</b>	0.03	0.66	8.68	2.09	1.83		0.89
<b>2011</b>	74.72	0.01	0.23	0.75	11.16	ND	8.89
<b>(SD)</b>	46.86	0.004	0.21	0.06	2.09		6.53
<b>2012</b>	229.70	0.31	0.29	0.64	9.54	20.1	9.26
<b>(SD)</b>	224.46	0.29	0.34	0.69	1.97	11.9	3.14
<b>2013</b>	ND	0.51	0.01	2.82	8.04	76.58	12.92
<b>(SD)</b>		0.21	0.007	1.98	1.36	92.65	10.76
<b>2014</b>	0.02	0.01	0.04	0.16	8.82	33.37	10.78
<b>(SD)</b>	0.03	0.005	0.008	0.03	2.1	39.35	1.20
<b>2015</b>	186.95	2.05	ND	ND	ND	15.62	5.73
<b>(SD)</b>	254.92	1.05				5.71	2.13
<b>2018</b>	0.0405	2.98	0.03	0.55	8.71	34.54	7.90
<b>(SD)</b>	0.01	1.69	0.005	0.13	1.35	13.67	3.15
<b>2019</b>	66.54	1.60	4.10	0.93	ND	40.17	7.95
<b>(SD)</b>	51.22	0.3	1.75	0.69		17.6	4.33

## 5.2. Análisis multivariados

### 5.2.1. Distribución temporal

El análisis de componentes principales mostró que el muestreo de mayo 2013 fue diferente a los otros ocho muestreos. Este muestreo correspondió a final de la temporada de secas y presentó los valores más altos de Eh (valor medio de 290.6 mV con SD 297.88), carbono orgánico total (7.58 mg/L con SD 92.65), transparencia (45.83 cm con SD 12.81),  $\text{NO}_3^-$  (2.82 mg/L con SD 1.98) y Ptotal (12.92 mg/L con SD 10.76). Estos valores se podrían deber a que en determinados momentos existen programas de dragado de los canales por las actividades turísticas que se llevan a cabo en la zona; además de que la calidad del agua proveniente de la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella difiere en todos los años con diferentes concentraciones de N y P (Narchi, 2013; Bojórquez-Castro, 2017). Por el contrario los años 2010, 2018 y 2019 mostraron un perfil similar entre ellos, con valores promedios de pH de 7.7 (SD 0.59), temperatura de 17.1 °C con SD 1.56 y  $\text{NH}_4^+$  (1.75 mg/L con SD 1.17), la agrupación de estos años está representado en color rojo en la figura 3. Por último, los años 2009, 2011, 2012, 2014 y 2015 conforman otro grupo porque presentaron un perfil similar en sus valores promedios mayores a diferencia del grupo anterior de  $\text{O}_2$  (9.7 mg/L con SD 1.32), pH (7.8 con SD 0.22), temperatura (19.6 °C con SD 1.02) y Ptotal (8.7 mg/L con SD 1.64), representado por el círculo con línea punteada (Figura 3).

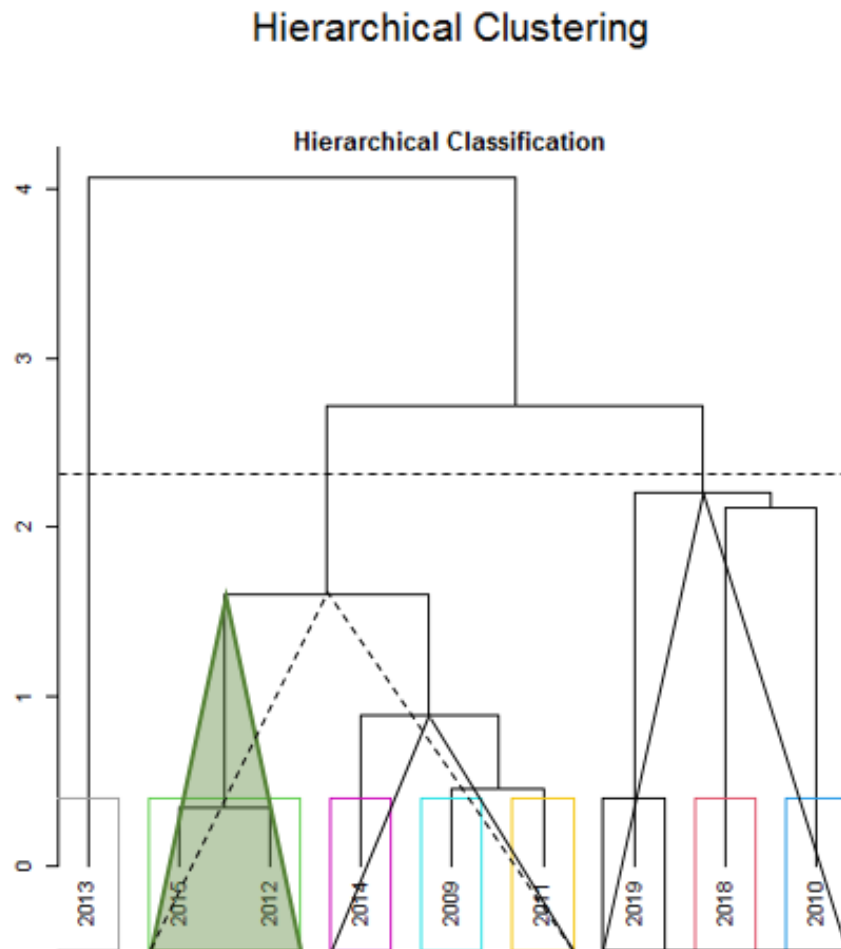
La mayoría de los años estudiados pertenecen a la temporada de lluvias: el año 2009 en el mes de junio y los años 2012, 2014, 2015, 2018 y 2019 en el mes de octubre; solo los años 2011 y 2013 en mayo y el año 2010 en febrero pertenecen a la temporada de secas. A pesar de esta diferenciación, no se observa desigualdad en la agrupación de los años en el análisis por temporadas, debido a que el proceso de contaminación en el sistema es constante (Bojórquez-Castro, 2017). A pesar de que se manifiesten cambios en los diferentes años, estos son mínimos y no se aprecia un aumento o disminución importante en los valores de los compuestos de nitrógeno y fósforo, ni en los valores de  $\text{O}_2$ , temperatura y pH, por lo que se observa que el sistema se mantuvo relativamente homogéneo durante los nueve años.



**Figura 3.** Análisis de Componentes Principales (ACP) que muestra la asociación de los diferentes años y épocas de muestreo en función al perfil físico y químico del agua.

A través del análisis Cluster se ratificaron las asociaciones que se formaron en el análisis PCA en función a sus similitudes entre los diferentes parámetros físicos y químicos. Se observó la formación de dos grandes grupos a una distancia euclidiana de 2.33. El primer grupo reúne a los años 2009, 2011, 2012, 2014 y 2015, este grupo está conformado por dos subgrupos: el primer subgrupo contiene a los años 2012 y 2015 representado en color verde, debido a sus valores promedios de  $O_2$  (8.71 mg/L con SD 0.69), pH (7.93 con SD 0.28) y temperatura (18.87 °C con SD 1.47) y el segundo subgrupo conformado por los años 2009, 2011 y 2014 representado por una línea punteada, se unen debido a sus valores promedios de  $O_2$  (10.58 mg/L con SD 2.98), pH (7.62 con SD 0.72), conductividad (901.68  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  con SD 111.28), temperatura (20.31 °C con SD 1.45),  $\text{PO}_4^{3-}$  (11.21 mg/L con SD 2.42) y fósforo total (9.81 mg/L con SD 0.94) (Figura 4).

El segundo grupo está conformado por los años 2010, 2018 y 2019, y al igual que en el análisis PCA las variables que permitieron su agrupación fueron pH (7.7 con SD 0.59), temperatura (17.1°C con SD 1.56) y  $\text{NH}_4^+$  (1.75 mg/L con SD 1.17). El año 2013 también en el análisis Cluster se agrupa de manera aislada, siendo su perfil físico y químico característico: Eh (290.6 mV con SD 297.88), carbono orgánico total (7.58 mg/L con SD 92.65), transparencia (45.83 cm con SD 12.81),  $\text{NO}_3^-$  (2.82 mg/L con SD 1.98) y Ptotal (12.92 mg/L con SD 10.76) (Figura 4).



**Figura 4.** Análisis de Conglomerados (Cluster) muestra la asociación de los diferentes años y épocas de muestreo de acuerdo a las similitudes de los valores de las variables físicas y químicas que comparten.

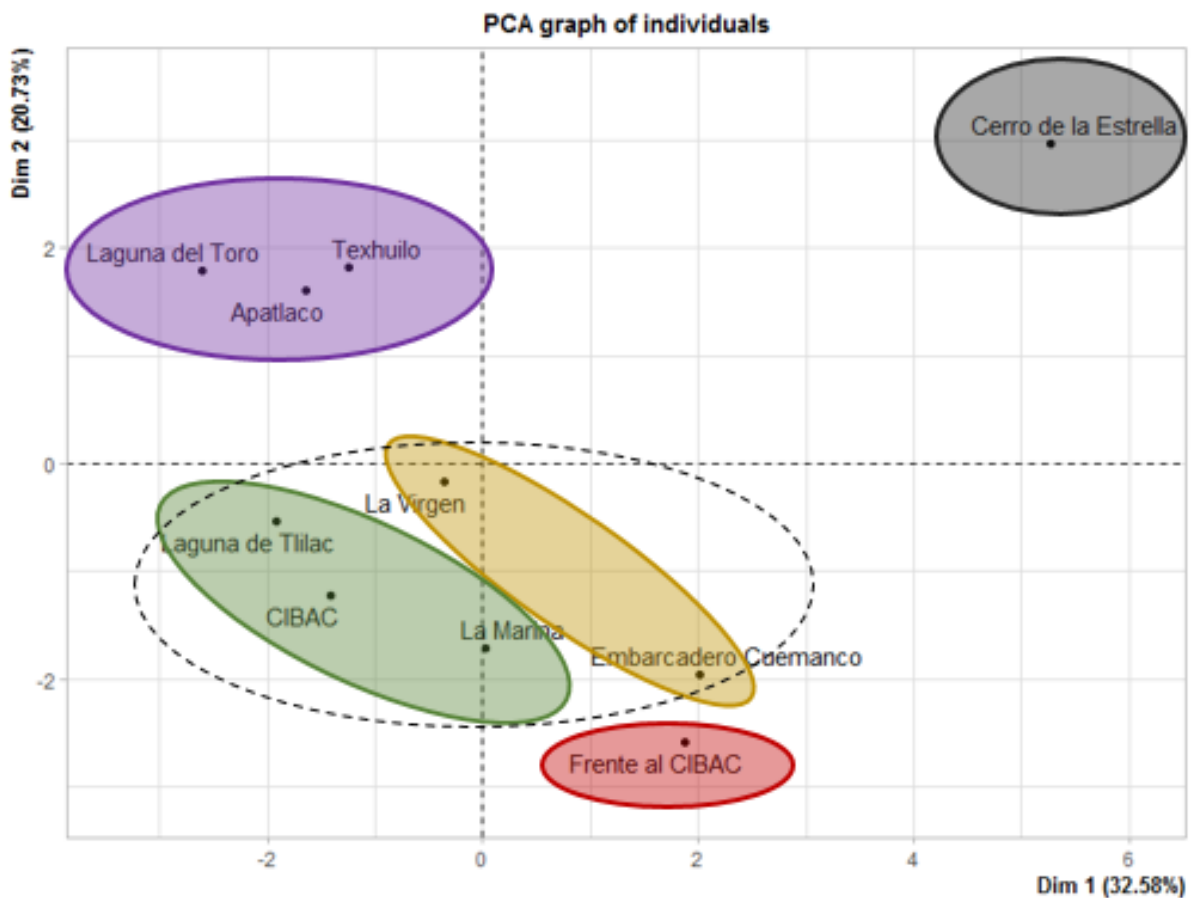
### 5.2.2. Distribución espacial

A partir del análisis de componentes principales basado en el perfil físico y químico del agua (Figura 5), se observó que las estaciones Cerro de la Estrella (en color gris) y Frente al CIBAC (en color rojo) presentaron las mayores diferencias con respecto al resto de los sitios estudiados. Cerro de la Estrella fue el sitio más profundo (196.3 cm con SD 22.41), con la mayor transparencia (51.3 cm con SD 16.53) y con los mayores niveles de  $\text{NO}_2^-$  (4.9 mg/L con SD 7.77),  $\text{NO}_3^-$  (2.96 mg/L con SD 2.56) y TOC (68 mg/L con SD 95.86); y el segundo sitio (Frente al CIBAC) presentó el valor más alto de  $\text{NH}_4^+$  (2.5 mg/L con SD 2.92). El aislamiento de estos sitios de muestreo se corresponde con las zonas donde se encuentran ubicados ya que las altas concentraciones de compuestos de nitrógeno y carbono están relacionados al vertimiento de aguas residuales, provenientes de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella y de las zonas habitadas que colindan con ellas, cargadas de carbono orgánico (Alonso-Duré, 2013). El vertimiento de agua semitratada de la planta de tratamiento para evitar la desecación de los canales, acarrea compuestos tóxicos los cuales son desplazados por las mezclas de agua que se producen por el paso de trajineras y lanchas que remueven el sedimento y hacen que las partículas orgánicas queden resuspendidas en la columna de agua; estas partículas forman microhábitats donde se están llevando a cabo procesos de mineralización por bacterias aerobias que se encuentran adheridas a las superficie de estas partículas (Quiñóñez-Amézquita, 2005).

Los sitios ubicados en Laguna del Toro, Apatlaco y Texhuilo, conforman un grupo separado de los demás, representado en la figura 5 por el color violeta, debido a sus similitudes en valores promedios de transparencia de 33.9 cm con SD 5.68,  $\text{O}_2$  (11.6 mg/L con SD 1.45), pH (8.1 con SD 0.57), salinidad (0.53 ppm con SD 0.04),  $\text{PO}_4^{3-}$  (10.7 mg/L con SD 0.91) y  $\text{P}_{\text{total}}$  (9.4 mg/L con SD 0.89). Por último los sitios La Marina, Laguna de Tlilac, CIBAC, La Virgen y Embarcadero Cuemanco representado por líneas punteadas, conforman otro grupo unidos por los valores de transparencia menor (25.3 cm con SD 2.45), pH neutros (7.6 con SD 0.2), mayor salinidad (1.5 ppm con SD 0.22) y temperatura media de 18.8 °C con SD 0.01 (Figura 5).



Los sitios ubicados sobre el corredor turístico de Canal Nacional que tienen influencia antrópica directa se agrupan junto a aquellos sitios ubicados en áreas de conservación en los canales adyacentes, a excepción de Cerro de la Estrella y Frente al CIBAC; a pesar de que existe esta diferenciación entre zonas, la mayoría de los sitios no presentan diferencias significativas en su perfil físico y químico, ya que aunque existan variaciones, estas son mínimas y el nivel de contaminación en todos los sitios es similar.

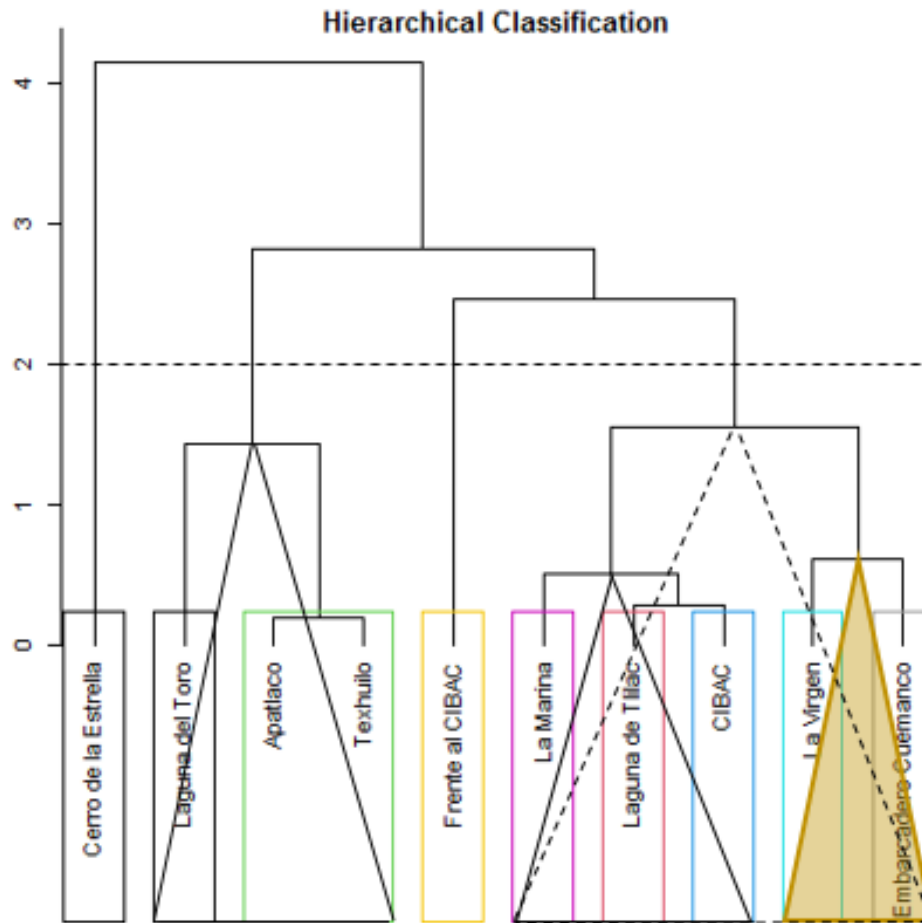


**Figura 5.** El Análisis de Componentes Principales (ACP) muestra la asociación de los sitios de muestreo con base en la similitud de los valores de las variables físicas y químicas.

Por otra parte, el análisis Cluster realizado para observar las agrupaciones por sitios de muestreos, coincidió con el análisis PCA, ya que se formaron dos grandes grupos de asociaciones a una distancia euclidiana de 2. El primer grupo reúne a las estaciones La Marina, Laguna de Tlilac, CIBAC, La Virgen y Embarcadero Cuemanco; este grupo está conformado por dos subgrupos: el primer subgrupo comprende a los sitios La Marina, Laguna de Tlilac y CIBAC representado por una línea continua, debido a sus valores promedio de profundidad (70.21 cm con SD 9.02), transparencia (23.54 cm con SD 2.23), O<sub>2</sub> (9.08 mg/L con SD 0.39), pH (7.71 con SD 0.55) y temperatura (18.82 °C con SD 0.71). Por último, el segundo subgrupo contiene a las estaciones La Virgen y Embarcadero Cuemanco, representado por el color amarillo, aquí los sitios se reúnen debido a la similitud en sus valores promedio de transparencia (27 cm con SD 3.18), O<sub>2</sub> (6.17 mg/L con SD 0.46), pH (7.42 con SD 0.52), salinidad (1.66 ppm con SD 0.17), temperatura (18.8 °C con SD 0.59) y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (1.40 mg/L con SD 0.07) (Figura 6).

El segundo grupo está conformado por las estaciones Laguna del Toro, Apatlaco y Texhuilo coincidiendo su agrupación por los valores reportados en el PCA, los cuales son: transparencia (33.9 cm con SD 5.68), O<sub>2</sub> (11.6 mg/L con SD 1.45), pH (8.1 con SD 0.57), salinidad (0.53 ppm con SD 0.04), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (10.7 mg/L con SD 0.91) y P<sub>total</sub> (9.4 mg/L con SD 0.89) y por último las estaciones Cerro de la Estrella y Frente al CIBAC se representan de forma aislada en el Cluster, coincidiendo también con la misma forma de agruparse que arrojó el análisis PCA, la primera representada por los valores de profundidad (196.3 cm con SD 22.41), transparencia (51.3 cm con SD 16.53), NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (4.9 mg/L con SD 7.77), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2.96 mg/L con SD 2.56) y TOC (68 mg/L con SD 95.86); y la segunda el valor más alto de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (2.5 mg/L con SD 2.92) (Figura 6).

# Hierarchical Clustering



**Figura 6.** Análisis de Conglomerados (Cluster) que reitera la asociación de los diez sitios muestreados de acuerdo con las similitudes en los valores de las variables físicas y químicas.

### 5.3. Índice de Estado Trófico (TSI)

En la zona de estudio, en todos los años se presentaron condiciones con categoría de Hipereutrofia; sin embargo el año 2014 mostró particularmente el valor más alto de TSI con 121.24 y el menor valor se obtuvo en el año 2015 con 97.14. En la tabla 6 se muestran los valores de TSI y las categorías del estado trófico para cada uno de los años de muestreo.

**Tabla 6.** Valores promedio y categorías del índice de estado trófico obtenidos por años de muestreo.

Año	Transparencia (m)	TSI	Ptotal (mg/L)	TSI	Promedios	SD	Categoría
2009	0.3	82.83	9.77	120.01	101.42	26.29	Hipereutrófico
2010	0.2867	83.61	11.63	122.19	102.9	27.28	Hipereutrófico
2011	0.275	84.32	8.89	118.82	101.57	24.39	Hipereutrófico
2012	ND	ND	9.26	119.33	119.33	ND	Hipereutrófico
2013	0.4583	75.57	12.92	123.51	99.54	33.90	Hipereutrófico
2014	ND	ND	10.78	121.24	121.24	ND	Hipereutrófico
2015	0.3342	80.98	5.73	113.31	97.14	22.86	Hipereutrófico
2018	0.2962	83.05	7.9	117.34	100.19	24.25	Hipereutrófico
2019	0.1267	97.6	7.95	117.42	107.51	14.01	Hipereutrófico

TSI: Valores del Índice de Estado Trófico

SD: Desviación Estándar

Igualmente, el TSI muestra un estado Hipereutrófico en todos los sitios estudiados, el valor más alto lo tuvo la estación La Virgen (104.82) y el valor menor la estación Cerro de la Estrella (95.37) (Tabla 7).

Estos valores de TSI se deben a que durante mucho tiempo se han ido acumulando grandes cantidades de compuestos de fósforo, nitrógeno y de carbono, debido a esto ha habido una fuerte producción de biomasa primaria y una insuficiente tasa de mineralización de esta materia orgánica flotante o sumergida. Debido a la poca profundidad esta materia se ha acumulado en el fondo provocando que haya un agotamiento del oxígeno en el fondo y por lo tanto una escasa actividad microbiana heterótrofa aerobia encargada de la descomposición de la materia orgánica acumulada en el fondo (López-Mendoza *et al.*, 2015). En resumen, este estado hipereutrófico de la zona de muestreo ha causado que exista en un principio, una alta proliferación de organismos, principalmente de los productores primarios, como

el lirio acuático, que al morir provoca una disminución en la concentración de oxígeno disuelto por la gran actividad de los organismos heterótrofos herbívoros que lo consumen, causando olores desagradables, cambio en la coloración del agua, disminución de la transparencia y en la concentración de otros contaminantes, que propician la aparición de enfermedades en las poblaciones cercanas además de la formación de floraciones algales con la consecuente producción de ficotoxinas (Camargo y Alonso, 2007).

**Tabla 7.** Valores promedio y categorías del índice de estado trófico obtenidos por sitios de muestreo.

Sitio	Transparencia (m)	TSI	Ptotal (mg/L)	TSI	Promedios	SD	Categoría
Laguna del Toro	0.2875	83.56	8.37	118.06	100.81	24.4	Hipereutrófico
La Marina	0.2517	85.84	8.38	118.08	101.96	22.8	Hipereutrófico
Cerro de la Estrella	0.5125	73.65	7.74	117.08	95.37	30.71	Hipereutrófico
Laguna de Tlilac	0.2445	86.33	11.2	121.72	104.03	25.02	Hipereutrófico
Texhuilo	0.33	81.2	10.05	120.36	100.79	27.69	Hipereutrófico
Apatlaco	0.4	77.9	9.7	119.92	98.91	29.71	Hipereutrófico
La Virgen	0.2475	86.12	12.92	123.51	104.82	26.44	Hipereutrófico
Embarcadero Cuemanco	0.2925	83.26	8.7	118.55	100.91	24.95	Hipereutrófico
Frente al CIBAC	0.315	81.99	4.95	111.47	96.73	20.84	Hipereutrófico
CIBAC	0.21	88.94	9.91	120.18	104.56	22.09	Hipereutrófico

TSI: Valores del Índice de Estado Trófico

SD: Desviación Estándar

## VI. CONCLUSIONES

- A partir de los análisis estadísticos, se pueden observar diferencias en el perfil físico y químico de los diferentes años muestreados, sin embargo, estas diferencias son mínimas y no es posible resaltar una distinción entre las zonas con impacto antrópico directo y de aquellas zonas de conservación.
- No es significativa la diferencia entre las variables físicas y químicas en los diferentes sitios muestreados, por lo que no se puede distinguir diferencias significativas entre aquellos sitios pertenecientes a la zona de conservación, zona turística y zona de vertimiento de aguas residuales, esto debido a que los canales están interconectados y la mezcla de aguas es permanente, lo que permite un impacto directo de las zonas con influencia antrópica sobre aquellas que no la presentan.
- De acuerdo a los valores obtenidos por el índice de estado trófico (TSI), todos los años y sitios fueron incluidos dentro de la categoría de hipertrofia. El sistema presentó valores de excesos de N, P y materia orgánica, con la consecuente disminución de la transparencia, proliferación de organismos que producen compuestos tóxicos y disminución de la calidad del agua, características de los sistemas hipereutróficos (Fontúrbel-Rada, 2005).
- Aunque el sistema se encuentre hipertrófico, hay que resaltar que se observaron concentraciones promedio de oxígeno de 8.6 mg/L (SD 3.14), indicando que el sistema puede soportar procesos de respiración aerobia y sustentabilidad de las redes tróficas como ha sido señalado por Mora-Orozco *et al.* (2011).
- Con base en lo anterior, se plantea la necesidad de continuar con los monitoreos de las variaciones de los factores físicos y químicos principalmente en los sitios con actividad antropogénica, ya que son las zonas que contribuyen a la eutrofización de todo el sistema y en las zonas de preservación para ver su comportamiento a lo largo del tiempo y detectar una aumento o mejora de la degradación del sistema. Esto puede

ayudar a establecer mejores prácticas de manejo y a preservar y mantener la calidad y dinámica del acuífero, lo que influiría en la conservación del equilibrio ecológico como ha sido sugerido por Mendoza (2018).

## VII. REFERENCIAS

- Aizaki, M.O., Otsuki, M., Fukushima, M., Hosomi, M. & Muraoka, K. (1981). Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 21, 675-681.
- Alcalá-Carillo, M., Castillo-Vargasmachuca, S.G. & Ponce-Palafox, J.T. (2016). Efectos de la temperatura y salinidad sobre el crecimiento y supervivencia de juveniles de pargo *Lutjanus guttatus*. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(1), 159-164. Recuperado de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-560X2016000100017](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-560X2016000100017)
- Alonso-Duré, J.A. (2013). *Evaluación de calidad de las aguas de arroyo Aguapey (Paraguay) mediante el empleo de macro invertebrados como bioindicadores*. (Tesis de Maestría en Gestión Ambiental, Universidad Nacional de Itapúa, Paraguay). Recuperado de <https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/TES-BN-025.pdf>
- Arcos-Ramos, R. & Vergara-Salgado, S. (2012). Evaluación del Área Natural Protegida (Lago de Xochimilco) y potenciales propuestas de restauración ecológica. Antología de Estudios Territoriales. Fomento de los Estudios Territoriales en Iberoamérica. Recuperado de <http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/3890/1/Evaluaci%C3%B3n%20del%20C3%A1rea%20natural%20protegida%20%28Lago%20de%20Xochimilco%29.pdf>
- Astudillo, D.V., López, F.V., & Rodas, M.D. (2010). *Valoración Socioeconómica de Humedales Altoandinos*. Recuperado de <https://www.flacsoandes.edu.ec/>
- Atlas, R.M. & Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y Microbiología ambiental*. Pearson. Madrid. España.
- Aznar-Jiménez, A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Gestión Ambiental*, 2(23), 12-19.



Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/otros-recursos-1/OR-F-001.pdf>

- Barbier, E.B., Acreman, M., & Knowler, D. (1997). Valoración económica de los humedales. Guía para decisores y planificadores. Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland. [https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib\\_valuation\\_s.pdf](https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib_valuation_s.pdf)
- Bojórquez-Castro, L. (2017). Xochimilco: Características, cambios y contaminación. En D.P. Orea-Coria, E. Jarillo-Soto, E. Sánchez-Mendoza, et al. (Eds.), *Contaminación química y biológica en la zona lacustre de Xochimilco*. (pp. 23-70). México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Bonansea, M., Ledesma, C., Rodríguez, C. & Sánchez-Delgado, A.R. (2012). Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B. *Ambiente & Agua*, 7(3). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.847>
- Camargo, J.A. & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas*, 16(2), 98-110.
- Castiblanco, L.C. (2015). La importancia de los humedales en las ciudades sostenibles. *XX Congreso Internacional del CLAD sobre la Reforma del Estado y de la Administración Pública, Lima, Perú*, 10-13.
- Castillo, T.R. (2016). *Control Físicoquímico del Sistema de Tratamiento de Agua Potable en el Distrito de Sucre* (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú). Recuperado de <http://repositorio.unc.edu.pe>
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J. & Díaz, D. (2014). Indicadores de la Calidad de Agua: Evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, 10 (17), 111-124. <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- Chapa-Balcorta, C. & Guerrero-Arenas, R. (2010). Eutrofización: abundancia que mata. *¿Cómo ves?*, 22-25. Recuperado de

[https://www.researchgate.net/publication/236649916 Eutrofizacion Abundancia que mata](https://www.researchgate.net/publication/236649916_Eutrofizacion_Abundancia_que_mata)

- De la Lanza, G., & Hernández, S. (2019). Variación de la calidad del agua de La Ciénega de Tláhuac, México. *Ciencias Biológicas, del Mar y Limnología*, 26(2). <https://doi.org/10.30878/ces.v26n3a4>
- De Miguel-Fernández, C., & Vásquez-Taset, Y.M. (2006). Origen de los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, 22(3), 1-9. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223517652002.pdf>
- Díaz-Medina, A.C. & Sotomayor-Maguiña, L.B. (2013). *Evaluación de la eutrofización de la Laguna Conococha – Ancash a agosto de 2012*. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú). Recuperado de [https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/p\\_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis\\_Diaz\\_y\\_Sotomayor\\_2013.pdf](https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis_Diaz_y_Sotomayor_2013.pdf)
- Díaz-Vargas, M., Elizalde-Arriaga, E.E., Quiroz-Castelán, H., García-Rodríguez, J. & Molina-Estudillo, I. (2005). Caracterización de algunos parámetros físico-químicos del agua y sedimento de Lago Zempoala, Morelos, México. *Acta Universitaria*, 15(2), 57-65. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/416/41615206.pdf>
- Faulkner, S. (2004). Urbanization impacts on the structure and function of forested wetlands. *Urban Ecosystem*, 7, 89–106.
- Ferrara-Guerrero, M.J., Hernández-Hernández, M., Angeles-Vázquez, J.R., Ponce-Mendoza, A., Figueroa-Torres, M.G. & Vargas-Solis, C. (2014). La nitrificación microbiana como indicadora de la calidad del agua en los canales de la zona chinampera de Xochimilco (México). *Revista Digital E-Bios*, 35-44.
- Figueroa-Torres M.G., Linares-Jauregui, F., Ferrara-Guerrero M.J. & Castro-Mejía, J. (2014). *Manejo Integral de la Cuenca de Xochimilco y sus afluentes*. Recuperado de

[https://yoamoxochimilco.files.wordpress.com/2017/03/manejo\\_integral\\_cuenca\\_xochimilco.pdf](https://yoamoxochimilco.files.wordpress.com/2017/03/manejo_integral_cuenca_xochimilco.pdf)

- Flores-Gómez, S., Siu-Cesar, J., Tira-Aures, E., Cerna-Becerra, M. & Castro, A. (2018). Parámetros de calidad de agua y estado trófico de humedal artificial costero: caso de laguna “La Mansion” – Lima (Perú). *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 4(1), 31-43. <https://doi.org/10.17162/rictd.v4i1.1070>
- Fontúrbel-Rada, F. (2005). Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del Lago Titikaka (Bolivia). *Ecología Aplicada*, 4(1,2), 135-141. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v4n1-2/a18v4n1-2.pdf>
- Fox, J. & Bouchet-Valat, M. (2020). Rcmdr: R Commander. R package version 2.7-1.
- Frías, T.M. & Montilla, L. (2016). Evaluación de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el sector Puerto de Productores río Itaya, Loreto Perú 2014-2015. *Universidad Científica del Perú*. Recuperado de <http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/114/FR%c3%8dAS-MONTILLA-Evaluaci%c3%b3n-1-Trabajo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Garmendia, M. (2018). *Bases de Datos en Excel, Diseño y Administración*. Ed. Universidad Nacional Agraria. Nicaragua. Recuperado de <https://repositorio.una.edu.ni/3692/1/NC30G233.pdf>
- Gil-Garzón, M. J., Soto, A.M., Usha, J.I. & Gutiérrez, O.D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción más Limpia*, 7(2), 52-73. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Hahn-vonHessberg, C.M., Toro, D.R., Grajales-Quintero, A., Duque-Quintero, G.M. & Serna-Uribe, L. (2009). Determinación de la calidad del agua mediante indicadores biológicos y fisicoquímicos, en la estación piscícola, Universidad de Caldas, Municipio de Palestina, Colombia. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*, 13(2), 89-105. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/bccm/v13n2/v13n2a06.pdf>

- Lê, S., Josse, J. & Husson, F. (2020). FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. [10.18637/jss.v025.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01)
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C.M. & Sánchez-Delgado, A.R. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Ciencia Agronómica*, 44(3), 419-425. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/rca/a/mBw9jQZ43cXVShJPBrvnTQs/?format=pdf&lang=es>
- López-Mendoza, Z., Tavera, R. & Novelo, E. (2015). El fitoplancton de un canal de Xochimilco y la importancia de estudiar ecosistemas acuáticos urbanos. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 18(1), 13-28. Recuperado de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1405888X15000030?token=8B3379E46364B95E3C72FF4264D12EC668E03AFE4B352E2C6DF33E55C7FA53E4DCA6D27E6D5541C1D684A8E11FDE443E&originRegion=u-s-east-1&originCreation=20220214043259>
- Madrid-Orellana, E.C. (2015). *Calidad del agua y estado trófico en el Lago de Guija y sus ríos afluentes y efluente para un programa de monitoreo, en el departamento de Santa Ana, El Salvador*. (Tesis de Maestría en Ciencias del Agua con énfasis en calidad de agua, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua Nicaragua). Recuperado de: <https://repositorio.unan.edu.ni/10958/1/01048.pdf>
- Mancera-Pineda, J. E., Brigitte, G. & Arencibia-Carballo. G. (2009). Floraciones algales nocivas, intoxicación por microalgas e impactos en el desarrollo regional: el caso de San Andrés Isla, caribe colombiano. *Cuadernos del Caribe*, 13: 46-62 p. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ccaribe/article/view/41328/42890>
- Maya, A.A. & Velásquez-Barrero, L.E. (2008). El medio ambiente urbano. *Gestión y Ambiente*, 11(1), 7-19. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169414452001.pdf>

- Mendoza, X.A. (2018). *Las Chinampas del Humedal de Xochimilco: Sistemas de Biorremediación para la Sostenibilidad* (Tesis de Maestría en Administración Integral del Ambiente El Colegio de la Frontera del Norte). Recuperado de <https://www.colef.mx/posgrado>
- Mora-Orozco, C., Flores-Lopez, H.E., Durán-Chávez, A. y Ruiz-Corral, J.A. (2011). Cambio climático y el impacto en la concentración de oxígeno disuelto en el Lago de Chapala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 381-394.
- Morell-Bayard, A., Bergues-Garrido, P.S. & Portuondo-Ferrer, E.R. (2015). Valoración de los parámetros físico-químicos de las aguas del río San Juan en los períodos húmedo y seco de 2014. *Ciencia en su PC*, (1), 1-12. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1813/181338814001.pdf>
- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., Neria, M., & Jiménez, J. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 59-74. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n5/v6n5a5.pdf>.
- Narchi, N.E. (2013). Deterioro ambiental en Xochimilco: Lecciones para el cambio climático global. *Veredas. Revista del Pensamiento Sociológico*, 27, 177-197.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Ochoa-Hueso, R. (2017). El ciclo del nitrógeno y el hombre: De lo esencial a lo excesivo. *Ecosistemas*, 26(1), 1-3. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/540/54050575001.pdf>

- Orquera, E. & Cabrera, M. (2020). Caracterización del estado trófico de la Laguna de Yambo mediante análisis de fósforo. *InfoANALÍTICA*, 8(1), 99-111. <https://doi.org/10.26807/ia.v8i1.119>
- Peña-Pulla, E. (2007). *Calidad de agua. Trabajo de investigación Oxígeno Disuelto (OD)*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>
- QGIS.org. (2021). QGIS Geographic Information System versión 3.20.1-Odense. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Quiñóñez-Amézquita, C.T. (2005). *Chinampas y Chinamperos: Los horticultores de San Juan Tezompa*. (Tesis de Doctorado, Universidad Iberoamericana, México).
- R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rangel-Montalvo, L.E. (2015). *Urbanismo y Humedales. Caso de estudio: el Humedal "La Sabana", desarrollo urbano en la zona noroeste de Chetumal, México*. (Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Veracruzana, México). Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41340/RangelMontalvoLuzElena.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Reyes-Posada, A. (2011). *La eutrofización de los lagos y sus consecuencias*. (Tesis de Licenciatura en Tecnología en Saneamiento Ambiental, Universidad Técnica del Norte, Ecuador). Recuperado de [https://www.academia.edu/1439928/La\\_eutrofizaci%C3%B3n\\_de\\_los\\_lagos\\_y\\_sus\\_consecuencias\\_Ibarra\\_2008](https://www.academia.edu/1439928/La_eutrofizaci%C3%B3n_de_los_lagos_y_sus_consecuencias_Ibarra_2008)
- Salgado-Rojas, N.A. & Triana-Martin, I.C. (2019). *Efectos del proceso de urbanización sobre el espejo de agua y la cobertura vegetal del humedal Jaboque en los últimos 31 años: análisis multitemporal*. (Tesis de Licenciatura en Ingeniero Ambiental, Universidad El Bosque, Colombia). Recuperado de

[https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2604/Salgado\\_Rojas\\_Natalia\\_Alejandra\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2604/Salgado_Rojas_Natalia_Alejandra_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Samboni-Ruiz, N.E., Carvajal-Escobar, Y. & Escobar, J.C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad de agua y contaminación del agua. *Ingeniería e investigación*, 27(3), 172-181. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n3/v27n3a19.pdf>
- Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E., Máquez, R., & Zambrano, L. (2007). *Perspectivas Sobre Conservación de Ecosistemas Acuáticos en México*. Ed. INE-SEMARNAT. México. 293 p. Recuperado de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Perspectivas-sobre-conservaci%C3%B3n-de-ecosistemas-acu%C3%A1ticos-en-M%C3%A9xico.pdf>
- SEMARNAT, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). *Los Humedales en México. Oportunidades para la Sociedad*. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Humedales.pdf>
- Serrano-Jiménez, M., Jordá-Llona, J., Rovira-Gallejones, S., Freixó-Rey, A. & Polo-Cañas, P. (2004). Inhibición del proceso de nitrificación por metales pesados en la EDAR de Granollers. *Tecnología del Agua*, 60-65. Recuperado de [http://www.bibliotecagbs.com/archivos/ta\\_248.pdf](http://www.bibliotecagbs.com/archivos/ta_248.pdf)
- Solano-Peña, J.M. (2005). *Determinación de fósforo total, Nitrógeno y Carbono orgánico en sedimentos del Lago de Tota, Boyacá, Colombia*. (Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad de los Andes, Colombia). Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22351/u263353.pdf?sequence=1>
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L.A., & Mora-Alvarado, D. (2017). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v31n1/0379-3982-tem-31-01-35.pdf>

- Terán-Suárez, J. M., V. Castro-Georgana, Mayor-Nucamendi, H.F. & Brito-López, J.A. (2006). Florecimientos algales en Tabasco. *Salud en Tabasco*, 12(1): 414-422. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/487/48712102.pdf>
- UICN, Unión Mundial para la Naturaleza (1992). *Conservación de Humedales. Un Análisis de Temas de Actualidad y Acciones Necesarias*. Recuperado de <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/1990-011-Es.pdf>
- Xolalpa, F. (2009). *Monitoreo Quincenal de Clorofila a y Parámetros Físicoquímicos en Tres Localidades de los Canales de Xochimilco (El Bordo, La Virgen y El Japón) período 11 de agosto al 3 de noviembre de 2008* (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de <https://rua.ua.es/>
- Zurrita, A.A., Badii, M.H., Guillen, A., Lugo-Serrato, O. & Aguilar-Garnica, J.J. (2015). Factores causantes de degradación ambiental. *International Journal of Good Conscience*, 10(3), 1-9. Recuperado de [http://www.spentamexico.org/v10-n3/A1.10\(3\)1-9.pdf](http://www.spentamexico.org/v10-n3/A1.10(3)1-9.pdf)