



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA

“Distribución espacial del estado trófico de los canales de San Gregorio Atlapulco-Xochimilco, CDMX”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

GERMÁN ALEJANDRO ESCUDERO
GUARNEROS

Director de Tesis: Dra. Claudia Alejandra Ponce
de León Hill

Asesor: M. en C. Ramiro Ríos Gómez



Ciudad de México, marzo 2022



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.

Agradecimientos

A mi querida Universidad y mi segunda casa por haberme brindado un espacio en donde desarrollarme, un aula para capacitarme, una pista para fortalecerme y un teatro para cultivarme, por sus excelentes docentes que aportaron un pedazo de sí para mi formación como profesionista y ser humano.

Agradezco infinitamente a la Dra. Claudia Ponce de León Hill y al M. en C. Manuel Hernández Quiroz en conjunto con la Unidad de Análisis Ambiental por acogerme, cuidarme, enseñarme y en particular por su enorme apoyo académico, profesional y personal que hicieron posible este trabajo en suma con su gran paciencia y dedicación.

Agradezco al M en C. Ramiro Ríos por creer en mi, por todas sus enseñanzas, el apoyo que me brindo desde el momento que nos conocimos y la confianza depositada que converge en este trabajo.

Agradezco de forma especial a mis sinodales: Dr. Blancas Arroyo Guillermo Artemio, M. en C. Cantellano de Rosas Eliseo y al M. en C. Guzmán Santiago José Luis por las aportaciones y observaciones que permitieron llevar a buen término el trabajo aquí presentado.

Extiendo mi agradecimiento a la Dra. Rosa Luz Talavera Sierra y el departamento de Biología Comparada y Ecología y Recursos Naturales por su amabilidad y calidez al permitirme utilizar sus instalaciones y equipos.

Aprovecho este espacio para agradecer eternamente a todos mis compañeros, amigos y familiares que estuvieron conmigo durante esta aventura:

A mi mamá Sandra Guarneros S. por su esfuerzo, amor y cariño incondicional que guío mi camino, por siempre creer en mí, por ser mi amiga y confidenta, por tus consejos, dedicación y sobre todo por ser mi ejemplo en la vida; no alcanzan las palabras para agradecerte por todo má, Te amo 3 millones.

A mi papá Alejandro Escudero H. por confiar en mi y permitirme explorar el mundo, por acompañarme en este viaje y en la vida, por procurarme y verme siempre con tanto orgullo, gracias pá.

A mi abuelita Silvia Hernández S. por todo el apoyo e inspiración, por escucharme y alentarme y ser la abue más cool. A mi abuelito Miguel Ángel Escudero B. por compartir conmigo sus experiencias y todo el cariño que me ha dado.

Con mucho amor y cariño agradezco Mayra Magali Llamas Guarneros por ser un verdadero ejemplo en la vida, una guerrera, una gran amiga, la persona con la que puedo hablar de todo y de nada a la vez, por demostrarme que no existe impedimento para alcanzar las metas porque siempre tenemos en nosotros un gran potencial, enseñándome el verdadero significado de la frase "Pies para qué los quiero, si tengo alas para volar" - Frida Kahlo Calderón (1953).

A la que fue mi mejor amiga, roomie y compañera de tantas aventuras durante este proceso Biól. Aura Pamela Islas (Oso del mal), nunca se olvidarán nuestras hazañas y vivencias juntos, ¡vamos por más!

A mis hermanos Emilio Baruch E. por ser un campeón, un gran amigo y compañero, a Matías A. y Bruno E. por ser la felicidad y alegría en nuestras vidas.

De manera especial quiero agradecer a Larissa Díaz Rayo por haber caminado a mi lado en este sendero por motivarme y apoyarme, por ser mi familia y un pilar en la vida recordando siempre que “El amor sin locura es una simple rutina” - *Up* (2009) ¡vayamos por más!

A mi tía Ma. Del Pilar E. y Andrea por su apoyo y confianza, así como al Biól. Abraham Genaro E. y tío por mostrarme el fascinante universo que es la Biología y al nuevo integrante de la familia: Mauricio nuestro un nuevo rayo de luz.

Un agradecimiento a mi mejor amiga y compañera Itzel Josefina Jiménez Becerril jamás olvidaré los momentos compartidos ni nuestras increíbles aventuras en PROFEPA.

A mis amigos y colegas por todas las historias que compartimos durante este tiempo: Abraham Arroyo, Adrián Armado Barranco V., Alicia, Ana Karen Ruiz, Andrea Yasmín López Chávez, Ángel Juárez, Ángel Rubira, Gabriel A. Martínez, Gabriela Palafox, Grisel Delsúa, Irais Monserrat Buendía, Ivonne Arreaga, José Alfredo Chavarría, Mariana Barajas, Miguel Ángel Toledo, Miguel Palacios Valdez y Moisés Hernández H.

Para Heriberto Morales Hernández por su apoyo, así como su tiempo para revisar y aportar a este trabajo mostrándose como un profesor en este trayecto.

A mis compañeros de trabajo por sus enseñanzas, dedicación, conocimientos y apoyo, Marco Antonio Arvizo, Grisel Ochoa, Octavio, Bernardo Joaquín Gil y con un agradecimiento especial a Francisco Javier Martínez Quiñones por la paciencia y apoyo a lo largo de este proceso que sin él no hubiera sido lo mismo.

A mis amigos y adoptantes de la Unidad de Análisis Ambiental Diana Carolina Francisco J., Eloísa E. Maya, Ismael Arce y Jorge Meza por motivarme, guiarme y ayudarme en este proceso nuevo para mi.

“Part of the journey is the end” Tony Stark
(Robert Downey Jr.) – *Avenger: Endgame* (2019).

Contenido

Resumen	7
1. Introducción	8
2. Marco teórico	9
2.1 Eutrofización	9
2.2 Estado Trófico	11
Clorofila.....	12
Fósforo.....	13
Transparencia	14
2.3 Otros parámetros	15
Amonio	15
2.4 Descripción de la zona de estudio:	16
Hidrografía.....	16
Orografía.....	17
Clima	17
Vegetación	18
2.5 Trabajos previos	20
3. Justificación:	20
4. Objetivos	21
4.1 Objetivo General:	21
4.1.1 Objetivos Particulares:.....	21
5. Hipótesis de trabajo	22
6. Método	22
6.1. Trabajo de campo	22
6.1.1 Muestreo de clorofila “a”	22
6.1.2 Nutrientes inorgánicos	23
6.1.3 Transparencia	23
6.1.4 Parámetros físicos y químicos.....	23
6.2. Trabajo en laboratorio	23
6.2.1 Determinación/concentración de Clorofila “a”	23
6.2.2 Determinación de Amonio (NH ₄ ⁺).....	24
6.2.3 Determinación de Fósforo	25
6.3. Trabajo de Gabinete	25
6.3.1 Determinación del estado trófico	25
6.3.2 Matriz de correlación.....	26
6.3.3 Análisis de conglomerados (Clúster) Dendogramas	27
6.3.4 Distribución espacial.....	27
7. Resultados y discusión	28

7.1	Transparencia	28
7.2	Sólidos disueltos totales (TDS)	29
7.3	Temperatura	31
7.4	Potencial de Hidrógeno (pH)	32
7.5	Oxígeno disuelto (O₂)	32
7.6	Amonio NH₄⁺	33
7.7	Fósforo	35
7.8	Clorofila <i>a</i>	36
7.9	Correlaciones entre los parámetros	37
7.10	Dendogramas	39
7.11	Índice del estado trófico (IET)	41
7.11.1	Clorofila <i>a</i>	42
7.11.2	Transparencia	45
7.11.3	Fósforo	48
8.	Conclusiones	51
	Bibliografía	52

Índice de Figuras

Figura 1: Cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua, causados por el proceso de eutrofización.	10
Figura 2 Estructura de la clorofila <i>a</i>	12
Figura 3 Estratificación de un embalse	14
Figura 4 Reacciones que intervienen en la oxidación de compuestos de nitrógeno inorgánico por bacterias quimiolitotrofas	15
Figura 5 Ubicación de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) que abastecen de aguas tratadas a los canales de Xochimilco.	17
Figura 6 Localización de las estaciones de muestreo en la zona de San Gregorio Atlapulco	19
Figura 7 Sistema de filtrado con bomba de succión manual para colecta de clorofila <i>a</i>	23
Figura 8 Lectura en fluorómetro	24
Figura 9 Valores de transparencia registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019	29
Figura 10 Valores de sólidos disueltos totales registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019	30
Figura 11 Valores de temperatura registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.	31
Figura 12 Valores de pH registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.	32
Figura 13 Valores de oxígeno registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.	33
Figura 14 Valores de amonio registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.	35
Figura 15 Valores de fósforo registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.	36
Figura 16 Valores de clorofila <i>a</i> registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.	37

Figura 17 Dendograma de los parámetros evaluados en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2018.....	40
Figura 18 Dendograma de los parámetros evaluados en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2019.....	41
Figura 19 IET utilizando la clorofila a cuantificada en este estudio en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco.	42
Figura 20 Sobre posición en imagen satelital del índice del Estado Trófico utilizando la clorofila a cuantificada en este estudio en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2018	43
Figura 21 Sobre posición en imagen satelital del índice del Estado Trófico utilizando la clorofila a cuantificada en este estudio en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2019.	44
Figura 22 Índice del Estado Trófico utilizando los resultados de transparencia cuantificada en este estudio en los sitios de muestreo de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco.....	45
Figura 23 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Trófico utilizando la transparencia cuantificada en el agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante 2018.	46
Figura 24 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Trófico utilizando la transparencia cuantificada en el agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante 2019	47
Figura 25 Índice del Estado Trófico utilizando los resultados de fósforo cuantificado en este estudio en los sitios de muestreo de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco.	48
Figura 26 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Trófico utilizando al fósforo cuantificado en agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2018.	49
Figura 27 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Trófico utilizando al fósforo cuantificado en agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2019.	50

Índice de Cuadros

<i>Cuadro I. Agrupación de estaciones de muestreo por paraje.....</i>	19
<i>Cuadro II. Agrupación de estaciones de muestreo por paraje.</i>	20
<i>Cuadro III. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.....</i>	26
<i>Cuadro IV. Fórmulas para estimar el estado trófico aplicando los indicadores de eutrofia</i>	26
<i>Cuadro V. Matriz de correlaciones entre los parámetros marcados con una $p<0.05$ para el año 2018.</i>	38
<i>Cuadro VI. Matriz de correlaciones entre los parámetros marcados con una $p<0.05$ para el año 2019</i>	39

Resumen

El presente trabajo muestra el estado trófico de sitios ecológicamente contrastantes de la zona chinampera de San Gregorio Atlapulco; en específico los parajes Puente de Urrutia, Tecaltitla, La Espejera, Coapatitla y Canal Nacional, durante la temporada de estiaje (mayo-junio) entre los años 2018 y 2019. Asimismo, en estos sitios se tomaron muestras *in-situ* de pH, oxígeno disuelto, temperatura y transparencia, variables que ayudaron a caracterizar las condiciones que presentan estos canales en conjunto con los parámetros utilizados en la determinación del estado trófico de los sitios: la concentración de clorofila *a* y fósforo a media profundidad junto a la transparencia. El dato del estado trófico se obtuvo al utilizar el Índice del Estado Trófico (IET) propuesto por Carlson (1977). El estudio mostró que los parámetros presentaron una variación temporal y espacial entre estos años.

Se encontró que existe un dinamismo en el estado trófico durante ambos años mostrando que las condiciones con mayor grado de eutrófia no se conservaron en un área en específico de los canales de San Gregorio Atlapulco, sino que hubo alternancia entre el sitio de entrada de agua al sistema (Puente de Urrutia) contra los sitios más alejados del mismo.

1. Introducción

Al sur de la Ciudad de México (CDMX) dentro de la Alcaldía de Xochimilco se encuentra el Área Natural Protegida (ANP) “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco” el cual alberga un sistema lacustre diversificado en canales con gran valor histórico, cultural y biológico, reconocido internacionalmente por sus “Chinampas”, los cuales son islotes artificiales de tierra parceladas, construidas con capas de lodo y elementos como ramas, plantas acuáticas y tierra en cuyas orillas es común encontrar ahuejotes (*Salix bonplandiana*) que al fijar sus raíces crean muros de reten que delimitan las chinampas, creando así jardines flotantes (Jurado, 2018).

Este sistema, de manera histórica se ha caracterizado por brindar diversos servicios ecológicos y económicos hacia la CDMX tales como el secuestro de CO₂ (gas de efecto invernadero), recarga de aguas subterráneas (importante para el soporte y abastecimiento de agua), control de inundaciones, ser soporte de biodiversidad entre otros, al mismo tiempo que se ha encargado de abastecer de alimentos y plantas ornamentales a la comunidad (López *et al.*, 2015). Debido a estos hechos, en 1987 las chinampas de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco fueron declaradas “Patrimonio Cultural de la Humanidad” por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), y para el año de 1992 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el decreto donde se reconoció como zona prioritaria de preservación y conservación del equilibrio ecológico, declarándose como Área Natural Protegida (ANP). Además, la Convención Internacional sobre Humedales RAMSAR inscribió en febrero del 2004 a la zona lacustre de Xochimilco en la lista de humedales de Importancia Internacional (Figueroa *et al.*, 2015) y recientemente en el 2017 fue reconocido como Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) lo que demandó asegurar el mantenimiento de sus características naturales de las Chinampas de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco.

Para esta zona lacustre, el agua resulta ser un recurso natural de gran valor e importancia para las comunidades adyacentes, debido a que se utiliza para el riego de las tierras de cultivo, la navegación, el turismo y más importante aún resulta ser un refugio para la fauna. Sin embargo, este recurso ha sido manejado de manera inadecuada (Ortiz y Ruvalcaba, 2005), al mismo tiempo el crecimiento de la urbanización en los últimos años ha creado un desgaste ecológico

por la sobreexplotación del agua de sus pozos para cubrir la demanda de la ciudad (Meza, 2019), esto ha provocado el desecamiento de los manantiales que alimentaban de manera natural a este complejo sistema lo que generó cambios en el patrón hidrológico del sistema, el descenso en el nivel de aguas del lago y el hundimiento gradual del suelo en el sitio (Valenzuela, 2016), no obstante, a partir de 1971 el gobierno intentó compensar la falta de agua inyectando aguas residuales parcialmente tratadas (Nemer, 2013).

De acuerdo con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) en la actualidad la zona lacustre de Xochimilco cuenta con aportaciones de aguas tratadas provenientes de tres Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) (Cerro de la estrella, San Luis Tlaxialtemalco y San Lorenzo) que aportan 208, 224 m³ diarios a este sistema (Valenzuela, 2016). Sumado a esto desde la década de 1990 algunos partidos políticos fomentaron la ocupación ilegal de tierras y con ello la urbanización se intensificó, priorizando los usos residencial e industrial sobre los usos agrícolas de la tierra, lo cual ocasionó una descarga directa de aguas negras domiciliarias a este sistema, para 2015 se encontraron 1, 374 descargas (603 de aguas negras y 771 de aguas grises) pertenecientes a 917 predios de acuerdo con el censo de descargas de aguas negras y grises en los canales de Xochimilco, realizado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación (SECITI) del Distrito Federal y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Silva, 2017).

Estos aportes de agua se han reconocido como la principal fuente de contaminación acuática en el sitio, siendo el enriquecimiento excesivo de nutrimentos uno de los principales impactos causantes de la eutrofización (López *et al.*, 2010; Horak, 2015).

La contribución del presente trabajo tiene como objetivo reflejar el estado trófico y su distribución en los canales de San Gregorio Atlapulco, que permita diseñar estrategias en la medición del mismo e identificar sitios de riesgo, al mismo tiempo que sirva de apoyo para fundamentar propuestas para el desarrollo sustentable del sitio.

2. Marco teórico

2.1 Eutrofización

La eutrofización es un fenómeno que se ha descrito en la actualidad como el proceso de sobreabastecimiento de los nutrimentos, principalmente nitrógeno y fósforo a los cuerpos de

agua, con el consecuente crecimiento acelerado de fitoplancton y macrófitas (Ledesma *et al.*, 2013). Dicho proceso ocurre cuando un sistema acuático es presionado por fuentes externas a él, con la adicción de más nutrimentos y materia orgánica que alteran las condiciones espacio-temporal del equilibrio propio del sistema. Este es un proceso que ocurre de manera natural, pero en el tiempo moderno la acción del hombre ha acelerado esta situación.

En el marco de la conferencia internacional sobre Eutrofización Marina, celebrada en Italia en 1990, se identificaron los síntomas y manifestaciones de la eutrofización, tales como el incremento en la producción de fitoplancton (el cual causa la reducción de la transparencia en el agua), la producción de gases ofensivos en las aguas del fondo (creando zonas de anoxia) lo que provoca la muerte de la biota acuática, peces, anfibios y moluscos entre otros (Magaña, 2004), estos procesos introducen cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua (Figura 1).

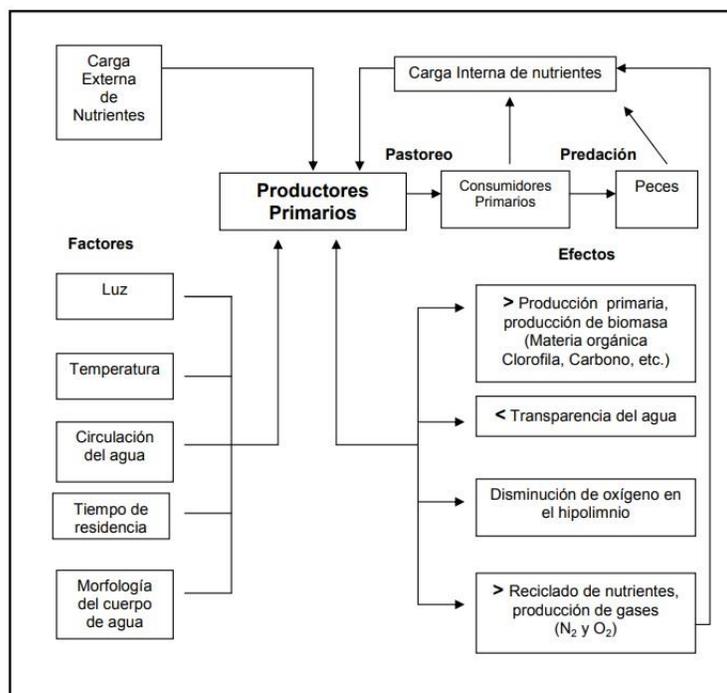


Figura 1: Cambios físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua, causados por el proceso de eutrofización.

Algunas de las causas antropogénicas del proceso de eutrofización tienen que ver con el vertido de aguas residuales ricas en nutrimentos, el uso excesivo de fertilizantes, la deforestación y la erosión en suelos agrícolas. Además una condición que influye en el desarrollo de este

fenómeno en cuerpos de agua es la poca profundidad, que los vuelve más propensos en mayor medida a la eutrofización o hipereutrofización (Moreno *et al.*, 2010).

Por ello la medición de los parámetros físicos y químicos de lagos y ecosistemas afines nos ayuda a establecer bases y criterios para diagnosticar y cuantificar este fenómeno, así como para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas (Chapa, 2010).

2.2 Estado Trófico

El estado trófico se define como la relación entre los nutrientes en un cuerpo de agua y el crecimiento de los microorganismos en el mismo, por ello para cuantificar el grado de eutrofización en un cuerpo de agua se pueden utilizar diversos índices para evaluar el estado trófico (Horak, 2015).

El interés por el proceso de eutrofización se dio en un principio en los países del norte y centro de Europa al igual que en Norteamérica, sobresaliendo entre ellos EEUU, todos buscaron establecer bases y criterios para diagnosticar y cuantificar este fenómeno, al mismo tiempo que se pudiera evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas, proponiendo diversos índices para evaluar el proceso de eutrofización.

De acuerdo de Shapiro *et al.* (1975) un índice apropiado debe:

1. Ser fácilmente accesible mediante el empleo de datos inequívocos.
2. Tener una forma sencilla.
3. Tener un margen de variabilidad suficientemente estrecho para servir de un modo práctico a los fines para los que se establece.
4. Ser objetivo, sin contener ningún juicio de valor.
5. Ser absoluto y no relativo para ser usado en cualquier situación.
6. Ser científicamente válido.
7. Ser reconvertible de manera que, si el índice es un número derivado de ciertos datos, éstos deben ser derivables de dicho valor.
8. Ser comprensible al público.

Dentro de las distintas propuestas para evaluar el proceso de eutrofización, destaca el índice de estado trófico de Carlson (1977) modificado por Aizaki *et al.* (1981) por su simplicidad y objetividad (Pena *et al.*, 2004), ya que este utiliza únicamente tres parámetros: la concentración de clorofila "a" en mg/m³, la transparencia a través del Disco de *Secchi* expresado en metros y el fósforo total en mg/L.

Clorofila

La clorofila *a* (C₅₅H₇₂MgN₄O₅) representa la estructura de mayor importancia y abundancia en la naturaleza (Figura 2) ya que corresponde aproximadamente al 75% de los pigmentos verdes encontrados en la naturaleza. Esta es una molécula compleja perteneciente a la clase de las porfirinas con carácter hidrófobo (Streit *et al.*, 2015).

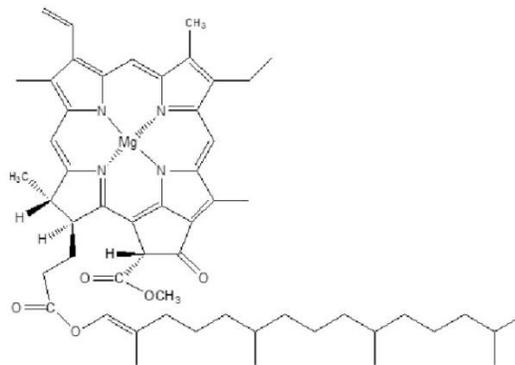


Figura 2 Estructura de la clorofila *a*

Actualmente se conocen cinco tipos de clorofilas, nombradas en orden de su descubrimiento: a, b, c, d y f, ésta última es la más reciente reportada en el año 2010 (Cárcamo, 2017).

Estos pigmentos son moléculas utilizadas para captar energía lumínica e impulsar la fotosíntesis oxigénica por diversos grupos taxonómicos, entre ella las microalgas y cianobacterias que en conjunto conforman el fitoplancton, grupos de organismos fotosintéticos autótrofos presentes en los ambientes acuáticos continentales y marinos (López *et al.*, 2015), los cuales mantienen en su mayoría clorofila *a* como pigmento utilizado en la absorción de energía (Manrique, 2003).

A su vez la clorofila *a* es utilizada como un indicador del grado de contaminación de los ecosistemas acuáticos y un importante índice del estado fisiológico del fitoplancton (Rivera *et al.*, 2005).

Para estimar la clorofila *a*, existen diferentes métodos y modelos matemáticos utilizados para minimizar los errores ocasionados por la presencia de otros pigmentos fotosintéticos y de algunos otros compuestos químicos en el agua. La estimación de este pigmento por medio del método espectrofotométrico ha encontrado una tendencia a obtener coeficientes de correlación altos y desviaciones estándares bajas. Aun así, el método espectrofotométrico,

puede utilizarse en sistemas acuáticos con baja concentración de nutrientes y con concentraciones de clorofila *a* inferiores a 60 mg m^{-3} . Sin embargo, en este estudio se utilizó el método fluorométrico, debido a su alta sensibilidad y precisión en la cuantificación de la clorofila *a*, en relación con los métodos espectrofotométricos debido a que no se ve afectado por la presencia de feopigmentos y clorofila *b* dentro de las muestras (Rivera *et al.*, 2005).

Fósforo

Otro parámetro relacionado al crecimiento del fitoplancton es el fósforo (P), mismo que tiene una gran importancia biológica debido a su función estructural en membranas celulares, fosfolípidos, ácidos nucleicos y principalmente en las moléculas energéticas que utilizan las células para realizar el metabolismo (ATP, NADP y NADPH) (Rojas, 2017). Este elemento se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, el cual se clasifica en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta- y otros polifosfatos) y fosfatos orgánicos (Severiche y González, 2012).

En su forma inorgánica de ortofosfato (PO_4^{-3}) proveniente de la descomposición bacteriana de la materia orgánica, es comúnmente asimilado por los microorganismos fotosintéticos presentes en la columna de agua. En ecosistemas acuáticos, el aumento en las concentraciones de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, promueven el crecimiento desmedido del fitoplancton, modificando la calidad del agua disminuyendo sus usos potenciales, como su calidad estética y organoléptica (Fontúrbel, 2003). Existe una relación entre las concentraciones de estos nutrientes y la profundidad debido a su consumo, siendo la parte superior de los lagos, el sitio donde se consumen con mayor rapidez, debido a la proliferación de microalgas, en esta parte es donde se presenta con frecuencia una menor cantidad, mientras que en aguas más profundas por lo general las concentraciones son mayores debido a la descomposición de la materia orgánica, el pH y la dureza, que también juegan un papel importante (Ferrel *et al.*, 2014) como se muestra en la figura 3.

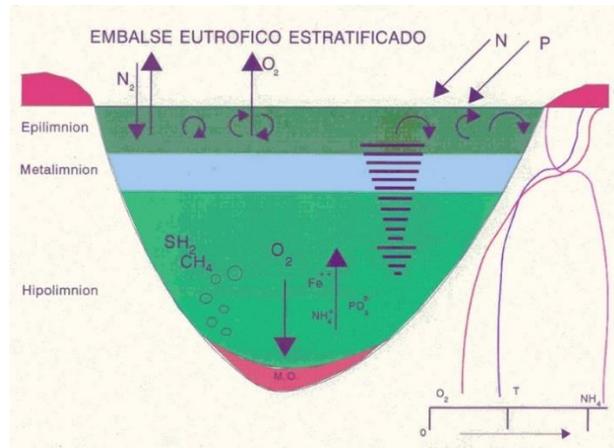


Figura 3 Estratificación de un embalse

Los métodos existentes para cuantificar el fósforo presente en líquidos, utilizan la espectrofotometría, ya que éste resulta ser de fácil acceso en comparación con equipo HPLC.

Dentro de esta gama de métodos espectrofotométricos se encuentra el colorímetro, instrumento de gran utilidad para la cuantificación del fósforo, debido a su fácil utilización e interpretación, por esta razón para el presente trabajo se optó por su utilización.

Transparencia

La transparencia es otro parámetro utilizado en la medición del estado trófico de embalses o lagos, el cual podría tomarse por grandes grupos de personas como sinónimo de calidad del agua. La transparencia está altamente relacionada con la turbidez, la cual se refiere a la pérdida de la claridad del agua debido a la presencia de partículas en suspensión (en la columna de agua), es común que estas partículas pertenezcan a microorganismos y sedimentos, los cuales hacen que se absorba más calor aumentando la temperatura y reduciendo la concentración de oxígeno (Agua Pura, 2020).

A pesar que al día de hoy existen métodos más sofisticados para medir la intensidad de luz (radiómetros, fotómetros, etc.) y su alcance en la columna de agua, el disco de Secchi (Ds) continúa siendo el método más común al medir la transparencia del agua debido a facilidad en su uso y bajo costo (Ordóñez, 2010).

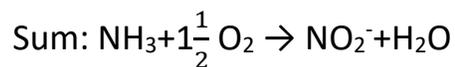
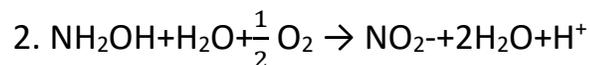
2.3 Otros parámetros

Amonio

Para el fitoplancton, el nitrógeno es el nutriente de mayor demanda después del carbono el cual es asimilado o incorporado como nitrato (NO_3^-) o bien como amonio (NH_4^+) por estos microorganismos.

El proceso que debe transitar el nitrógeno para ser utilizado por el fitoplancton, es posible debido a las bacterias nitrificantes también conocidas como quimiolitotróficas, las cuales a través de la enzima amoníaco monooxigenasa, provocan la oxidación del amoníaco (NH_3) a hidroxilamina (NH_2OH) y a su vez este es oxidado a nitritos (NO_2^-), por medio de la enzima hidroxilamina oxidoreductasa, que se encuentra en el periplasma de bacterias nitrosificantes. Por último a través de otro grupo de bacterias oxidantes, se realiza la transformación de nitrito a nitrato (NO_3^-) por medio de la enzima nitrito oxidoreductasa; todas estas bacterias están presentes tanto en el suelo como en cuerpos de agua con alto contenido de compuestos nitrogenados (Baca *et al.*, 2000), provocando reacciones involucradas en estas transformaciones, como las que se indican en la figura 4.

Bacterias nitrosificantes



Bacterias nitrificantes

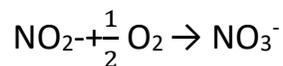


Figura 4 Reacciones que intervienen en la oxidación de compuestos de nitrógeno inorgánico por bacterias quimiolitotrofas

El desarrollo del fitoplancton está influenciado por la disponibilidad de nutrientes, frecuentemente el nitrógeno constituye el factor limitante del crecimiento (Hernández y Labbé, 2014).

2.4 Descripción de la zona de estudio:

El Área Natural Protegida (ANP) “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco” se localiza en la porción centro y norte de la Alcaldía Política de Xochimilco, al sur de la Ciudad de México (CDMX). Las coordenadas geográficas extremas son: 19° 15' 11" y 19° 19' 15" de latitud Norte; 99° 00' 58" y 99° 07' 08" de longitud Oeste, delimitada por un polígono con una superficie de 2 657.0847 ha (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006).

Hidrografía

De manera histórica la Cuenca del Valle de México en los tiempos de la colonia existía un desarrollado cuerpo de agua que incluía los lagos de Zumpango, Xaltocan y San Cristóbal al norte, el lago de Texcoco en el centro y en la zona sur estaba cubierto por el lago de Chalco-Xochimilco (Aldana, 2016). Actualmente el sistema lacustre de Xochimilco se encuentra reducido a canales, apantles, lagunas permanentes y de temporal, donde se estima aproximadamente una longitud de 203 km de canales interconectados con una variación en su profundidad que oscila entre los 60 cm hasta los 6 m en zonas de lagunas.

Como se ha mencionado, estos canales se ven alimentados con aguas residuales provenientes de las PTAR, principalmente la ubicada en el Cerro de la Estrella, con un aporte de aproximado de 1 m³/s, seguida por la planta de San Luis Tlaxialtemalco con un aporte de 0.225 m³/s y por la planta de San Lorenzo Tezonco (Figura 5). De manera natural estos canales también se abastecen por los escurrimientos superficiales provenientes de los arroyos de Santiago, Parres, San Lucas y San Gregorio (Xolalpa, 2009).



Figura 5 Ubicación de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) que abastecen de aguas tratadas a los canales de Xochimilco.

Orografía

El área está ubicada en un terreno plano de origen lacustre que corresponde al antiguo vaso del lago de Xochimilco, que hacia el sur se encuentra rodeada por los cerros de Xochitepec, Cantil y los volcanes Teoca, Zompole y Teutli (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006). Hace aproximadamente 600 000 años, ocurrió una erupción volcánica en la sierra de Chichinautzin, lo que cambio la dirección del escurrimiento de la cuenca del valle de México que drenaba hacia el océano pacífico, haciendo que posteriormente se dirigiera hacia el suroeste o noreste, lo que permitió que algunos sedimentos clásticos y pirlásticos se agruparan en depósitos lacustres, creando así un altiplanicie extendida desde Zumpango hasta Chalco, y de Texcoco al Cerro de Chapultepec, mientras que en el terciario superior se formaron los volcanes de las Sierras de las Cruces y de Rio Frio lo que estableció un desagüe hacia el sur de la cuenca, donde al día de hoy se encuentran los canales de Xochimilco (Guevara *et al.*, 2005).

Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificado por García (1988), en la zona predomina un clima de tipo C(w₂)(w)b(i'), templado subhúmedo con lluvias durante el verano. La temperatura promedio anual varía entre los 12 y 18 °C de acuerdo a la estación meteorológica

ubicada en San Gregorio Atlapulco. Existe entre los meses de noviembre a enero algunos días de heladas. La precipitación media anual corresponde a 620 mm, presentando lluvias entre los meses de junio a septiembre (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006).

Vegetación

Dentro del sitio es posible encontrar los siguientes tipos de vegetación natural: vegetación halófila, vegetación acuática y la vegetación riparia.

El primer tipo de vegetación se caracteriza por presentar pastizales bajos y densos con dominación de gramíneas, donde los suelos son salinos, alcalinos y propensos a inundaciones someras.

La vegetación acuática está representada principalmente por los “tulares” que son comunidades encontradas en los cuerpos de agua someros pero permanentes o semipermanentes, también existe la presencia de especies flotantes como la lentejilla (*Lemna minuscula*), chilacastle (*Wolffia columbiana*) y sobre todo por el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) esta última se ha visto beneficiada por la contaminación del agua.

Por último, la vegetación riparia o terrestre está compuesta de diferentes árboles como el ahuejote (*Salix bonplandiana*) y ahuehuete (*Taxodium mucronatum*) y especies introducidas como el sauce llorón (*Salix babylonica*), araucaria (*Araucaria heterophylla*) jacaranda (*Jacaranda moinsaefolia*), eucalipto (*Eucalyptus spp.*) entre otras.

Esta diversidad de especies se debe a que el sitio se encuentra dentro de la Región Mesoamericana de Montaña y forma parte de la Provincia Florística de las Sierras Meridionales (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2006).

Los criterios para seleccionar los parajes donde se realizó el presente estudio fueron: su cercanía a entradas de agua, como es el caso de Puente de Urrutia, mientras que aquellos que se encontraron próximos a la zona productiva se eligieron por su lejanía del sitio de abastecimiento de agua y su accesibilidad para llevar a cabo los muestreos. Los parajes seleccionados fueron: Tecaltitla, Canal Nacional, Coapatitla y La Espejera como se muestran en la figura 6.

A cada estación de muestreo se le asignó una clave de identificación, quedando englobados dentro de cada paraje como se muestra en el cuadro I.

2.5 Trabajos previos

Existen escasos estudios realizados sobre el estado trófico en la zona del lago de Xochimilco, y menos aún para la región sureste del ANP, la cual se caracteriza por tener una aptitud agrícola más que turística; de igual manera, existen diferentes autores que han registrado diversos parámetros que permiten vislumbrar el gran deterioro ambiental existente en la zona. En el cuadro II se muestra los rangos reportados por diversos autores para ciertos parámetros.

Cuadro II. Antecedentes de algunos parámetros.

Parámetro	Ortiz y Ruvalcaba, 2005	Xolalpa, 2009	Valenzuela, 2016	Aldana, 2016
Temperatura (°c)	21-25	15-20	18-20	18.7-20
Transparencia (m)	0.10-0.6	0.25-0.60	0.20-0.80	s/d
Profundidad (m)	1.1-2.5	s/d	0.50-1.40	2.50-0.50
pH	7-9	7-10	7-9	6.7-7.7
Oxígeno disuelto (mg/l)	3-13	1-5.5	3-6	s/d
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	62-91	700-1100	695-813	680-1150
Clorofila a (mg m^{-3})	10-203	100-20,000	s/d	s/d
Fósforo (mg/l)	0.2-1.1	0.1-38	s/d	s/d
Nitratos (mg/l)	2-4	s/d	s/d	s/d

s/d: Sin dato

3. Justificación:

Existe poca información que exhiba la distribución espacial del estado trófico en la porción sureste del ANP "San Gregorio Atlapulco", ya que diversos autores han concentrado sus investigaciones limnológicas en canales y lagunas pertenecientes a la porción oeste del área quedando por conocer el comportamiento de los nutrientes y su relación con los microorganismos que tiende a darse hacia la zona chinampera. Como menciona Xolalpa (2009), la eutrofización es una condición prevaleciente en los canales situados a la entrada de agua proveniente de las plantas de tratamiento (parte turística) de los lagos de Xochimilco, debido a las grandes cantidades de nutrientes descargados hacia éstos, quedando por estudiar a mayor detalle el desarrollo de las condiciones tróficas en los sitios más alejados como lo es la zona lacustre de San Gregorio Atlapulco.

Por lo anterior, es necesario estudiar el comportamiento que toman los parámetros de manera horizontal en los canales del ANP de San Gregorio Atlapulco, para establecer la referencia de las características limnológicas en los canales, además contar con un registro y antecedente de

los cambios suscitados en el sitio, como es: la identificación de lugares con un alto valor trófico, la velocidad a la que esto está ocurriendo, y que permita tomar decisiones en un futuro para realizar acciones para revertir estas condiciones.

Por lo anterior, la presente investigación se centró en la estimación de la distribución espacial del estado trófico caracterizado por la concentración de clorofila *a*, el fósforo y la transparencia en canales de la zona chinampera al sureste del ANP “San Gregorio Atlapulco”, y la relación existente entre algunos parámetros ambientales principales como: el pH, sólidos disueltos totales (TDS), amonio, temperatura y oxígeno disuelto con aquellos utilizados en la determinación del estado trófico, para tener un breve diagnóstico del sitio.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General:

Estudiar el estado trófico de algunos canales dentro del ANP San Gregorio Atlapulco con diferente impacto ambiental, a través del índice de Carlson (1977) modificado por Aizaki *et al.* (1981), de tal manera que sea posible distinguir las diferencias espaciales en la zona de estudio y realizar un comparativo de los mismos sitios entre los años 2018 y 2019.

4.1.1 Objetivos Particulares:

- Determinar los parámetros físicos y químicos generales (pH, temperatura, sólidos disueltos totales, transparencia y oxígeno disuelto) en las estaciones de muestreo.
- Estudiar la variación de concentración de clorofila “*a*”, fosfatos y amonio en el agua de los canales del Área Natural Protegida “San Gregorio Atlapulco” con diferente impacto ambiental.
- Determinar el estado trófico del agua de los canales de estudio por medio del índice de Carlson.
- Zonificar el área de estudio por el grado de eutrofización con base en los resultados de esta investigación.

5. Hipótesis de trabajo

En los canales del Área Natural Protegida “San Gregorio Atlapulco” se presenta una tendencia de eutrofización durante la época de estiaje por la alta concentración de nutrimentos en esta época del año.

6. Método

El procedimiento para cumplir con los objetivos planteados se dividió en tres fases:

- I. Campo
- II. Laboratorio
- III. Gabinete

6.1. Trabajo de campo.

Se trabajó en la zona chinampera de los canales de San Gregorio Atlapulco en Xochimilco, en los meses de mayo a junio (temporada de estiaje) de los años 2018 y 2019 debido a que algunos nutrimentos tienden a concentrarse (Ortiz y Ruvalcaba, 2005) en esta época, lo que permite ayudar a entender mejor el sistema en su punto más crítico.

6.1.1 Muestreo de clorofila “a”

Se tomaron muestras de agua a media profundidad del canal, donde la influencia de fenómenos superficiales o de fondo son menores, utilizando una botella Van Dorn horizontal de 2L de capacidad. Posteriormente se filtró *in situ* una alícuota de 150 mL con un sistema de filtrado Millipore (Figura 7), utilizando un filtro de fibra de vidrio (GF/F, Whatman) con poro nominal de 0.7 μ m, posteriormente el filtro se guardó debidamente rotulado con el número de muestra, sitio y fecha. Los sobres de aluminio se resguardaron en una hielera (por un periodo máximo de 2 horas) a bajas temperaturas hasta su almacenamiento en refrigeración (-60°C) de acuerdo con el método 445 de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos de América.



Figura 7 Sistema de filtrado con bomba de succión manual para colecta de clorofila *a*

6.1.2 Nutrientes inorgánicos

Para analizar la concentración de amonio y fosforó, se tomó una muestra de agua a media profundidad utilizando la botella Van Dorn y pasando la muestra a través de un filtro Millipore de 0.45 micras, guardándose la muestra en una botella de Nalgene debidamente etiquetada y posteriormente se guardó en una hielera.

6.1.3 Transparencia

Se sumergió el disco de *Secchi* hasta que los colores fueron difusos y se registró el dato de la profundidad.

6.1.4 Parámetros físicos y químicos

Para registrar los datos de pH, sólidos disueltos, oxígeno disuelto y temperatura se utilizó un multiparámetro marca Hanna®, modelo HI9829 con precisión de $\pm 0,15$ °C; $\pm 0,02$ pH; ± 3 % de la lectura de 0,00 a 30,00 ppm (mg/L): $\pm 1,5$ % de la lectura o $\pm 0,10$ ppm (mg/L) (el que sea más alto); de 30,00 ppm (mg/L) a 50,00 ppm (mg/L): ± 3 % de la lectura para el oxígeno.

6.2. Trabajo en laboratorio

El trabajo *ex situ* consistió en procesar la muestra de clorofila “*a*”, así como la determinación de amonio y fosfatos.

6.2.1 Determinación/concentración de Clorofila “*a*”

Para establecer la concentración de clorofila “*a*” se utilizó el método 445.0 modificado de la Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory utilizando un

fluorómetro modelo Turner Desings 10 AU. Las lecturas del fluorómetro (Figura 8) se convirtieron en valores dados en $\mu\text{g L}^{-1}$ para clorofila "a", utilizando una curva de calibración con un estándar certificado de clorofila "a" del alga *Anacystis nidulans* de la marca SIGMA-ALDRICH® C6144.

Para obtener la cantidad de pigmento por unidad de volumen de la muestra, se aplicó la siguiente ecuación indicada en el método 445.0 de la United States Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory (Arar & Collins, 1997).

$$C_{S,u} = \frac{C_{E,u} * \text{volumen del extracto (L)} * DF}{\text{volumen de la muestra (L)}}$$

Donde

$C_{S,u}$ = Concentración de clorofila a en toda la muestra de agua

DF = Factor de dilución

Volumen de la muestra = Volumen filtrado de la muestra en litros

$C_{E,u}$ = La respuesta del fluorómetro a la muestra * el factor de sensibilidad



Figura 8 Lectura en fluorómetro

6.2.2 Determinación de Amonio (NH_4^+)

Para determinar la concentración de amonio presente en las muestras de agua se utilizó el método desarrollado por Solarzano (1969) y modificado por Strickland y Parsons utilizando un espectrofotómetro modelo UV-Visible Spectrophotometer Varian®, este método emplea la llamada reacción de azul de indofenol entre el amoníaco, fenol e hipoclorito en un medio alcalino. El indofenol es un derivado amino intensamente coloreado de fenilquinona-monoamina. El color azul resultante es similar al del indofenol y su intensidad es proporcional

a la concentración de amonio. La reacción colorométrica de indofenol se modificó mediante la introducción del catalizador nitroprusiato que acentúa el color azul a temperatura ambiente.

Las lecturas del espectrofotómetro registradas en absorbancia (abs) se convirtieron en valores dados en mg/L^{-1} para el amonio, utilizando una curva de calibración con un coeficiente de correlación de 0.995 utilizando muestras duplicadas.

6.2.3 Determinación de Fósforo

Para determinar la concentración de fósforo presente en la muestra de agua se utilizó el procedimiento sugerido por el fabricante del fotómetro multiparamétrico de la marca Hanna instruments® modelo HI 83200 (método HI93717), el cual consistió en colocar una alícuota de 10 mL de muestra de agua en el fotómetro y adicionar el reactivo propio de la marca para la determinación de fósforo, pasado el tiempo dado por el método se registró el dato de la concentración presente expresando los valores en mg/L^{-1} . Dentro de las especificaciones para este método se indica un rango de 0.0 a 30 mg/L^{-1} con una precisión de $\pm 1 \text{ mg/L}$, $\pm 4\%$ de lectura. La determinación de fósforo por medio del fotómetro es una adaptación del método Amino ácido de *standard methods for the examination of water and wastewater*, 18ª edición.

6.3. Trabajo de Gabinete

6.3.1 Determinación del estado trófico

Se obtuvo el estado trófico de las estaciones de muestreo utilizando el índice del Estado Trófico (IET o TSI) propuesto por Carlson (1977) y modificado por Aizaki *et al.* (1981) (Cuadro IV). Donde los valores del estado trófico se obtuvieron para cada uno de los parámetros utilizados en las fórmulas, es decir, la transparencia establecida por medio del disco de Secchi (DS) registrando el dato en metros, así como la concentración de clorofila "a" (Clorf a) y fósforo (Pt) la cual se registró en mg/m^3 utilizando las fórmulas que figuran en el cuadro VI.

Cuadro III. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua.

Estado trófico	TSI	D _s (m)	P _t (mg/m ³)	Clorf a (mg/m ³)
Oligotrófico (TSI < 30)	0	64	0.75	0.04
	10	32	1.5	0.12
	20	16	3	0.34
	30	8	6	0.94
Mesotrófico (30 < TSI < 60)	40	4	12	2.6
	50	2	24	6.4
	60	1	48	20
Eutrófico (60 < TSI < 90)	70	0.5	96	56
	80	0.25	192	154
	90	0.12	384	427
Hipereutrófico (90 < TSI < 100)	100	0.06	768	1183

TSI: Índice del estado trófico, D_s: Claridad del agua, P_t: Fósforo total y Clorf a: Clorofila a

Cuadro IV. Fórmulas para estimar el estado trófico aplicando los indicadores de eutrofia

Parámetro de eutrofización	Carlson (1977; 1980)	Aizaki <i>et al.</i> (1981)
Claridad de agua (D _s)(m)	$TSI_{D_s} = 60 - 14.41 \ln(D_s)$	$TSI_{D_s} = 10 * (2.46 + \frac{3.76 - 1.57 \ln(D_s)}{\ln 2.5})$
Fósforo total (P _t)(mg/L)	$TSI_{P_t} = 14.42 \ln(P_t) + 4.15$	$TSI_{P_t} = 10 * (2.46 + \frac{6.68 - 1.15 \ln(P_t)}{\ln 2.5})$
Clorofila a (Clorf a)(mg /m ³)	$TSI_{Clorf a} = 9.81 \ln(Clorf a) + 30.6$	$TSI_{Clorf a} = 10 * (2.46 + \frac{\ln(Clorf a)}{\ln 2.5})$

Para poder comparar los resultados obtenidos de los años 2018 y 2019, los datos se presentaron por medio de gráficas de barras con sus límites marcados para cada uno de los estados tróficos (hipereutrófico, eutrófico, mesotrófico y oligotrófico).

6.3.2 Matriz de correlación

Con el uso del programa Statistica para Windows Ver. 10.0 (StatSoft Inc., USA), se elaboró una matriz de correlación entre los parámetros medidos (clorofila “a”, fósforo, amonio, oxígeno, transparencia, sólidos disueltos totales, temperatura y pH), lo que permitió un análisis sobre las relaciones existentes entre éstos parámetros.

Para la matriz de correlación fue necesario ordenar los datos obtenidos de cada parámetro en cada año evaluado en cuadros de Excel y, posteriormente, realizar la normalización de los mismos que consistió en la transformación de la escala de una variable con el objeto de poder hacer comparaciones respecto a conjuntos de elementos sin que las escalas de las mediciones afecten el análisis estadístico. Dicho de otra manera, la normalización nos permite tener proporciones adimensionales (Rodó, 2019). Existen diversos tipos de normalización de datos,

utilizando para este caso la normalización de puntuación tipificada o estándar debido a que esta nos permite normalizar los errores cuando se puede calcular los parámetros muestrales utilizando la siguiente fórmula para cada uno de los parámetros utilizados:

$$\frac{X - \mu}{\sigma}$$

Donde:

X = Valor registrado

μ = Media aritmética o promedio

σ = Desviación estándar

Una vez obtenido el nuevo cuadro con los datos normalizados para cada uno de los parámetros medidos, se procedió a ingresarlos en el programa de análisis estadístico Statistica para Windows Ver. 10.0 (StatSoft Inc., USA).

6.3.3 Análisis de conglomerados (Clúster) Dendogramas

El Análisis clúster es una técnica estadística multivariante que busca agrupar elementos tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos (De la Fuente, 2011).

Dentro de estos análisis existen dos grandes tipos, los jerárquicos y los no jerárquicos. Nos enfocamos en los jerárquicos ya que conforman estructuras arborescentes al mismo tiempo que nos permite producir casos disjuntos o solapados, de manera que, clústers de niveles más bajos van siendo englobados en otros clústers de niveles superiores representando de mejor manera las relaciones existentes entre los parámetros analizados.

Para este caso, utilizaremos el dendograma como método gráfico ya que resume el proceso de agrupación de un análisis de clústers. Utilizando el programa Statistica para Windows Ver. 10.0 (StatSoft Inc., USA) se agruparon los diferentes parámetros evaluados.

6.3.4 Distribución espacial

Para la distribución espacial del estado trófico se utilizaron los datos obtenidos en la determinación del estado trófico por año (2018 y 2019) para cada parámetro utilizado, teniendo una muestra por cada sitio y sobreponiendo esta información sobre una imagen satelital utilizando el programa Esri® ArcMap™ 10.1.

7. Resultados y discusión

7.1 Transparencia

En los canales evaluados se encontró un fenómeno de oscilación entre las transparencias registradas que afectó de manera muy similar los años 2018 y 2019, teniendo como valor mínimo para el primer año -0.30 m en el paraje perteneciente a Coapatitla en las estaciones 9A y 9B en contraste con el dato máximo de -0.80 m en La Espejera, mientras que para el año sucesor se muestra nuevamente una transparencia mínima de -0.30 m en la entrada de agua al sistema en los sitios 20A y B como se observa en la figura 9.

La transparencia es un parámetro fluctuante que es afectado por diversas causas como la estacionalidad, la posición del sol, el tiempo, la profundidad del cuerpo de agua y hasta el observador; González *et al.*, (2006) menciona que el ascenso de aguas subsuperficiales modifican el ambiente generando turbulencia, cambiando la estructura vertical del plancton al aportar mayor cantidad de nutrientes en la zona eufótica, lo cual podría explicar las variaciones que se tienen para estos canales ya que la translocación de aguas se debe a los cambios en la temperatura, la cual es dada principalmente por la exposición a la radiación solar y que en los canales no es completamente homogéneo debido las diferencias en profundidad, al ancho y a la vegetación circundante propia de cada caso.

Carlson (1977) explica que, al utilizar sus fórmulas para determinar el estado trófico por medio de la transparencia, existe una relación dada entre la profundidad y el incremento del estado trófico siendo que a menor profundidad de transparencia el estado trófico es mayor y viceversa.

Para establecer los usos que se le puedan dar a un canal, el monitoreo y gestión de la calidad del agua son de gran importancia y entre los factores principales que afectan directamente a la calidad son: las concentraciones de nutrimentos y el desarrollo de microorganismos, siendo estos últimos quienes marcan el estado trófico del ambiente, por lo tanto, se considera que sitios con bajas densidades de fitoplancton y zooplancton tienen una “buena calidad del agua” para el consumo humano. Sin embargo, Echaniz y Vignatti (2009) mencionan que una baja transparencia corresponde a concentraciones altas de fósforo y clorofila *a*, aunque no en todos

los casos sucede de esta manera debido a los sólidos suspendidos y en especial aquellos de origen orgánico puesto que juegan un papel importante en la transparencia del agua.

De acuerdo con las observaciones en campo y con los datos obtenidos de la profundidad en los canales y su transparencia, es muy probable que la turbidez se debiera en mayor medida a la presencia de sólidos en suspensión que a una biomasa por fitoplancton. Para poder aceptar esta conjetura se deben realizar más estudios donde se aplique el método adecuado que permita determinar la cantidad de sólidos suspendidos.

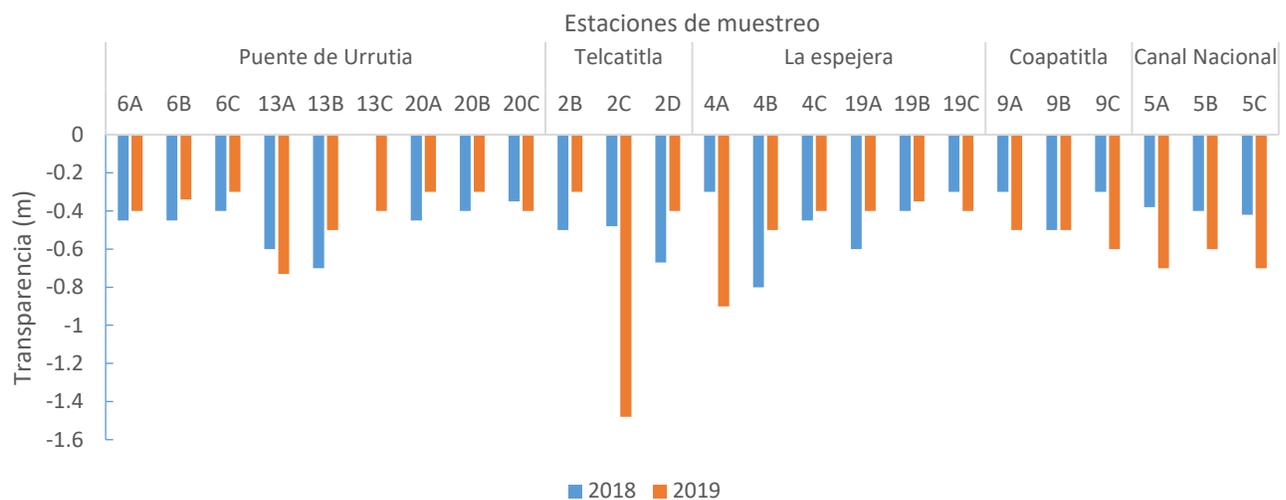


Figura 9 Valores de transparencia registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019

7.2 Sólidos disueltos totales (TDS)

Los sólidos disueltos totales pueden ser medidos a través de la conductividad en el agua, lo cual se puede definir como la unidad de resistencia de una solución a la corriente eléctrica utilizando de manera común el Siemens/cm (S/cm) como unidad de medición, pero en soluciones acuosas la conductividad se vuelve directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos utilizando como unidad las partes por millón (ppm). Como se expresó en la determinación de parámetros físico-químicos del presente trabajo se utilizó un multiparámetro marca Hanna® el cual de forma automática convierte la conductividad eléctrica en ppm, facilitando así la lectura directa sobre la concentración de sólidos disueltos (Hannainst, <https://www.hannainst.es/blog/79/conductividad-y-solidos-disueltos>); siendo está

conductividad determinada por el movimiento iónico proveniente de sales disueltas (Ortiz y Ruvalcaba, 2005).

De los resultados obtenidos, para el paraje Puente de Urrutia se aprecia que no existen cambios demasiados marcados entre los años analizados en la cantidad de sólidos disueltos (Figura 10), las diferencias ocurren de manera resaltada en el sitio del paraje La Espejera donde el valor más alto y más bajo muy cercanos entre sí, esto probablemente debido a que el día de muestreo los Chinamperos ocuparon alguna bomba de agua en el canal para regar los cultivos de las chinampas, ocasionando una turbulencia y una mezcla entre las sales asentadas en el fondo con aquellas suspendidas en la columna de agua.

Se encontró para el año 2018 un valor mínimo de 240 ppm y el máximo en 1411 ppm, mientras que en el 2019 los valores se mantuvieron de manera muy similar, registrándose 460 ppm como mínimo y 1,078 ppm como concentraciones máximas, esto concuerda con otros estudios realizados en este sistema acuático como los presentados por Aldana (2016).

Debido a que la toma de muestra se realizó en la temporada de estiraje, es muy probable que los valores obtenidos se encuentren en su situación máxima ya que las lluvias logran descender estos valores debido a su dilución de acuerdo con Xolalpa (2009).

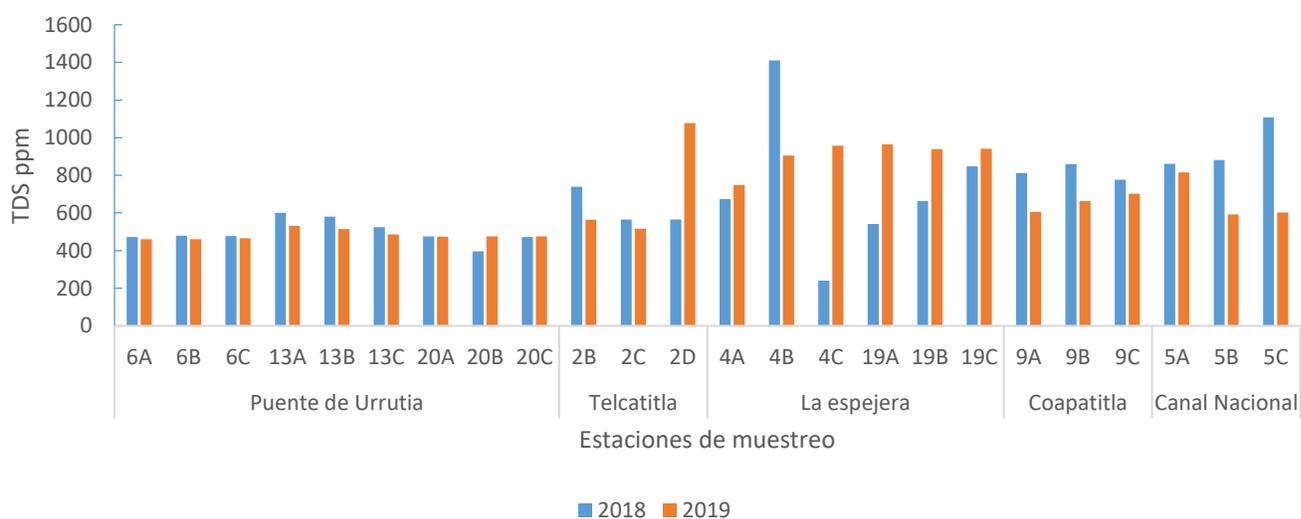


Figura 10 Valores de sólidos disueltos totales registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019

7.3 Temperatura

La importancia de la temperatura como factor, se encuentra en el incremento de la tasa de reconversión de nutrimentos debido a que el incremento de este parámetro favorece que se eleve la productividad del sitio y se propicie el proceso de eutrofización (Ledesma *et al.*, 2013). Para este parámetro se obtuvo un comportamiento característico en cada paraje evaluado, al mismo tiempo que se observó una heterogeneidad con sus homólogos, repitiéndose este acto para los dos años estudiados. Los valores mínimos se presentaron en el paraje La Espejera con 15.7°C y 16.13 °C para el año 2018 y 2019 respectivamente, mientras que los valores máximos se presentaron en el paraje de Puente de Urrutia con 21.39°C en el año 2018 y 23.01°C para el 2019; esto coincide con la temperatura reportada por López *et al.* (2015) en la zona de Xochimilco durante los mismos meses, donde las disconformidades existentes entre canales puede deberse a las corrientes de aire, ya que de acuerdo con Bécares *et al.* (2014) en lagos someros no existe una estratificación marcada y la masa de agua puede estar completamente mezclada como consecuencia del efecto del viento (polimixis) y esta variación en temperatura puede darse en función del tipo de vegetación circundante y su cobertura o en otras palabras la protección que tenga el cuerpo de agua frente al viento.

Los valores de temperatura registrados se encontraron dentro de los límites que presenta la NOM-001-ECOL-1996 que es de 40 °C para embalses naturales y artificiales cuya agua se utiliza para el riego agrícola.

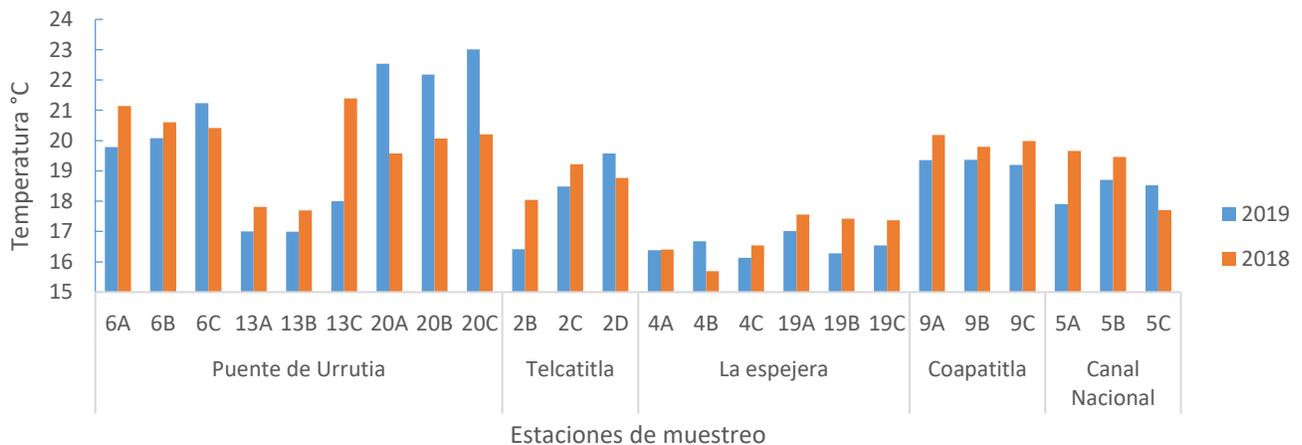


Figura 11 Valores de temperatura registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.

7.4 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es considerado como un indicador esencial el cual permite determinar la idoneidad de la calidad del agua para diversas actividades, esto se debe a sus valores que pueden favorecer ciertas circunstancias. Dentro de este trabajo se encontró que para ambos años hubo una afinidad hacia la condición alcalina registrando valores promedio de 7.4 unidades con una desviación estándar de 0.32 para el año 2018 y 8.03 unidades con una desviación estándar de 0.78 para el año 2019, demostrando que en este último hubo una mayor dispersión de los datos, pero sin perder su tendencia hacia la alcalinidad, esto debido probablemente al proceso de disolución de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos de calcio, ya que en el sitio es posible encontrar el grupo de suelo de tipo Solonchak, conforme al sistema de clasificación Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) versión 2015, caracterizado por su alto contenido de sales solubles conforme a la Gaceta Oficial del Distrito Federal (2006); sin embargo, estos valores se pueden incrementar por causa de las lluvias, ya que el lavado del suelo circundante genera el arrastre de compuestos carbonatados a los cuerpos de agua como lo exponen Ortiz y Rubalcaba (2015).

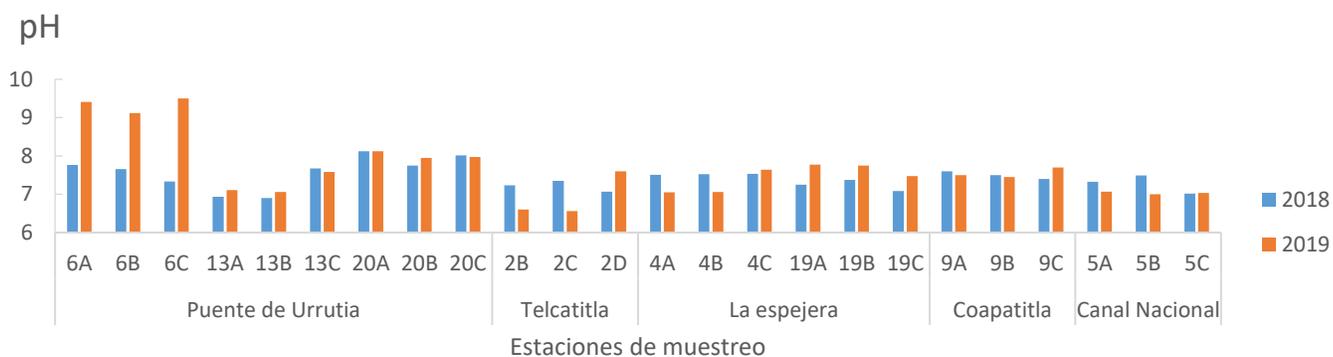


Figura 12 Valores de pH registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.

7.5 Oxígeno disuelto (O₂)

El comportamiento del oxígeno a media profundidad fue muy bajo en todos los parajes en 2018, encontrándose concentraciones desde 0.04 mg/L en el paraje Telcaltitla (2B), y hasta 1.9 mg/L en el Puente de Urrutia (6A), tal como se muestra en la figura 13, lo que indica una condición de hipoxia (<2 mg/L⁻¹ O₂) (Muciño *et al.*, 2017; Drabrowski *et al.*, 2004).

Para el año 2019 se presentaron las concentraciones más elevadas de este gas en el paraje de Puente de Urrutia (6A, B, C y 20A, B, C) con un máximo de 7 mg/L en el punto 6C.

El oxígeno disuelto se encuentra íntimamente relacionado con el proceso de la fotosíntesis que es realizada por el fitoplancton presente en la zona, esto podría explicar el aumento drástico de este parámetro en el paraje de Puente de Urrutia ya que de forma similar se registraron valores elevados en las concentraciones de clorofila *a* en los mismos puntos de muestreo. Magaña (2004) menciona que los procesos fotosintéticos locales aumentan la producción de oxígeno presente en lagunas costeras y que de igual manera el viento puede jugar un papel importante en el aumento del mismo.

Sin embargo, como puede apreciarse en la figura 13, las condiciones de hipoxia fueron predominantes en los canales muestreados, esto puede ser atribuido al proceso de descomposición originado en los sedimentos donde se degrada y consume el oxígeno disuelto como lo refiere de la Lanza (2008).

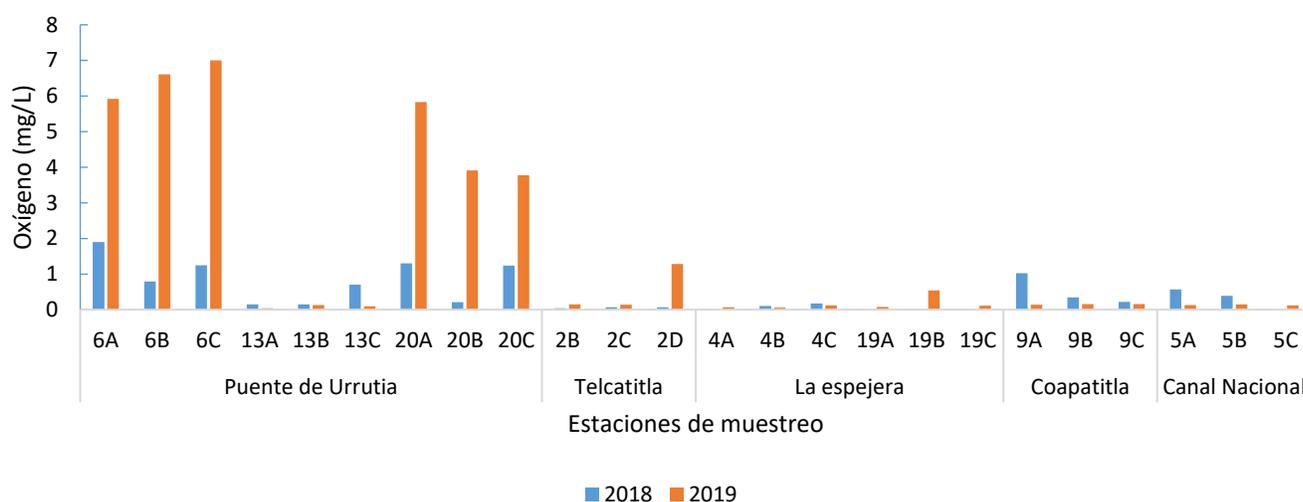


Figura 13 Valores de oxígeno registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.

7.6 Amonio NH₄⁺

Este parámetro mostró un comportamiento heterogéneo debido a que las concentraciones más altas de este nutriente se alcanzaron en el año 2018 con 12.03 mg/L en el paraje La Espejera (4C), mientras que las concentraciones más bajas se registraron en Puente de Urrutia

(20C) con 1.27 mg/L, lo que muestra que existe un excedente de este compuesto de acuerdo con el valor del límite permisible presente en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), la cual es de 0.06 mg/L para la protección de la vida acuática en agua dulce.

El paraje La Espejera se encuentra ubicado en un canal que se conecta con el Canal Nacional, sitio que activamente es el paso de arrastre de las chinampas en la zona, Alcántara (2014) menciona que el uso de los agroquímicos cerca de los cuerpos de agua superficiales promueve la eutrofización en los sistemas acuáticos debido a que los cultivos solo usan entre el 30 al 50% del nitrógeno en forma de nitrato y amonio, en tanto que la proporción no absorbida se pierde en el suelo, es probable que este sea el caso lo que permitiría explicar el aumento en la concentración de este nutrimento.

Para el año 2019 las concentraciones más elevadas se encontraron en el Canal Nacional con un máximo de 6.18 mg/L, seguido del paraje de Coapatitla, mientras que el valor mínimo encontrado fue de 0.09 mg/L en Telcaltitla (Figura 14) manteniendo las menores concentraciones en Puente de Urrutia

Algunos de los orígenes del nitrógeno amoniacal pueden provenir de aguas residuales agrícolas, de aguas residuales industriales, descomposición de productos nitrogenados orgánicos en el suelo (Horak, 2015), esto se compagina con el censo de descargas de aguas negras y grises en los canales de Xochimilco realizado por la SECITI del Distrito Federal y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde se reveló que las principales fuentes de descarga hacia los canales son las descargas de casa habitación, seguido de los invernaderos y por ultimo sitios de crianza de cerdos (Silva, 2017; SDPN, 2015)

Para este estudio no fue posible registrar las concentraciones de nitritos y nitratos debido a que los valores fueron menores a los límites de detección del método empleado, indicando que el proceso de oxidación del nitrógeno amoniacal se ve interrumpido debido a las condiciones de hipoxia presente en las estaciones de muestreo como lo menciona Horak (2015); Mota (2012).

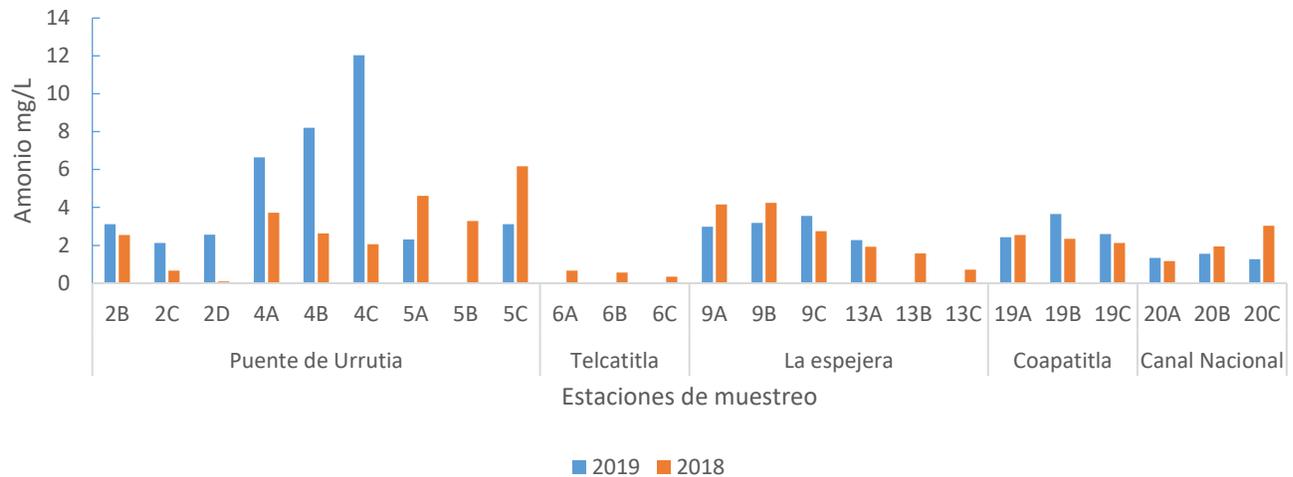


Figura 14 Valores de amonio registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.

7.7 Fósforo

Durante el estudio, la concentración de fósforo registró valores entre 4.33 y 28.03 mg/L en el año 2018, observándose una tendencia de concentrarse hacia la zona chinampera del paraje La Espejera; mientras que en el año 2019, las concentraciones se registraron entre los 3.4 y 11.9 mg/L mostrando de igual manera un comportamiento irregular como se observa en la figura 15, en el que el paraje La Espejera volvió a ser el sitio donde se registró la mayor concentración, mostrando un enriquecimiento mayor al permitido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) el cual muestra una tolerancia límite de 0.05 mg/L para el caso de lagos y embalses para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y controlar la eutrofización acelerada y hasta 0.1 mg/L para ríos y arroyos, esto nos da una referencia de la proporción disponible de este elemento en la columna de agua.

Esta condición de exceso del nutriente en la columna de agua puede deberse a la difusión continua del fosforo contenido en el sedimento en condiciones de hipoxia como lo sugiere Rodriguez (1989), sumado a este proceso Álvarez (2004) menciona que existen grupos de cianobacterias capaces de liberar fósforo durante épocas cálidas al asimilar el fosforo orgánico, al mismo tiempo que el aumento de este nutrimento se encuentra directamente relacionado con las actividades agrícola-ganaderas en conjunto con las descarga de drenajes ubicadas en

las periferias del sistema (Ledesma *et al.*, 2013). Todos estos factores son congruentes con los documentados en el presente trabajo de investigación.

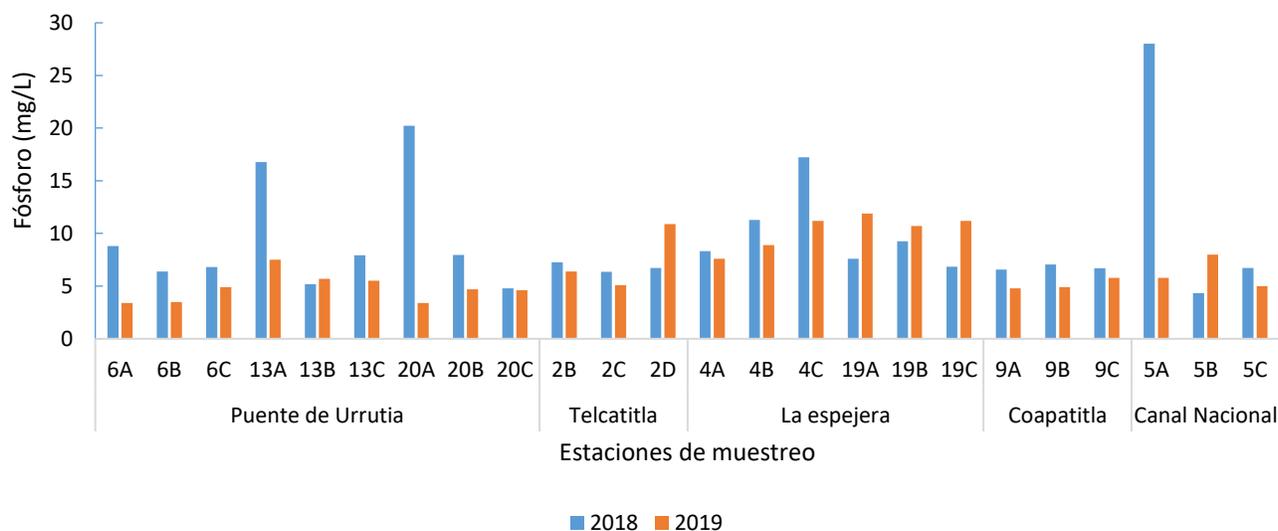


Figura 15 Valores de fósforo registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.

7.8 Clorofila *a*

El comportamiento de la clorofila *a* tuvo una clara tendencia a concentrarse más hacia la zona agrícola en La Espejera en el año 2018, donde el valor de 28.09 mg/L fue el mayor registrado, mientras que el valor mínimo se encontró con 0.01 mg/L en un canal secundario en el Puente de Urrutia; por otro lado en el año 2019, este parámetro se disparó únicamente en la entrada del canal principal de Puente de Urrutia obteniendo una concentración máxima de 48.12 mg/L y colocando la mínima en 0.01 mg/L de nuevo en el canal secundario del Puente de Urrutia.

Estos datos reportados sobrepasan los manifestados por Xolalpa (2009), quien presenta una concentración máxima de 20.0 mg/L de clorofila *a* en la laguna de la Virgen (Porción Oeste del ANP “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”) dentro de su monitoreo quincenal, lo que nos indica una tendencia a aumentar la concentración de este parámetro dentro de la zona.

Cabe notar que la proporción de clorofila reportada en el presente documento muestra una relación con el oxígeno disuelto siendo la entrada de agua el sitio donde las concentraciones de ambos parámetros resaltaron, ya que cuando existe mayor radiación solar en la superficie

el proceso de fotosíntesis puede disminuir o inhibirse, lo que obliga a las especies fotosintéticas a migrar hacia estratos más profundos donde las condiciones sean óptimas, mostrando que los máximos de clorofila y oxígeno pueden ser encontrados a media profundidad (Ordoñez, 2010).

En este mismo sentido, la concentración de la clorofila en el Puente de Urrutia es anómalamente más alta que en los otros sitios, esto probablemente a la cercanía de estas estaciones a la entrada de agua lo que provoca una resuspensión de nutrientes, los cuales son aprovechados por el fitoplancton tal como lo expresa Campos (2011) en su estudio de distribución de clorofila.

La clorofila *a* es utilizada como un indicador del estado trófico de los ecosistemas acuáticos. Asimismo, la concentración de clorofila *a* es una insignia confiable para la cuantificación y el seguimiento de las variaciones de la biomasa fitoplanctónica presente en el tiempo y espacio, quienes se encuentran en relación con la porción de nutrientes lo que permite determinar la calidad del agua y la salud del ecosistema (Muciño *et al.*, 2017).

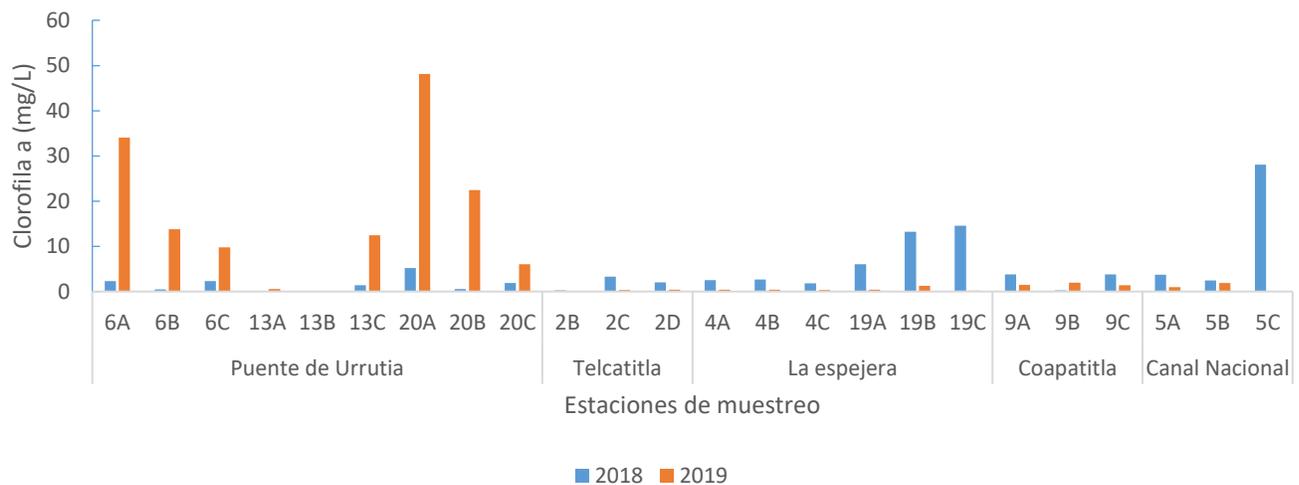


Figura 16 Valores de clorofila *a* registrados de los sitios de muestreo durante los años 2018 y 2019.

7.9 Correlaciones entre los parámetros

Las correlaciones se realizaron a través de los rangos de Spearman utilizando esta prueba para evidenciar el grado de asociación existente entre los parámetros evaluados. El análisis mostró que el pH fue el parámetro que se relacionó mejor de forma positiva con otros parámetros como la temperatura, la transparencia y el oxígeno, siendo esta relación la más fuerte en el año

2018, como queda resaltado en el cuadro V. Estas relaciones pueden ser explicadas debido a la condición neutra ligeramente alcalinizada que presenta el sitio y la temperatura que no logró exceder los 25 °C ya que, de acuerdo con diversos autores, así como el aumento de la temperatura logra acidificar el medio debido al incremento de iones hidronio, lo mismo ocurre de manera inversa a temperaturas inferiores. El comportamiento de estos datos indica que a medida que aumenta un parámetro el otro también lo hará, por otro lado el amonio fue el parámetro que se correlaciono de forma negativa con el oxígeno y la temperatura, esto posiblemente debido a la baja cantidad de oxígeno disponible para las bacterias Nitrobacter ya que su tasa de crecimiento se ve reducida con concentraciones de oxígeno disuelto menores a 4mg/L⁻¹ (Sotomayor, 2016). Por otro lado, los coeficientes de relación de forma positiva indican una relación proporcional como ocurre en el caso de la temperatura con el oxígeno, la cual puede ser explicada debido al aumento de radiación solar en el agua aumentando así la temperatura y con ello el proceso de fotosíntesis. Muñoz *et al.*, (2015) mencionan para esta misma relación, que existen ambas formas de correlacionarse dependiendo de la estacionalidad del año, mostrando relaciones positivas durante temporada de sequias y de forma negativa durante la temporada de lluvias.

A manera de comparación, Ortiz y Ruvalcaba (2005) mostraron una relación similar donde también obtuvieron correlaciones positivas entre los mismos parámetros.

Cuadro V. Matriz de correlaciones entre los parámetros marcados con una $p < 0.05$ para el año 2018.

	Fósforo	Amonio	pH	Oxígeno	Temperatura	Clorofila	TDS	Transparencia
Fósforo	1	0.351	0.032	-0.047	-0.273	0.079	-0.113	-0.090
Amonio		1	-0.286	-0.587	-0.659	0.307	0.415	-0.038
pH			1	0.644	0.612	-0.070	-0.579	0.495
Oxígeno				1	0.814	-0.268	-0.395	0.222
Temperatura					1	-0.266	-0.371	0.349
Clorofila						1	0.335	0.355
TDS							1	0.018
Transparencia								1

Para el año 2019 existió más relaciones entre los parámetros evaluados, resaltando el fósforo que se relacionó más veces de forma inversa o negativa con parámetros como el oxígeno, la temperatura y la clorofila, probablemente porque el consumo de este elemento se da por el fitoplancton quien libera oxígeno como parte de su proceso metabólico, mientras que la

temperatura permite mantenerlo en su forma asimilable para la biota; por otro lado se observa en el cuadro VI una fuerte relación positiva con los sólidos disueltos totales, lo que nos da una idea de la existencia de minerales en disolución ricos en este elemento.

De manera similar el pH vuelve a ser el parámetro que se involucró más veces de forma positiva con el resto para este año, resaltando la inclusión de la clorofila dentro de estas relaciones, esto probablemente a que el pH óptimo para el desarrollo de especies fitoplanctónicas dulceacuícolas es de 8 (Hernández y Labbé, 2014), el cual es coincidente con los rangos registrados en las estaciones de muestreo, sumado al hecho que las concentraciones de clorofila más altas se obtuvieron en este año, lo cual podría explicar su adición en las relaciones en comparación con su homólogo del año antecesor.

Cuadro VI. Matriz de correlaciones entre los parámetros marcados con una $p < 0.05$ para el año 2019.

	<i>Fósforo</i>	<i>Amonio</i>	<i>pH</i>	<i>Oxígeno</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Clorofila</i>	<i>TDS</i>	<i>Transparencia</i>
<i>Fósforo</i>	1	0.140	-0.381	-0.626	-0.772	-0.657	0.858	-0.212
<i>Amonio</i>		1	-0.446	-0.381	-0.234	-0.227	0.388	-0.470
<i>pH</i>			1	0.627	0.557	0.694	-0.334	0.669
<i>Oxígeno</i>				1	0.737	0.615	-0.541	0.596
<i>Temperatura</i>					1	0.737	-0.619	0.300
<i>Clorofila</i>						1	-0.590	0.401
<i>TDS</i>							1	-0.282
<i>Transparencia</i>								1

7.10 Dendogramas

El dendograma es una representación gráfica en forma de árbol que resume el proceso de agrupación de elementos proveniente del análisis Cluster, un método estadístico multivariado el cual trata de agrupar variables buscando la máxima homogeneidad en cada grupo (variables) y la mayor diferencia entre estos mismos. Este procedimiento estadístico parte de un conjunto de datos para poder reorganizarlos en grupos de conglomerados (cluster) y su utilidad está dada en apreciar las relaciones entre grupos y su afinidad (De la Fuente, 2011).

El análisis tipo Cluster para los parámetros evaluados se construyó a partir de los datos normalizados de cada año evaluado, en él se puede apreciar para el año 2018 que el pH fue el grupo mayor diferenciado de los demás parámetros, es decir no tiene similitud y actúa de forma independiente a los demás grupos, el siguiente parámetro menos relacionado con los demás fue la transparencia del agua; por otro lado, la clorofila, el fósforo y los sólidos disueltos se

encuentran muy cercanos entre sí demostrando una estrecha relación entre ellos como se muestra en la figura 17.

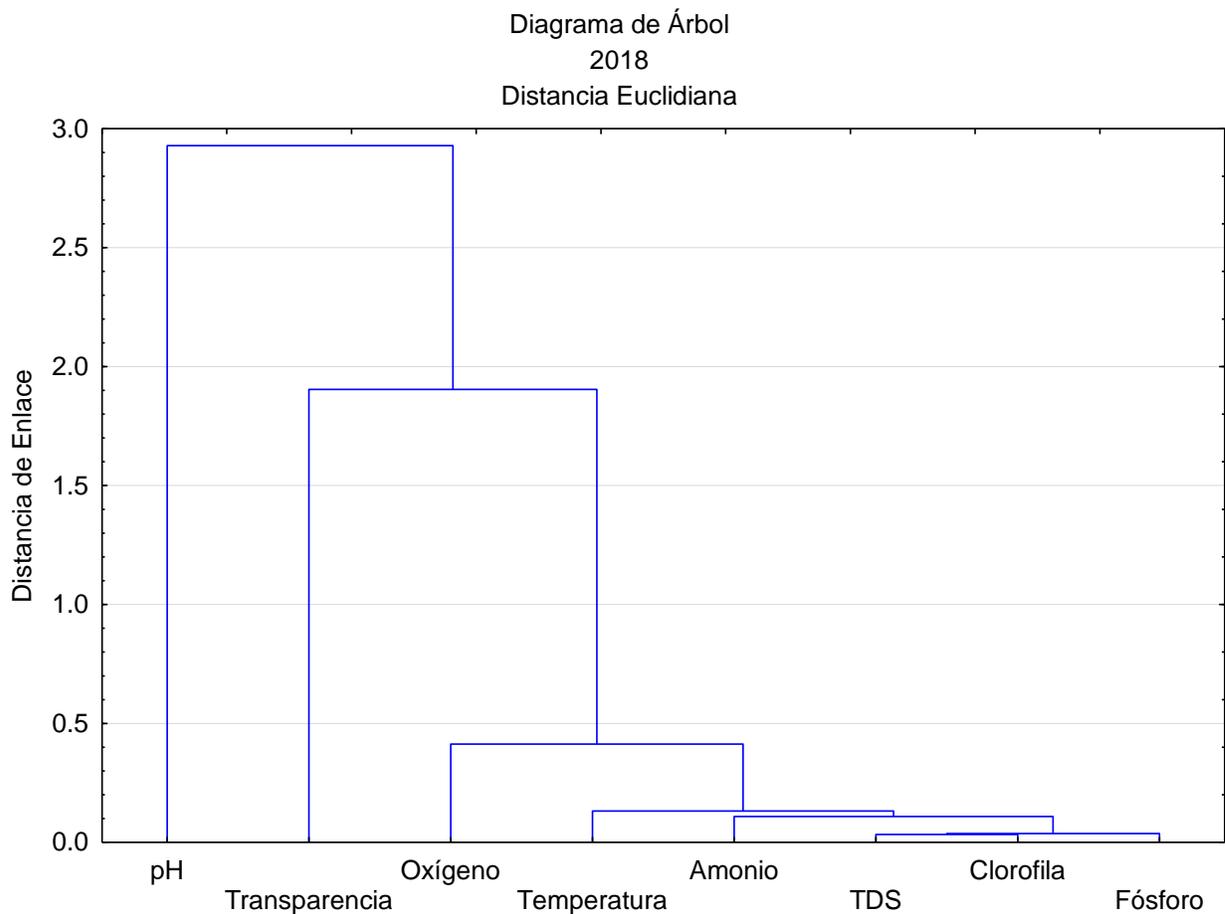


Figura 17 Dendograma de los parámetros evaluados en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2018.

En el año 2019 podemos encontrar ciertas asociaciones disimiles en relación con el año antecesor como es el caso de la clorofila con los sólidos disueltos y esta vez creándose un nuevo grupo donde se coloca el oxígeno, temperatura y fósforo. De manera contraria en esta ocasión la transparencia tomó el lugar del pH como el grupo más alejado de los demás, este es un comportamiento extraño ya que la transparencia tiene una estrecha relación con la clorofila y los sólidos disueltos (Ordóñez, 2010) esto puede verse reflejado en la figura 18.

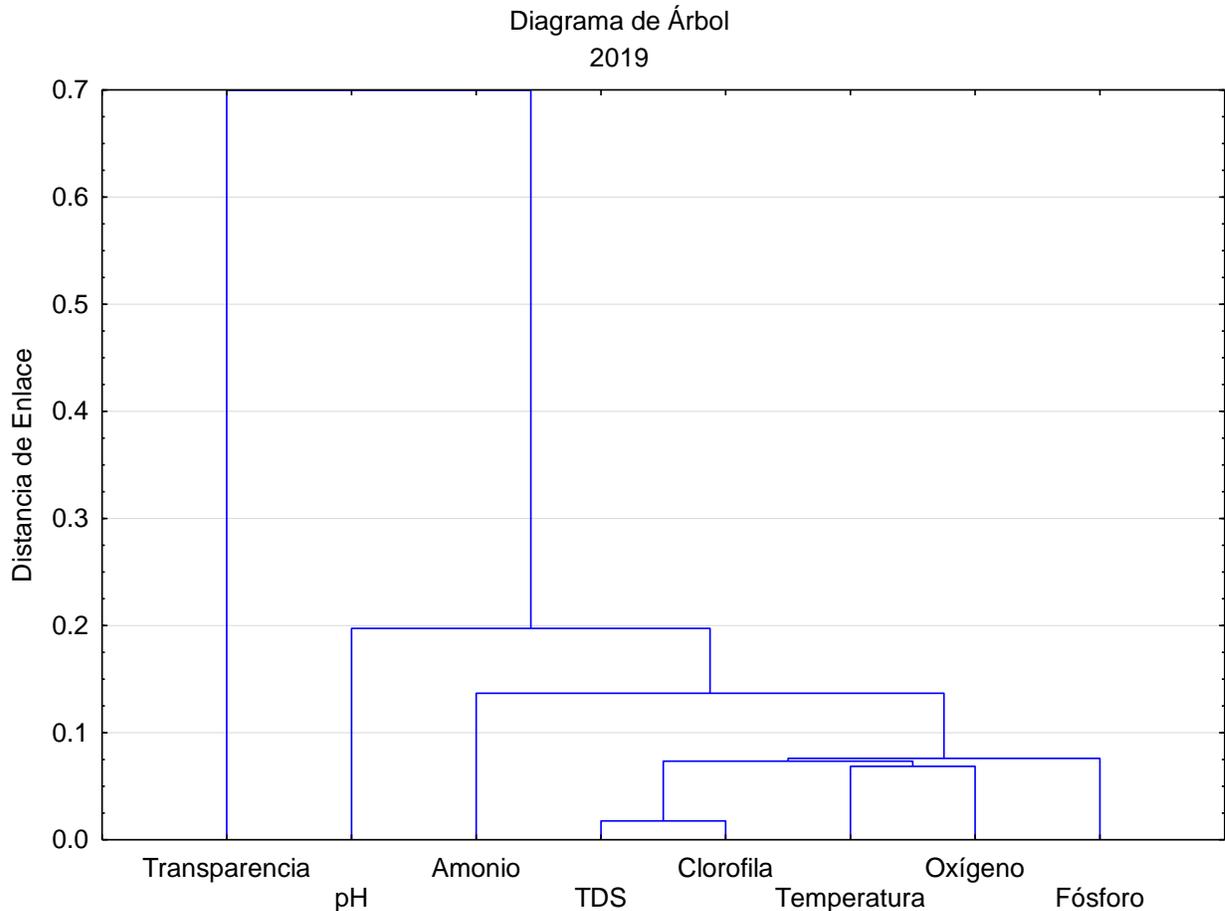


Figura 18 Dendrograma de los parámetros evaluados en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2019.

7.11 Índice del estado trófico (IET)

El estado trófico en los sistemas acuáticos resulta de la interacción de los factores externos con los procesos internos que involucran al agua como medio, la biota y los sedimentos (Ortiz y Ruvalcaba, 2005), mostrando que este estado, es la relación entre los nutrientes de un sistema y el incremento de la materia orgánica, el estado trófico se calcula por medio de tres diferentes parámetros obtenidos de datos experimentales con valores fijos para cada rango, y es el índice de Carlson (1977) el que usa las variables de transparencia, clorofila *a* y fósforo para su obtención.

Debido a que es posible presentar un valor para cada parámetro, es que existe una variación del IET en función del parámetro utilizado en su determinación, como lo expresaron Ortiz y Ruvalcaba (2005), los valores de IET no deben ser promediados ya que los parámetros pueden verse afectados durante ciertos meses frente a otros, por esta razón, un análisis individual de

cada parámetro proyecta una mejor comprensión de la productividad biológica. Esta aproximación se ve reforzada por los resultados del análisis Cluster en la sección anterior donde demuestra la asociación y la no asociación entre los parámetros.

7.11.1 Clorofila *a*

Empezando por la clorofila *a* como parámetro encontramos que para el año 2018 la mayoría de los sitios presentan una condición hipereutrófica de acuerdo a la clasificación de Carlson con modificación de Aizaki *et al.* (1981). Este parámetro muestra un aumento del índice en el paraje La Espejera (19A, B y C); sin embargo, se registró el valor más alto en el paraje Canal Nacional (5C), donde se presume es un punto de salida de agua residual como se ve en la figura 20, mientras que las condiciones mesotróficas, se presentaron solamente en los sitios 13A y B que se encuentran en un canal secundario de Puente de Urrutia, sitio donde entra el agua del área de Xochimilco al sistema. De manera general se tuvo un comportamiento hipereutrófico en más de la mitad de los sitios evaluados, mostrándose este comportamiento en la figura 19.

Por otro lado, en el año siguiente hubo un mayor número de sitios que tuvieron un comportamiento eutrófico de acuerdo al parámetro, de los cuales sólo un sitio permaneció mesotrófico (13B) y de manera complementaria el sitio 2B en Tecaltitla. Es de interés los sitios 20A, B y C, los cuales mostraron un aumento a valores hipereutróficos, siendo el sitio 20A el que mostró el valor más alto del índice para ambos años (Figura 21).

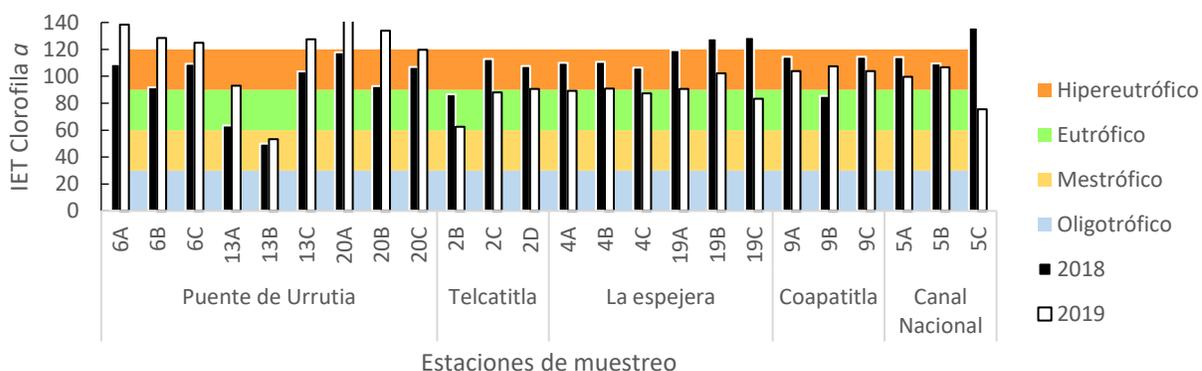


Figura 19 IET utilizando la clorofila *a* cuantificada en este estudio en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco.

Xochimilco - CDMX IET Clorofila 2018

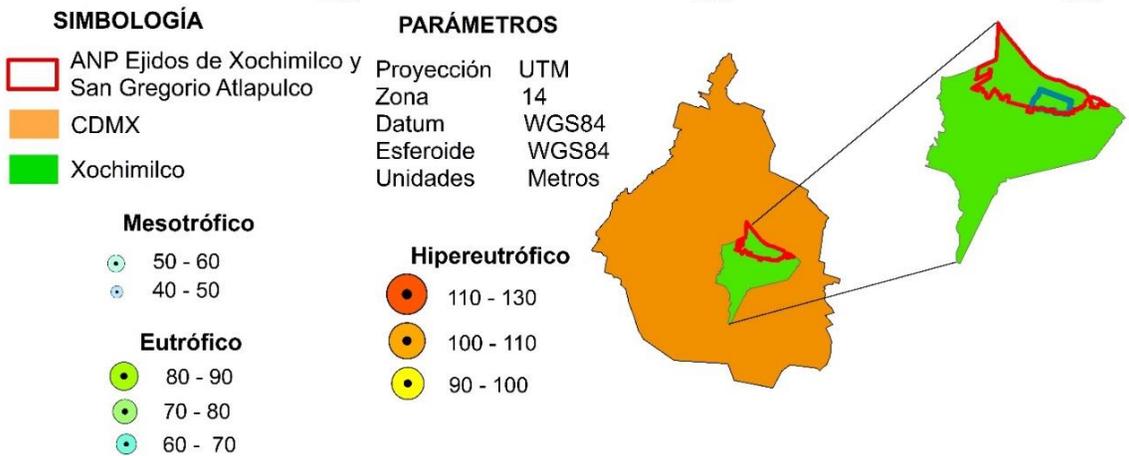
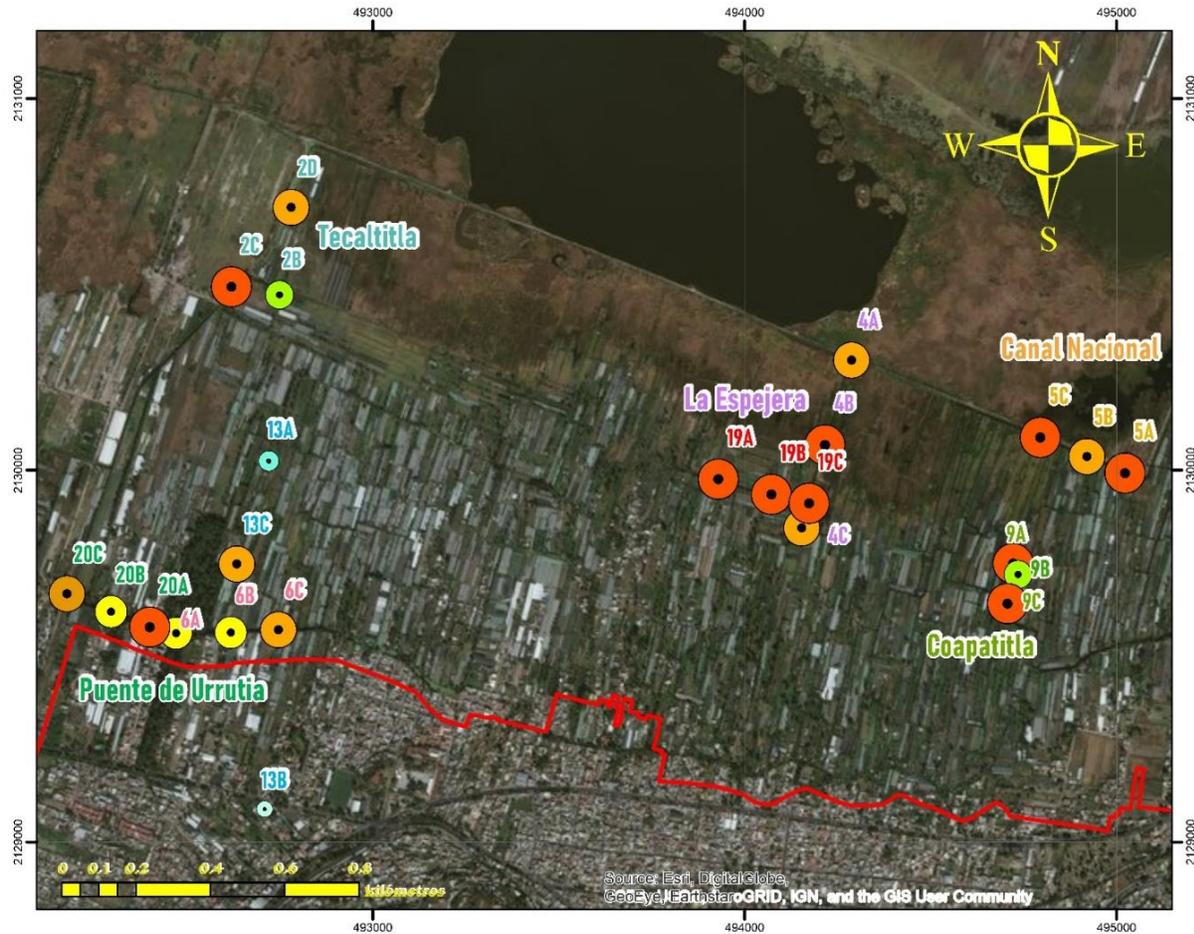


Figura 20 Sobre posición en imagen satelital del índice del Estado Trófico utilizando la clorofila a cuantificada en este estudio en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2018.

Xochimilco - CDMX
IET Clorofila
2019

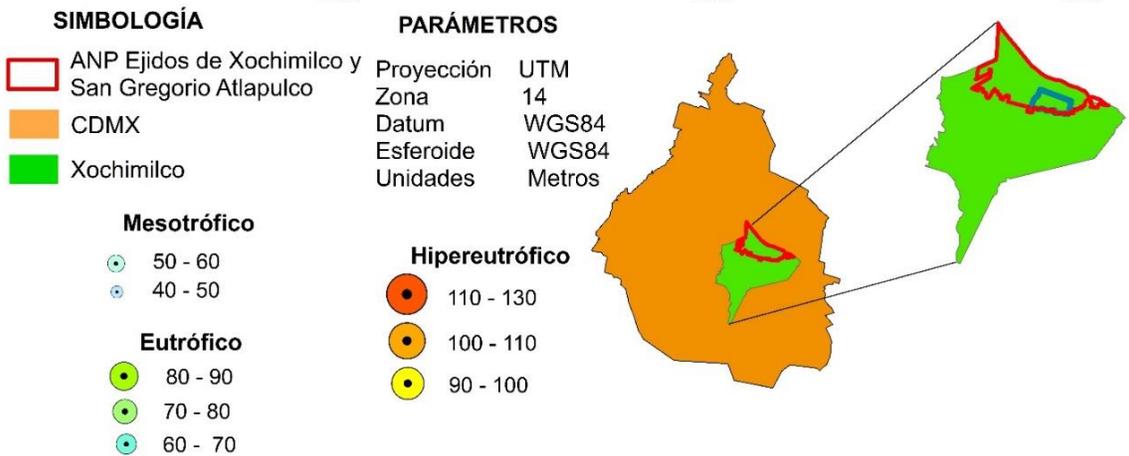
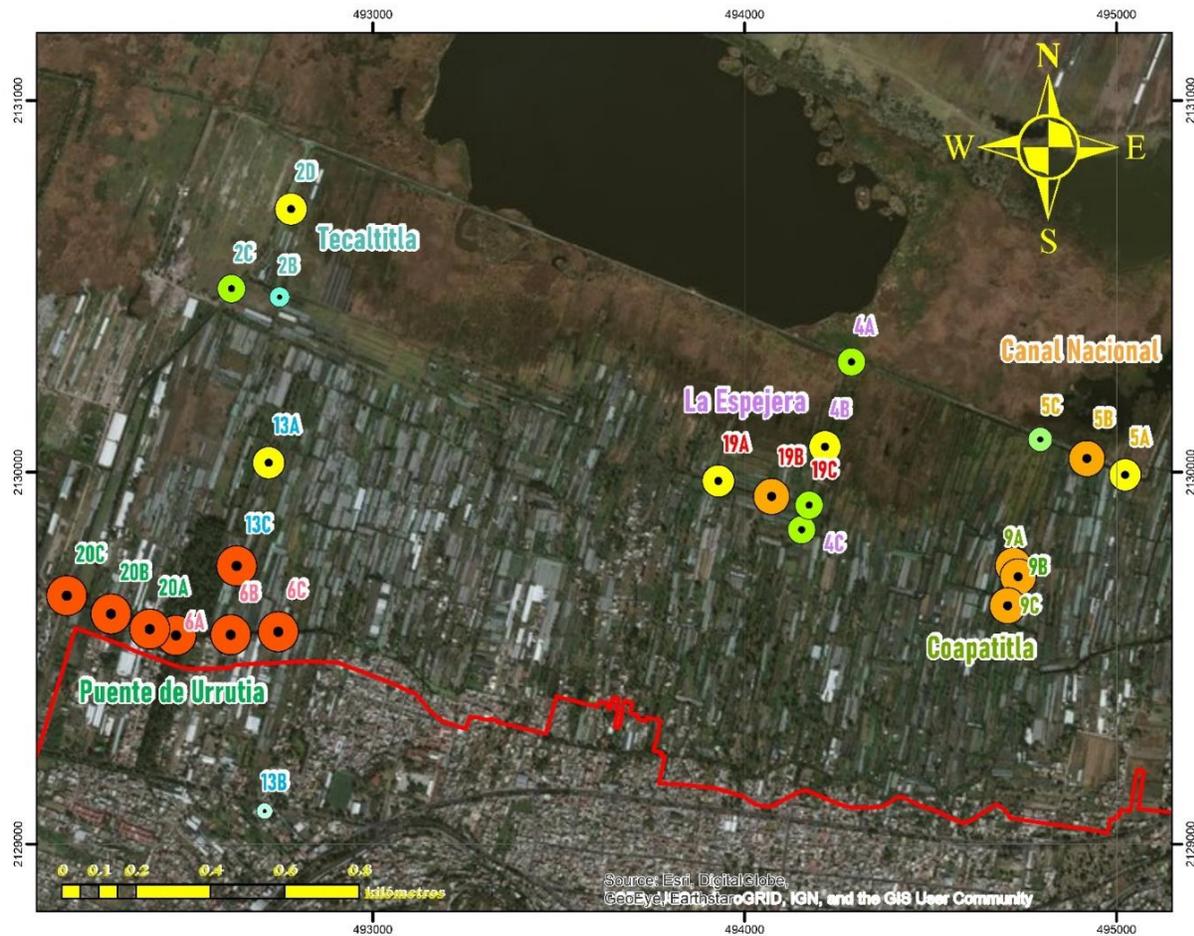


Figura 21 Sobre posición en imagen satelital del índice del Estado Trófico utilizando la clorofila a cuantificada en este estudio en las muestras de agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2019.

7.11.2 Transparencia

Utilizando a la transparencia como parámetro, encontramos que para el año 2018 los canales evaluados se comportaron de manera regular, predominando el estado eutrófico con cercanía a condiciones mesotróficas (Figura 23), encontrándose el valor máximo en los puntos 9A (Coapatitla) y 4A (La Espejera) y el mínimo en los puntos 4B (La espejera) y 13C (Puente de Urrutia), figura 22.

De la misma manera, en el siguiente año el comportamiento de los valores se mantuvo de forma muy similar ya que la mayoría de los sitios conservaron su estado eutrófico aumentando ligeramente su valor al del año antecesor, y otros más como fue el caso del paraje Canal Nacional (Figura 24), donde los valores fueron menores llegando a mostrarse en la categoría mesotrófica.

En la medición de este parámetro existen diversos factores que pueden afectar el registro del dato preciso como son: la posición del sol a la hora del registro, el clima y el contenido de sólidos suspendidos en la columna de agua, los cuales pueden ser los principales causantes de interferencia al utilizar este valor. Cabe señalar que Puente de Urrutia se encuentra en una entrada de agua y el movimiento circulante del agua puede ocasionar que se agite el fondo de los canales creando así una turbidez en el lugar, lo que podría explicar la manera en que los valores aumentaron en el sitio.

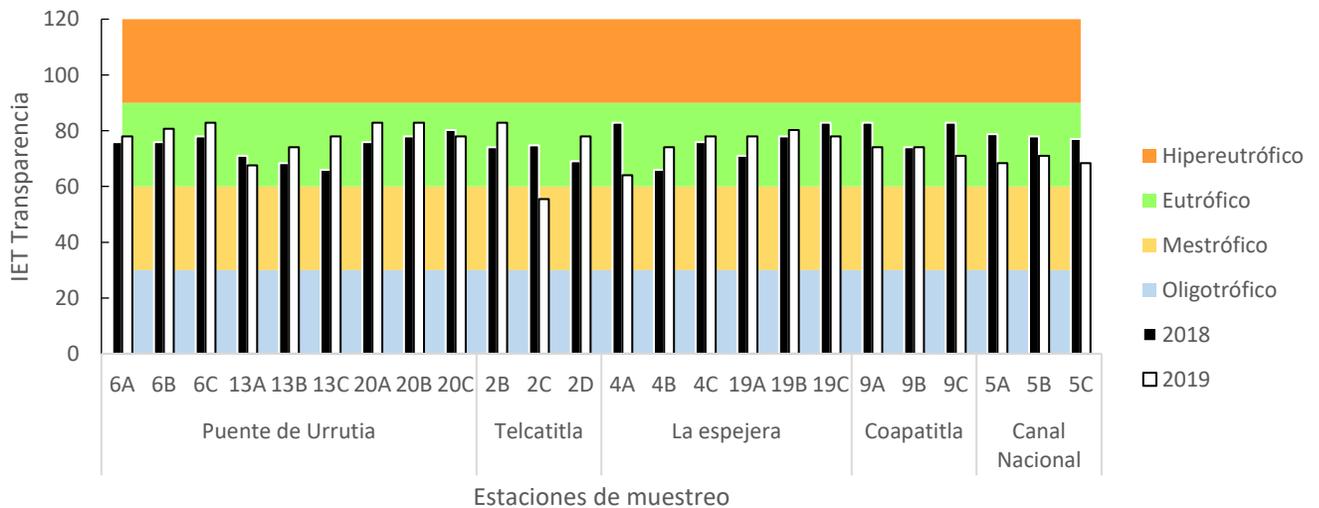


Figura 22 Índice del Estado Trófico utilizando los resultados de transparencia cuantificada en este estudio en los sitios de muestreo de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco.

Xochimilco - CDMX IET Transparencia 2018

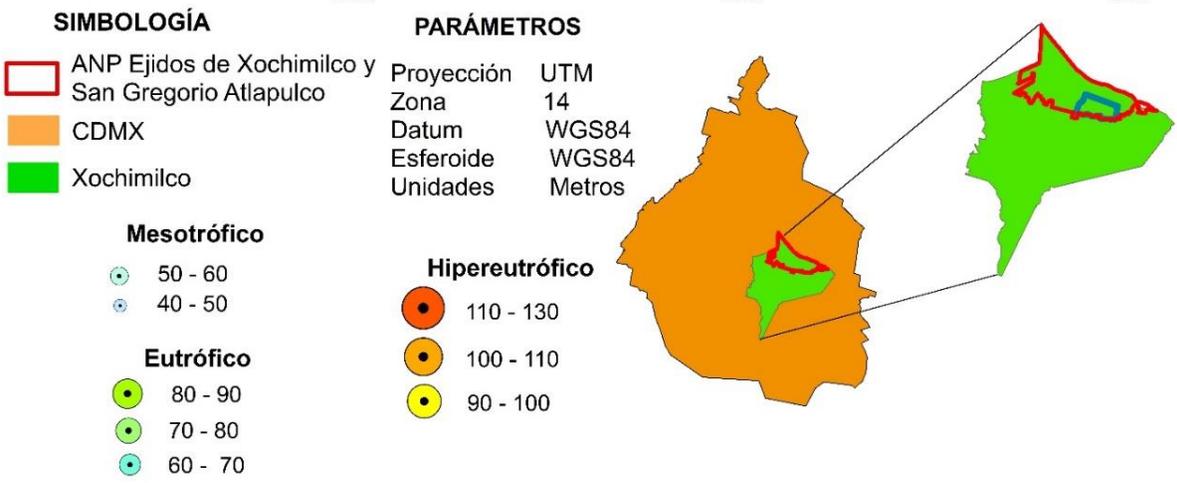
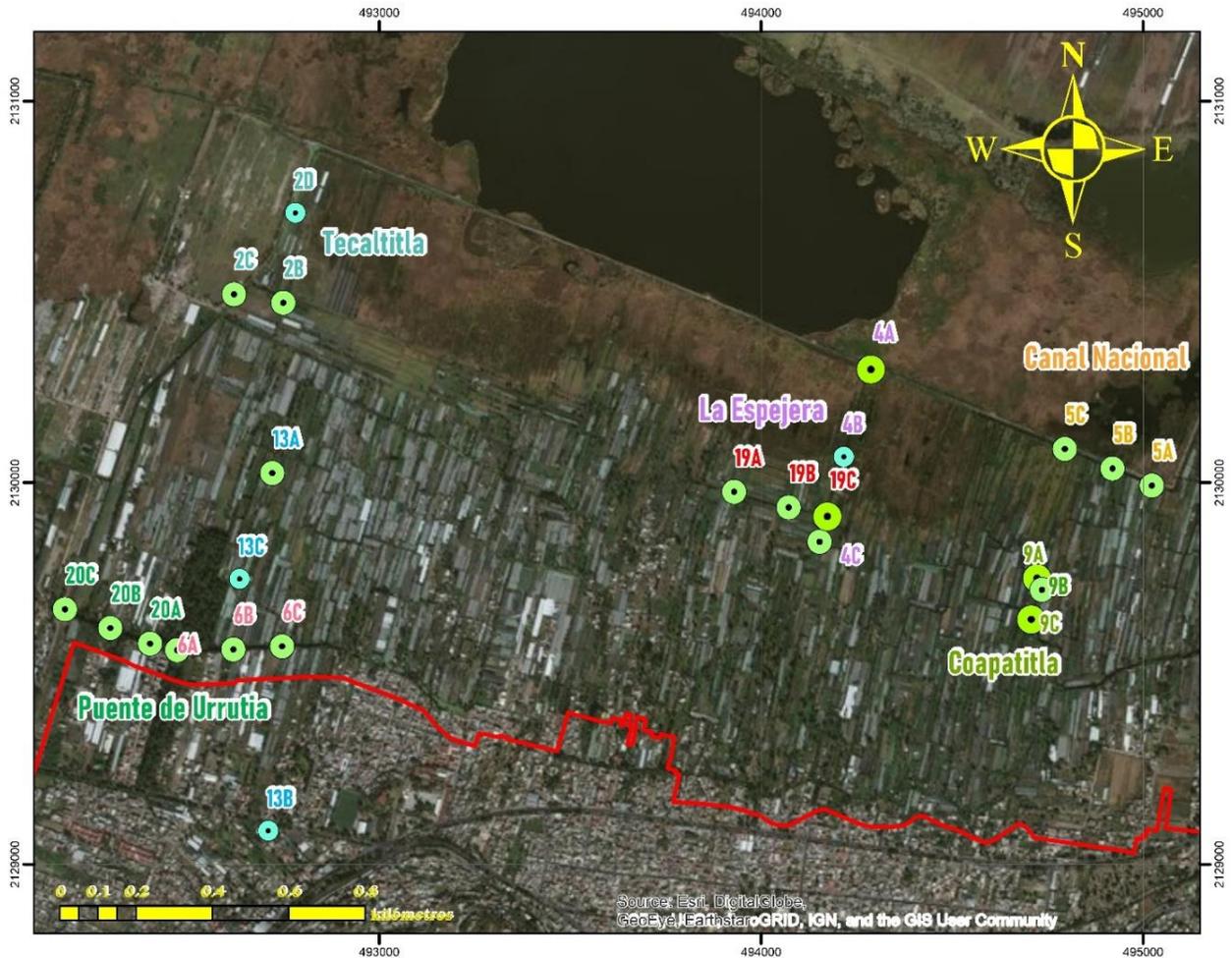


Figura 23 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Trófico utilizando la transparencia cuantificada en el agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante 2018.

Xochimilco - CDMX
IET Transparencia
2019

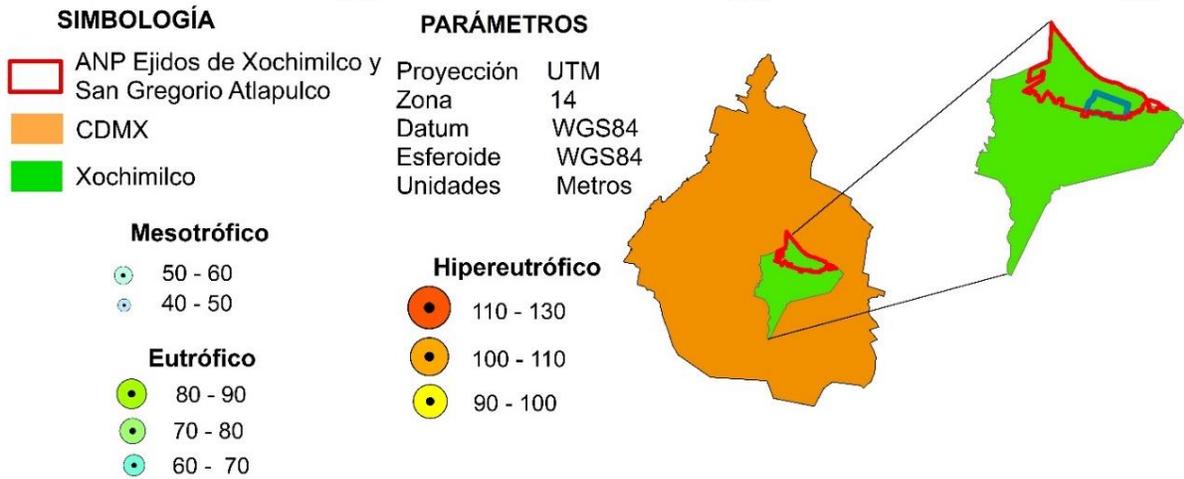
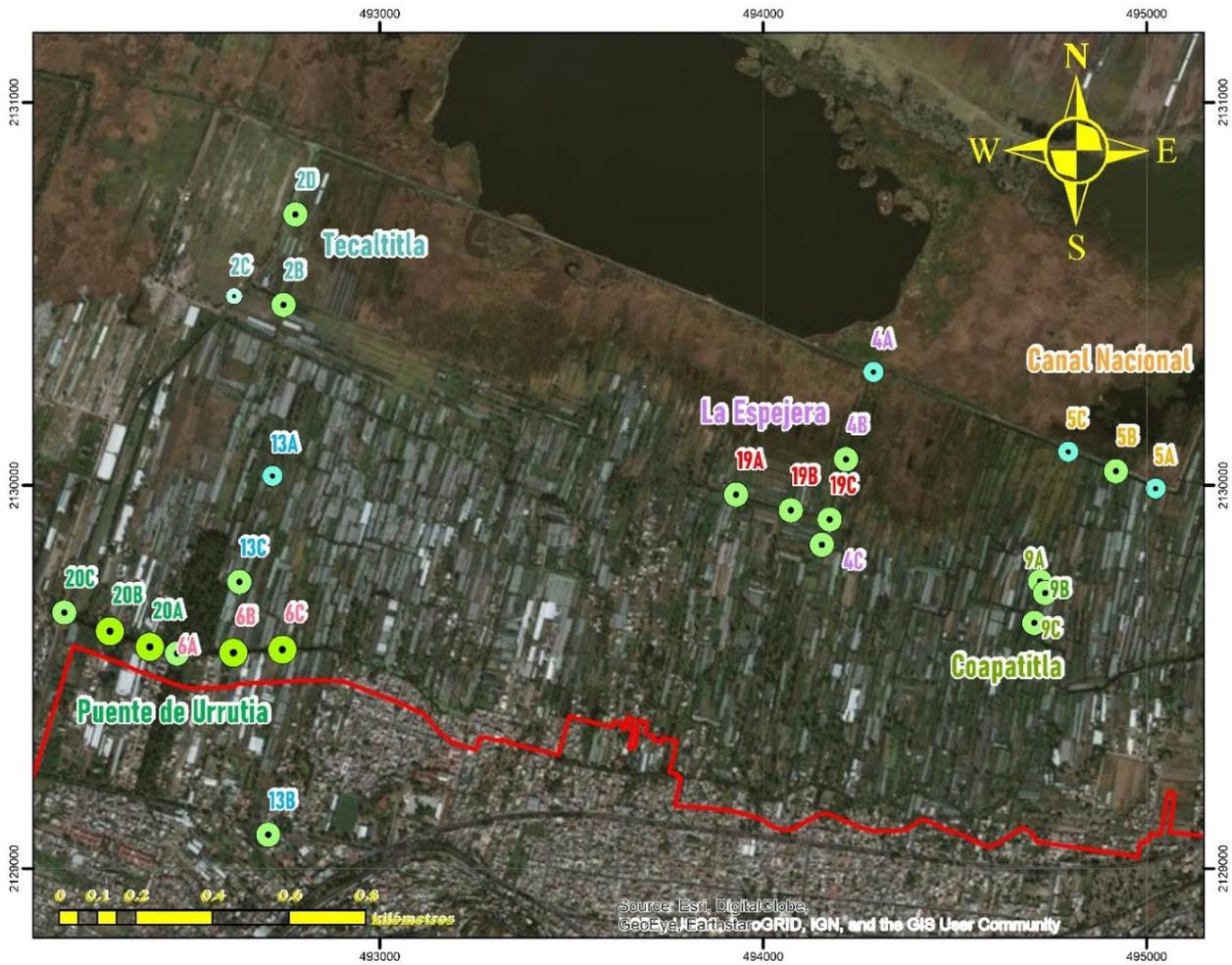


Figura 24 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Tráfico utilizando la transparencia cuantificada en el agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante 2019.

7.11.3 Fósforo

Este nutriente es la principal limitante en la productividad de ecosistemas acuáticos, al mismo tiempo que es el menos abundante en los sistemas, existe en diferentes tamaños como la fracción coloidal o en partículas que se sedimentan hacia el hipolimnion y son hidrolizados a ortofosfatos solubles (Xolalpa, 2009).

Dentro de los años de estudio tenemos que para el 2018 el valor más alto se encontró en Canal Nacional (5B) y la gran mayoría de los sitios en este paraje se encontró en un estado mesotrófico. De la misma forma, el valor más bajo se encontró en el punto 5A perteneciente al mismo paraje (Figura 25), quedando reflejado de manera especial en las figuras 26 para el año 2018 y figura 27 para el año 2019.

Durante el siguiente año los valores se incrementaron en la mayoría de los sitios sin llegar a presentar algunas condiciones de hipereutrofia, teniendo cambios importantes en Puente de Urrutia.

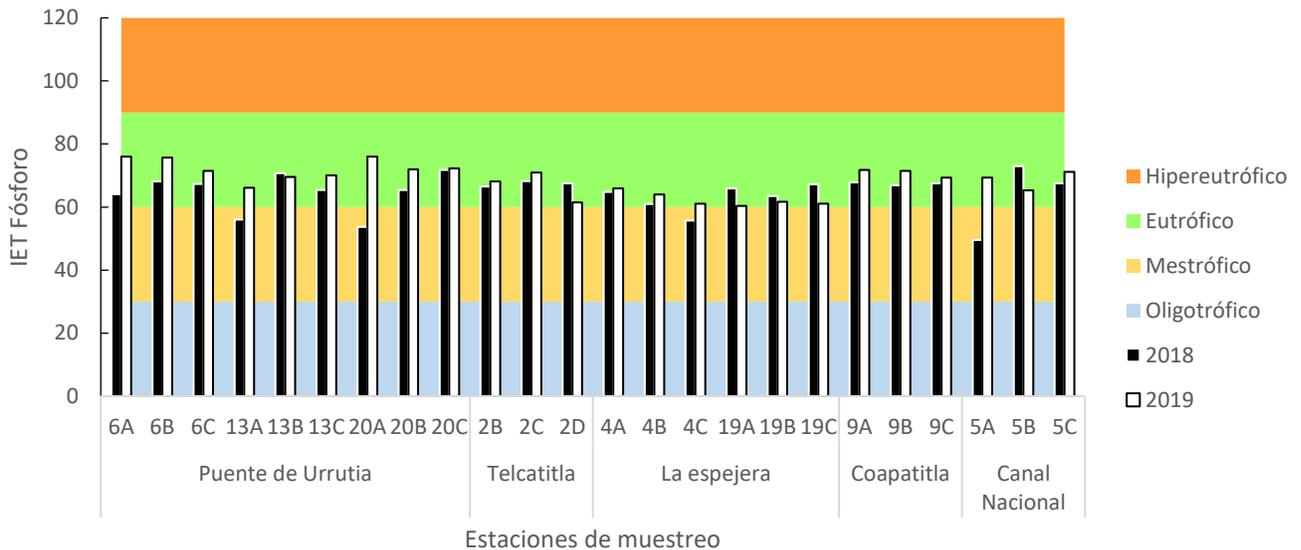


Figura 25 Índice del Estado Trófico utilizando los resultados de fósforo cuantificado en este estudio en los sitios de muestreo de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco.

Xochimilco - CDMX
IET Fósforo
2018

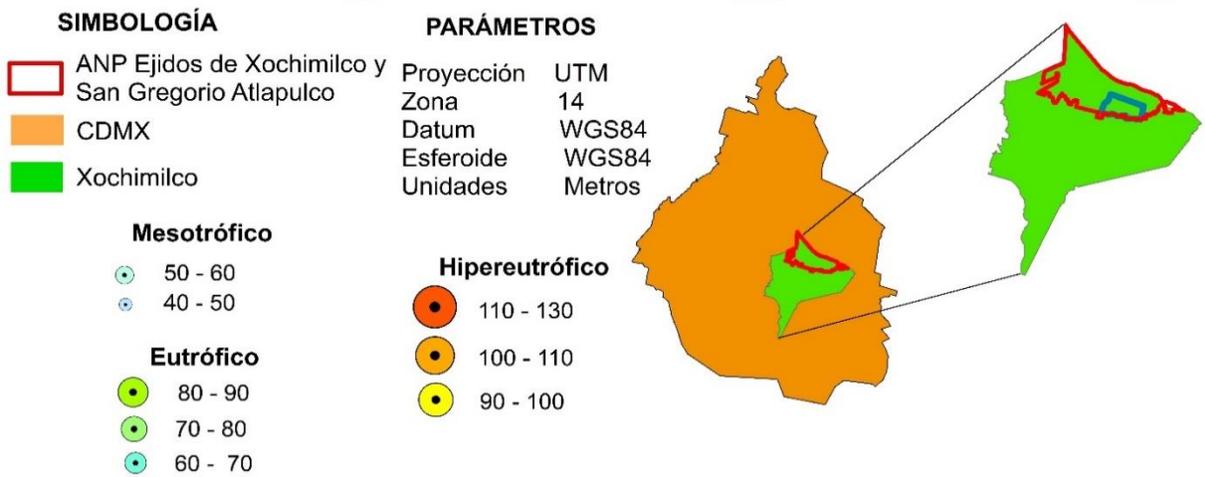
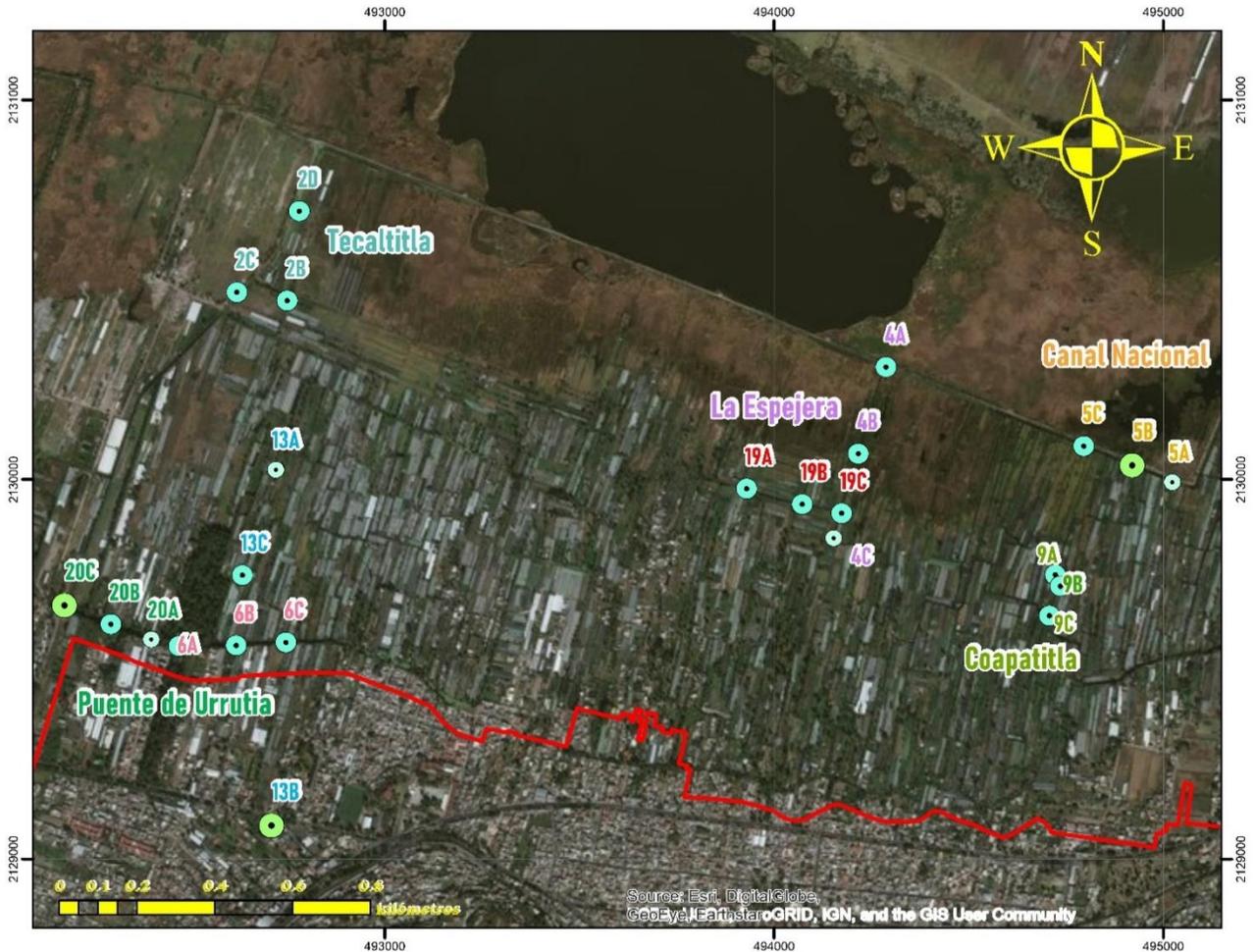


Figura 26 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Trófico utilizando al fósforo cuantificado en agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2018.

Xochimilco - CDMX
IET Fósforo
2019

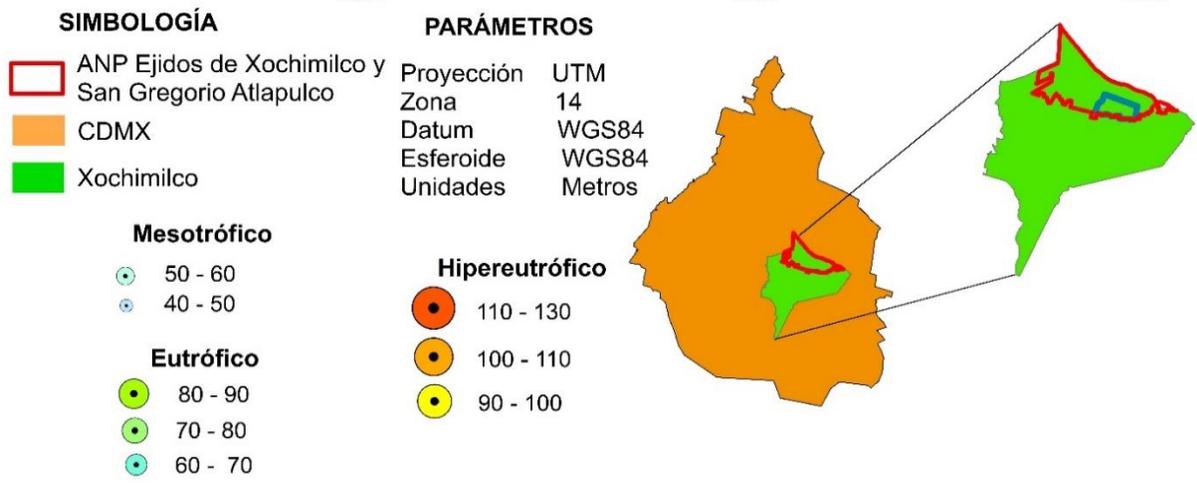
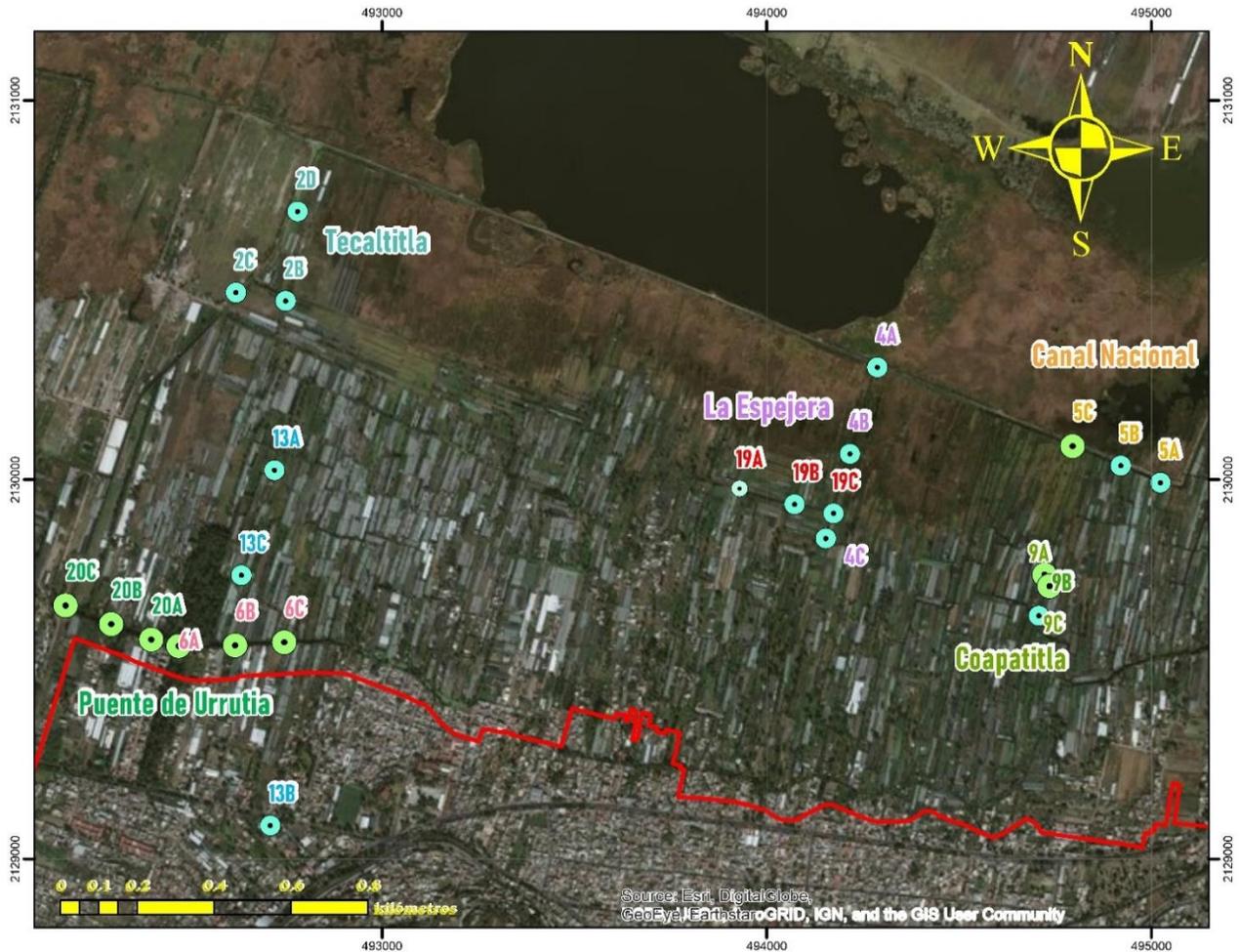


Figura 27 Sobre posición en imagen satelital del Índice del Estado Trófico utilizando al fósforo cuantificado en agua de los canales de San Gregorio Atlapulco, en Xochimilco durante el año 2019.

8. Conclusiones

- Existe una alternancia del estado trófico entre los sitios estudiados, los cuales se ven influenciados por la entrada de agua y su salida en el sistema.
- Las concentraciones de los parámetros utilizados en la medición del estado trófico son ligeramente más elevados comparados con otros trabajos cercanos a la zona de estudio, esto se podría explicar por el aumento de la intervención antropogénica.
- La calidad del agua rebasó los límites permisibles para la protección de la vida acuática conforme a lo señalado en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) para los parámetros de fósforo y amonio.
- La clorofila rebasó los límites presentados para el cálculo del estado trófico, por lo que se deben proponer nuevas categorías para englobar estas nuevas condiciones a las que nos enfrentamos en la actualidad.
- El estado trófico en el sitio de estudio es dinámico y demuestra una tendencia hacia la hipereutrofización utilizando la clorofila como indicador y hacia la eutrofización empleando la transparencia y fosforo.
- La clorofila *a* muestra una gran asociación con los sólidos disueltos totales a diferencia de otros parámetros como lo fue el oxígeno o el fósforo.

Bibliografía

- Agua Pura. (2020). *¿Qué es la transparencia del agua y cómo se mide?* (<https://www.aguapura.com.py/agua-y-salud/transparencia-del-agua/>).
- Aizaki M., Otsuki A., Fukushima T., Hosomi M. & Muraoka K., "Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters" *Verh. Internat. Verein Limnol.* 21:1, 675-681, DOI: 10.1080/03680770.1980.11897067, 1981.
- Aldana G. G. (2016). Influencia de la materia orgánica en la biodisponibilidad de metales en el agua de los canales de Xochimilco. (*Tesis de licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Arar E. J. & Collins G. B. "In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence National Exposure Research Laboratory Office of Research and Development U. S. Environmental Protection Agency In Vitro Determination of Chlorophyll" Issue September, pp. 1-22, 1997.
- Arredondo F. J. L. y Ponce P. J. T. (1986). Aporte al conocimiento limnológico de un embalse temporal tropical por medio de la aplicación de modelos multivariados. *Anales del Instituto Ciencias del Mar y Limnología*, 13 (2): 47-56.
- Baca B. E., Soto U. L. y Pardo R. M. A. (2000). Fijación biológica de nitrógeno. *Elementos: Ciencia y Cultura*, 7(38), 43-49.
- Drabrowski, k. I., k. I. Guz, L. Verhac & V. Gabaudan "Effects of dietary ascorbic acid on oxygen stress (hypoxia o hyperoxia), growth and tissue vitamin concentrations in juvenile rainbow trout" *Aqua-culture* 233: 382-392, 2004.
- Bécares E., Conty A., Rodríguez V. C. y Blanco S. (2004). Funcionamiento de los lagos someros mediterráneos. *Ecosistemas*, XIII (2), 0. ISSN: 1132-6344.
- Cárcamo C. J. R. (2017). Evaluación de la productividad primaria y la concentración de clorofila a en los lagos cráter la preciosa y Atexcac, en la cuenca oriental, Puebla. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Carlson R. E. "A trophic state index for lakes" *Limnol. Oceanogr.* 22:361-369, 1977.
- Campos G. M., Vargas C. J., Franco H. A. y Medina C. J. (2011). Distribución de la clorofila A en las aguas adyacentes a las islas de providencia y Santa Catalina, Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 40(2), 347-360, Colombia.
- Chapa B. C. y Guerrero A. R. (2010). Eutrofización: abundancia que mata. *¿Como Ves?*, 134, 22-25.
- De la Fuente F. S. (2011). Análisis conglomerados. *Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, 11-22.
- De la Lanza E. G., Alcocer D. J., Moreno R. J. L. y Hernández P. S. (2008). Análisis químico-biológico para determinar el estatus trófico de la Laguna de Tres Palos, Guerrero, México. *Hidrobiología* 18(1), 21-30.

- Echaniz S. y Vignatti A. (2009). Determinación del estado trófico y de la capacidad de carga del embalse casa de piedra. *BioScriba*, 2(1). 41-51.
- Ferrel C. L. A., Palmillas M. Á., Sánchez S. G. B. y Santos L. V. G. (2014). Estudio de la Diversidad de Dinoflagelados en los canales de Xochimilco. *Ciencias Biológicas y de la Salud*, 1-14.
- Figueroa T. M. G., Arana M. F., Almanza E. S., Ramos E. M. G. y Ferrara G. M. J. (2015). Microalgas del Área Natural Protegida Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, México. *CienciaUAT*, 9(2), 15-29.
- Fontúrbel R. F. (2003). Algunos aspectos biológicos sobre el proceso de eutrofización a orillas de seis localidades del lago Titikaka. *Ecología aplicada*, 2(1). ISSN 1726-2216.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (11 de enero de 2006). *Décima Sexta Época*.
- Acuerdo por el que se establece los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89. (14 de diciembre 1989).
- García E. (1988) Los climas de México, Sistemas de Información Geográfica S.A, México, D. F., págs. 1-16.
- González F., Zoppi R. E. y Montiel E. (2006). Productividad primaria del fitoplancton en la bahía de Mochima, Venezuela. *Invest. Mar.* 34(2), 37-45, Venezuela.
- Guevara O. B. K., Ortega E. H. M., Ríos G. R., Solano E. y Vanegas R. J.M. (2015). Morfología y geoquímica de suelos de Xochimilco. *Terra Latinoamericana*, 33(4). 263-273.
- Hernández P. A. y Labbé J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>.
- Horak R. K. P. (2015). Evaluación del estado trófico de la costa sur de Tamaulipas. (*Tesis de Maestría*). Instituto Politécnico Nacional, Tamaulipas.
- IUSS Working Group WRB (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Jurado F. D. C. (2018). Evaluación de la biodisponibilidad de metales en sedimentos en relación a su contenido de materia orgánica en la zona chinampera de Xochimilco, Ciudad de México. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ledesma C., Bonansea M., Rodriguez C. M. y Delgado A. R. S. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciencia Agronomica*, 44(3), 419–425. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300002>.
- López L. E., Sedeño D. J. E., Ortíz O. E., Rosas C. M., & Abeja P. O. "Health condition assessment in lake Xochimilco" *Romanian Journal of Biology*, 55(1), 69-80, 2010.
- López M. M. T., Ramírez R. J. J., Palacio B. J. A., Echenique R. O., De Mattos B. C. E., y Parra G. E. A. (2016). Biomasa del fitoplancton eucariota y su disponibilidad para la red trófica del

embalse Riogrande II (Antioquia, Colombia). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 244. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.336>

- López M. Z., Tavera R., y Novelo E. (2015). El fitoplancton de un canal de Xochimilco y la importancia de estudiar ecosistemas acuáticos urbanos. *TIP. Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 18(1), 13–28. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2015000100002.
- Magaña A. M. E. (2004). Distribución de nutrimentos y su efecto en el nivel trófico de la laguna Macapule, Sinaloa. (*Tesis de Maestría*). Instituto Politécnico Nacional, Sinaloa.
- Manrique R. E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas*, 12(1), 1-11.
- Meza González J. (2019). Evaluación Cualitativa De Los Contaminantes Orgánicos En Agua De Los Canales Del Área Natural Protegida De Xochimilco Tesis. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Mota A. A. J. (2012). UGR, Universidad de Granada. [En línea] Disponible en: <http://www.ugr.es/~mota/Parte2-Tema05.pdf>
- Moreno F. D. P., Quintero M. J. y López C. A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 75(1), 25–33. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716072>.
- Muñoz H., Orozco S., Vera A., Suárez J., García E., Neria, M. y Jiménez J. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(5), 59–74.
- Muciño M. R. E., Aguirre L. A. y Figueroa T. M. G. (2017). Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiología* 27(3), 281-291.
- Nemer E. N. (2013). Deterioro ambiental en Xochimilco: Lecciones para el cambio climático global. *Veredas Revista Del Pensamiento Sociológico*, 27, 117-197. <https://veredasojs.xoc.uam.mx/index.php/veredas/article/view/321>
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. “Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”. Diario Oficial de la Federación. 23 de abril de 2003.
- Ordóñez J. (2010). LIMNOLOGÍA DEL EMBALSE DE SAU Relaciones del zooplancton, la clorofila y los sólidos en suspensión con el clima lumínico del agua. (*Tesis Doctoral*). Universitat de Barcelona, España.
- Ortiz R. J. B. y Ruvalcaba G. A. (2005). Evaluación del estado trófico del lago de Xochimilco, Méx. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Pena N. L., Ferreira S. C. D. y Almeida de Souza M.A. (2004). Comportamento dos índices do estado trófico de Carlson (IET) e modificado (IET_M) no reservatório da UHE Luís Eduardo

Magalhaes, Tocantis-Brasil. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 6. <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/tocan.pdf>.

Rivera R. C., Zapata A., Pinilla G., Donato J., Chaparro B. y Jiménez P. (2005). Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. *Acta Biológica Colombiana*, 10(2), 95-110.

Rodó P. (06 de julio, 2019). <https://economipedia.com/definiciones/normalizacion-estadistica.html> Normalización estadística. Economipedia.com.

Rojas R. C. O. (2017). Evaluación anual de la productividad primaria y del contenido de clorofila "a" en el lago cráter, Atexcac, Puebla. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Rodríguez M. M. A. (1989). Estudio in situ de la degradación halofita de la *Salicornia subterminalis* y su relación de nutrientes a través de la interfase sedimento-agua en el sistema lagunar Huizache- Caimanero, Sinaloa, México. (*Tesis Doctoral*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Severiche S. C. y González G. H. (2012). Determinación de Fosfatos en Aguas por Método Colorimétrico. *QUÍMICA HOY CHEMISTRY SCIENCES*, 2(3), 28-32.

Shapiro J., Lundquist J.B. & Carlson R.E. "Involving the public in limnology: an approach to communication" *int. ver. theor. angew. limnol. verh.* 19: 866-874, 1975.

Silva J. J. C. (2017). Análisis de la política de saneamiento en San Gregorio Atlapulco, Xochimilco. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional Autónoma de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2017/diciembre/0769047/Index.html>.

Solorzano L. "Determination of Ammonia in Natural Waters by the Phenolhypochlorite Method" *Limnology and Oceanography*, 14, 799-801, 1969.

Sotomayor B. C. A. (2016). Análisis de la dinámica del oxígeno y el amonio en un sistema de recirculación con agua de mar, para el cultivo experimental de peces. (*Tesis de licenciatura*). Universidad Nacional Agraria. Lima-Perú.

Streit N., Ramírez M. L. G., Queiroz Z. L., Jacob L. E. y Queiroz M. (2015). Producción de pigmentos naturales (clorofila-a) en biorreactores agroindustriales. *Revista Ciencia y Tecnología*, 8(2), 27-34. ISSN 1390-4043.

Valenzuela V. Y. (2016). Evaluación del estrés oxidante en la tilapia *Oreochromis niloticus* de la zona lacustre urbano-agrícola de Xochimilco, D.F. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Xolalpa L. F. (2009). Monitoreo quincenal de clorofila a y parámetros fisicoquímicos en tres localidades de los canales de Xochimilco (el bordo, la virgen y el Japón) período 11 de agosto al 3 de noviembre 2008. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ANEXOS

Paraje	Estación de muestreo	Fosforo mg/L		Amonio mg/L		pH		Oxigeno mg/L		Temperatura °C		Clorofila en mg/L		TDS en ppm		Transparencia m	
		2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Puente de Urrutia	6A	8.80	3.4	S/D	0.66	7.76	9.41	1.9	5.92	21.14	19.79	2.33	34.04	473	460	-0.45	-0.4
	6B	6.39	3.5	S/D	0.56	7.66	9.12	0.79	6.61	20.61	20.08	0.47	13.75	479	461	-0.45	-0.34
	6C	6.80	4.9	S/D	0.34	7.33	9.5	1.25	7	20.42	21.24	2.34	9.74	477	466	-0.4	-0.3
	13A	16.79	7.5	2.28	1.93	6.93	7.11	0.15	0.04	17.81	17	0.04	0.53	601	532	-0.6	-0.73
	13B	5.19	5.7	S/D	1.57	6.9	7.06	0.15	0.13	17.7	16.99	0.01	0.01	581	515	-0.7	-0.5
	13C	7.94	5.5	S/D	0.72	7.67	7.58	0.7	0.09	21.39	18	1.41	12.44	524	486	S/D	-0.4
	20A	20.23	3.4	1.33	1.17	8.12	8.12	1.3	5.83	19.58	22.54	5.19	48.12	475	474	-0.45	-0.3
	20B	7.96	4.7	1.55	1.94	7.75	7.95	0.21	3.91	20.07	22.18	0.52	22.47	396	476	-0.4	-0.3
	20C	4.78	4.6	1.27	3.04	8.01	7.97	1.24	3.78	20.21	23.01	1.89	6.06	473	475	-0.35	-0.4
Telcatitla	2B	7.27	6.4	3.12	2.54	7.23	6.6	0.04	0.15	18.04	16.42	0.30	0.03	740	564	-0.5	-0.3
	2C	6.35	5.1	2.13	0.66	7.35	6.56	0.07	0.14	19.22	18.48	3.28	0.33	565	517	-0.48	-1.48
	2D	6.73	10.9	2.56	0.09	7.07	7.6	0.07	1.28	18.77	19.58	2.04	0.42	565	1078	-0.67	-0.4
La espejera	4A	8.31	7.6	6.65	3.72	7.51	7.05	S/D	0.07	16.4	16.38	2.49	0.38	673	748	-0.3	-0.9
	4B	11.27	8.9	8.2	2.63	7.52	7.06	0.1	0.06	15.69	16.68	2.68	0.43	1411	905	-0.8	-0.5
	4C	17.25	11.2	12.03	2.06	7.53	7.64	0.17	0.12	16.54	16.13	1.80	0.32	240	958	-0.45	-0.4
	19A	7.60	11.9	2.43	2.54	7.25	7.77	S/D	0.08	17.56	17.01	6.02	0.42	542	965	-0.6	-0.4
	19B	9.26	10.7	3.66	2.35	7.37	7.75	S/D	0.54	17.42	16.28	13.23	1.23	663	939	-0.4	-0.35
	19C	6.84	11.2	2.59	2.13	7.08	7.47	S/D	0.11	17.37	16.54	14.53	0.22	847	941	-0.3	-0.4
Coapatitla	9A	6.56	4.8	2.99	4.16	7.6	7.5	1.02	0.14	20.19	19.36	3.79	1.43	813	606	-0.3	-0.5
	9B	7.06	4.9	3.19	4.24	7.5	7.45	0.34	0.16	19.8	19.37	0.26	1.98	860	664	-0.5	-0.5
	9C	6.70	5.8	3.55	2.74	7.4	7.7	0.22	0.16	19.99	19.2	3.77	1.42	777	703	-0.3	-0.6
Canal Nacional	5A	28.03	5.8	2.31	4.61	7.32	7.07	0.57	0.13	19.66	17.91	3.72	0.97	862	815	-0.38	-0.7
	5B	4.33	8	S/D	3.28	7.49	7	0.39	0.15	19.46	18.7	2.41	1.87	881	593	-0.4	-0.6
	5C	6.72	5	3.11	6.18	7.02	7.03	S/D	0.12	17.71	18.53	28.09	0.11	1108	603	-0.42	-0.7

S/D= Sin dato

Anexo 2

Paraje	Estación de muestreo	Fosforo		IET Clorofila		IET Transparencia	
		2018	2019	2018	2019	2018	2019
Puente de Urrutia	6A	64	76	109	138	76	78
	6B	68	76	92	129	76	81
	6C	67	71	109	125	78	83
	13A	56	66	63	93	71	68
	13B	71	70	50	53	68	74
	13C	65	70	104	127	66	78
	20A	54	76	118	142	76	83
	20B	65	72	93	134	78	83
	20C	72	72	107	120	80	78
Telcatitla	2B	66	68	87	63	74	83
	2C	68	71	113	88	75	55
	2D	67	61	108	91	69	78
La espejera	4A	65	66	110	89	83	64
	4B	61	64	111	91	66	74
	4C	56	61	106	87	76	78
	19A	66	60	120	91	71	78
	19B	63	62	128	102	78	80
	19C	67	61	129	83	83	78
Coapatitla	9A	68	72	115	104	83	74
	9B	67	71	85	107	74	74
	9C	68	69	114	104	83	71
Canal Nacional	5A	50	69	114	100	79	68
	5B	73	65	110	107	78	71
	5C	67	71	136	75	77	68