

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

INFORME FINAL DE SERVICIO SOCIAL POR INVESTIGACIÓN

**“Ictiofauna endémica y alóctona de la Zona
Lacustre de Xochimilco”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGA

PRESENTA

Ana Alicia Landini García

Matrícula: 2163066119

ASESORES:

Dra. Gabriela Vázquez Silva - (No. Eco.30288)
Laboratorio de Limnobiología y Acuicultura

Biol. Ana Karen López de la Rosa - (No. de Céd 12194410)
Laboratorio de Limnobiología y Acuicultura

CDMX

Octubre, 2023

RESUMEN

La Zona Lacustre de Xochimilco forma parte de los remanentes del ecosistema acuático de la cuenca del Valle de México, que se caracteriza por la gran biodiversidad de peces nativos que habitan en ella. Al ser considerada patrimonio cultural y natural de la humanidad, forma parte de los humedales considerados de importancia a nivel internacional. Sin embargo, la introducción de especies exóticas invasoras, la pérdida de hábitat y la contaminación causada por la urbanización han causado la extirpación e inclusive extinción de la fauna nativa. Se considera de vital importancia la caracterización de la ictiofauna local, no sólo para mantener un registro actualizado de la riqueza y abundancia de peces, sino también para correlacionar la presencia o ausencia de determinadas especies con la calidad del agua, mediante su uso como bioindicadores. El presente estudio fue realizado a partir de la base de datos obtenida a través del muestreo del Lago de San Gregorio Atlapulco y los Canales de Xochimilco entre los años 2017-2019, en el cual se registraron datos de riqueza y abundancia de peces, con la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua. Para el análisis de la información obtenida se utilizaron índices de diversidad alfa y beta y se desarrolló un Índice de Integridad Biótica para determinar la calidad del agua según las especies encontradas. Los resultados reportaron una riqueza de 8 especies en el Lago de San Gregorio Atlapulco siendo el guppy *Poeciliopsis reticulata* (41.50%) el pez más abundante, se destaca que fue en este cuerpo de agua el único sitio donde se encontró al mexclapique *Girardinichthys viviparus* (19.46%), especie nativa particularmente sensible a la contaminación. En los Canales se registraron 11 especies de las cuales el charal de Xochimilco *Chiostoma jordani* tuvo la mayor abundancia (30%), seguida por el guatopote manchado *Heterandria bimaculata* (21%). Se puede concluir que, aunque el Lago de San Gregorio Atlapulco fue un área menos diversa, la presencia del mexclapique indica que este tiene las condiciones más favorables para la vida silvestre acuática.

Palabras clave: bioindicadores, Ciudad de México, humedales, integridad biótica, peces, Xochimilco.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.4. Aspectos generales de la Zona Lacustre de Xochimilco	6
2.5. Antecedentes geológicos	6
2.6. Antecedentes hidrológicos	7
2.7. Ictiofauna de la Zona lacustre de Xochimilco	9
2.7.1. <i>Especies endémicas de la Zona Lacustre de Xochimilco</i>	10
2.7.2. <i>Especies alóctonas de la Zona Lacustre de Xochimilco</i>	11
2.5 Bioindicadores	13
2.5.1 <i>Clasificación</i>	14
2.5.2 <i>Criterios de selección</i>	15
2.5.3 <i>Índices bióticos</i>	15
2.5.4 <i>Peces como bioindicadores</i>	16
2.6. Propiedades fisicoquímicas del agua	17
3. HIPÓTESIS	18
4. OBJETIVO GENERAL	19
4.1 <i>Objetivos particulares</i>	19
1. MATERIALES Y MÉTODOS	20
5.1 Área de estudio	20
5.2 Análisis biótico de la calidad del agua	21
5.2.1 <i>Diversidad alfa</i>	21
5.2.2 <i>Diversidad beta</i>	23
5.2.3 <i>Análisis biótico de la calidad del agua</i>	24

5.3 Análisis de los parámetros fisicoquímicos y caracterización visual de los sitios	
	25
6. RESULTADOS	26
6.1 Diversidad ictiofaunística de la ZLX	26
6.2 Análisis biótico de la calidad del agua	30
6.3.1 <i>Panorama general de la zona lacustre</i>	34
6.3.2 <i>Análisis de agrupación de los Parámetros fisicoquímicos de la ZLX</i>	37
7. DISCUSIÓN	39
7.1 <i>Diversidad ictiofaunística en la ZLX</i>	39
7.2 <i>Calidad biótica del agua</i>	40
7.3 <i>Caracterización fisicoquímica</i>	42
8. CONCLUSIONES	44
9. LITERATURA CITADA	45

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales abarcan una parte relativamente pequeña de la superficie terrestre, pero son esenciales para la vida humana; ya que en ellos se encuentran los ecosistemas más productivos del planeta, los cuales proveen de un diverso número de servicios ecosistémicos (Ramsar, 2018): Destaca su función en la regulación del ciclo hidrológico, la reducción del riesgo e intensidad de los desastres naturales, su importancia en mantener la seguridad alimenticia, así como su valor en materia de biodiversidad, por mencionar algunos ejemplos. A pesar de su importancia, los humedales son los ecosistemas más amenazados a nivel mundial, con una pérdida media del 60% del área ocupada por los mismos. Se estima que en México esta pérdida es del 62%, tasa que continúa incrementando año con año, a pesar de que el país posee el mayor número de humedales protegidos a nivel internacional (Landgrave y Moreno-Casasola, 2012; Mauerhofer *et al.*, 2015).

Uno de los ejemplos más importantes de la estrecha relación entre los asentamientos humanos y los humedales es la Zona Lacustre de Xochimilco (ZLX), que se encuentra ubicada en el sureste de la Ciudad de México y representa los últimos remanentes de los humedales que abarcaban gran parte de la cuenca del Valle de México. Desde tiempos prehispánicos, este ecosistema ha dado sustento a la población de la Ciudad de México y localidades aledañas, en gran medida por el establecimiento de la chinampería, que fue por siglos un eficiente sistema de producción agrícola. También es una fuente valiosa de animales silvestres comestibles tales como aves, anfibios, invertebrados y peces; que fueron por siglos la principal fuente de alimentación de la población humana del Valle de México (Rojas, 1985, cit. por Bojórquez y Arana, 2014). El Centro Histórico y las chinampas de Xochimilco tienen la distinción de ser consideradas como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y de ser incluida por la Convención Ramsar en los humedales de Importancia Internacional (Ramsar, 2004).

A partir del establecimiento de los primeros grupos humanos, la ZLX ha pasado por un gran número de cambios hidrológicos, los cuales están representados por la fase del lago que estuvo caracterizada por una degradación ambiental mínima, que se reflejaba en la excelente calidad del agua y la alta diversidad biológica; y la fase de canales, en la que el crecimiento poblacional, la urbanización y la demanda por recursos hídricos; redujo significativamente el área abarcada por lagos y tuvo gran impacto en las características físicas, químicas y biológicas de la ZLX (Bojórquez, 2017). El proceso de degradación de la ZLX se ha exacerbado con el paso de las décadas: la desecación del humedal, la contaminación presente y la introducción de especies exóticas invasoras, ha provocado la extinción de un número sustancial de

especies nativas (Bojórquez y Arana, 2014). La ictiofauna nativa se ha visto particularmente afectada, al grado que su distribución ha quedado restringida a las áreas mejor conservadas del humedal; por lo que la presencia de estas especies es considerada de gran importancia para la evaluación del estado de salud de la ZLX.

El monitoreo es la pieza central para realizar la evaluación del estado o calidad de los factores físicos y químicos dentro de un ecosistema. Los datos obtenidos a través del monitoreo pueden venir de diversas fuentes; tanto de factores abióticos como de los componentes bióticos, en una variedad de escalas temporales y espaciales. A los organismos que son utilizados para evaluar la calidad de los ecosistemas se les denominan indicadores biológicos o bioindicadores (Burger, 2006). Un número considerable de organismos pueden ser usados como indicadores biológicos, los peces son considerados excelentes para evaluar el estado de salud de los ecosistemas acuáticos, debido a la amplia información disponible su biología, los requerimientos ambientales que necesitan y las características de su hábitat a lo largo de los años (Markert *et al.*, 2003).

Debido a la creciente degradación de la ZLX, resulta necesario realizar un monitoreo constante de su estado de salud ecosistémica. Al ser un ecosistema del que se conoce ampliamente su evolución histórica, puede beneficiarse ampliamente del uso de bioindicadores acuáticos, particularmente ictiofaunísticos; al tener especies nativas sensibles a la contaminación, cuya biología está bien descrita. Es por ello que, la importancia de este estudio va más allá de simplemente tener un registro de la composición de la comunidad de peces presentes, la información proporcionada por la ictiofauna endémica y alóctona; aunada a los factores físicos y químicos de la zona, permiten un análisis integral del impacto causado por la actividad antrópica.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.4. Aspectos generales de la Zona Lacustre de Xochimilco

La ZLX se encuentra ubicada en el sureste de la Ciudad de México, abarcando principalmente el centro y norte de la alcaldía Xochimilco, así como el oriente de la alcaldía Tláhuac, colinda al norte con Iztapalapa y Coyoacán y al noroeste con Tlalpan, limitando con aproximadamente 49 colonias ubicadas dentro de las alcaldías mencionadas con anterioridad (Bojórquez y Arana, 2014). Comprende el Área Natural Protegida (ANP) conocida como “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, la cual abarca una extensión de 2,657 ha de superficie y una red de 180 km de canales, que fue establecida como una zona prioritaria de preservación y conservación del equilibrio ecológico en el año 1992 (DOF, 1992; Meléndez-Herrada y Romero, 2010). Este sistema es parte del área conocida como Ecosistema Lacustre de Xochimilco (ELX), la cual está delimitada por un rectángulo que forma una red irregular de canales y algunas lagunas de Xochimilco, San Gregorio Atlapulco y San Luis Tlaxialtemalco, que son remanentes del extinto Lago de Xochimilco (Bojórquez, 2017). Fisiográficamente, se ubica en la provincia del Eje Neovolcánico; Subprovincia de Lagos y Volcanes Anáhuac.

2.5. Antecedentes geológicos

Se estima que el proceso de formación de la cuenca del Valle de México comenzó entre el periodo terciario superior e inicios del cuaternario, debido a un aumento significativo de la actividad volcánica en la zona; la cual dio origen a la Sierra de Chichinautzin, la cual cerró la cuenca y obstruyó el drenaje al Río Balsas; transformándola en un cuerpo de agua endorreico (Ramsar, 2004; Santoyo *et al.*, 2005 cit. por Guevara-Olivar *et al.*, 2015). Este almacenamiento de agua permitió la formación de diversos tipos de lagos, que poseían una composición química compleja, debido a los conos de deyección depositados por los ríos de sierras cercanas; los cuales llenaron la zona lacustre con distintos tipos de acarreo: 1) limo-arenosos, 2) limo-arcillosos y 3) cenizas y pómez provenientes de los volcanes aledaños (Santoyo *et al.*, 2005 cit. por Guevara-Olivar *et al.*, 2015). Se teoriza que la transición de los suelos de tipo ígneo a suelos idóneos para la producción agrícola se dio por la translocación de arcillas, proceso que comenzó en un periodo de estabilidad iniciado desde la formación de los grandes lagos; que, aunque de carácter somero, mantuvieron corrientes suaves e intermitentes, debido a los períodos glaciales e interglaciares (Guevara-Olivar *et al.*, 2015).

El cambio drástico en las características físicas y químicas de los lagos comenzó en los años cuarenta, con la transformación de la mayoría de estos a

canales; influenciados principalmente por la acelerada e irregular urbanización de Xochimilco, que llevó al cambio en el uso de suelo con tal de acomodar las necesidades urbanas, por lo que la zona lacustre y chinampera se llenó de casas, calles y puentes, particularmente en el centro de la alcaldía. La degradación ambiental se desarrolló de forma distinta en los canales y los remanentes de los lagos, debido a que este proceso de urbanización avanzó en menor escala en poblados productivos como San Gregorio Atlapulco, concentrándose principalmente en la zona montañosa de la alcaldía (Avendaño-García *et al.*, 2019).

2.6. Antecedentes hidrológicos

Las propiedades hidrológicas de la ZLX han cambiado significativamente a lo largo de las décadas, viéndose fuertemente influenciadas por las características socioculturales de la población presente, así como el uso que se le daban a los recursos que se obtenían de ella; manteniéndose como un lugar de importancia considerable para la región centro del país (Orozco *et al.*, 2008). Para facilitar su estudio, la evolución hidrológica se divide en dos fases principales: 1) La fase de lago, la cual comprendió el período posclásico de la época prehispánica, la época colonial; así como los gobiernos formados tras la independencia, hasta parte del Porfiriato y 2) La fase de canales, que comenzó en la última década del Porfiriato y continúa hasta la actualidad (Bojórquez y Arana, 2014).

Durante la fase de lago, las aguas del ELX eran alimentadas por diversos ríos y 14 manantiales, encontrándose limpias y con gran diversidad de peces y otros animales comestibles; características que favorecieron el asentamiento de diversos grupos humanos (Alatriste, 2005; Bojórquez y Arana, 2014). Los primeros en realizar modificaciones significativas al lago fueron los Xochimilcas, quienes implementaron la chinampería; un tipo de agroecosistema formado por plataformas rectangulares (actualmente isletas de forma irregular que se asentaban al fondo del lago, las cuales se rellenaban con rocas, lodos del mismo lago, plantas acuáticas y otros materiales; su estructura era protegida por entretejidos de materiales vegetales sujetas a postes y cultivos de ahuejote (*Salix bonplandiana*) para evitar la erosión. La irrigación de las chinampas era efectuada por filtración, que permitió el desarrollo de una agricultura basada en la siembra de diversas hortalizas y flores nativas, independiente del régimen de lluvias (Alatriste, 2005; Quiñónez-Amezquita, 2005; Arcos y Vergara, 2012). La llegada de los Mexicas supuso otra serie de cambios en el ELX, debido a que, bajo sus órdenes, se efectuó el drenado de los pantanos de Xochimilco (separándolo artificialmente del lago de Chalco) y se construyeron nuevas chinampas que modificaron el fondo del lago de manera tal que formaron isletas angostas separadas por canales; creando así una red sistemática de canales, chinampas y lagunas (Alatriste, 2005). Para el año 1884, durante la parte inicial del

Porfiriato, la ZLX se había reducido a un espejo de aproximadamente $45\ km^2$ y comenzó la introducción de especies no nativas, con fines de ornato y de alimentación; tales como *Eichornia crassipes* (lirio acuático) y varios miembros de las familias *Cyprinidae*, siendo la primera introducida *Cyprinus carpio* (carpa barrigona) y la familia *Salmonidae* (truchas) tales como *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris) y *Salvelinus fontinalis* (trucha de arroyo) (Arcos y Vergara, 2012; Bojórquez y Arana, 2014).

La fase de canales se caracteriza por la desaparición del lago y su conversión total en una red canales, así como de un progresivo declive ecológico; el cual continúa hasta nuestros días (Bojórquez y Arana, 2014). Durante el Porfiriato, incrementó la demanda de agua de la Ciudad de México, por lo que para el año 1900 se comenzaron a bombear los manantiales más profundos y de mayor tamaño, extracción que llevó a que en 1950 estos dejarán de alimentar a las lagunas y canales; sin embargo, la explotación irracional de los recursos continuó, esto debido a la acelerada urbanización de la cuenca del Valle de México. En el año 1985 ya se extraían 7,700 litros por segundo de los 213 pozos existentes, cantidad que duplica la capacidad del acuífero para recuperarse (Alatriste, 2005; Arcos y Vergara, 2012). También hubo cambios drásticos en el uso de suelo, puesto que las chinampas comenzaron a ser utilizadas con fines industriales, ganaderos, habitacionales y recreativos; provocando que diversos contaminantes fueran introducidos por descargas de agua residual (Alatriste, 2005; Bojórquez, 2014), esto aunado al rápido crecimiento poblacional y de los asentamientos irregulares; reduciendo la calidad del agua cada vez más, al aumentar el número y clase de contaminantes presentes (Bojórquez *et al.*, 2017).

En la actualidad, la ZLX se encuentra reducida a planicies inundadas naturales y cuerpos de agua inducidos, presentes en las zonas agrícolas de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, alimentados por depósitos subterráneos; la zona aún es reconocida por su importancia ecológica, económica y cultural para la Ciudad de México, por lo que la UNESCO la declaró Sitio de Patrimonio Mundial y en el año 2004 fue integrada a la lista Ramsar de humedales de importancia internacional (Ramsar, 2004). A pesar de estas denominaciones, la degradación ambiental de la ZLX ha ido en aumento; por la urbanización descontrolada, la cual provoca cambios en las características edáficas; el pobre manejo de los recursos hídricos; la contaminación proveniente de la actividad antrópica, tanto de origen doméstico como industrial, y la introducción de especies exóticas invasoras (Ramsar, 2004; Bojórquez *et al.*, 2017).

2.7. Ictiofauna de la Zona lacustre de Xochimilco

Antes de hablar de la ictiofauna de esta región, es conveniente definir términos importantes que permiten entender de forma adecuada el estado actual de las distintas especies que habitan las aguas de la ZLX:

- I. **Extirpación:** Se refiere a la desaparición a nivel local de la población de una especie determinada. A pesar de que exista la posibilidad de reintroducir a dicha especie al hábitat de donde desapareció, esto sería en vano si los factores que llevaron a su extirpación persisten o han empeorado (Bojórquez y Arana, 2014). Entre las especies extirpadas de la ZLX se encuentran *Menidia humboldtanium* (charal de Xochimilco), *Algansea tincella* (xohuilin) y *Aztecula sallei* (carpita azteca) (Miller *et al.*, 2005; Bojórquez y Arana, 2014; Maiz-Tome, 2019)
- II. **Extinción:** Se considera que una especie está extinta cuando todos los individuos de esta han desaparecido definitivamente, principalmente por cambios drásticos en su entorno a los que la especie no logró adaptarse a tiempo, y una vez que desaparece no hay posibilidad alguna de recuperarla (Castellanos, 2006; Bojórquez y Arana, 2014). Aunque la extinción es un proceso natural, multifactorial, y el destino final de todas las especies; se debe reconocer que en la actualidad el hombre es el principal agente causal de la extinción de especies, siendo responsable de la extinción masiva más rápida de la historia (Castellanos, 2006). Entre los taxones extintos de la ZLX se encuentran todas las especies del género *Evarra*: *E. bustamantei* (carpa xochimilca), *E. eigenmannii* (carpa verde) y *E. tlahuacensis* (carpa de Tláhuac, todas especies endémicas, que llevan décadas sin avistamiento alguno (Miller *et al.*, 2005; Bojórquez y Arana, 2014; Mejía Guerrero, 2019).
- III. **Intrusión:** Entrada de especies ajenas a determinado hábitat, ya sea de forma accidental o con algún propósito (usualmente alimenticio y ornamental). Aunque no todas las especies alóctonas logran establecerse con éxito, aquellas que lo hacen causan daños notables a las zonas donde fueron introducidas. Una gran cantidad de ictiofauna fue introducida a la ZLX, pero destacan *Cyprinus carpio* (carpa común) y *Oreochromis niloticus* (tilapia) por lo destructiva que ha resultado su presencia para este hábitat (Bojórquez y Arana, 2014).

2.7.1. Especies endémicas de la Zona Lacustre de Xochimilco

Desde tiempos prehispánicos; la ictiofauna de la ZLX ha tenido gran importancia para las poblaciones humanas de la zona; puesto que diversas especies son utilizadas como fuente de alimento (Miller *et al.*, 2005). Sin embargo, la diversidad de peces ha declinado rápidamente, debido a su sensibilidad a la contaminación; encontrándose únicamente en las zonas más preservadas de la ZLX, como el Lago de conservación (Vázquez Silva *et al.*, 2017) y por la presencia de especies exóticas invasoras, con las que compiten por recursos y que en muchas instancias los depredan. Es por esto que, de los endemismos que alguna vez habitaron en la ZLX, solo persistan dos especies (Arana *et al.*, 2006; Vázquez-Silva *et al.*, 2017).

Los charales son un grupo de especies de importancia económica, social, cultural y ecológica en el centro de México. El charal de Xochimilco *Menidia jordani* (antes *Chiostoma* Woolman, (1894)) es un endemismo del Centro de México, particularmente del eje Neovolcánico. Habita en lagos, charcas y canales poco profundos, en aguas claras, turbias o lodosas (Miller *et al.* 2005, Bojórquez y Arana, 2014); se alimenta principalmente de zooplancton, insectos, peces pequeños y en ocasiones de caracoles. El charal de Xochimilco se encuentra en peligro de extinción debido a los cambios ambientales de la ZLX y su alta demanda en los mercados locales, lo que incita a los pescadores a capturar individuos indiscriminadamente (Olvera-Blanco *et al.*, 2009).

El mexclapique *Girardinichthys viviparus* (Bustamante, 1837) es una especie cuya distribución se limita casi exclusivamente a la Ciudad de México y estados cercanos, como el Estado de México e Hidalgo (Navarrete *et al.*, 2004). Miller y colaboradores (2005) reportaron que este pez apenas sobrevivía en Zumpango; pero no se le encuentra únicamente en la ZLX; sino también persiste en otros cuerpos de agua de la Ciudad de México, tales como los tres lagos de Chapultepec (Navarrete *et al.*, 2004; Bojórquez y Arana, 2014; Koeck, 2019). Se le puede encontrar tanto en aguas lóticas como lénicas, y aunque es primordialmente dulceacuícola, también habita en cuerpos de agua de considerable salinidad e incluso en diferentes calidades de agua; pero no en aquellas de desecho doméstico e industrial. Al igual que con *M. jordani*, los causantes de su declive poblacional son el deterioro de los cuerpos de agua y su explotación para el consumo humano (Navarrete *et al.*, 2004; Bojórquez y Arana, 2014). De los peces de la ZLX, este es el único que se encuentra bajo la protección de la NOM-069-SEMARNAT-2010; considerado como una especie en peligro de extinción (P).

2.4.2 Especies alóctonas de la Zona Lacustre de Xochimilco

La acuicultura es la principal causa de introducción de especies alóctonas; no todas las especies introducidas tienen un impacto notable en el hábitat al que llegaron, pero un gran número de ellas provocan cambios ecológicos y económicos. La mayoría de estas especies son introducidas de forma intencional; usualmente por motivos monetarios y sin consideración alguna por las consecuencias biológicas causadas; aunque muchas de ellas también son traídas de forma accidental (Pérez *et al.*, 2006).

Numerosas especies fueron introducidas con fines alimenticios y de ornato; sin embargo, no todas lograron establecerse de manera satisfactoria, esto fue el caso para *Ctenopharingodon idella* (carpa herbívora), *Hipophthalmichthys molitrix* (carpa plateada) y *Poecilia reticulata* (guppy) las cuales no han sido observadas en tiempos recientes (Bojórquez y Arana, 2014; Vázquez-Silva, 2017). Sin embargo, aquellos que lograron proliferar, han representado una amenaza significativa para la integridad ecosistémica de la ZLX. Del listado de peces alóctonos mostrados anteriormente (Cuadro 1), es conveniente resaltar algunas especies de particular importancia, ya sea por el valor alimenticio que poseen y/o por el daño que ocasionan al ecosistema de la ZLX.

La carpa común (*Cyprinus carpio*, Linneo 1758) procede de Europa oriental, específicamente de las cuencas del mar Negro, Azov y Caspio; además es posible encontrarla en Asia, desde la cuenca de Aral hasta la del Río Amur en China; sin embargo, ha sido introducida en África, América del Norte y América del Sur (Bojórquez y Arana, 2014). A pesar de que posee valor alimenticio, es considerada una plaga, ya que se le asocia con cambios a los ecosistemas acuáticos en donde se le ha introducido, ya que sus hábitos alimenticios sedimentarios enturbian el agua, acarreando graves consecuencias para las especies nativas (Zambrano *et al.*, 2001). Espinoza y colaboradores (cit. Por Bojórquez y Arana, 2014) mencionan que fue introducida en 1872 en la ZLX y que en 1903 se les encontraba con abundancia en la zona. La carpa es principalmente utilizada para el consumo humano, pero ha resultado ser perjudicial para la salud del hombre, debido a que es vector de organismos causales de diversas enfermedades zoonóticas, parasitosis médica y parasitosis clínica (CONABIO, 2014; Arias *et al.*, 2016).

Cuadro 1. Peces alóctonos de la Zona Lacustre de Xochimilco, modificado de Arana et al. (2006) y Vázquez-Silva et al. (2017).

Familia	Especie	Nombre común	Estado actual	Procedencia
Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i>	carpa común	P	Asia (1872)
	<i>C. carpio specularis</i>	carpa Israel	P	Israel (1960)
	<i>C. carpio</i>			
	<i>rubrofuscus</i>	carpa barrigona	P	Asia (antes de 1987)
	<i>Carassius auratus</i>	carpa dorada	P	Asia (antes 1950)
	<i>Ctenopharingodon idella</i>	carpa hervíbora	D	Asia (antes de 1987)
Goodeidae	<i>Hipophthalmichthys molitrix</i>	carpa plateada	D	Asia (antes de 1987)
	<i>Goodea atripinnis</i> *	burrito	P	México (2007)
Poeciliidae	<i>Xiphophorus helleri</i>	cola de espada	P	México (antes de 1970)
	<i>Xiphophorus variatus</i>	platy	P	México (antes de 1970)
	<i>Heterandria bimaculata</i>	guatopote		
	<i>Poecilia reticulata</i>	manchado	P	México (1985)
	<i>Poecilia infans</i>	guppy	D	E.U (1985)
	<i>Poecilia gracilis</i>	guatopote del Lerma	P	México (año desconocido)
Centrarchidae	<i>Micropterus salmoides</i>	guatopote jarocho	P	México (año desconocido)
		lobina negra	A	E.U (1955)
Cichlidae	<i>Lepomis macrochirus</i>	mojarra agalla azul	P	E.U (1955)
	<i>Oreochromis niloticus</i>	tilapia del Nilo	P	África (antes del 2000)
Salmonidae	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	trucha arcoíris	A	E.U (Finales del s. XIX)
	<i>Salvelinus fontinalis</i>	trucha de arroyo	A	E.U (Finales del s. XIX)

P=Presente; D=Desconocido; A=Ausente. * *Goodea atripinnis* tiene amplia distribución en México, se cree que llegó antes de 2007 junto con un lote de tilapias (Bustamante, 2007).

La tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*, Linneo 1758) es un pez nativo de África tropical, subtropical y de Medio Oriente, encontrándose en el río Nilo, así como en los ríos costeros de Israel, respectivamente, pero ya se ha establecido exitosamente en todos los continentes, estando presente en un gran número de países (Froese y Pauly, 2016). En México fue introducida en el año 1964, en el centro piscícola de Temascal, Oaxaca; de un lote proveniente de la Universidad de Auburn, a partir de donde fueron transferidas a la presa Miguel Alemán; en la actualidad se distribuye en todos los estados de la República mexicana (INAPESCA, 2012; DOF,

2012). Existe evidencia de que la tilapia causa daños a los ecosistemas en los que es introducida, como la eutrofización (Global Invasive Species Database, 2012); sus hábitos alimenticios generalistas (es principalmente herbívora, detritívora y en menor medida carnívora) ejercen presión por competencia interespecífica y afectan el éxito reproductivo de anfibios y peces; al alimentarse de los huevos y estadios juveniles (Zambrano, 2006 cit. por CONABIO, 2014). También es vector de parásitos que comprometen la salud de otros peces, tales como *Cichlidogyrus dossoui*, *C. longicornis*, *C. sclerosus*, *C. tilapia*, *Dactylogyrus* sp., *Enterogyrus malmbergi*, *E. niloticus*, *Gyrodactylus cichlidarum*, *G. niloticus*, *G. yacatli*, *Scutogyrus longicornis* y *Bothriocephalus acheilognathi* (Salgado-Maldonado y Rubio-Godoy, 2014). Su presencia repercute en la producción pesquera, siendo considerada como de calidad inferior a otras especies (Wise et al., 2017 cit. por CONABIO, 2014); sin embargo, en países en vías de desarrollo es el pez más importante para la producción acuícola (Tenorio-Collín, 2003).

2.5 Bioindicadores

Los disturbios ocurren en los ecosistemas de forma natural y relativamente constante, lo que permite a los organismos adaptarse a los cambios ocasionados por dichos disturbios a lo largo de los años; estos estresores ambientales pueden ser de origen abiótico: como las variaciones climáticas y de la radiación solar y el régimen de incendios, y de procedencia biótica: tales como la presencia de parásitos, la competencia intraespecífica e interespecífica y las interacciones depredador-presa (Markert et al., 2003; González-Zuarth et al., 2014). Pero el ritmo con el que la actividad antrópica ha afectado la integridad de los ecosistemas, ya sea alterando el régimen e intensidad de los disturbios ambientales y/o introduciendo nuevos estresores previamente inexistentes, hace difícil que los seres vivos se adapten con rapidez suficiente a dichos cambios, llevando a gran cantidad de especies a su extinción (Markert et al., 2003; Burger, 2014); entre estas alteraciones se encuentra la reducción de área y la fragmentación de hábitats, la presencia sustancias orgánicas e inorgánicas tóxicas, la contaminación biológica y el cambio climático global (González-Zuarth et al., 2014; Bojórquez et al., 2017).

En la actualidad esta situación es un tema de especial preocupación, debido a que la mayoría de los ecosistemas del planeta presentan diversas magnitudes de deterioro ambiental; cuya severidad incrementará en las siguientes décadas, comprometiendo la salud ecosistémica; término que en general se refiere a un estado ideal al que se busca llegar a través del manejo ambiental (Constanza, 1992 cit. por Markert, 2003). Resulta cada vez más evidente que la prosperidad presente y futura de la sociedad, depende de los servicios ecosistémicos y por ende de la

capacidad humana de utilizar, proteger y restaurar el ambiente (Aguilar-Ibarra, 2005). Lo anterior ha llevado a la búsqueda y desarrollo de métodos precisos, económicos y sencillos que permitan la detección temprana de estresores ambientales, con tal de tomar las acciones adecuadas para su prevención, control y posible restauración de los ecosistemas afectados (González-Zuarth *et al.*, 2014). Uno de estos métodos es el monitoreo basado en el uso de los organismos vivos como indicadores de la salud ambiental; ya que estos tienen la característica fundamental de reaccionar a los disturbios ecosistémicos, independientemente de su origen; posibilitando la medición del impacto de las actividades antrópicas (Markert *et al.*, 2003).

Se define como indicador biológico o bioindicador a los organismos sensibles a cambios ambientales que sirven para obtener información acerca del estado de salud de un ecosistema; el muestreo y estudio de los bioindicadores permite evaluar el impacto de la influencia humana. Diversos organismos pueden considerarse bioindicadores, según el ecosistema de interés, como microorganismos, algas, líquenes, zooplancton, plantas, invertebrados y vertebrados terrestres y acuáticos (Markert *et al.*, 2003; García *et al.*, 2017). El término biomarcador se refiere a parámetros medibles en niveles celulares y moleculares, donde las alteraciones estructurales y funcionales permiten observar el efecto de sustancias nocivas en la biota; entre estos se resalta a los marcadores genómicos, proteómicos y metabólicos (conocidos como “omics”) así como los cambios histológicos y funcionales tras la exposición a sustancias tóxicas (Markert *et al.*, 2003).

2.5.1 Clasificación

Los bioindicadores se dividen en tres categorías, según el tipo de reacción del organismo ante la presencia de estresores ambientales (González-Zuarth *et al.*, 2014):

- I. **Detectores:** Este tipo de organismos muestran mayor tasa de mortalidad, alteraciones reproductivas y disminución de su abundancia ante la presencia de determinados estresores.
- II. **Explotadores:** Son los organismos que, ante la pérdida de competencia interespecífica o debido a la excesiva presencia de nutrientes enriquecedores, presentan un crecimiento poblacional significativo; por lo que el incremento en su abundancia es evidencia de dicha perturbación.
- III. **Acumuladores:** Se les denomina así a aquellos organismos que poseen resistencia a determinados contaminantes, siendo capaces de almacenarlos

en distintos tejidos; en concentraciones medibles y sin presentar daños histológicos notables.

2.5.2 Criterios de selección

La selección de especies como bioindicadores es crítica para realizar valoraciones ecológicas, monitorear y elaborar programas de remediación de forma adecuada (Burger, 2014; García *et al.*, 2017); esta depende del ecosistema que se busque evaluar y de los organismos presentes. Además, dicha selección debe estar fundamentada en los siguientes criterios (Li *et al.*, 2010; Holt y Miller, 2011):

- I. **Capacidad de reacción:** 1) Los bioindicadores deben ser lo suficientemente sensibles como para advertir de alteraciones en el hábitat, pero no al punto de detectar cambios biológicamente irrelevantes. 2) Debe advertir riesgos para toda la biota del ecosistema, no exclusivamente para su propio taxón. 3) La reacción del organismo al disturbio debe estar positivamente correlacionado con la magnitud de este. 4) Debe indicar la causa del disturbio y no únicamente su impacto y 5) Los cambios en el organismo deben ser rápidos para prevenir daños desproporcionados en el ecosistema.
- II. **Características de la población:** 1) Su abundancia debe permitir el muestreo periódico de forma tal que no afecte su población. 2) Debe tener una distribución amplia para que sea posible realizar comparaciones entre poblaciones diferentes. 3) Poseer baja movilidad para facilitar la identificación del disturbio.
- III. **Facilitación de estudio:** 1) La especie debe tener la resistencia suficiente como para permitir el manejo, así como su posterior transporte al laboratorio para su estudio. 2) Su identificación debe ser relativamente sencilla, incluso para personas sin experiencia en el taxón. 3) Los datos obtenidos a partir de ellos deben ser relativamente fáciles de interpretar. 4) El equipo utilizado para el monitoreo no debe ser complejo o costoso.
- IV. **Aplicaciones:** 1) Esta debe ser factible a nivel local y regional. 2) La información obtenida debe permitir la toma de decisiones rápidas y efectivas (Markert, 2003).

2.5.3 Índices bióticos

Desde la perspectiva biológica, el análisis de la calidad del agua es un proceso que involucra un gran número de variables complejas; es por ello que se han desarrollado diversos índices que permiten caracterizar la estructura de la

comunidad de especies bioindicadores en un ecosistema determinado. Los índices bióticos rápidos o protocolos rápidos de biovaloración, son considerados la herramienta más importante en la evaluación de los sistemas acuáticos. El más empleado es el índice de integridad biótica (IBI), pero también existen otros índices, tales como el índice Saprobiótico (S), Índice Biótico de Trent (TBI), la Clasificación Biótica de Chandler (CBS), Índice Biótico Extendido (IBE) e Índice de Fauna Danés (DFI) (Pérez-Mungía *et al.*, 2005).

El IBI posee dos características fundamentales: 1) El uso de parámetros que engloban la estructura, composición y organización funcional de una comunidad determinada, los cuales se denominan como “métricas” y 2) Expectativas cuantitativas para cada una de las métricas consideradas, obtenidas empíricamente y modificadas de acuerdo con las diferencias entre las comunidades existentes entre los ecosistemas (Lyons *et al.*, 2000).

En el año 2000, Lyons y colaboradores diseñaron el IBI preliminar para los lagos del centro de México, basados en ensamblaje de peces. Esta versión del índice toma en cuenta un total de diez métricas: 1) Número total de especies nativas, 2) Número total de especies nativas en común, 3) Número de individuos de *Goodeidae* sp. 4) Número de individuos de *Chirostoma* sp. 5) Número de especies nativas sensibles a cambios ambientales, 6) Porcentaje en biomasa de especies tolerantes, 7) Biomasa de especies exóticas 8) Biomasa de consumidores secundarios nativos 9) Máxima longitud estándar de las especies nativas y 10) Porcentaje de invertebrados parásitos exóticos.

2.5.4 Peces como bioindicadores

Los peces han sido ampliamente usados como bioindicadores, ya que poseen diversas características que los hacen útiles para hacer una evaluación integral de salud de un ecosistema (Markert *et al.*, 2003):

- Se conoce ampliamente los requerimientos ambientales de un gran número de especies, esto gracias al número de estudios ecológicos, fisiológicos y ecotoxicológicos realizados a lo largo de los años.
- Un gran número de variables ambientales abióticas, en diferentes escalas espacio-temporales, están íntimamente relacionadas con los requerimientos de hábitat de las especies presentes y sus etapas ontogénicas.
- Su tamaño facilita la realización de diferentes tipos de estudios. Por ejemplo, en estudios histopatológicos es posible evaluar los efectos de los contaminantes presentes.
- La longevidad de los peces permite analizar los efectos de procesos de acumulación, como la de metales pesados en los tejidos.

- Es posible conocer el estado original de su hábitat gracias a la existencia de registros históricos.
- El uso de peces como indicadores frecuentemente cumple con los requerimientos necesarios para hacer tanto análisis top-down (evaluar cambios en las comunidades e identificar las causas de posibles problemas existentes) como análisis bottom-up (utilizar datos de laboratorio para modelar cambios más complejos en el ecosistema natural).

Sin embargo, el uso de los peces como indicadores biológicos también tiene una serie de desventajas:

- Las alteraciones directamente relacionadas con las actividades pesqueras, como lo son la transferencia de especies, el cultivo de peces para su posterior liberación y la sobrepesca, dificultan la identificación de otras causas de degradación ambiental por actividades antrópicas (Chovanec *et al.*, 2003).
- La movilidad de algunas especies impide identificar el origen preciso de la contaminación, así como el tiempo y duración de esta exposición a contaminantes (Chovanec *et al.*, 2003). Además, la movilidad de los peces dificulta la recolección de especies, por lo que en ocasiones se requiere de gran cantidad de personal, numerosas herramientas y un tiempo prolongado de estudio para poder registrar variaciones diarias y estacionales (Fierro *et al.*, 2016).
- Factores como la depredación, competencia, parasitismo y la presencia de enfermedades, pueden complicar el análisis de las causas específicas de la degradación ambiental (Holt *et al.*, 2011).
- Son dependientes de la escala en que se realice el estudio, organismos como los peces podrían no ser ideales para caracterizar otras comunidades (ídem).

2.6. Propiedades fisicoquímicas del agua

Para realizar un análisis integral del estado de salud de un ecosistema dulceacuícola es necesario considerar características fisicoquímicas que permiten caracterizar un cuerpo de agua determinado, así como zonas específicas de interés para el estudio. Estos factores permiten identificar aquellas condiciones que favorecen la exacerbación de la contaminación ambiental y evaluar la calidad del agua (Bojórquez *et al.*, 2017).

La turbidez es una medida de la dispersión de la luz como consecuencia de la presencia de materiales suspendidos, ya sean coloidales y/o particulados (UPCT, 2008). Para los organismos acuáticos es idóneo que el agua sea lo más transparente posible; debido a que así, la luz solar llegaría hasta el fondo del cuerpo de agua,

permitiendo el crecimiento de macro y microfitobentos oxigenando toda la columna de agua (Bojórquez *et al.*, 2017). La presencia de organismos como *C. carpio*, ha aumentado la turbidez de las aguas de la ZLX debido a que se alimentan en el fondo de los cuerpos de agua y remueven el sedimento (CONABIO, 2014).

Existe una correlación directa entre el incremento de la temperatura del agua y la disminución de los niveles del oxígeno disuelto. Esto resulta perjudicial para aquellos organismos cuya reproducción depende de la temperatura, incrementa también la incidencia de florecimientos algales y aumenta la concentración de ciertos contaminantes cuyas interacciones a nivel molecular aumentan con la temperatura (UPCT, 2008). El pH es una medida de la acidez (presencia de iones hidrógeno) o la alcalinidad del agua. Puesto que es una propiedad importante que afecta a diversas reacciones metabólicas, los organismos acuáticos son extremadamente sensibles a los cambios en esta variable, y se considera que el intervalo ideal para los sistemas de agua dulce se encuentra entre 6.0 y 7.2; sin embargo, hay organismos capaces de tolerar valores de pH de entre 5.0 a 9.0 (UPCT, 2008).

Aunque son esenciales para el desarrollo de la vida acuática, el exceso de nutrientes provenientes del nitrógeno (N) pueden alterar la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, la eutrofización y la incorporación de niveles tóxicos que pueden afectar a las comunidades biológicas y a la salud humana, inclusive en muy bajas concentraciones. La mayor parte de estas moléculas provienen de procesos biogeoquímicos naturales, siendo los compuestos más comunes el amonio (NH_4), nitritos (NO^{2-}) y nitratos (NO^{3-}). El amonio es el compuesto más frecuente, debido a que proviene de procesos proteolíticos, y además la contaminación antrópica de origen agrícola o industrial puede aumentar significativamente la concentración presente de nitritos y nitratos (Cárdenas-Calvachi y Sánchez-Ortiz, 2013). El fósforo (P) es un macronutriente esencial, que en su forma elemental no se encuentra con frecuencia en la naturaleza, pero si está presente en forma de ortofosfatos, pirofosfatos, metafosfatos y polifosfatos en cuerpos de agua naturales y residuales (UPCT, 2008).

La dureza es otro componente importante del análisis de la calidad del agua, el estudio de este parámetro se divide en dureza general (la cantidad total de iones de calcio y magnesio en el agua) y dureza carbonatada (el número de iones de carbonato y bicarbonato de calcio y magnesio en el agua); a esta última se le conoce también como dureza temporal porque puede ser eliminada mediante el proceso de ebullición (UPCT, 2008).

3. HIPÓTESIS

El área que presentará mayor diversidad ictiofaunística y mostrará una mejor calidad del agua será el Lago de San Gregorio Atlapulco, ya que se encuentra en el

núcleo del Área Natural Protegida. Por el contrario, los canales de Xochimilco, al estar dentro de un área más perturbada, registrará una menor diversidad y signos de contaminación en el agua.

4. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la ictiofauna nativa y alóctona, así como su relación con la calidad del agua de la Zona Lacustre de Xochimilco.

4.1 Objetivos particulares

- Comparar la diversidad α y β entre en el Lago de San Gregorio Atlapulco y los Canales de la Zona Lacustre de Xochimilco.
- Realizar el análisis biótico de la calidad del agua de la Zona Lacustre de Xochimilco, de acuerdo con los criterios del Índice de Integridad Biótica (IBI).
- Identificar bibliográficamente el grado de tolerancia que presentan las especies registradas en la Zona Lacustre de Xochimilco.
- Integrar la información obtenida a partir de los factores físicos, químicos y biológicos de los puntos muestreados en la Zona Lacustre de Xochimilco.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó a partir de la revisión bibliográfica de las características geológicas, hidrológicas y bióticas del área de estudio; así como del análisis de la base de datos de la información obtenida a través del muestreo de los Canales de Xochimilco y el Lago de San Gregorio Atlapulco desde el año 2017 hasta 2019. Se analizó la composición de la comunidad de peces encontrada y los parámetros fisicoquímicos de los puntos de muestreo. El procesamiento de la base de datos fue realizado en Excel 2013 (v. 15.0) y R (v. 4.2.0).

5.1 Área de estudio

El Área Natural Protegida Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco se encuentra localizada en el área centro y norte de la alcaldía Xochimilco, así como en la parte sur de la Ciudad de México, abarcando un área de 2,522.43 ha (GODF, 2006). Presenta una temperatura media anual de 2-18 °C y precipitación total anual de 1,200 mm en años secos a 2,000 mm en años húmedos. Su clima es templado subhúmedo (Cwb) con precipitación abundante a finales de primavera e inicios del verano y sequías invernales (CONABIO, 2012). Se encuentra conformada por el Lago de San Gregorio Atlapulco, el cual es considerado como un ANP; y los Canales de Xochimilco, que son los siguientes: Pista de Remo y Canotaje Virgilio Uribe y su pista de retroceso, Cuemanco, El Bordo, Japón, Chicoco, Güerolodo, Laguna y Canal de Tlilac, Ampampilco, Paso del Águila, Laguna y Canal de Tezhuilo; Costepexpan, San Pedro, Amelaco, Laguna del Toro, Toltenco, Tlicuilli, La Asunción, El infiernito, Castillo, laguna y Canal La Virgen; Santa Cruz, Xaltocan, Caltongo, Turístico, Nativitas, Tochipa, Canal Nacional, Apatlaco y Cruxtitla (Zambrano *et al.*, 2019).

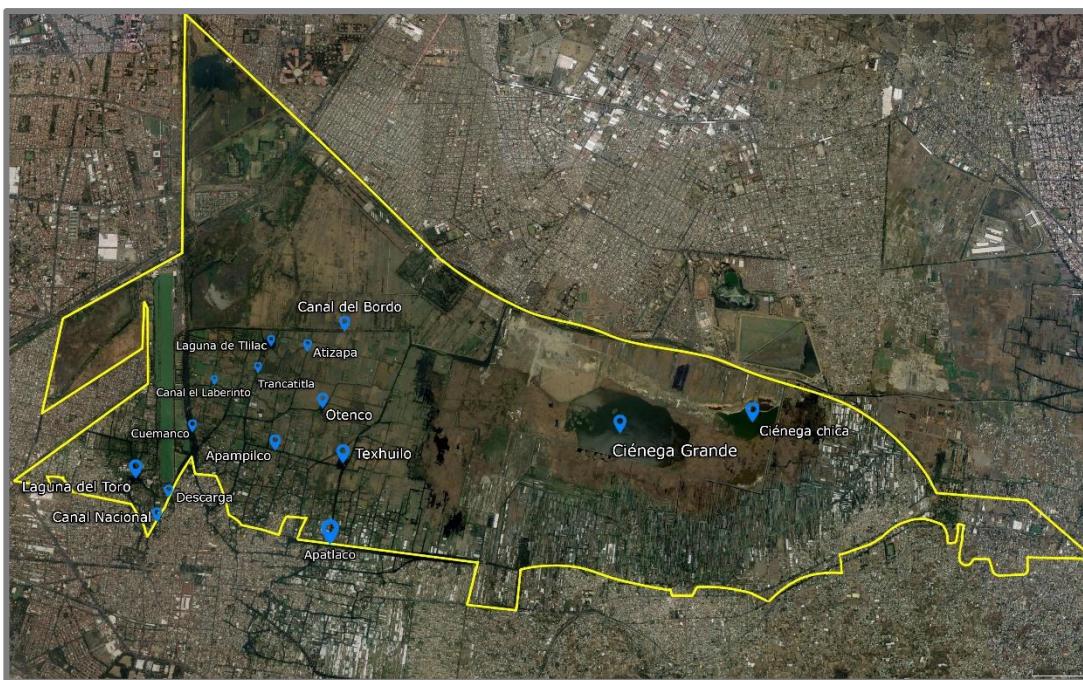


Figura 1. Mapa de la Zona Lacustre de Xochimilco, modificado de PAOT (2015) y Google Earth (2023)

5.2 Análisis biótico de la calidad del agua

Para esta investigación, se construyó el IBI para la ZLX, a partir de la riqueza y abundancia de especies nativas; la presencia de individuos de *Goodeidae* sp. y *Chirostoma* sp., el número de especies nativas sensibles a los contaminantes, así como la abundancia de especies exóticas invasoras. Con este fin, se utilizaron índices de diversidad alfa y beta útiles para el estudio de sistemas lenticos:

5.2.1 Diversidad alfa

Con el objetivo de entender los cambios de una comunidad de acuerdo con las variaciones del paisaje, se ha dividido su estudio en sus componentes básicos; la diversidad alfa representa la riqueza de especies en una comunidad determinada considerada como homogénea (Moreno, 2001).

Riqueza específica

Índice de Margalef: Supone que existe una relación entre el número total de especies y el número total de individuos $S = \sqrt[k]{N}$; si el valor de k no se mantiene constante, entonces el valor obtenido cambiará con el tamaño de muestra. Cuando existe una única especie, $D_{Mg} = 0$ (Moreno, 2001). Este índice resulta útil en los

estudios ictiofaunísticos debido a que es un indicador óptimo de la diversidad y es sensible a cambios en la comunidad por variaciones espacio-temporales, volviéndolo un parámetro valioso para la conservación de ambientes naturales (Ríos y Mazzoni, 2013).

$$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln \ln N}$$

Donde

S = Número de especies

N = Número de individuos

Acumulación

Modelo logarítmico: La probabilidad de hallar especies nuevas en un muestreo disminuye, conforme más especies son añadidas a la muestra, volviéndose eventualmente 0. Este modelo es idóneo para muestreos en zonas relativamente pequeñas y/o con taxones bien conocidos (Moreno, 2001).

$$E(S) = \frac{1}{z} \ln (1 + zax)$$

Donde:

a = Ordenada al origen. Representa la tasa de incremento del registro de especies al inicio del muestreo.

$z = 1 - \exp \exp (-b)$, Siendo b la pendiente de la curva.

x = Número acumulativo de muestras

Dominancia

Índice de Simpson: Representa la probabilidad de que dos organismos tomados al azar del total de registros pertenezcan a la misma especie, y está fuertemente influenciado por la importancia de las especies más dominantes (Moreno, 2001).

$$D = \sum p_{i^2}$$

Donde:

p_i = Abundancia proporcional de la especie i , es decir el número de individuos de la especie i divididos entre el número total de individuos de la muestra.

Equitatividad

Índice de Shannon-Weiner: Expresa la uniformidad de los valores relevantes considerando todas las especies muestreadas. Mide el grado promedio de incertidumbre al predecir a qué especie pertenece un individuo elegido al azar de la muestra. Sus valores van del 0, cuando hay una sola especie, hasta logaritmo de S , cuando las especies encontradas poseen el mismo número de individuos (Moreno, 2001). En estudios de ecosistemas acuáticos, se ha encontrado una correlación directa entre el valor de este índice y la contaminación orgánica presente en el cuerpo de agua (Pérez-Munguía *et al.*, 2005).

$$H' = - \sum p_i \ln p_i$$

5.2.2 Diversidad beta

El estudio de la diversidad beta, fue desarrollado con el objetivo de comparar el grado de cambio o reemplazo en la composición de especies entre diferentes paisajes. Estos índices pueden obtenerse con base en datos cualitativos o cuantitativos directamente (Moreno, 2001). Los índices cualitativos o de incidencia, son una medida que permite evaluar la similitud entre comunidades basados en presencia-ausencia de especies; los índices cuantitativos, se fundamentan en datos de abundancia (Espinosa, 2022).

Índices cualitativos

Índice de Jaccard: Permite evaluar la similitud entre comunidades utilizando datos de ausencia-presencia de especies (Moreno, 2001; Espinosa, 2022).

$$I_J = \frac{c}{a + b - c}$$

Donde:

a = Número de especies presentes en el sitio A

b = Número de especies presentes en el sitio B

c = Número de especies presentes en ambos sitios A y B

Índices cuantitativos

Índice de Sørensen para datos cuantitativos: Se expresa como un porcentaje de similitud y se fundamenta en datos de abundancia, por lo que puede disminuir el grado de similitud entre los sitios estudiados (Moreno, 2001; Espinosa, 2022).

$$I_{\text{Scuant}} = \frac{2pN}{aN + bN}$$

Donde:

aN = Número de total de individuos en el sitio A

bN = Número total de individuos en el sitio B

pN = Sumatoria del valor mínimo de abundancia de cada una de las especies compartidas entre ambos sitios.

5.2.3 Análisis biótico de la calidad del agua

Los criterios para caracterizar la comunidad ictiofaunística fueron fundamentados parcialmente en aquellos empleados por Lyons (2000) para la elaboración del Índice de Integridad Biótica (IBI) preliminar de los cuerpos de agua del centro de México. Las métricas elegidas se dividen en dos grupos, dependiendo si corresponden a diversidad de peces o a la abundancia de los mismos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Índice de Integridad Biótica (IBI) para la ZLX.

Criterios utilizados	
Tipo de Métrica	Métricas
Diversidad	Especies nativas
	Especies exóticas
	Especies sensibles
	Especies facultativas
	Presencia de <i>Girardinichthys viviparus</i>
	Presencia de <i>Cyprinus carpio</i>
Abundancia	Presencia de <i>Oreochromis niloticus</i>
	Abundancia de poecilíidos
	Abundancia de goodeídos
	Abundancia de <i>Girardinichthys viviparus</i>
	Abundancia de <i>Chiostoma jordani</i>
	Abundancia de <i>Cyprinus carpio</i>
	Abundancia de <i>Oreochromis niloticus</i>

Para medir los criterios utilizados, se desarrolló un sistema de puntuación de 0 y 10, de acuerdo con el impacto de la métrica en la calidad del agua. Las métricas de diversidad se enfocan en la presencia de especies sensibles a contaminantes, criterio que indica buena calidad del agua. Las métricas basadas en abundancia toman en consideración la abundancia media del total de peces encontrados. Este análisis fue aplicado por separado al Lago de SGA y a los Canales de Xochimilco, para después compararlos con la puntuación teórica esperada para un ecosistema con alta calidad del agua, creando un valor de referencia. Para obtener el valor del IBI se utilizó la siguiente ecuación:

$$IBI = \frac{PT}{PTt}$$

Donde:

PT = Puntaje total obtenido de la suma de las métricas para el Lago de SGA/ canales de Xochimilco

PTt = Puntaje total teórico esperado.

El resultado del IBI es un número en un intervalo de 0 a 1; entre más cerca se encuentre el valor obtenido para un cuerpo de agua determinado al 1, mayor será la calidad del agua para la vida silvestre. Además, con el objetivo de complementar los resultados de este análisis; se utilizó la correlación del valor del índice de Shannon-Weiner con el grado de contaminación ambiental en ecosistemas lenticos (Pérez-Munguía *et al.*, 2005).

5.3 Análisis de los parámetros fisicoquímicos y caracterización visual de los sitios

El análisis abiótico de la calidad del agua estuvo fundamentado en las diferencias registradas entre las diferentes zonas de estudio, por lo que se ubicó geográficamente los puntos de muestreo y se tomó en cuenta diversos factores fisicoquímicos tales como la temperatura del agua (°C), transparencia (cm), pH, nitratos (mg/L); oxígeno disuelto (mg/L); nitratos (mg/L); nitrógeno total (mg/L), amonio; (mg/L); fosfato (mg/L); dureza general y dureza carbonatada (mg/L). Debido a que las diferencias existentes entre los cuerpos de agua, particularmente en los canales, pueden ir más allá de su ubicación geográfica se elaboró un cladograma a partir de los resultados obtenidos; con el propósito de obtener información integral que facilitó el análisis de estos resultados.

6. RESULTADOS

6.1 Diversidad ictiofaunística de la ZLX

De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró la presencia de un total de 4,230 individuos pertenecientes a 12 especies, clasificadas dentro de 8 géneros y 5 familias (Cuadro 3). En el Lago de SGA se registraron un total de 930 individuos de 8 especies, pertenecientes a 5 familias; siendo *Poeciliopsis reticulata* la especie más abundante, con un total de 386 individuos (41.50% de la abundancia total), seguida por *Orechromis niloticus* con 253 individuos representando el 27.20% de abundancia y *Girardinichthys viviparus* con 181 individuos con una abundancia del 19.46%. La especie menos abundante fue *Poeciliopsis infans* de la cual se encontraron únicamente dos individuos (0.22%). En los Canales de Xochimilco se registraron 3,300 individuos de 11 especies en total, pertenecientes a 5 familias; la especie más abundante fue *Chirostoma jordani* con 764 individuos (30% de la abundancia total) y *Heterandria bimaculata* con 528 individuos (21%). La especie con menor abundancia fue *Cyprinus carpio*, de la cual se registraron 96 individuos (4% del total).

Cuadro 3. Listado de las especies encontradas en la Zona Lacustre de Xochimilco, ordenadas en niveles taxonómicos.

Clase	Superorden	Orden	Familia	Género	Especie
	Acanthopterygii				
		Atheriniformes	Atherinopsidae	Chirostoma	<i>Chirostoma jordani</i>
			Goodeidae	Girardinichthys	<i>Girardinichthys viviparus</i>
				Goodea	<i>Goodea atripinnis</i>
	Actinopterygii				
		Cyprinodontiformes	Poeciliidae	Heterandria	<i>Heterandria bimaculata</i>
				Poeciliopsis	<i>Poeciliopsis gracilis</i>
					<i>Poeciliopsis infans</i>
					<i>Poeciliopsis reticulata</i>
					<i>Poeciliopsis occidentalis</i>
				Xiphophorus	<i>Xiphophorus helleri</i>
					<i>Xiphophorus variatus</i>
		Perciformes	Cyprinidae	Oreochromis	<i>Oreochromis niloticus</i>
	Ostariophysi	Cypriniformes	Cyprinidae	Cyprinus	<i>Cyprinus carpio</i>

Cuadro 4. Abundancia ictiofaunística de la Zona Lacustre de Xochimilco según el sitio de muestreo y año.

Especie	Ciénega Grande			Ciénega Chica			Canal del Bordo			Canal Trancatilta			Canal de Cuemango			Canal Nacional			Canal el Laberinto			Laguna de Tlilac			Laguna del Toro			Canal Otenco			Canal Apampilco			Canal Apatlaco			Canal Texhuilo			Canal Atizapa			Descarga	
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2019	2018	2019	2017	2018	2019	2018	2017	2018	2019	2018	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2018	2019	2019	2019	2019	2019	2018	2019										
<i>Heterandia bimaculata</i>	9	13	38	12	10	6	6	12	36	10	25	36	10	12	12	49	4	13	14	35	4	6	14	12	6	5	3	10	39															
<i>Oreochromis niloticus</i>	25	123	12	25	45	23	5	24	5	0	2	81	0	3	0	39	0	60	6	0	25	2	3	4	5	8	2	5	6															
<i>Chiostoma jordani</i>	0	0	4	0	0	0	31	5	5	10	24	52	79	123	42	22	35	34	26	29	45	12	12	5	0	0	0	3	0															
<i>Poeciliopsis occidentalis</i>	0	2	0	0	3	0	45	0	26	0	19	0	0	12	0	0	0	0	0	25	0	16	5	2	4	6	0	0	0															
<i>Poeciliopsis gracilis</i>	0	5	2	0	3	1	68	4	25	2	42	0	4	12	0	55	3	15	7	29	16	10	8	4	2	3	0	8	1															
<i>Girardinichthys viviparus</i>	36	46	20	34	26	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0															
<i>Xiphophorus variatus</i>	0	0	0	0	0	0	2	5	2	6	2	0	1	3	0	3	12	6	10	12	11	12	2	1	2	1	1	10	0															
<i>Xiphophorus helleri</i>	0	0	0	0	0	0	2	0	5	0	25	0	0	5	0	10	2	0	45	0	15	2	5	8	5	2	5	1																
<i>Cyprinus carpio</i>	0	0	0	0	0	0	2	0	5	0	10	0	0	2	0	30	14	1	10	15	5	10	11	15	2	0	0																	
<i>Poeciliopsis reticulata</i>	46	69	97	54	78	42	38	5	1	2	2	0	2	0	2	36	1	46	5	2	42	0	0	0	0	0	23	1																
<i>Goodea atripinnis</i>	0	0	0	0	0	0	2	5	7	1	5	0	0	0	0	35	4	1	2	41	2	1	1	1	2	5	1																	
<i>Poeciliopsis infans</i>	0	0	1	0	0	1	0	0	25	0	34	0	0	13	0	0	0	0	0	38	0	46	25	0	0	3	0	0	16															

En el análisis de los componentes básicos de la diversidad α (Cuadro 4), se observa que de acuerdo con el índice de diversidad específica de Margalef; la mayor parte de los cuerpos de agua de la ZLX se consideran bajos en diversidad ictiofaunística ($D_{Mg} < 2$); los Canales de Xochimilco son los sitios con la riqueza media más elevada ($D_{Mg} = 1.66$), siendo el Canal de Ampampilco ($D_{Mg} = 2.14$) el sitio más diverso; mientras que el menos diverso fue Canal Nacional ($D_{Mg} = 0.5$). De acuerdo al índice de Simpson, la diversidad de la ZLX es baja ($D < 2$), al existir alto grado de dominancia por parte de una sola especie; este valor fue mayor para los canales ($D = 0.78$) que para el Lago de SGA ($D = 0.71$). El Índice de Shannon-Wiener muestra que tanto el Lago de SGA ($H' = 1.38$) como los canales de Xochimilco ($H' = 1.82$) son zonas de poca diversidad biológica ($H' < 2$). La curva de acumulación de especies para la ZLX (Figura 3) expresa que la probabilidad de encontrar especies nuevas en muestreos subsecuentes es baja.

Cuadro 5. Índices de diversidad α calculados para la ZLX durante el período de 2017 a 2019.

Índice	Diversidad α ZLX (2017-2019)													
	SGA*	Canal del Bordo	Trancatíla	Cuemanco	Canal Nacional	Laberinto	Laguna de Tilíac	Laguna del Toro	Otenco	Ampampilco	Apatlaco	Texhuilo	Atizapa	Descarga
Margalef	1.02	1.69	1.89	1.48	0.5	1.31	1.63	1.52	2.08	2.1	1.88	2.0	2.01	1.45
Simpson	0.71	0.87	0.87	0.62	0.39	0.8	0.88	0.89	0.81	0.8	0.83	0.8	0.82	0.77
Shannon-Weiner	1.38	2.16	2.15	1.34	0.66	1.71	2.25	2.3	1.93	1.9	1.9	2.0	1.75	1.74

*Valores obtenidos para el Lago de San Gregorio Atlapulco, a partir de la media de los índices de diversidad alfa de Ciénega Grande y Ciénega Chica.

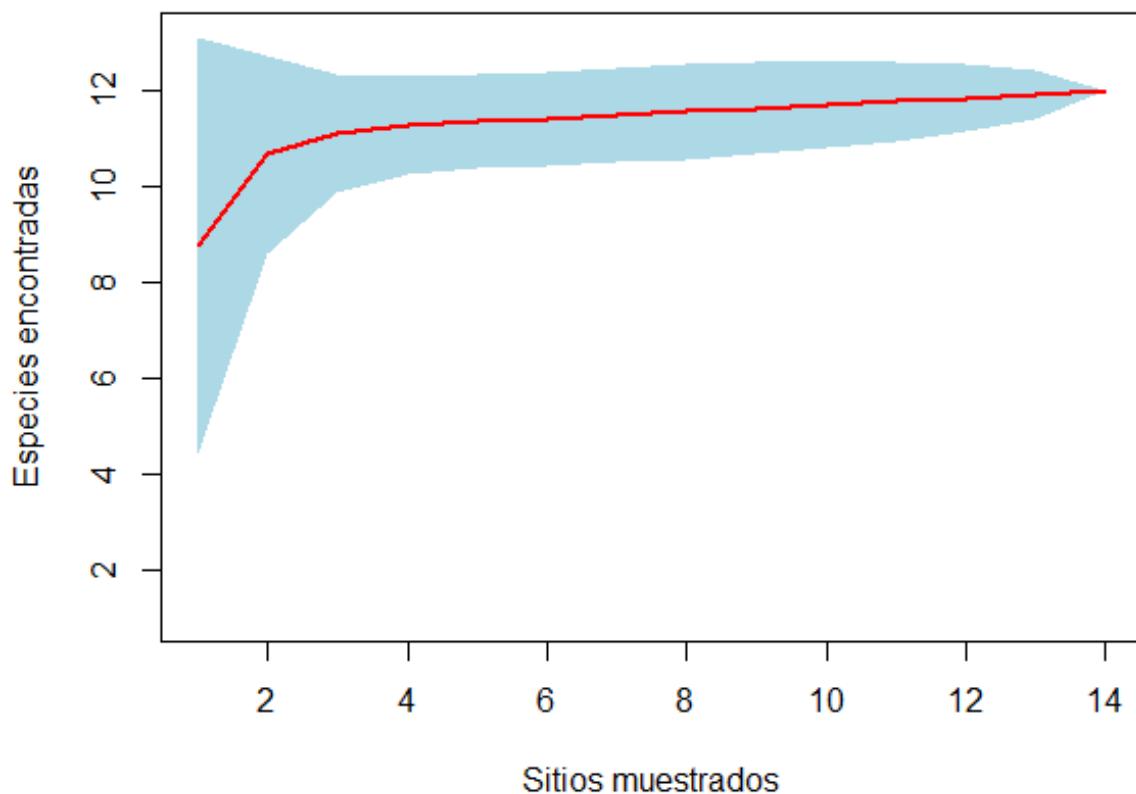


Figura 3. Curva de acumulación de especies de la ZLX

Se encontraron diferencias entre los sitios de muestreo y las especies encontradas, de acuerdo con el análisis de presencia-ausencia (Cuadro 6) para el cálculo de la diversidad β . Los resultados de este análisis, realizados a partir de los índices de Jaccard y de Sørensen cuantitativo muestran que el Lago de SGA y los Canales de Xochimilco son sitios distintivos en relación con la cantidad de especies presentes-ausentes, al tener un grado de similitud de $I_J = 33\%$ y $I_{Scuant} = 20\%$.

Cuadro 6. Presencia-Ausencia de las especies registradas en la Zona Lacustre de Xochimilco.

SGA	Sitios de muestreo												
	Canal del Bordo	Trancatitla	Cuemanco	Canal Nacional	Canal el Laberinto	Laguna de Tilíac	Laguna del Toro	Otenco	Ampampilco	Apatlaco	Texhuilo	Atizapa	Descarga
<i>Chiostoma jordani</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+
<i>Girardinichthys viviparus</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Goodea atripinnis</i>	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Heterandria bimaculata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Poeciliopsis gracilis</i>	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-
<i>Poeciliopsis infans</i>	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+
<i>Poeciliopsis reticulata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
<i>Poeciliopsis occidentalis</i>	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-
<i>Xiphophorus helleri</i>	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Xiphophorus variatus</i>	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Oreochromis niloticus</i>	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Cyprinus carpio</i>	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-

6.2 Análisis biótico de la calidad del agua

La composición de la comunidad ictiofaunística fue similar entre los Canales de Xochimilco y el Lago de SGA (Cuadro 7). El gremio más frecuente fue el de las especies alóctonas facultativas, las cuales fueron encontradas con mayor abundancia en los Canales de Xochimilco. Las especies nativas sensibles a la contaminación fueron *Chiostoma jordani* y *G. viviparus* (mexclapique) esta última cabe mencionar que solamente fue registrada en el Lago de SGA. Y sólo dos especies del género *Xiphophorus* son tolerantes a la contaminación.

Cuadro 7. Organización ecológica de los peces registrados en la Zona Lacustre de Xochimilco durante el período de 2017 a 2019.

Especies	Origen	Gremio trófico	Tolerancia
Atherinopsidae			
<i>Chiostoma jordani</i> (Woolman, 1894)	Nativa	Carnívoro	Sensible
Goodeidae			
<i>Girardinichthys viviparus</i> (Bustamante, 1837)	Nativa	Carnívoro	Sensible
<i>Goodea atripinnis</i> (Jordan, 1880)	Alóctona	Omnívoro	Facultativa
<i>Heterandria bimaculata</i> (Heckel, 1848)	Alóctona	Carnívoro	Facultativa
Poeciliidae			
<i>Poeciliopsis gracilis</i> (Heckel, 1848)	Alóctona	Carnívoro	Facultativa
<i>Poeciliopsis infans</i> (Woolman, 1894)	Alóctona	Carnívoro	Facultativa
<i>Poeciliopsis reticulata</i> (Peters, 1859)	Alóctona	Carnívoro	Facultativa
<i>Poeciliopsis occidentalis</i> (Baird y Girard, 1853)	Alóctona	Carnívoro	Facultativa
<i>Xiphophorus helleri</i> (Heckel, 1848)	Alóctona	Omnívoro	Tolerante
<i>Xiphophorus variatus</i> (Meek, 1904)	Alóctona	Omnívoro	Tolerante
Cyprinidae			
<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus, 1758)	Alóctona	Omnívoro	Facultativa
Cyprinidae			
<i>Cyprinus carpio</i> (Linnaeus, 1758)	Alóctona	Omnívoro	Facultativa

De acuerdo con los criterios utilizados para el desarrollo del IBI para la ZLX (Cuadro 8), un ecosistema lacustre de alta calidad del agua tendría una puntuación global de 110, traduciéndose al valor máximo de (1.0), conforme a la ecuación utilizada para obtener el IBI. Con base en esto, es posible decir que el Lago de SGA es el ecosistema con el menor nivel de degradación ambiental, al obtener un valor de (0.72), mientras que el valor calculado para los Canales fue de (0.27). Aunque los Canales de Xochimilco obtuvieron una mayor riqueza y abundancia, la presencia del mexclapique tiene un impacto significativo al evaluar el estado de salud del cuerpo de agua en términos del IBI (Cuadro 9).

Cuadro 8. Desarrollo del Índice de Integridad Biótica (IBI) para la Zona Lacustre de Xochimilco

Criterios del Índice de Integridad Biótica (IBI)				
Métricas	Presencia	Puntuación	Presencia	Puntuación
Especies nativas	SI	10	NO	0
Especies exóticas	SI	0	NO	0
Especies sensibles	SI	10	NO	0
Especies facultativas	SI	0	NO	10
Presencia de <i>Girardinichthys viviparus</i>	SI	10	NO	0
Presencia de <i>Cyprinus carpio</i>	SI	0	NO	0
Presencia de <i>Oreochromis niloticus</i>	SI	0	NO	10
Métricas	Abundancia	Puntuación	Abundancia	Puntuación
Abundancia de poecilidos	≥346	0	≤346	10
Abundancia de godeidos	≥218	10	≤218	0
Abundancia de <i>Girardinichthys viviparus</i>	≥181	10	≤181	0
Abundancia de <i>Chirostoma jordani</i>	≥384	10	≤384	0
Abundancia de <i>Cyprinus carpio</i>	≥48	0	≤48	10
Abundancia de <i>Oreochromis niloticus</i>	≥272	0	≤272	10

Con el fin de complementar el análisis de la calidad biótica del agua, se utilizó el valor medio del índice de Shannon-Wiener, el cual tiene una correlación directa con la calidad del agua en sistemas lenticos, asignando intervalos numéricos para la interpretación de la calidad del agua. De acuerdo con lo anterior, los valores de $H' = 1.38$ para el Lago de SGA y $H' = 1.82$ para los canales de Xochimilco, consideran las aguas de la ZLX como medianamente contaminadas (Cuadro 8).

Cuadro 9. Resultados del cálculo Índice de Integridad Biótica (IBI) para el Lago de SGA y los Canales de Xochimilco; comparados con valores teóricos.

IBI de la Zona Lacustre de Xochimilco			
Métricas	SGA	Canales de Xochimilco	Valores esperados
Especies nativas	10	10	10
Especies exóticas invasoras	0	0	10
Especies sensibles	10	0	10
Especies facultativas	10	0	10
Presencia de <i>Girardinichthys viviparus</i>	10	0	10
Presencia de <i>Cyprinus carpio</i>	10	0	0
Presencia de <i>Oreochromis niloticus</i>	0	0	0
Abundancia de poecílidos	0	0	10
Abundancia de <i>Girardinichthys viviparus</i>	10	0	10
Abundancia de <i>Goodea atripinnis</i>	0	10	10
Abundancia de <i>Chirostoma jordani</i>	0	10	10
Abundancia de <i>Cyprinus carpio</i>	10	0	10
Abundancia de <i>Oreochromis niloticus</i>	10	0	10
TOTAL	80	30	110

Cuadro 10. Correlación entre el valor de H' con la calidad del agua (Dall, 1995 cit. por Pérez-Munguía et al., 2005).

Valor del Índice de Shannon-Wiener	Interpretación
H'>3	Aguas limpias
H'= 2-3	Aguas ligeramente contaminadas
H' = 1-2	Aguas medianamente contaminadas
H'= 0-1	Aguas fuertemente contaminadas

6.3.1 Panorama general de la zona lacustre

La caracterización cualitativa de las zonas de muestreo de la ZLX (Cuadro 10 y 11), permite identificar las diferencias entre el Lago de SGA y los Canales de Xochimilco; de acuerdo con las características del agua, el tipo de hidrófitas presentes y el tipo de actividades antropogénicas realizadas. En el Lago de SGA, las aguas de Ciénega Grande sufrieron una marcada transición tanto en coloración como en olor durante los tres años de muestreo: Verde oscuro en 2017, verde olivo en 2018 a café en 2019. Durante el muestreo el olor de la Ciénega correspondió a materia orgánica descompuesta. Se observó la presencia de hidrófitas emergentes coloquialmente conocidas como tules (*Typha latifolia* y *Schenoplectus americanus*).

En la Ciénega chica, el agua fue café con olor a descomposición de materia orgánica durante 2017-2018; mientras que en 2019 ésta fue verde oscuro e inodora. Se encontraron hidrófitas como tules, gramíneas; hidrófitas flotantes como los chilacastles (*Wolffia sp.*), flotantes como el lirio acuático (*Eichornia crassipes*) así como plantas sumergidas tales como la cola de zorro (*Ceratophyllum demersum*). En ambos sitios, se observó actividad agrícola y ganadera. En los canales predominaron aguas color verde oscuro y café, las cuales fueron por la mayor parte inodoras.

El tipo de hidrófitas observadas fueron más diversas que las encontradas en SGA, habiendo vegetación emergente como el berro (*Nasturtium officinale*) y la cola de caballo (*Myriophyllum aquaticum*); gramíneas y tule, flotante como la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y lentejas de agua (*Lemna sp.*); enraizada como el paragüitas (*Cyperus alternifolius*) y la ninfa acuática (*Nymphaea mexicana*) sumergidas tales como la elodea (*Elodea sp.*) así como la presencia de algas filamentosas. En los canales la presencia de actividades antrópicas fue mayor y más diversa que en el Lago de SGA, existiendo actividad ganadera, agrícola, pecuaria, turística y urbana.

Cuadro 10. Caracterización fisicoquímica de la Zona Lacustre de Xochimilco durante el período de 2017 a 2019, para el área del Lago de San Gregorio Atlapulco.

Variables	Lago de San Gregorio Atlapulco					
	Ciénega Grande			Ciénega Chica		
	2017	Año 2018	2019	2017	Año 2018	2019
Coordinadas	19°16'23.43"N 99° 3'43.17"O	19°16'18.33"N 99° 3'31.23"O	19°16'22.75"N 99° 3'36.49"O	19°16.642" N 99°03.631" O	19°16'7.70"N 99° 3'17.54"O	19°16'16.33"N 99° 2'38.15"O
Hora	09:38:00 a. m. 14:00:00 p. m.	09:40:00 a. m. 12:46:00 p.m.	09:49:00 a. m. 11:16:00 a.m.	11:35:00 a. m. 12:31:00 p.m.	13:15:00 p. m. 10:00 p.m.	11:20:00 a. m. 13:45:00 p.m.
Temperatura ambiente (°C)	22.95	19.07	23	21.60	22	20.50
Temperatura del agua (°C)	20.79	18.43	21.36	20.20	21.60	19.45
pH	8.24	8.27	8.54	8.54	6.44	8.98
Oxígeno (mg/L)	7.51	10.47	10.02	9.00	4.48	5.87
Transparencia (cm)	31.15	31.17	33.40	26	40	32.50
Profundidad (cm)	131.63	152.50	175	153	130	152.50
Nitratos (mg/L)	1.13	0.76	1.14	1.13	4.54	1.13
Nitritos (mg/L)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.26
Fosfato (mg/L)	3.63	4.17	2.55	2.50	5.00	1.38
Amonio (mg/L)	0.11	0.10	0.18	0.10	0.02	0.10
Dureza general (mg/L)	200	200	220	176	120	120
Dureza carbonatada (mg/L)	110	180	180	112	180	140
Coloración	Verde oscuro a Café	Café	Café	Café	Café	Verde oscuro
Olor	Descomposición de materia orgánica	Inholora	Descomposición de materia orgánica			
Vegetación	Emergente, marginal	Emergente, Sumergida, Marginal	Emergente y Marginal	Emergente, marginal	Emergente, Sumergida	Emergente, Sumergida
Actividad Antropogénica	Agrícola-Ganadera	Agrícola, Ganadera	Agrícola-Ganadería	Agrícola-Ganadera	Agrícola, Ganadera	Agrícola, Ganadera

Cuadro 11. Caracterización fisicoquímica de la Zona Lacustre de Xochimilco durante el período de 2017 a 2019, para el área de Canales de Xochimilco.

6.3.2 Análisis de agrupación de los Parámetros fisicoquímicos de la ZLX

El cladograma obtenido para el análisis de los parámetros fisicoquímicos de la ZLX (Cuadros 10 y 11; Figura 4), divide los cuerpos de agua muestreados en tres grupos distintivos; a los que se les denominó Grupo A (Atizapa y Descarga) Grupo B (Texhuilo, Ciénega grande, Ciénega chica, Trancatitla, Cuemanco, Laguna del Toro, Canal del Bordo, Canal el Laberinto, Laguna de Tlilac y Canal Nacional y Grupo C (Ampampilco Otenco y Apatlaco):

1. En el grupo A se encontraron los valores medios más elevados de NO^{2-} (7.44 ± 5.55 mg/L), NO^{3-} (0.61 ± 0.18 mg/L) y NH_4 (2.11 ± 0.10 mg/L); por el contrario, presentó los valores medios más bajos de PO_4^{3-} (2.76 ± 0.37 mg/L), dureza general (127.50 ± 17.68 mg/L) y dureza carbonatada (72.50 ± 3.54 mg/L). Al ser cuerpos de agua geográficamente distantes, compartieron estas características debido a las actividades antrópicas realizadas en ambos canales; particularmente la ganadería y el desagüe de aguas residuales, las cuales impactan la calidad del agua de formas similares.

La actividad ganadera promueve el uso de fertilizantes que elevan la concentración de compuestos nitrogenados, de forma similar la descarga de aguas residuales aporta una gran cantidad de estos compuestos. Esto causa cambios en el color del agua, la cual fue de color café en la duración del muestreo, ya sea por el agregado de materia orgánica o en el caso particular de la descarga, la presencia de compuestos oxidados provenientes del pobre mantenimiento de las tuberías. Si bien este grupo se caracterizó por tener los niveles de fosfatos más bajos, estos aún son relativamente elevados y debido a la flora acuática presente, cuyas características fueron las mismas entre ambos cuerpos de agua; puede indicar cierto grado de eutrofización.

2. El grupo B registró los valores medios más altos de temperatura del agua (19.99 ± 1.49 °C), transparencia (39.78 ± 16.97 cm), OD (8.74 ± 2.18 mg/L), N total (0.17 ± 0.11 mg/L) y PO_4^{3-} (3.75 ± 0.76 mg/L); y los niveles más bajos de NH_4 (0.98 ± 1.15 mg/L). La mayoría de los cuerpos de agua dentro de este grupo son cercanos geográficamente y en ellos se encuentran hidrofitas similares y se realizan el mismo tipo de actividades antrópicas.

En la mayoría de los canales de este grupo, además de haber actividad ganadera y agrícola, hubo actividad turística; estadísticamente, el número de cuerpos de agua incluidos en este grupo determinó los valores medios para los factores fisicoquímicos medidos. Es importante resaltar que las ciéngegas

que formas parte del Lago de SGA se encuentran dentro de este grupo, y aunque en ellas se realizan antrópicas similares a los otros canales, es importante resaltar que el Lago de SGA, se encuentra en la Zona de Conservación y por ende la magnitud de las actividades realizadas es menor que en los demás cuerpos de agua.

- Finalmente, en el Grupo C se registró la dureza general más alta (185.00 ± 19.15) y los valores más bajos de temperatura del agua (16.55 ± 1.14 °C), transparencia (20.00 ± 8.16 cm), OD (2.83 ± 1.23 mg/L), (1.14 ± 0.02), (0.10 ± 0.10 mg/L) y N total (0.07 ± 0.07 mg/L). Estos cuerpos de agua son los más geográficamente cercanos entre sí de entre todos los estudiados, a pesar de que la cantidad de compuestos nitrogenados fue inferior a la de los demás grupos, el bajo nivel de OD es un indicador importante de contaminación, puesto que una concentración baja de este compuesto, puede causar la muerte de la biota acuática, aun si este grupo tuvo valores relativamente bajos de compuestos nitrogenados, estos aún se considerados elevados para un cuerpo de agua dulce y por ello se considera que es grupo contiene cuerpos de agua contaminados.

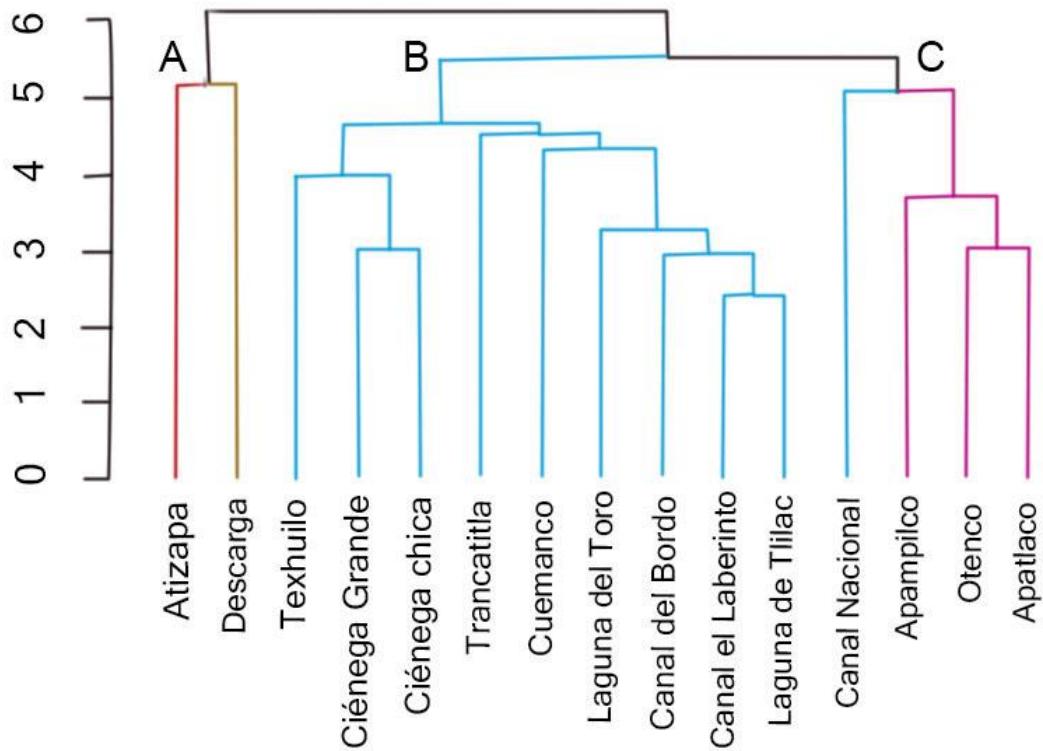


Figura 4. Cladograma de similitud entre los cuerpos de agua de la Zona Lacustre de Xochimilco.

7. DISCUSIÓN

7.1 Diversidad ictiofaunística en la ZLX

De acuerdo con el análisis de diversidad alfa, la ZLX se considera un ecosistema poco diverso, sin embargo, esto puede deberse a la sensibilidad de los índices de diversidad alfa utilizados, especialmente el de Margalef. Gamito (2009) advierte que el índice de Margalef es particularmente sensible al tamaño de la muestra, tiendiendo a subestimar la diversidad real del área de muestreo; es por ello que resulta crucial usarlo en conjunto con otros índices como el de Simpson y Shannon-Wiener; ya que determinan otros componentes básicos de la diversidad alfa, permitiendo un análisis completo y preciso.

Respecto a la dominancia de especies, el charal de Xochimilco (*Chirostoma jordani*) fue la especie dominante en Canales de Xochimilco. La abundancia de este organismo es acorde a lo registrado en otros muestreos realizados por Arana et., al (1999), Orozco et., al (2003) cit. por Bojórquez y Arana, (2014). La presencia de esta especie nativa en la Zona Lacustre de Xochimilco podría indicar una mejoría en las condiciones ambientales existentes. A pesar de ser la zona con la mayor degradación ambiental, los Canales de Xochimilco presentaron la mayor riqueza y diversidad. Sin embargo, las especies encontradas en este cuerpo de agua fueron casi en su totalidad especies alóctonas, siendo la familia Poeciliidae la más abundante, en la cual se encontraron siete especies (*Heterandria bimaculata*, *Poeciliopsis gracilis*; *P. infans*; *P. reticulata*; *Xiphophorus helleri* y *X. variatus*). En estudios similares y recientes, esta familia también ha sido registrada como la más predominante en la ZLX (Vázquez-Silva et al., 2017; Arana, et. al 2020). De los poeciliidos registrados, el género *Xiphophorus* fue introducido con fines de ornato y *H. bimaculata* y *P. gracilis* de forma accidental (Bojórquez y Arana 2014).

En cuanto a la proliferación de *Orechromis niloticus* (tilapia del Nilo), esta resulta preocupante, ya que es considerada como una especie exótica invasora en México, de acuerdo con lo reportado en el Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) (Conabio, 2014). Esta especie de cíclido fue encontrada tanto en el Lago de SGA como en los canales de Xochimilco en abundancias similares, lo que habla del éxito que ha tenido para establecerse en la ZLX, según Bojórquez y Arana (2014) su alta abundancia se debe a sus frecuentes períodos reproductivos, con hasta 16 desoves anuales dependiendo de las condiciones climáticas. *Cyprinus carpio* (Carpa común) es otra especie exótica invasora que afecta los ecosistemas en los que habita, debido a su tendencia a destruir la vegetación existente y los nidos de otras especies, esto por su forma de alimentación; la cual también reduce la calidad del agua al revolver los sedimentos del fondo, incrementando la concentración de

nutrientes y la turbidez en la columna de agua (Global Invasive Species Database, 2013).

Aunque la carpa es una especie con alto grado de éxito de establecimiento en los ecosistemas acuáticos, su abundancia es baja en la ZLX; donde fueron registrados 96 individuos en un periodo de tres años, encontrándose únicamente en los Canales de Xochimilco debido a su arte de pesca. De forma similar, Vázquez-Silva y colaboradores (2017) encontraron 25 individuos también en los canales de Xochimilco, en un muestreo realizado en los primeros cuatro meses del 2017. La poca abundancia de la carpa común se debe al método de colecta de esta especie utilizado en este estudio, así como medida a la competencia interespecífica con la tilapia del Nilo.

De las once especies registradas, la única que no se encontró en los Canales de Xochimilco fue *G. viviparus* (mexclapique), especie altamente sensible a la contaminación urbana. Navarrete y colaboradores (2003), en su análisis de la situación del mexclapique en los Lagos de Chapultepec, Zumpango y Requena, encontraron que los sitios de mayor abundancia de esta especie, son aquellos con la menor presencia antrópica; enfatizando que este pez es intolerante a los deshechos provenientes de descargas de origen doméstico e industrial.

7.2 Calidad biótica del agua

La diversidad de los Canales de Xochimilco se debe a la mayor riqueza y abundancia de especies facultativas, capaces de sobrevivir en ambientes contaminados, así como la presencia de especies exóticas invasoras. Particularmente la proliferación de la tilapia del Nilo, exacerba el deterioro de los ecosistemas en los que se encuentra, concordando con Zhang y colaboradores (2022) quienes mencionan los efectos negativos que la tilapia tiene en la columna del agua, incrementando la turbidez al ser peces que tienden a escarbar en los sedimentos; reduciendo la luz solar disponible para el fitoplancton, e incrementando la concentración de nutrientes disponibles para los mismos, afectando así la producción primaria. Por otro lado, la tilapia consume también perifiton, que compite por nutrientes con el fitoplancton, favoreciendo el incremento en su biomasa y facilitando condiciones de eutrofización; su presencia impacta negativamente a la fauna acuática, ya que son carnívoros generalistas que se alimentan de los huevecillos y estadios juveniles de otras especies; también compiten por espacio, siendo peces extremadamente territoriales, lo que les permite dominar un área considerable del hábitat donde se encuentren, desplazando a las especies nativas y

afectando así la composición de la comunidad ictiofaunística de la ZLX (Zambrano *et. al*, 2010; Gutiérrez y Lasso, 2012 cit. por Conabio, 2014; Bojórquez y Arana, 2014). Las dinámicas del fitoplancton son factores clave que tienen un impacto directo en la red trófica, ensamblajes ecológicos y en la calidad general del cuerpo de agua.

Otro punto clave es la presencia del charal de Xochimilco, cuya biología hace posible su uso como bioindicador de la calidad del agua, puesto que la dinámica de su población ha sido vinculada directamente con condiciones persistentes de contaminación, la pesca indiscriminada de organismos adultos y juveniles debido a la demanda del mercado (Olvera-Blanco *et. al*, 2009). En cuanto a su sensibilidad a los contaminantes, Van Aerle y colaboradores (2004), explican que las sustancias arrojadas a los cuerpos de agua, principalmente en las descargas, pueden actuar de la misma forma que hormonas involucradas en la reproducción, especialmente estrógenos, lo que lleva a la malformación y reducción del crecimiento gonadal, así como alteraciones en la formación de células germinales y asignación de género; este último debido a que existe una correlación directa entre la temperatura y la proporción de géneros. Esta información podría explicar la poca presencia del charal de Xochimilco en el canal de Atizapa y la zona de la Descarga, sitios con influencia de aguas tratadas, donde a lo largo de los tres años de muestreo, tan sólo se encontraron tres ejemplares.

Las condiciones ambientales en los Canales de Xochimilco no son aptas como hábitat del mexclapique, al aporte descargas de agua tratada en las cercanías del Club España y en el Canal Nacional; así como la rápida expansión urbana hacia los canales y actividades antrópicas realizadas (Contreras-Balderas, 2005). Navarrete-Salgado y colaboradores (2004), en su estudio realizado en el Lago de Chapultepec, encontraron que la especie es intolerante a la presencia del lirio acuático, desapareciendo una vez que esta planta acuática prolifera en la zona. Esto explica la posible ausencia de esta especie endémica de los canales de Xochimilco. Al estar relativamente aislado de la mancha urbana de la CDMX, el Lago de SGA es un ecosistema que favorece la presencia de esta especie; a pesar de ello, se le considera una especie rara, ya que no ha sido encontrada en abundancia desde 2003 a la fecha (Bojórquez y Arana, 2014), es por ello que su presencia en el Lago de SGA, indica una calidad del agua superior a la de los Canales de Xochimilco, con condiciones ambientales más favorables para la vida silvestre acuática de la CDMX (Vázquez-Silva *et. al* 2017).

La diversidad presente en la ZLX no provee la información suficiente para ajustarse a los criterios más específicos utilizados para el desarrollo de otros IBI,

como el realizado por Lyons (2000); debido a que su estudio fue realizado en la totalidad del Valle de México, obteniendo así un mayor número de especies registradas. Al tratarse de cuerpos de agua pequeños, con baja riqueza ictiofaunística, el uso de la abundancia de peces como el criterio con mayor peso al desarrollar el IBI, resultó más beneficioso para este estudio. Aun así, la riqueza tuvo una parte importante en este análisis, puesto que la presencia del mexclapique fue el criterio determinante para demostrar la superioridad de la calidad del agua en el Lago de SGA, en comparación a los Canales de Xochimilco. Finalmente, el uso del índice de Shannon-Weiner permitió obtener información complementaria, la cual fue coherente con los resultados obtenidos a través del IBI; indicando que el agua de las zonas de muestreo se encuentra medianamente contaminada siendo el Lago de SGA la zona con mejor calidad del agua.

7.3 Caracterización fisicoquímica

La zona de la descarga y el canal de Atizapa poseen características que los hacen los más contaminados de la ZLX; principalmente por el aporte directo de aguas tratadas, provenientes de la Planta de Tratamiento del Cerro de la Estrella, por lo que presentan altos niveles de compuestos nitrogenados, particularmente de amonio; cuyo valor medio se encuentra por encima del límite permisible de 0.5 mg/L, establecido por la NOM-127-SSAI-2021; esto junto con una concentración elevada de fosfatos, de acuerdo con los criterios de caracterización de condiciones tróficas en agua dulce. García-Lozano, (2016) establece que valores superiores a 0.08 mg/L corresponden a cuerpos de agua eutrofizados. Los valores registrados de PO_4^{3-} están relacionados con la baja transparencia (<60 cm) y concentración de OD (<5mg/L) esta última debido a que no es posible mantener el crecimiento de micro y/o macrofitobentos (Bojórquez, 2014; Smith y Schindler, 2009 cit. por García-Lozano, 2016).

El cladograma engloba a la mayoría de los canales de la ZLX con el Lago de SGA, cuerpos de agua geográficamente distantes entre sí con diferencias marcadas entre ellos, por lo que resulta necesario analizarlos de forma independiente.

Las ciénegas del Lago de SGA conforman el área de conservación de la ZLX, y esto se refleja en las condiciones fisicoquímicas presentes que favorecen a la vida silvestre presente; destaca que fue en esta zona donde se encontraron los valores medios de OD óptimos para la vida silvestre de aguas dulces (>5mg/L) indicados por el acuerdo que establece los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. El ecosistema del Lago de SGA presentó los niveles más bajos de PO_4^{3-} y compuestos nitrogenados entre las zonas de muestreo; lo que se debe a que es considerada una ANP de gran importancia para la CDMX, por lo que está destinada

a la conservación del suelo agrícola y de la chinampería; esto con el propósito de incrementar la velocidad de recarga del acuífero y mitigar las inundaciones y los hundimientos que afectan la zona (Bojórquez, 2014). Al encontrarse relativamente aislada del entorno urbano, el Lago de SGA es considerada como una zona idónea para la realización de planes de protección o manejo ecológico, propuestos tanto de forma oficial por el gobierno capitalino como por otras instituciones (Latournerié, et. al, 2015). Los parámetros fisicoquímicos presentes en los Canales de Xochimilco son el resultado de la actividad turística, ganadera y agrícola que se realizan en ellos. Los elevados niveles de oxígeno disuelto (9.31 ± 0.96 mg/L) pueden estar relacionados con el paso de lanchas y trajineras, que producen movimientos continuos en la columna del agua (Berdeja-Nuñez, 2022). Además, el agua de los canales posee niveles elevados de PO_4^{3-} y compuestos nitrogenados, particularmente de NH_4 ; los cuales se deben a la alta presencia de actividad agrícola y ganadera junto a los canales, actividades que aportan niveles importantes de estos nutrientes a través del excremento de los animales y el uso de fertilizantes (Pérez-Espejo, 2008).

De acuerdo con los valores medidos, los Canales de Otenco, Ampampilco y Apatlaco son cuerpos de agua contaminados, debido a su similitud con el área de la descarga y a los altos niveles de PO_4^{3-} , que se atribuyen a la actividad agrícola de la zona, pero principalmente a la descarga de aguas residuales en Canal Nacional, causando una baja concentración de OD, inferior a los otros grupos (2.83 ± 1.23 mg/L) indicando un alto grado de eutrofización, exacerbado por la presencia de concentraciones elevadas de NO_3^- y NH_4 .

Finalmente, es importante analizar las acciones tomadas por el gobierno de la Ciudad de México respecto a la ZLX. Bojórquez Castro (2014), critica que en general ha habido mal manejo de la zona, particularmente en el siglo pasado, llevando a resultados negativos que afectan de forma directa la biota nativa y la calidad del agua del ecosistema. Narchi (2013), en su estudio del deterioro ambiental de Xochimilco, indica que las acciones de mitigación de la contaminación han sido realizadas por tecnologías exógenas las cuales no están diseñadas para las características ecológicas de la ZLX. Sin embargo, también se han tomado acciones positivas, como el desarrollo del “Plan de Manejo Integral de Xochimilco”. También se han realizado trabajos directos en la zona lacustre, como el desazolve de canales, construcción de bordos, y la extracción periódica de especies exóticas invasoras, entre otras (Méndez, 2006., cit. por Bojórquez Castro 2014). Narchi y Canabal-Cristiani (2017) hacen énfasis que la resolución de los problemas ambientales de la ZLX requiere la inversión de vastos recursos económicos, del desarrollo con escrutinio de planes de manejo a largo plazo y la retroalimentación entre las autoridades y la comunidad que conoce del sistema lacustre y sus requerimientos.

La Zona Lacustre de Xochimilco se encuentra en un estado de degradación ambiental constante, siendo los canales de Xochimilco el ecosistema con la menor calidad del agua; en comparación con el Lago de San Gregorio Atlapulco. El uso de la ictiofauna como bioindicadores de la calidad del agua, permite no solo caracterizar los cuerpos de agua, sino que también hace posible el identificar los problemas vinculados con la pérdida en la calidad del agua. Los criterios más importantes en esta evaluación son naturalmente aquellos vinculados con la riqueza de especies intolerantes a la contaminación, así como la presencia de especies exóticas invasoras. Al haber poca diversidad de especies, la abundancia de organismos es un criterio fiable al realizar un análisis de este tipo. El IBI desarrollado para la ZLX probó ser un método confiable, con resultados coherentes al estado ambiental del Lago de SGA y de los canales de Xochimilco. Sin embargo, también resulta fundamental tomar en cuenta la ecología de las especies registradas, para un análisis global y preciso de la calidad del agua, así como los factores fisicoquímicos del área de estudio.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis biótico y fisicoquímico realizado a partir de la base de datos obtenida del muestreo de la ZLX, es posible concluir que el Lago de San Gregorio Atlapulco, a pesar de tener menor diversidad que los canales de Xochimilco, es el sitio con la mejor calidad del agua para la vida silvestre; debido a la presencia de *Girardinichthys viviparus*, especie endémica intolerante a la contaminación. Las especies presentes en los Canales de Xochimilco, siendo en su mayoría alóctonas facultativas y exóticas invasoras, indican que la calidad del agua de esta zona es significativamente inferior. Sin embargo, la abundancia de *Chirostoma jordani*, podría indicar una mejoría en las condiciones ambientales de los canales. El uso de métricas fundamentadas en los índices de diversidad alfa y beta resultó ser de especial importancia para un análisis integral de la ictiofauna como indicadora del grado de contaminación ambiental de la ZLX.

9. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Ibarra, A. 2005. Los peces como indicadores de la calidad del agua. Revista digital Universitaria 8(4): 1-14.
- Alatriste-Guzmán, O. 2005. Xochimilco-Aspectos históricos culturales. CEPE-UNAM. <http://www.revistadecires.cepe.unam.mx/articulos/art7-6.pdf> (Descargado el 25 de septiembre del 2021).
- Arana, F. Pérez, R. y Orozco, J. 1999. Reproducción y crecimiento en cautiverio de *Chiostoma jordani* Woolman, 1894 (Pisces: Atherinidae) de Xochimilco, Distrito Federal. Zoología Informa (41): 39-52.
- Arana, F., C.F., Bojórquez, L., Esquivel, A., Moreno, C., Soto, R. 2006. Informe final. Inicio del estudio poblacional de peces alóctonos, calidad del agua de canales y metales pesados en peces alóctonos, biorremediación en canales y capacitación a chinamperos en el manejo y engorda de ajolotes. Convenio UAM Xochimilco (CIBAC)-Delegación Xochimilco. Ciudad de México.
- Arana, F.C, Vázquez-Silva, G., López de La Rosa, A.K, Callejas-Chavero, A., Padilla-Hernández, Y. y Núñez-García L.C. 2020. Caracterización parcial de la ictiofauna en los canales y lago de San Gregorio Atlapulco, Xochimilco, CDMX. https://congresos.cio.mx/17_enc_mujer/cd_congreso/archivos/resumenes/S2/S2-BYQ11.pdf (Descargado el 29 de junio del 2023).
- Arcos Ramos, R. y Vergara Salgado, S. 2012. Evaluación del Área Natural Protegida (Lago de Xochimilco) y posibles propuestas para su restauración ecológica. Antología de Estudios Territoriales. Fomento de los Estudios Territoriales en Iberoamérica. <http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/3890/1/Evaluaci%C3%B3n%20del%20%C3%A1rea%20natural%20protegida%20%28Lago%20de%20Xochimilco%29.pdf> (Descargado el 25 de septiembre del 2021).
- Arias, H.R., Domínguez-Chacón, M., Hernández-Castaños., M.R., Burrola-Barraza, M.E., Colmenero, L. y Villalba, M.L. 2011. Identificación de helmintos en carpa común (*Cyprinus carpio*) de un ecosistema acuático en el norte de México. Investigación y Ciencia 24(68): 15-21.
- Avendaño García, M.A., Vilchis González, A.B., Pérez-Anaya, J., Vásquez Zecua, E., Herrera-Cruz, I.U., Hidalgo Rico J., Ríos Maya, J.A., Rivero López, K. y Méndez Estrada L.A. 2019. 2019. Capítulo cinco: Afectaciones en San

- Gregorio Atlapulco, Xochimilco. En: Félix, A.P., Gómez, P., Mora, M., Ortiz, M., Vera, J. y Saffron-Sanin, M. P. 1era edición. Contra el desamparo del Estado: violaciones a los derechos de las personas damnificadas por el sismo 19S. 171-177. Biblioteca Jurídica Virtual.
- Berdeja-Nuñez, D.J. 2022. Evolución físico-química del corredor turístico del Canal Nacional y zona lacustre adyacente de Xochimilco, durante un período de 9 años. [Tesis de grado]. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco.
- Bojórquez Castro, L. y Arana-Magallón, F. 2014 Peces de Xochimilco: Su ambiente y situación actual. 1era ed. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. 191 pp.
- Bojórquez Castro, L., Arana, F., Esquivel Herrera, A., Latournerié Cervera, J., Rosiles Martínez, R. y Soto Castor, R. 2017. Contaminación química y biológica en la zona lacustre de Xochimilco. 1era edición. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Ciudad de México. 342 pp.
- Burger, J. 2006. Bioindicators: Types, Development, and Use in Ecological Assessment and Research. Environmental Bioindicators 1:22-39.
- Burger, J. 2014. Prólogo. En González-Zuarth, C.A., Vallarino, A., Pérez-Jiménez, J.C. y Low-Pfeng A.M. Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental. 1era edición. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México. 78pp.
- Cárdenas-Calvachi, G.L. y Sánchez-Ortiz, I.A. 2013. Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. Universidad y Salud, 15(1):72-88.
- Castellanos, C.A. 2006. Extinción, Causas y efectos sobre la diversidad biológica. Revista Luna Azul 23: 33-37.
- Ceballos, G., Díaz Pardo, E., Martínez, L. y Espinoza, H. 2018. Los peces dulceacuícolas de México en peligro de extinción. Fondo de Cultura Económica. Ciudad de México. pp. 312-313.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2014. Ponderación de Invasividad de Especies Exóticas en México (SIEI) *Cyprinus carpio* *carpio* Linnaeus, 1758. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/>

[LI007 Anexo 9 Ficha Cyprinus%20 carpio carpio.pdf](#) (Descargado el 07 de abril del 2022).

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2014. Ponderación de Invasividad de Especies Exóticas en México (SIEI) *Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/LI007 Anexo 10 Ficha Oreochromis niloticus.pdf> (Descargado el 07 de abril del 2022).

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2012. Remanentes del complejo lacustre de la cuenca de México. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_068.html#:~:text=68.,DE%20LA%20CUENCA%20DE%20M%C3%89XICO&text=I%C3%A9nticos%3A%20canales%20y%20lagos%20relictos,y%20Ameca%2C%20arroyo%20San%20Borja. (Descargado el 31 de mayo del 2022).

Contreras-Balderas, S. 2005. Conservation Status of Mexican Freshwater Viviparous Fishes. En: Viviparous Fishes. New Life Publications: México.

Convención Ramsar. 2004. Zona Lacustre “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”. <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1363RIS.pdf> (Descargado el 07 de abril del 2022).

Convención Ramsar. 2018. Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales y los servicios que prestan a las personas. 1era edición. Secretaría de la Convención Ramsar. Gland. Suiza. 88 pp.

Diario Oficial de la Federación. 1992. Declaratoria que establece como zona prioritaria de preservación y conservación del equilibrio ecológico y se declara como área natural protegida, bajo la categoría de zona sujeta a conservación ecológica, la superficie que se indica de los ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, D.F. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4664640&fecha=07/05/1992 (Descargado el 07 de abril del 2022).

Espinosa, C.I. 2022. Similitud de Comunidades Biológicas. <https://ciespinosa.github.io/Similitud/index.html> (Descargado el 09 de diciembre del 2022).

Fierro, P., Valdovinos, C., Vargas-Chacoff, L., Carlos-Bertrán, C., y Arismendi, I. 2017. Macroinvertebrates and Fishes as Bioindicators of Stream Water

- Pollution. <https://www.intechopen.com/chapters/52384>. (Descargado el 27 de abril del 2022).
- Froese, R. y Pauly, D. 2016. FishBase. World Wide Web electronic publication. <http://www.fishbase.org/summary/Oreochromis-niloticus.html> (Descargado el 07 de abril del 2022).
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2006. Acuerdo por el que se aprueba el Programa Nacional de Manejo del Área Natural Protegida con carácter de zona de conservación ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”. <https://paot.org.mx/centro/gaceta/2006/enero06/11enero06.pdf> (Descargado el 04 de junio del 2022).
- Gamito, S. 2009. Caution is needed when applying Margalef diversity index. *Science Direct. Ecological Indicators*. 10: 550-551.
- García, J.M., Sarmiento, L.F., Rodríguez, M. S. y Porras, L. S. 2017. Use of bioindicators for evaluating water quality in rivers: application to tropical high mountain rivers. A short review. *UGciencia*. 23: 47-62.
- García-Lozano, M. 2016. Eutrofización: una visión general. *CienciAcierta*. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2016/09/26/eutrofizacion-una-vision-general/> (Descargado el 29 de junio del 2023).
- Global Invasive Species Database. 2013. *Oreochromis niloticus*. Invasive Species Specialist Group. <http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=1322> (Descargado el 07 de abril del 2022).
- González-Zuarth, C.A., Vallarino, A., Pérez-Jiménez, J.C. y Low-Pfeng A.M. 2014. Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 1era edición. Ciudad de México. 782 pp.
- Google Maps. 2022. Zona lacustre de Xochimilco y Ejidos de San Gregorio Atlapulco. <https://goo.gl/maps/EJpPkoRzqVGxnZCLA> (Descargado el 04 de junio del 2022).
- Guevara-Olivar, B.K., Ortega, H.M., Ríos, R., Solano, E. y Venegas, J.M. 2015. Morfología y geoquímica de los suelos de Xochimilco. *Terra Latinoam*. 33: 263-273.
- Holt, A.E., y Miller, S.W. 2011. Bioindicators: Using organisms to measure environmental impacts. *Nature Education Knowledge*. 2(2): 1-8.

- Instituto Nacional de Pesca. 2012. Acuacultura Tilapia: Acuacultura comercial. <https://www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuacultura-tilapia> (Descargado el 07 de abril del 2022).
- Koeck, M. 2019. *Girardinichthys viviparus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T9196A3150258.en> (Descargado el 2 de septiembre del 2021).
- Koeck, M. y Maiz-Tome, L. 2019. *Goodea atripinnis*. The IUCN List of Threatened Species 2019. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T133768576A1276740.en> (Descargado el 2 de septiembre del 2021).
- Landgrave, R. y Moreno-Casasola, P. 2012. Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación ambiental* 4(1): 19-35.
- Latournerié-Cervera, J. R. Arana-Magallón, F. C. Saldaña-Arias G.A y Rodríguez-Ayala A. (2015). Ecofisiología del mexcalpique (*Girardinichthys viviparus*) del humedal de San Gregorio Atlapulco, Xochimilco: I.- Caracterización de la población natural, crecimiento y requerimientos de energía en cautiverio. XXII Congreso Nacional de Zoología. Mazunte, Chiapas. Res. 459.
- Li, L., Bingui, Z. y Lusan, L. 2010. Biomonitoring and Bioindicators used for river ecosystems: Definitions, Approaches and Trends. *Procedia Environmental Sciences*. 2: 1510-1524.
- Lyons, J., Gutiérrez-Hernández, A., Díaz-Pardo, E., Soto-Galera, E., Medina-Navarrete, M. y Pineda-López, R. 2000. Development of a preliminary index of biotic integrity (IBI) based on fish assemblages to assess ecosystem conditions in central Mexico. *Hydrobiologia* 418: 57–72.
- Maiz-Tome.2019. *Algansea tincella*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T191254A1974385.en> (Descargado el 2 de septiembre del 2021).
- Markert, B., Breure, M. y Zeichmaster, H.G. 2003. Bioindicators and biomonitoring: Principles, Concepts and Applications. *Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*. 6: 15-25.
- Mauerhofer, V., Kim, R.E. y Stevens, C. 2015. When implementation works: A comparison of Ramsar Convention implementation in different continents. *Environmental Science and Policy* 51: 95-105.

Mejía-Guerrero, O. 2019. *Evarra bustamantei*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T8431A3145702.en> (Descargado el 2 de septiembre del 2021).

Mejía-Guerrero, O. 2019. *Evarra eigenmanni*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T8432A3145753.en> (Descargado el 2 de septiembre del 2021).

Mejía-Guerrero, O. 2019. *Evarra tlahuacensis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T8432A3145753.en> (Descargado el 2 de septiembre del 2021).

Meléndez-Herrada, A. y Romero, F.J. Humedales del centro de México 2a parte: Aves de Xochimilco. http://www.dumac.org/dumac/habitat/esp/notas/notas_marzo/HUMEDALES_MEXICO.pdf (Descargado el 07 de abril del 2022).

Miller, R. R., Minckley, W.L., Norris, S.M., Hall, M. y Schmitter, J.J. 2005. Freshwater fishes of Mexico. University of Chicago. Chicago. 180 pp.

Moreno, C.E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. 1era ed. M&T – Manuales y Tesis SEA. Zaragoza, España. 84 pp.

Narchi N. E. 2013. Deterioro Ambiental en Xochimilco: Lecciones para el cambio climático global. Veredas: Revista del Pensamiento Sociológico. 27: 177-197

Narchi N.E. y Canabal-Cristianni, B. 2017. Percepciones de la degradación ambiental entre vecinos y chinamperos del Lago de Xochimilco, México. Sociedad y Ambiente. 12: 5-29.

Navarrete-Salgado, N.A., Contreras-Rivero, G. y Fernández G .2004. Abundancia y estado sanitario del mexclapique (*Girardinichthys viviparus* Bustamante) en cuerpos de agua del centro de México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 9(2): 143-146.

Olvera, B.M., Gómez, J.M., Peña, B.M. Gaspar M.T. y Pérez, C. 2009. Reproducción de Menidia jordani (Atheriniformes: Atherinopsidae), en el lago de Xochimilco, México. Ciencia Pesquera 17(2): 65-75.

Orozco-Almanza, J.G., Amezcua Cornejo, P., Guzmán Ortega, M., López Mejía, S., Lucero Magdaleno A.L. y Mendoza Peralta, L.A. 2012. Xochimilco. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Ciudad de México. 74 pp.

- Pérez-Munguía, R., Pineda-López, R. y Medina-Nava, M. 2006. Integridad biótica de ambientes acuáticos
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/533/integridad.pdf>
(Descargado el 07 de abril del 2022).
- Pérez-Espejo, R. 2008. El lado oscuro de la ganadería. Revista latinoamericana de economía. 39 (154): 218-227.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal. 2015. ANP-EXGS: Problemas generales y particulares.
<http://189.204.244.147/index.php?pagina=problematica2> (Descargado el 04 de junio del 2022).
- Quiñonez-Amezquita, C.T. 2005. Chinampas y chinamperos: Los horticultores de San Juan Tezompa. Tesis doctoral, Universidad Iberoamericana Campus Ciudad de México. <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/014615/014615.pdf>
(Descargado el 12 de septiembre del 2021).
- Ríos, R. y Mazzoni, R. 2013. Measuring diversity: Looking for processes that generate diversity. Natureza y Conservação 73(8): 1-14.
- Secretaria de Salud. 2022. NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación 2 de mayo de 2022.
- SEMARNAT. 2019. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental– Especies nativas de México de flora y fauna silvestres– Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio– Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación 14 de noviembre de 2019.
- Tenorio-Colín, G. 2003. Caracterización isoenzimática de *Oreochromis niloticus* y *O. mossambicus* introducidas en México. Ciencia y Mar. 19: 11-24.
- Universidad Politécnica de Cartagena. 2008. Análisis de aguas.
https://www.upct.es/~minaeees/analisis_aguas.pdf (Descargado el 06 de julio del 2022).
- Van Aerle R., T.J Runnalis y C.R Tyler. 2004. Ontogeny of gonadal sex development relative to growth in fathead minnow. Journal of Fish Biology 64: 355–369.
- Vázquez-Silva, G., Arana Magallón, F.C., Núñez García, L.G., Martínez Santiago, A., Cruz Aviña, J.R. 2017. Contribución al estudio de la ictiofauna del Lago San

Gregorio Atlapulco y Canales de Xochimilco. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias. 8(19): 33-46.

Von Bertrab, I. 2013. De tilapias, peces y ajolotes: Discursos sobre la restauración ecológica de Xochimilco. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2013/agosto/0698408/0698408.pdf> (Descargado el 21 de octubre del 2021).

Zambrano, L.G., Scheffer, M., y Martínez-Ramos, M. 2001. Catastrophic response of lakes to benthivorous fish introduction. OIKOS. 94: 344-350.

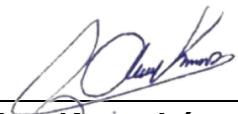
Zambrano, L.G., Suman-Arias, C.U., Jiménez-Jiménez, O., Marín-Betanzos, L.E. Miyano-Celaya, M., Rivas, M.I. y Villaseñor-Rojas, R. 2019. Conservación y Reactivación de la Zona Chinampera de Xochimilco (Segunda Fase) Informe final. https://a44fa4ff-5795-428d-a92d-09cfeb810102.filesusr.com/ugd/862719_5e74da094ab14969ad17ad6169c26bc3.pdf (Descargado el 04 de junio del 2022).

Zhang, L., Mei, X., Tang, Y., Razlutskij, V. Peterka, J., Taylor, WD., Naselli-Flores, Luigi., Liu, Zhengwen., Tong, Chunfu. y Zhang X. 2022 Effects of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) on phytoplankton community structure and water quality: a short-term mesocosm study. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. 423(11): 1-8.

Vo.Bo.



Dra. Gabriela Vázquez Silva
(No. Eco.30288)



Biol. Ana Karen López de la Rosa
(Céd. Prof. 12194410)