



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE BIOLOGÍA

“Variables bióticas y abióticas como indicadores de
heterogeneidad en el Lago de Xochimilco, Distrito Federal.”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

ANA VICTORIA CONTRERAS RUIZ ESPARZA

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. LUIS ZAMBRANO GONZÁLEZ

COMITÉ TUTOR:
DRA. MARISA MAZARI HIRIART
DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO

MÉXICO, D.F.

Febrero , 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 17 de octubre de 2011, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** de la alumna **CONTRERAS RUIZ ESPARZA ANA VICTORIA** con número de cuenta **98543201** con la tesis titulada "**Variables bióticas y abióticas como indicadores de heterogeneidad en el Lago de Xochimilco, Distrito Federal**", realizada bajo la dirección del **DR. LUIS ZAMBRANO GONZÁLEZ:**

Presidente: DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER
Vocal: DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ
Secretario: DR. ALONSO AGUILAR IBARRA
Suplente: DR. ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS
Suplente: DRA. MARISA MAZARI HIRIART

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 9 de enero de 2012.

M. del Coro Arizmendi
DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA

c.c.p. Expediente del (la) interesado (a).

AGRADECIMIENTOS:

Al **Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM** por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto y de continuar con mi formación académica y profesional. Igualmente por el apoyo económico para realizar una estancia internacional.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** mi más profundo agradecimiento por brindarme el apoyo económico necesario para realizar la maestría.

Al **Instituto Nacional de Ecología** y a la **Iniciativa Darwin** por su apoyo económico para la realización de este proyecto.

A los miembros de mi comité tutorial:

Dr. Luis Zambrano González
Dra. Marisa Mazari Hiriart
Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento.

AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS:

Al Dr. Luis Zambrano por su amistad, ayuda y paciencia en el desarrollo de mi formación académica.

A la Dra. Marisa Mazari y el Dr. Leopoldo Galicia por brindarme sus consejos y ayuda durante estos últimos años. Gracias por toda la paciencia que han tenido durante este proyecto y por creer en mí.

A los Dres. Enrique Martínez, Alonso Aguilar, Javier Carmona y Roberto Lindig por ayudarme con sus conocimientos, aportaciones e interés para mejorar esta tesis.

Al Dr. Alfredo Saynes por sus aportaciones a este proyecto.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES:

A mi mamá por ser un ejemplo a seguir, por su cariño y sabiduría pero sobre todo por su paciencia durante este largo proceso.

A mi papá por enseñarme que al final el amor es lo más importante y lo puede todo, yo también todo el tiempo estoy pensando en ti, en el brillo del sol y una mirada tuya.

A mis hermanos por ser mi familia, mi soporte y mi fuente de sabiduría de todas las corrientes, colores y sabores. Por además brindarme la alegría de tener nuevos amigos en sus parejas y nuevas adoraciones en los sobrinos.

A Juan por que me cae bien, por ser mi compañero, mi soporte, mi puerto y por toda la ayuda y cariño durante este tiempo, te quiero mucho.

A Roberto Altamirano, sin quien este proyecto no hubiera sido posible, gracias por todo ese esfuerzo y por enseñarme un poco más de Xochimilco.

A Sara Salinas, Bibiana, Ariana y Sara Estrada por seguir siendo mi girl-power, gracias por su amistad.

A Julio, Ángel, Yair, Lupita, Cristina, Daniel, Teo, a los Hugos (Tovar y Cortes), Paula, Paty, Fer, César, Laura, Gustavo, Emilio, Cinthya y a todos los que han estado o pasado por el lab mil gracias por su amistad y apoyo y por todas las aventuras vividas, sin ustedes no hubiera sido lo mismo.

A Vero, Haru, Fer y Pía por no dejarme olvidar ni por un momento esa otra parte que es vital para mí, gracias por su amistad.

"Nunca digas de esta agua no beberé..."
Sabiduría popular.

ÍNDICE

Resumen

Introducción	1
Calidad del agua	3
Efectos de la calidad del agua sobre especies nativas	5
Especies de peces que habitan en Xochimilco.....	6
Hipótesis y objetivos	11
Área de estudio	12
Metodología	14
Métodos de campo	14
Métodos estadísticos	17
Análisis espaciales	19
Modelos de distribución potencial	21
Resultados	22
Caracterización de las variables abióticas	22
Caracterización de las variables bióticas	26
Agrupación de las variables bióticas y abióticas por zonas	33
Relación entre las variables bióticas y abióticas	34
Modelos de distribución potencial	39
Discusión	45
Caracterización de las zonas	45
Variabilidad temporal	54
Conclusiones	56
Recomendaciones	57
Referencias	58

Anexos

RESUMEN

Las actividades humanas juegan un papel determinante en el aumento de la heterogeneidad en los sistemas acuáticos. La gran mayoría de estas actividades se llevan a cabo en las orillas de ríos y lagos, de manera que no necesariamente afectan a todo el cuerpo de agua, sino únicamente a una sección del mismo. Sin embargo, en el caso de estudio los canales incrementan el efecto que tienen sobre la superficie las actividades de la orilla.

En el caso de Xochimilco, las condiciones del agua presentan una gran heterogeneidad espacial, que se ha podido asociar a diferentes tipos de uso de suelo. Así se genera un mosaico de condiciones que pueden ser agrupadas en cinco zonas: chinampera (uso tradicional de la tierra sin agroquímicos); urbana (uso habitacional con drenajes irregulares); turística (presencia de invernaderos y turismo); chinampera-urbana (zona de transición entre un uso agrícola y una menor densidad habitacional) y chinampera tecnificada (agricultura a cielo abierto con gran uso de agroquímicos y maquinaria y algunos invernaderos).

Existe evidencia que sugiere que las especies como *Ambystoma mexicanum* sobreviven de manera diferencial en cada zona. Sin embargo, no es claro si este patrón también ocurre con otros vertebrados de gran movilidad, como los peces.

El objetivo de este trabajo fue entender si las especies que habitan los canales de Xochimilco, son afectadas de manera diferencial por las condiciones fisicoquímicas presentes en cada una de las zonas mencionadas anteriormente. Para cumplir con dicho objetivo se midieron y analizaron algunas variables fisicoquímicas y bióticas. Los resultados sugirieron que las cinco zonas previamente descritas son significativamente distintas entre sí tanto para las variables bióticas como las abióticas.

La zona chinampera presentó las condiciones más favorables para la comunidad íctica, con presencia de todas las especies, con altas abundancias y con buena salud. Esto coincidió con ser la zona con valores más bajos para las variables fisicoquímicas. Las zonas urbana y turística presentaron altas concentraciones de nitratos y amonios. Estos factores estuvieron asociados con la baja abundancia y la precaria salud de los peces, más no limitaron la presencia de ninguna especie. Las zonas chinampera - urbana y tecnificada fueron las menos favorables, por que tienen altos valores de conductividad, sólidos disueltos y fosfatos que limitaron la presencia de especies, incluso en un sitio sólo se encontró una especie en muy baja densidad y con un estado de salud degradado.

El lago de Xochimilco es un ecosistema altamente perturbado en el que las actividades humanas que se desarrollan en las chinampas son determinantes para la vida acuática. Los resultados nos permiten conocer mejor el funcionamiento del sistema y brindan información relevante para su conservación y restauración.

ABSTRACT

Human activities are playing a key role in the increased heterogeneity in aquatic systems. The vast majority of these activities are close to the shore of rivers and lakes, therefore not necessarily affecting the entire body of water, but only to a section of it. In our study case, due to the nature of the channels, human activities affect the entire aquatic surface.

In the case of Xochimilco spatial heterogeneity of abiotic conditions had been associated with different types of land use. Creating a mosaic of conditions that can be grouped into five areas: chinampera (traditional agricultural land use without agrochemicals), urban (residential use with non-regulated drainage discharges), tourism (presence of greenhouses and tourism); chinampera-urban (transition area, from agriculture to urban but with low housing density) and technified chinampas (agriculture heavily using agrochemicals, machinery and some greenhouses).

Evidence suggests differential survival of species like *Ambystoma mexicanum* between areas with different land use. However, it is unclear if other highly mobile vertebrates such as fish are also affected.

The objective of this work, is to understand whether fish species inhabiting Xochimilco channels, are differentially affected by the physicochemical conditions of the water occurring in the above mentioned zones. To meet this objective physicochemical and biotic variables were measured and analyzed. . The results suggest that the previously described five areas are significantly different from each other for both biotic and abiotic variables.

Chinampera zone, presented the most favorable conditions for fish communities; finding in it all the species, with high abundances and with signs of good health. This area had the lowest values of the measured physicochemical variables. Urban and tourist zones had high concentrations of nitrate and ammonium. These factors were associated with low abundances and poor health of the fishes, but did not limit the presence of any specie. Chinampera-urban and technified were the less favorable areas, due to high values of conductivity, dissolved solids and phosphates, limiting the presence of different species, to the extent that in one site, we found only one species, in low abundances and in a poor health state.

The lake of Xochimilco is a highly disturbed ecosystem in which human activities are critically affecting aquatic life. Our results allow us to better understand the functioning of the system, providing relevant information for conservation and restoration.

INTRODUCCIÓN

El concepto de heterogeneidad espacial ha sido introducido en el estudio de los ecosistemas acuáticos recientemente. Esta aportación ha ayudado a explicar los fenómenos ecológicos naturales y además ha aportado información sobre los efectos que tienen las actividades humanas en los cuerpos de agua y las especies que ahí habitan (Steinman y Denning, 2005).

Los promotores de la heterogeneidad espacial están asociados con la orientación y conectividad con otros cuerpos de agua, los afluentes que lo alimentan, los usos de suelo aledaños cuyos escurrimientos repercuten en la calidad del agua y el efecto que tienen los cuerpos de agua sobre la recarga de los sistemas de agua subterráneos. Las modificaciones antropogénicas de estas variables repercuten en una mayor heterogeneidad dentro del sistema, las cuales en la mayoría de los casos tienen efectos negativos (Steinman y Denning, 2005).

Por ejemplo, el tipo y concentración de contaminantes en un cuerpo de agua determinan la calidad de hábitat y por ende las zonas de distribución de biodiversidad se verán reducidas (Steinman *et al.*, 2003; Zutshi *et al.*, 2008). La modificación de los patrones de conectividad entre distintos cuerpos de agua afecta la movilidad de las especies nativas, promueve la invasión de especies exóticas; facilitan la desecación, la pérdida de hábitat y la disrupción en las cadenas tróficas debida a la disminución en el flujo de energía entre los cuerpos de agua. Las actividades humanas presentes en las laderas influyen en la acumulación de nutrientes y sedimentos en los sistemas acuáticos, produciendo inundaciones o desecación y modificando la productividad del mismo. Lo anterior repercute en la calidad del agua que se infiltra a los sistemas de agua subterránea (Steinman y Denning, 2005).

Los efectos de la heterogeneidad espacial en los ecosistemas acuáticos producen una disrupción del hábitat para las especies que ahí habitan. Esto se incrementa cuando se trata de un lago urbano, ya que todos los promotores de heterogeneidad se ven maximizados. Un ejemplo de ello es el Lago de Xochimilco, en el Distrito Federal. Si bien este cuerpo de agua es nombrado

comúnmente como un “lago” en realidad se trata de un humedal ya que no alcanza más de 6 m de profundidad.

El lago de Xochimilco es un sistema que ha sido modificado desde tiempos prehispánicos (Rojas y Pérez, 1985). Junto con el lago de Texcoco y Chalco, Xochimilco representa reminiscencias del último lago que aún prevalece del conjunto de cinco lagos que existían en el Valle de México (Chalco, Xochimilco Texcoco, Xaltocan, y Zumpango). La desaparición de los lagos Xaltocan y Zumpango y la reducción de las áreas de los otros tres se debieron principalmente a medidas para evitar las inundaciones en la Ciudad de México, aunados a la presión de la mancha urbana (Rojas, 2004). En particular, durante el último siglo se llevaron a cabo dos grandes obras el Drenaje Profundo y el Gran Canal que influyeron en la desecación del sistema de lagos (Aguilar *et al.*, 2006).

El lago de Xochimilco aún conserva el sistema de producción agrícola utilizado por los aztecas que consiste en “robar espacio al lago” por medio de la sobreposición del limo del lecho acuoso (Rojas y Pérez, 1985). Este proceso provee un suelo rico en nutrientes para el cultivo. Creando un paisaje de isletas rectangulares que sobresalían 60 cm de la superficie de agua y que tenían entre 3 y 6 m de ancho y de 5 a 100 m de largo (Merlín-Uribe, 2009). Estas isletas llamadas chinampas estaban rodeadas por canales (Rojas y Pérez, 1985). En la época prehispánica, las chinampas se encontraban en los lagos del sur por contar con agua dulce (Aguilar *et al.*, 2006). Este tipo de cultivos solía ser sumamente exitoso, todavía en la década de los 50's era el sistema más productivo de la Meseta Central.

En la actualidad el abastecimiento de agua de los canales de Xochimilco proviene de tres plantas de tratamiento de aguas residuales: San Luis Tlaxiatemalco, San Lorenzo y Cerro de la Estrella (Aguilar *et al.*, 2006). En cambio el agua proveniente del acuífero se utiliza para abastecer de agua, para uso humano, a la ciudad a través de 77 pozos de extracción que se encuentran en esta zona (Cisneros, 2005).

Se ha calculado que en la antigüedad los cinco lagos cubrían una superficie de ~290 km², en la actualidad el lago de Xochimilco tan solo cubre ~ 40 Km² (Zambrano *et al.*, 2009). Debido a la tradición chinampera en este lago, los canales ocupan tan solo 203 Km. lineales. Además Xochimilco está sujeto aún a la constante demanda de uso de suelo habitacional que ejerce la Ciudad de México, una de las megalópolis más grandes del mundo.

En las últimas décadas se han llevado a cabo diversos esfuerzos nacionales e internacionales para conservar este ecosistema. En 1987 Xochimilco fue decretado en su totalidad Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, con ello se buscaba proteger y promover la chinampería y evitar el cambio de uso de suelo. En 1989 en un intento de restaurar el ecosistema se creó el Parque Ecológico de Xochimilco, ubicado en el extremo norte del lago, con 200 hectáreas de extensión. En el 2004 fue incluido en la lista de los sitios RAMSAR debido a las especies endémicas y migratorias que lo habitan, la fragilidad del hábitat así como los servicios ecosistémicos que ofrece el humedal.

Entre los esfuerzos de conservación se encuentran algunos estudios que han intentado abordar el estado de conservación en el que se encuentra. En particular, Lyons *et al.* (2000) realizó un estudio comparativo de los lagos de la Meseta Central de México utilizando un Índice de Integridad Biótica (IBI por sus siglas en inglés), de acuerdo con sus resultados Xochimilco es uno de los ecosistemas más degradados.

De acuerdo con sus resultados, de las seis especies de peces nativas que estaban registradas para Xochimilco en 1900, cuatro habían desaparecido un siglo después. Dos de las cuales *Evarra bustamantei* (Navarro, 1955) y *Evarra eigenmanni* (Woolman, 1895) están extintas. *Menidia jordani* (Woolman, 1894) y *Girardinichthys viviparus* (Bustamante, 1837) son las únicas especies nativas que sobreviven (Lyons *et al.*, 2000).

Calidad del agua

En una aproximación a mayor escala, los distintos usos de suelo que existen al interior del área de canales de Xochimilco afectan las condiciones fisicoquímicas del agua. De tal manera que ha sido posible identificar cuatro zonas con características fisicoquímicas distintas y que están relacionadas a distintos usos de suelo (Zambrano *et al.*, 2009). Estas zonas son (Figura 1):

Zona A o chinampera: se encuentra inmersa en el área natural protegida, no tiene una influencia urbana directa, y es la zona que se encuentra más al norte, siendo la más conservada.

Zona B o urbana: los canales de esta zona están rodeados por asentamientos urbanos y algunos invernaderos. Está delimitada por la laguna de Tezhuilo y el canal de Apatlaco. La calidad de agua en esta zona, con respecto a las demás, es la de peor calidad.

Zona C o turística: Los asentamientos urbanos en esta zona existen desde hace más de cincuenta años. Sin embargo, desde hace tiempo el incremento del turismo ha promovido la agricultura intensiva para la venta de plantas de ornato. Esto no ha sido regularizado, aunque si fomentado por el gobierno, por lo que el uso de agroquímicos se vuelve evidente en el incremento de nutrientes en el agua, por lo que esta zona está clasificada como la segunda de peor calidad de agua en el sistema. En cuanto a su ubicación la zona turística se encuentra en la frontera con el área urbana en el extremo sur del humedal.

Zona D o chinampera urbana: Se encuentra al oeste, y esta inmersa en una matriz urbana pero aparentemente conserva la producción tradicional en chinampas. Además solo está comunicada con el resto del sistema por un canal. Por esta razón, al igual que la zona A, está clasificada como la que presenta la mejor calidad de agua.

Zona E o chinampera tecnificada: Esta zona no fue incluida en los análisis realizados por Zambrano *et al.* (2008). Enclavada en la localidad de San Gregorio Atlapulco, esta zona se encuentra en la frontera de la chinampería

tradicional y los invernaderos, donde si bien el cultivo no se realiza bajo techo, si se aplican agroquímicos y maquinaria en el proceso (Merlín-Uribe, 2009). Además la influencia de la mancha urbana es más limitada ya que es una comunidad rural. Se encuentra al este de los demás de canales de Xochimilco y superficialmente no está comunicada con ellos. El agua que circula por sus canales permite la visibilidad del fondo, no es una zona de fácil acceso por lo que no hay actividades turísticas.

Efectos de la calidad de agua sobre las especies nativas

Los efectos que tiene la calidad de agua de cada una de estas zonas sobre las especies que ahí habitan aún no han sido estudiadas. Sin embargo, estudios previos sobre la distribución potencial de *Ambystoma mexicanum*, sugieren que no todas las zonas son apropiadas para sustentar las condiciones mínimas para la supervivencia de la especie (Contreras *et al.*, 2009).

El *Ambystoma mexicanum* (axolote) es una especie de anfibio neoténico facultativo (Schaffer, 1989), con distribución endémica y restringida a los lagos de Xochimilco, Chalco y Chapultepec (Duhon, 1997; Zambrano *et al.*, 2004; Zambrano *et al.*, 2008), aunque se cree que originalmente se distribuía en los cinco lagos que conformaban la cuenca (Duhon, 1997). Esta especie tiene una gran relevancia cultural, biológica y biomédica. Fue venerado por los aztecas como un dios, el hermano gemelo de Quetzalcóatl. En la actualidad es utilizado como organismo modelo en biomedicina por su capacidad de regeneración de tejidos. Para su ecosistema tiene gran relevancia ya que es un depredador tope dentro de la cadena alimenticia (Valiente, 2006).

El axolote se encuentra en peligro de extinción de acuerdo con la International Union for Conservation of Nature (IUCN) (Zambrano *et al.*, 2008) y bajo protección especial de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF,2010)). En fechas recientes la estimación de su densidad de población disminuyó de 6000 ind/km² en 1998 (Graue, 1998) a 1000 ind/km² en 2006 (Zambrano *et al.*, 2007) a 100 ind/km² en 2008 (Contreras *et al.*, 2009).

Además, de acuerdo con los modelos de distribución potencial de esta especie, sólo existen pocos sitios donde aún se puede encontrar, los cuales no están conectados entre sí y abarcan áreas pequeñas (Contreras *et al.*, 2009). Estos sitios se encuentran principalmente en la zona chinampera y chinampera-urbana. Las zonas urbana y turística casi no obtuvieron valores de predicción (Contreras *et al.*, 2009). Durante muestreos previos a este proyecto no fue posible encontrar individuos de esta especie en las zonas anteriormente estudiadas. El único organismo que se encontró fue en la zona chinampera tecnificada.

La frágil situación en la que se encuentra el axolote no es más que un reflejo de las condiciones de su entorno. Por lo que cualquier esfuerzo dirigido a la conservación de la especie seguramente inducirá una mejoría en las condiciones del ecosistema. Para lograrlo es preciso conocer más a fondo la relación entre las especies acuáticas y la calidad del agua. Sin embargo, la baja densidad poblacional del axolote hace necesario utilizar otras especies acuáticas para estudiar el efecto que tiene la calidad del agua sobre ellas. A manera de contar con valiosa información para implementar medidas de mitigación.

Especies de peces que habitan Xochimilco

Durante los muestreos de previos a este estudio sólo se encontraron cuatro especies de peces presentes en la mayoría de las zonas y con números poblacionales superiores a 10 individuos. Estas especies fueron incluidas en este proyecto.



Figura 1. Especies de peces más abundantes del Lago de Xochimilco. Las cuatro especies son: a: *Menidia jordani*, b: *Goodea atripinnis*, c: *Cyprinus carpio*, d: *Oreochromis niloticus*.

Menidia jordani (Woolman, 1984)

Pez pequeño de 4 a 12 cm. Comprimido lateralmente. Cabeza alargada y aplanada. Hocico romo, apertura de la boca pequeña. Con el cuerpo cubierto de escamas, presenta una banda plateada en los flancos. Ovíparo de fecundación externa, alcanza la talla reproductiva al año de edad y con tan solo 48 -55 mm de longitud estándar. En el Lago de Xochimilco el pico reproductivo ocurre entre los meses de enero a mayo. La ovoposición está asociada al incremento de temperatura en estos meses. Pez con hábitos alimenticios carnívoros principalmente se alimenta de zooplancton, insectos, caracoles y peces pequeños (Olvera-Blanco *et al.*, 2009) (Figura 1a).

Especie endémica de la Meseta Central de México. Se distribuye en cuerpos de agua lénticos que pueden llegar a ser turbios y que suelen presentar hasta un metro de profundidad (Olvera-Blanco *et al.*, 2009). Es un pez comestible por lo que tiene relevancia económica, social y cultural (Ibáñez *et al.*, 2008). Si bien algunas especies de esta familia han sido registradas en alguna categoría de la lista roja de la IUCN no existe aún un análisis para esta especie.

Goodea atripinnis (Jordan, 1880)

Hocico de forma triangular y prolongado en vista lateral. Cuerpo alargado, considerablemente comprimido, con una ligera elevación en el dorso. Longitud del cuerpo variable entre 2.6 y 3.7 de la longitud estándar. (Miranda *et al.* 2010) (Figura 1b).

Existe una controversia ya que algunos autores consideran las características de *Goodea gracilis* como las del estado juvenil de *Goodea atripinnis*. Sin embargo, la primera ha sido considerada como especie vulnerable por la IUCN (Snoeks *et al.*, 2007) mientras que la segunda no está incluida en ninguna categoría de riesgo y se considera una especie tolerante (de la Vega-Salazar, 1996).

Especie nativa de la región Central de México, en particular de la Cuenca del Lerma, existen registros desde Nayarit hasta San Luis Potosí. De distribución subtropical cuyas temperaturas óptimas se encuentran entre los 18 y 24°C. Es una especie que suele vivir en el fondo de los cuerpos de agua someros.

Cyprinus carpio (Linnaeus, 1758)

Cuerpo alargado y comprimido. Labios gruesos con barbillas en los costados de la boca, siendo las del labio superior más cortas. Línea lateral con 32 a 38 escamas. Color variable de un parduzco verdoso en el torso, y costados, y amarillo-dorado en el área ventral. Aletas oscuras con un tono rojizo en la zona ventral (FAO 2004-2011) (Figura 1c).

Nativa de los ríos que van a los Mares Negro, Caspio y Aral, esta especie es de gran relevancia para la acuicultura desde el siglo XII cuando se tienen los primeros registros de su domesticación, pero su cultivo se propagó en el siglo XIX en Europa. Vive en las corrientes medias de aguas confinadas y poco profundas, tienen hábitos bentívoros y son omnívoras. Obtiene su mejor crecimiento entre los 23 y los 30°C, aunque puede sobrevivir inviernos fríos y bajas concentraciones de oxígeno (<0.5 mg/l). Las hembras alcanzan la

madurez sexual entre los cuatro y seis años mientras que los machos lo logran entre los tres y los cinco años. Desovan cuando el agua tiene temperaturas entre 17 y 18 °C, aunque las variedades asiáticas lo hacen cuando la concentración de iones en el agua disminuye abruptamente al inicio de la temporada de lluvias (FAO 2004-2011). Su desarrollo embrionario tarda alrededor de 3 días a temperaturas entre 20 y 23°C, llegan a vivir 50 años (Freyhof y Kottelat, 2008).

La carpa fue introducida en todos los continentes así como en Xochimilco. Debido a su hábito alimenticio de forrajeo ha sido asociada a la degradación de algunos hábitats en donde se le ha introducido. Sin embargo, de acuerdo con la IUCN esta especie se encuentra en la categoría de vulnerable en su lugar de origen (Freyhof y Kottelat, 2008).

Oreochromis niloticus (Linnaeus, 1758)

Cuerpo comprimido, longitud de la mandíbula superior sin dimorfismo sexual. Línea lateral interrumpida. Espinas rígidas, blandas y continuas en la aleta dorsal. Aleta caudal trunca. En temporada de desove las aletas caudal, dorsal y pectoral presentan una coloración rojiza, la aleta dorsal tiene numerosas líneas negras. Alcanza hasta los 60 cm de longitud y los 5 kg de peso (FAO 2008-2011) (Figura 1d).

Nativa del continente africano (FAO 2008-2011). El cultivo de esta especie data de 4000 años atrás en Egipto, donde se encontraron bajo-relieves en una tumba que muestran a esta especie. Sin embargo, el auge de su disseminación se dio con la revolución verde en las décadas de los 60's a los 80's. Especie tropical de aguas someras, cuya temperatura óptima está entre los 33-36°C. Resultan condiciones letales aquellas temperaturas inferiores a los 11°C y superiores a los 42°C. De hábitos omnívoros suele alimentarse cerca de la superficie. Alcanza su madurez sexual en estanques entre los 5 y 6 meses de edad. El desove se lleva a cabo cuando la temperatura alcanza los 24°C. Sus hábitos reproductivos son complejos, ya que la hembra lleva los huevecillos en la boca hasta que estos eclosionan, la incubación y crianza duran un periodo

de entre 1 y 2 semanas. Debido al cuidado parental esta especie no produce grandes cantidades de huevos. Sin embargo, las hembras pueden desovar continuamente, esta especie puede vivir más de 10 años y llega a pesar 5 kg. Se encuentra en la lista de especies invasoras del GISD (Global Invasive Species Database) (GISD 2011).

El alto nivel de degradación del ecosistema en el Lago de Xochimilco se ve reflejado en la heterogeneidad de las zonas que lo conforman. Lo anterior hace indispensable realizar estudios que permitan comprender la estructura y funcionamiento del sistema. Esto ayudará a maximizar los esfuerzos de manejo y restauración del lago, ya que de ello dependerá la existencia de este ecosistema en un futuro.

Para ello es necesario conocer los efectos que tiene las condiciones del agua en cada una de las zonas sobre la distribución y salud de las especies de peces que habitan en Xochimilco. De esta manera podremos evaluar las condiciones del hábitat y conocer los factores más relevantes en cada zona para sentar precedentes que ayuden en la elaboración de planes de manejo y restauración.

HIPÓTESIS

Si la variación en las condiciones fisicoquímicas de las distintas zonas en Xochimilco repercuten negativamente en la comunidad íctica entonces observaremos heterogeneidad espacial en la distribución, abundancia talla y salud de los peces que habitan en los canales.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Estimar las relaciones entre las condiciones fisicoquímicas del agua y las distintas especies de peces para caracterizar las distintas zonas de Xochimilco.

Objetivos Particulares:

- Caracterizar las condiciones tanto ambientales como bióticas prevalecientes en los canales de Xochimilco.
- Analizar la agrupación espacial de las variables bióticas y abióticas dentro de las zonas descritas en estudios previos.
- Establecer las relaciones entre las variables abióticas y las bióticas; cómo patrones de abundancias, tallas y estado de salud de los peces.
- Establecer las relaciones entre las variables abióticas y la distribución de las cuatro especies de vertebrados presentes en Xochimilco a partir de modelos de distribución potencial.

ÁREA DE ESTUDIO

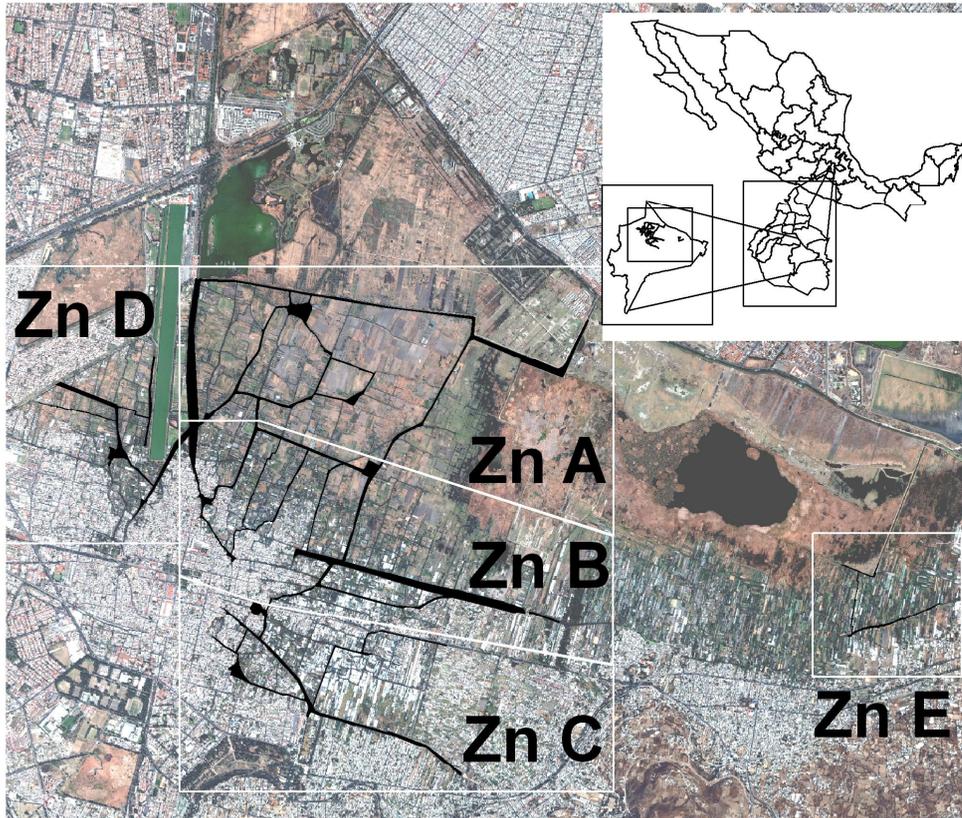


Figura 2. Localización del área de canales de Xochimilco en la República Mexicana.
Zn = Zona.

El Lago de Xochimilco se encuentra a 2240 msnm en la cuenca de México, caracterizándolo como un lago tropical de altura. Aunque debido a diversas modificaciones para desaguar la cuenca, la Comisión Nacional del Agua la agrupa en la región hidrológica del Pánuco, subcuenca del Lago Texcoco-Zumpango perteneciente a la cuenca del río Moctezuma (INEGI 2011).

En la parte norte de la delegación Xochimilco se encuentra una zona relictual del lago que lleva el mismo nombre, conformado por 203 Km de canales entre las coordenadas 19°15' y 19°07" de latitud y 99°04' y 99°07' de longitud. La UNESCO lo declaró Patrimonio de la Humanidad en 1987. En 1992, el área comprendida entre las coordenadas 19°15'11" y 19°19'15" de latitud y 99°00'58" y 99°07'08" de longitud fue decretada como zona sujeta a conservación ecológica bajo el nombre de "Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco" (INEGI 2002).

En cuanto al clima Xochimilco tiene una precipitación pluvial anual que oscila de los 600 a los 1100 mm y en la mayoría de su territorio tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw). La temperatura promedio anual es de 16°C (INEGI, 2011).

Una lista de 180 especies de plantas distribuidas en 135 géneros y 63 familias es el resultado del recuento florístico del Área Natural Protegida (GDF, 2006). Cuatro de estas especies: *Nymphaea mexicana* (ninfa), *Eritrina coralloides* (colorín), *Cupressus lusitanica* (cedro blanco) y el *Hacer negundo* var. *mexicanum* (acezintle) se encuentran bajo protección debido a que sus poblaciones han disminuido (GDF, 2006).

En el Área Natural Protegida también es posible encontrar 139 especies de vertebrados: 21 especies de peces, seis de anfibios, 10 de reptiles, 79 de aves, y 23 de mamíferos (GDF, 2006). Nueve de estas especies están sujetas a algún tipo de protección de acuerdo con la NOM-059 (DOF, 2010). Este lago además es refugio de algunas especies de aves migratorias.

La delegación Xochimilco cuenta con 415, 007 habitantes y un total de 102,750 viviendas (INEGI, 2011). Del total de la superficie de esta demarcación el 56% es de uso urbano, el 37% agrícola, el bosque ocupa un 4% y el pastizal un 3% (INEGI, 2011). Al comparar estos resultados con los datos de (INEGI, 2002), el uso de suelo agrícola perdió 4.3% de su superficie en los últimos nueve años.

METODOLOGÍA:

Métodos de campo:

Para comprobar la permanencia de los patrones de heterogeneidad durante las distintas temporadas del año, se realizaron dos muestreos en el 2008 los cuales comprendieron los periodos de secas (11 enero – 1 febrero) y lluvias (8 julio – 11 septiembre). En ambos muestreos se retomaron los criterios de selección utilizados en Contreras et al., 2009 obteniendo datos para 25 canales previamente seleccionados. Se utilizaron canales con una longitud mayor a 500 metros, que estuvieran conectados entre sí y que tuvieran alguna relevancia para la distribución de *Ambystoma mexicanum* (Contreras et al., 2009).

En cada uno de los canales seleccionados se intentó obtener un mínimo de 20 puntos de colecta donde se recabaron datos de las variables fisicoquímicas y bióticas. Este número osciló dependiendo de la longitud y accesibilidad del canal. Se muestrearon entre uno y siete canales por cada zona dependiendo de si cumplían con las características anteriormente descritas. El objetivo de este muestreo intensivo fue maximizar la cantidad de datos disponibles para optimizar los modelos de interpolación. Los cuales nos permitirían ver el comportamiento espacial de las variables fisicoquímicas y posteriormente realizar los modelos de distribución potencial. En total se obtuvieron 411 puntos para el primer muestreo y 279 para el segundo. Cada uno de estos puntos fue georreferenciado con un GPS marca Garmin modelo Plus III.

En cada punto de colecta se obtuvieron dos tipos de variables: fisicoquímicas y de comunidad íctica.

Las variables fisicoquímicas obtenidas fueron las siguientes: temperatura (°C), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales (ppm), oxígeno disuelto (mg/L), porcentaje de saturación de oxígeno (%), profundidad (m) y pH, fueron recabados con una sonda multiparamétrica marca YSI modelo 6600.

En cuanto a la colecta de datos de la comunidad íctica, se utilizó una atarraya como arte de pesca. Las características de la atarraya fueron un diámetro de 6

m y un ojo de maya de una pulgada. En cada punto de colecta se realizó un lance de atarraya. Los lances de ambos muestreos fueron realizados por un pescador de amplia experiencia de la localidad, el Sr. Roberto Altamirano.

Cada uno de los peces colectados fue identificado hasta el nivel de especie y medido obteniendo su longitud patrón. Además se obtuvo información sobre las condiciones de salud de cada individuo, las variables registradas fueron: deformidades, erosiones, lesiones y tumores. Entendiendo por deformidad la falta o cambio de alguna parte del cuerpo del pez. Por erosión, cualquier proceso infeccioso sobre la piel del individuo. Por lesión, cualquier herida reciente, y por tumor cualquier acumulación anormal de tejido. Estos criterios fueron retomados de una herramienta conocida como DELT por sus siglas en inglés (Deformity, Erosion, Lesion and Tumor) (Simon, 1998).

El DELT es parte de la implementación de los índices de integridad biótica que han sido desarrollados para identificar el grado de degradación de un ecosistema. Las variables en que se basan estos índices reflejan la estructura de la comunidad y permiten hacer inferencias de los efectos que las actividades humanas tienen sobre la estructura de la comunidad. Los cambios en la estructura de la comunidad de peces son reflejo de modificaciones en los flujos tróficos, la calidad de agua y por ende del estado de su hábitat, por lo que es posible establecer distintos grados de degradación ambiental (Fausch *et al.*, 1984; Miller *et al.*, 1988).

Un segundo tipo de muestreo se realizó al mismo tiempo para obtener datos de tres variables de nutrientes. Estas variables fueron: amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$) (mg/L), nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) (mg/L) y fosfatos (PO_4) (mg/L). Se colectaron 250 ml de agua en frascos de plástico a 30 cm de profundidad y fueron almacenados en hielo hasta su procesamiento en el laboratorio, ese mismo día. La cantidad de datos de estas variables es menor a las demás puesto que no se pueden tomar “*in situ*”. Además, una cantidad menor de datos es suficiente para generar interpolaciones de estas variables (Zambrano *et al.*, 2009). Los mismos 25 canales fueron utilizados, pero los datos se recabaron en las intersecciones de

cada canal y en la parte media obteniendo un total de 54 puntos para el primer muestreo y 53 para el segundo.

Las lecturas de los nutrientes se obtuvieron siguiendo los siguientes protocolos: Amonio fue analizado con el método de Nesslerización (APHA 2005). Nitratos con el método de reducción de cadmio y el de reducción de zinc (APHA, 2005). Fosfatos se utilizó el método de reducción del ácido ascórbico y el del ácido vanadomolibdofosfórico (APHA, 2005).

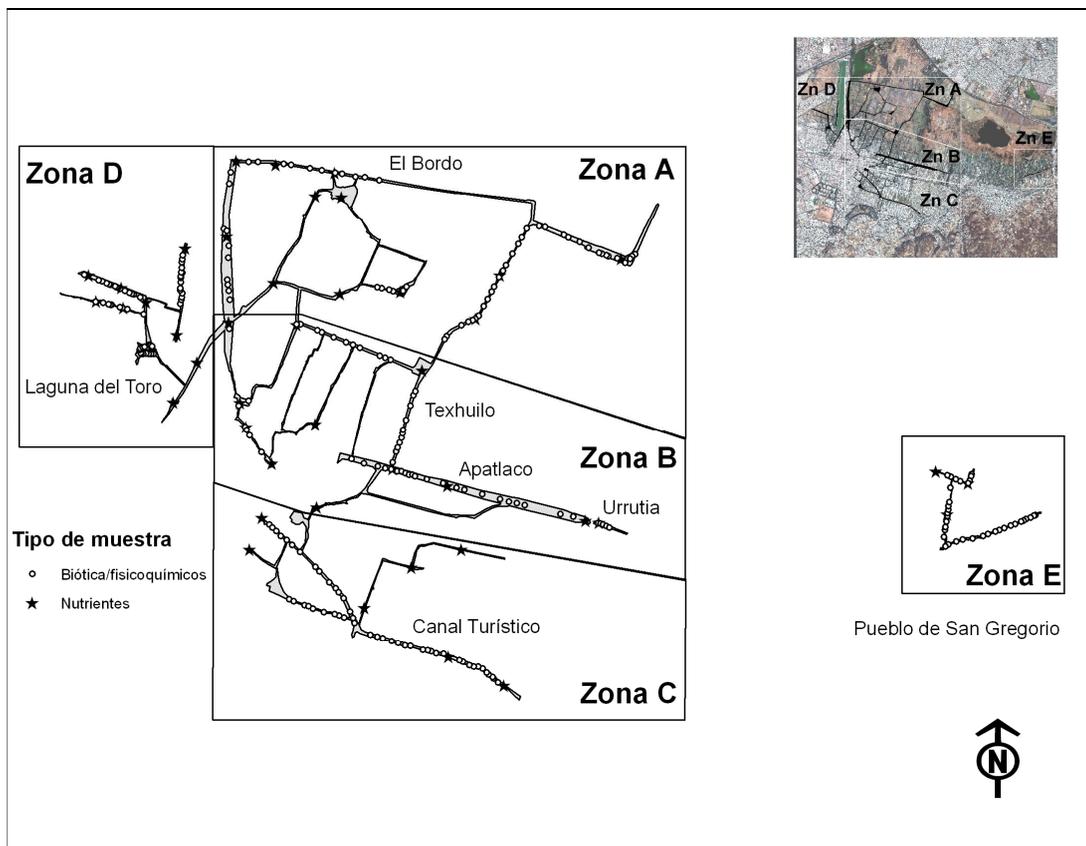


Figura 3. Mapa que muestra los puntos de colecta obtenidos durante el muestreo de secas.

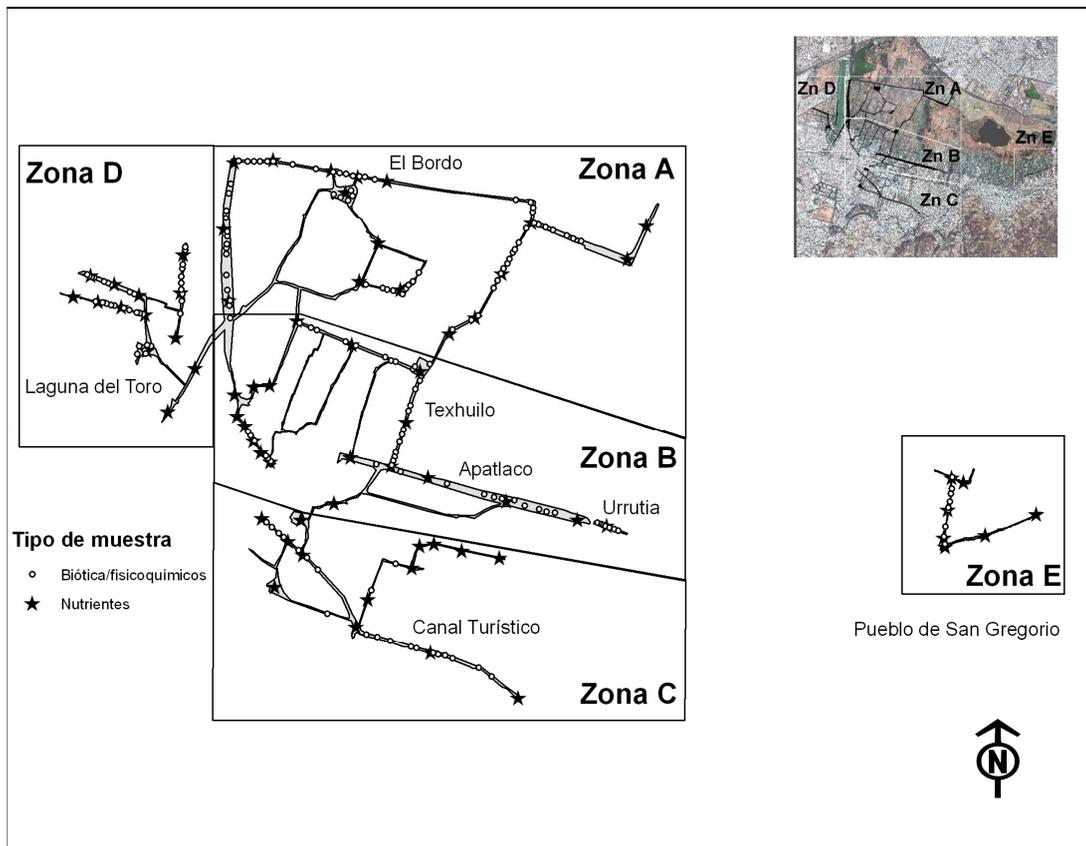


Figura 4. Mapa que muestra los puntos de colecta obtenidos durante el muestreo de lluvias.

Métodos estadísticos

Para hacer la caracterización ambiental y biótica en los canales de Xochimilco se realizó un análisis exploratorio de los datos recabados en ambos muestreos. Estos análisis consistieron en la obtención de medias y desviación estándar las variables bióticas y ambientales; ANOVAs para comparar entre las distintas zonas dentro de cada muestreo y pruebas de t para comparar los dos muestreos. Además se observaron las tendencias del estado de salud de los peces en cada muestreo.

La necesidad de comprender la relación entre las variables bióticas y abióticas y la relación de éstas con las zonas hicieron indispensable el uso de análisis multivariados. Este tipo de herramientas busca establecer las relaciones entre tres o más variables de manera simultánea. Para lograrlo, se calculan las comunalidades tomando como base las correlaciones múltiples entre las

variables, es decir, la proporción de la varianza explicada por los factores comunes en cada variable.

Para analizar las variables bióticas y abióticas a manera de probar si se comportan de manera significativamente distinta entre las zonas previamente descritas, se utilizó un análisis discriminante (Hair *et al.*, 1998). Estos análisis discriminantes tienen como finalidad identificar la pertenencia de un objeto (dato de una variable) a un grupo predeterminado.

Para ello intenta demostrar que las medias de un conjunto de variables independientes pertenecientes a un grupo predeterminado son iguales a las de los demás grupos. Utilizando una función discriminante con la cual se obtienen los centroides, es decir, la media de los datos de todas las variables que pertenecen a un grupo. La distancia entre los centroides de los grupos indican una menor similitud entre ellos; el solapamiento, por ende, implica igualdad (Zuur *et al.*, 2007). Estos análisis se realizaron con el programa SPSS versión 15.0 (Chicago, US).

Para establecer si las variables fisicoquímicas influyeron en las bióticas de manera que se viera reflejado en la abundancia, talla y estado de salud de los peces se realizó un análisis de redundancias RDA (por sus siglas en inglés; *Redundancy Analysis*), como lo describen Legendre y Gallagher (2001). En este tipo de análisis busca la relación que hay entre las variables explicativas (fisicoquímicas) y las de respuesta (bióticas). El RDA muestra qué tanto de la varianza de las variables bióticas puede ser explicada por las variables fisicoquímicas. Es similar al análisis de componentes principales ya que al igual que éste busca encontrar aquellas variables que puedan explicar el mayor porcentaje de varianza, sin embargo el RDA utiliza variables explicativas y de respuesta. El programa utilizado para llevar a cabo estos análisis fue CANOCO 4.0 para Windows (Wageningen, Holanda).

En ambos casos el tamaño de muestra fue reducido para cumplir con los supuestos de los análisis multivariados, donde los datos ausentes van en detrimento de las pruebas (Zuur *et al.*, 2007). Por lo que las variables limitantes fueron los nutrientes, ya que tenían una menor cantidad de puntos de muestreo.

La reducción de datos se realizó de la siguiente manera: en el caso de los fisicoquímicos, los datos utilizados para el análisis fueron aquellos cuyas coordenadas correspondieran a las de las variables limitantes. En cambio para los parámetros de abundancia, deformidad, erosión, lesión y tumor se sumó el número de individuos de aquellos puntos con las coordenadas más cercanas a las de los nutrientes, este mismo procedimiento se realizó para la talla de los peces, pero en este caso se utilizó la media aritmética de los datos.

Análisis espaciales

Para poder analizar la relación espacial de las variables ambientales dentro de las zonas descritas y también establecer la relación entre las variables ambientales y la distribución potencial de las especies se realizaron interpolaciones utilizando los datos de fisicoquímicos y nutrientes recabados en ambos muestreos. Estos modelos matemáticos nos permiten estimar el valor de un punto del que no se tienen datos a partir de otros ya colectados en localidades cercanas.

Dos técnicas son las más frecuentemente utilizadas para realizar las interpolaciones: el Gravitacional o Inverso de la Distancia (IDW por sus siglas en inglés, *Inverse Distance Weighted*) y el Kriging. El IDW supone que cada punto de muestreo tiene una influencia local, por lo que los puntos más cercanos a las celdas a interpolar tendrán mayor influencia que aquellos que estén más distantes. El Kriging en cambio, cuantifica la auto correlación espacial de todos los puntos con que se alimenta el modelo, con ello traza la tendencia dando mayor peso a los puntos cercanos para calcular el valor de la nueva celda.

Si bien el método más utilizado es el Kriging, para este estudio elegimos utilizar el IDW con base en dos criterios: 1) El IDW es más eficiente cuando los datos de entrada cuentan con pocos puntos de muestreo, y cuando la distribución de los mismos no es del todo homogénea (Kravchenko, 2003). 2) El IDW es tan eficiente como el Kriging cuando se parte de una abundante base de datos de entrada (Villatoro *et al.*, 2008). De esta manera el IDW satisface los

requerimientos de interpolación tanto de las variables de nutrientes como las de fisicoquímicos debido a los tamaños de muestra.

El IDW permite modificar algunos parámetros en el modelo para delimitar la influencia que ejercen los puntos conocidos sobre los sitios a predecir. Para esto existen dos parámetros: 1) el poder que define en general la influencia de los puntos más cercanos sobre la predicción de la nueva celda o píxel, y 2) el radio de búsqueda que puede ser fijo o variable. El radio de búsqueda fijo está dado por la distancia de los puntos muestreados a la celda de interés, en tanto que el radio de búsqueda variable es el que se relaciona con el número de puntos que pueden determinar la predicción de la celda.

Los valores óptimos de estos dos parámetros se calculan minimizando la raíz cuadrada de la media del error de predicción (RMPSE por sus siglas en inglés, *Root Mean Square Prediction Error*). El RMPSE se basa en una validación cruzada para cuantificar el error de la superficie predicha, al predecir valores para puntos con valores conocidos que son obtenidos del análisis para esta prueba. Este proceso lo lleva a cabo varias veces para distintos valores de poder y de radios de búsqueda a manera de encontrar los valores óptimos, es decir aquellos que tengan menos errores de predicción y donde la superficie sea suavizada por la tendencia general de los datos.

Con esta herramienta se determinaron los valores óptimos de poder y radios de búsqueda para cada interpolación, los cuales fueron: poder con un valor de 2, radio de búsqueda fijo de 750 m, y radio de búsqueda variable con un máximo de 6 puntos de influencia y un mínimo de 3. Estos análisis se llevaron a cabo con el programa Arc Map 9.3 (California, US).

Debido a que el estudio es sobre las condiciones acuáticas presentes en los canales de Xochimilco, se creó un polígono que los delimitara y que sería utilizado como máscara al realizar los modelos de interpolación. Dicho polígono se obtuvo con el programa Arc Map 8.1 a partir de una imagen Quickbird, 2007 con una resolución de 60 cm.

Modelos de distribución potencial

Los modelos de distribución potencial para *Menidia jordani*, *Goodea atripinnis*; *Cyprinus carpio* y *Oreochromis niloticus* fueron obtenidos con el programa MaxEnt. Para ello el programa requiere de dos tipos de datos: sitios georreferenciados de los puntos de presencia de la especie, y una serie de capas geográficas con las condiciones ambientales del área que se desea predecir.

El cruce de información de las dos fuentes de datos fisicoquímicos (interpolaciones) y bióticas (puntos de presencia de las especies) ofrece información sobre las características ambientales de los sitios de presencia de la especie. Debido a que las relaciones entre las especies y el ambiente tienden a ser complejas, el modelo transforma las variables originales para buscar una relación con mayor poder explicativo. Estas transformaciones son: lineales, producto (multiplica las combinaciones pareadas de las variables), cuadráticas (las eleva al cuadrado), “de bisagra” (permiten un cambio en el gradiente de respuesta), “de umbral” (permite un cambio brusco o escalonamiento en el ajuste de la función) y finalmente categóricas (Elith *et al.*, 2011).

Las restricciones del modelo consisten en minimizar la aleatoriedad presente entre dos densidades de probabilidad, la de los puntos de presencia de la especie y la de las variables ambientales. De esta manera se eliminan todos aquellos sitios donde el modelo predice a la especie, si las características ambientales de estos no están cercanas a la media de las mismas en los sitios con presencias observadas (Elith *et al.*, 2011).

Dado que la generación del modelo se basa en la ponderación de las variables ambientales, MaxEnt entrega como parte de sus resultados una lista con aquellas que fueron más relevantes para la obtención del modelo.

RESULTADOS

Caracterización de las variables abióticas

Las condiciones acuáticas en el Lago de Xochimilco durante el periodo de secas fueron las siguientes: los canales tienen poca profundidad (0.87-1.53m), concentraciones de oxígeno superiores a los 3 mg/L, pH básico (9.11-9.62), y con altas concentraciones de sólidos disueltos totales (1.35-1.79 g/L), amonio (0.24-1.50mg/L), nitratos (0.26-10.12mg/L) y fosfatos (1.63-8.39 mg/L) (Tabla 1).

Durante el periodo de lluvias todas las variables ambientales, excepto los nitratos, presentaron diferencias significativas en comparación con el muestreo de secas. Las condiciones promedio en el sistema de canales muestran un decremento cercano al 50% en las variables de: conductividad, sólidos disueltos totales y nitratos. Además se registró un descenso en la concentración de oxígeno disuelto de un miligramo por litro, una acidificación del pH de 1.5 unidades y 27 cm menos de profundidad. En cambio la temperatura aumentó 5°C, el fosfato tuvo un incremento de 4 mg/L y el nitrato triplicó su concentración (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Resumen de las condiciones fisicoquímicas en los canales del Lago de Xochimilco durante ambos muestreos. **NOTA:** T= Temperatura; Cnd= Conductividad; SDT= Sólidos Disueltos Totales; OD%= Porcentaje de Saturación de Oxígeno; OD= Oxígeno disuelto; Prf= Profundidad; pH= Potencial de Hidrógeno; NH4= Amonio; NO3= Nitratos; PO4= Fosfatos; ND= Sin registro; D.S.= Desviación estándar.

Secas											
Zona	Canal	Prf m	T °C	pH	Cnd mS/cm	SDT g/L	OD mg/L	OD% %	NH4 mg/L	NO3 mg/L	PO4 mg/L
A	Bordo	0.92	16.36	9.81	0.83	ND	4.41	55.85	0.19	0.05	2.07
	Cuemanco	1.38	17.53	9.12	0.94	ND	3.91	55.69	0.45	6.10	6.90
	Japón	1.58	14.84	9.37	1.88	1.54	5.45	51.20	0.23	0.62	6.27
	La Virgen	0.83	15.28	9.45	2.03	1.59	7.23	72.00	0.18	0.36	9.70
	Paso Águila	0.93	15.64	9.25	1.94	1.54	7.64	77.07	0.06	2.19	5.30
	Tlicuilli	0.93	14.85	9.21	1.89	1.52	6.10	60.15	0.28	1.93	7.80
<i>Media</i>		1.16	15.74	9.37	1.53	1.54	5.42	58.84	0.24	1.49	6.23
B	Apampilco	1.16	15.31	9.28	1.80	1.44	5.84	58.93	0.10	2.71	8.70
	Apatlaco	1.51	14.75	9.48	2.04	1.66	7.57	74.47	0.45	2.47	7.12
	Infiernito	1.27	16.18	9.01	1.89	1.48	2.22	23.25	1.78	6.93	9.63
	Tezhuilo	1.23	13.51	9.40	1.92	1.60	4.11	40.20	0.33	2.45	8.90
	Urrutia	1.86	13.17	9.08	2.39	2.01	0.76	7.44	0.00	0.09	3.20
	<i>Media</i>		1.37	14.69	9.33	1.97	1.60	5.12	50.79	0.65	3.35
C	Candelaria	1.05	16.59	9.08	1.77	1.37	1.43	13.43	1.50	13.75	8.00
	Nvo León	1.20	17.07	9.12	1.78	1.36	1.90	20.59	1.58	5.56	3.03
	Sta Cruz	1.11	15.31	9.37	1.67	1.33	6.96	69.76	1.34	6.02	7.05
	Turístico	2.33	15.83	9.04	1.74	1.37	1.27	11.91	1.50	16.51	6.43
	<i>Media</i>		1.53	15.84	9.19	1.72	1.35	3.31	33.04	1.50	10.12
D	Amelaco	0.92	13.89	9.59	2.41	1.94	7.93	74.89	0.33	0.07	8.50
	Coacalco	0.82	12.21	9.67	2.07	1.75	6.39	59.74	0.34	0.20	8.47
	El toro	0.58	13.49	9.67	1.95	1.62	6.57	60.87	0.28	1.41	6.90
	Toltenco	1.14	13.07	9.56	2.11	1.82	6.79	61.81	0.81	0.14	8.70
	<i>Media</i>		0.87	13.22	9.62	2.14	1.79	6.77	62.89	0.47	0.26
E	Sn Gregorio	0.66	13.58	9.15	1.78	1.48	0.79	4.55	0.99	6.70	1.10
	Sn Sebastian	1.46	12.41	9.18	3.05	2.63	<0.01	<0.01	0.77	6.20	0.94
	Tlapechicalli	1.41	13.37	9.06	1.71	1.43	1.99	19.44	0.82	5.20	2.50
	<i>Media</i>		1.25	13.20	9.11	2.03	1.71	1.27	11.67	0.82	5.84
Media		1.22	14.67	9.35	1.85	1.60	4.55	46.02	0.71	4.03	6.31
D.S.		0.50	1.53	0.28	0.46	0.31	2.84	28.30	0.63	4.82	3.10

Lluvias											
Zona	Canal	Prf m	T °C	pH	Cnd mS/cm	SDT g/L	OD mg/L	OD% %	NH4 mg/L	NO3 mg/L	PO4 mg/L
A	Bordo	0.56	21.09	8.42	0.71	0.50	2.85	32.43	0.10	3.10	10.58
	Cuemanco	1.17	22.12	8.26	0.73	0.51	5.01	57.99	0.51	11.40	9.50
	Japón	0.81	21.23	7.66	0.75	0.53	2.77	31.44	7.65	0.12	4.91
	La Virgen	0.62	20.87	7.84	0.94	0.64	5.92	66.50	0.03	1.20	12.75
	Paso Águila	0.55	22.05	7.79	0.89	0.62	7.85	93.08	13.25	0.14	8.00
	Tlicuilli	0.53	21.14	7.88	0.89	0.63	6.08	65.51	12.70	0.05	7.00
	Tlilac	0.58	22.28	8.18	0.78	0.53	7.63	87.38	0.00	0.30	10.70
<i>Media</i>		0.72	21.44	8.11	0.80	0.55	4.81	54.17	3.98	2.61	9.11
B	Apampilco	0.93	19.28	7.37	0.81	0.59	4.90	52.92	11.55	0.63	2.17
	Apatlaco	1.52	20.71	8.02	1.07	0.76	5.45	61.54	1.12	2.66	10.72
	Infiernito	0.82	18.52	7.23	0.61	0.45	2.81	31.26	1.92	8.54	10.10
	Tezhuilo	1.06	19.57	7.60	0.81	0.59	6.33	66.39	13.40	0.12	5.90
	Urrutia	1.58	17.12	7.06	0.82	0.63	2.21	23.69	0.00	1.40	3.90
	<i>Media</i>		1.17	19.32	7.53	0.84	0.61	4.74	51.45	4.34	3.93
C	Candelaria	0.90	19.77	7.26	0.60	0.43	1.99	22.35	0.00	0.10	9.90
	Nvo León	1.00	16.40	ND	0.86	0.57	1.98	18.23	2.16	1.33	12.40
	Sta Cruz	0.94	20.29	7.56	0.74	0.53	3.51	39.05	0.03	6.25	9.60
	Turístico	1.74	19.94	7.36	0.62	0.45	0.83	8.91	2.09	4.63	9.33
	<i>Media</i>		1.25	19.80	7.46	0.70	0.49	2.26	24.67	1.42	3.39
D	Amelaco	0.85	19.27	7.69	1.08	0.69	2.35	26.03	0.00	0.30	12.53
	Coacalco	0.90	18.61	7.46	1.15	0.85	3.37	37.62	0.07	0.70	12.65
	El Toro	0.67	19.47	7.64	0.91	0.66	4.48	48.73	0.21	1.90	13.30
	Toltenco	1.20	19.60	7.40	1.27	0.88	3.91	43.13	0.00	0.10	10.97
	<i>Media</i>		0.92	19.23	7.55	1.11	0.77	3.43	37.79	0.04	0.54
E	Sn. Gregorio	0.68	18.55	7.51	1.71	1.34	0.43	4.94	0.32	1.03	17.97
	<i>Media</i>		0.68	18.55	7.51	1.71	1.34	0.43	4.94	0.32	1.03
Media		0.95	20.06	7.72	0.90	0.64	3.96	43.78	2.65	2.59	10.23
D.S.		0.41	1.34	0.42	0.29	0.21	2.26	25.21	4.51	3.50	3.69

Tabla 2. Comparación de las medias de las variables fisicoquímicas en ambos muestreos.

	Media Secas	Error Estándar	Media Lluvias	Error Estándar	T	Sign.
T	14.671	0.077	20.059	0.080	-47.392	0.00
Cnd	1.851	0.231	0.902	0.017	30.570	0.00
SDT	1.603	0.016	0.644	0.012	44.789	0.00
OD	4.606	0.154	3.964	0.135	3.047	0.00
Prf	1.223	0.025	0.952	0.246	7.413	0.00
pH	9.346	0.014	7.725	0.255	59.590	0.00
NH4	0.834	0.150	2.648	0.614	-2.871	0.01
NO3	4.032	0.656	2.594	0.477	1.774	0.08
PO4	6.309	0.421	10.233	0.502	-5.985	0.00

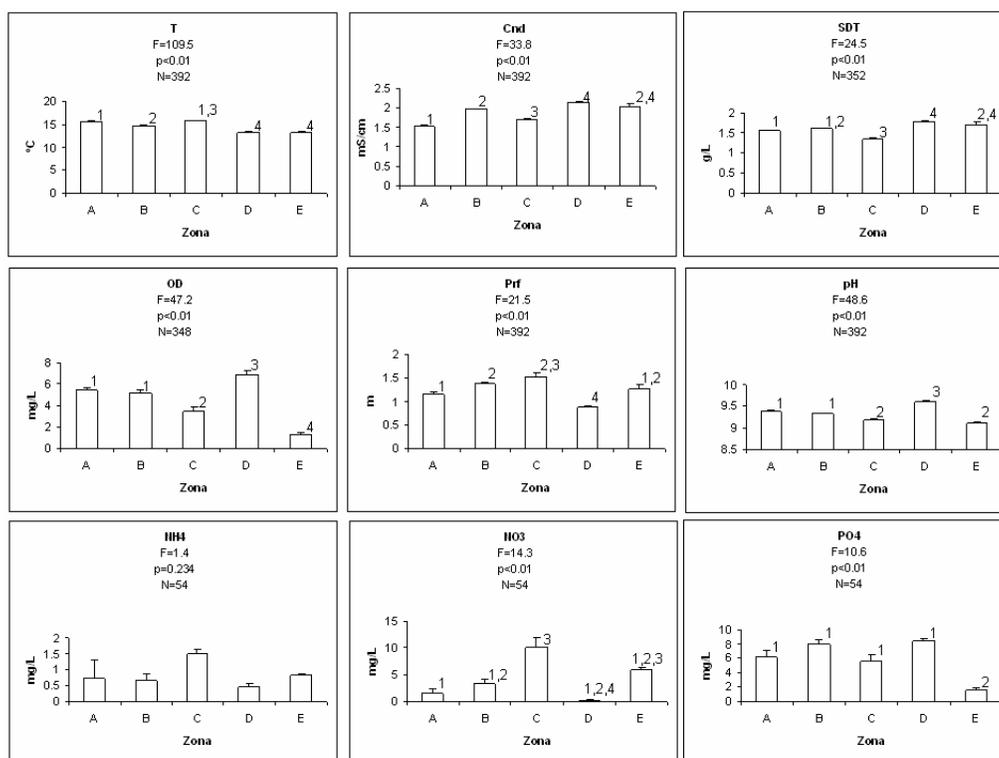


Figura 5. Análisis de varianza de las variables fisicoquímicas durante el muestreo de secas. Los números pequeños muestran las diferencias encontradas en el post hoc, donde números distintos representan diferencias significativas.

Durante el muestreo de secas se encontraron diferencias significativas entre las zonas en todas las variables excepto en el amonio (Figura 5).

Las zonas D y E obtuvieron valores altos de conductividad y sólidos disueltos totales (Figura 5 y Anexo I Mapas 3 y 5). En cambio, las zonas B y C presentaron altas concentraciones de amonio y nitrato (Figura 5 y Anexo I

Mapas 13 y 15). La zona A presentó concentraciones bajas en la mayoría de las variables excepto oxígeno disuelto y pH (Figura 5 y Anexo I Mapas 7 y 11).

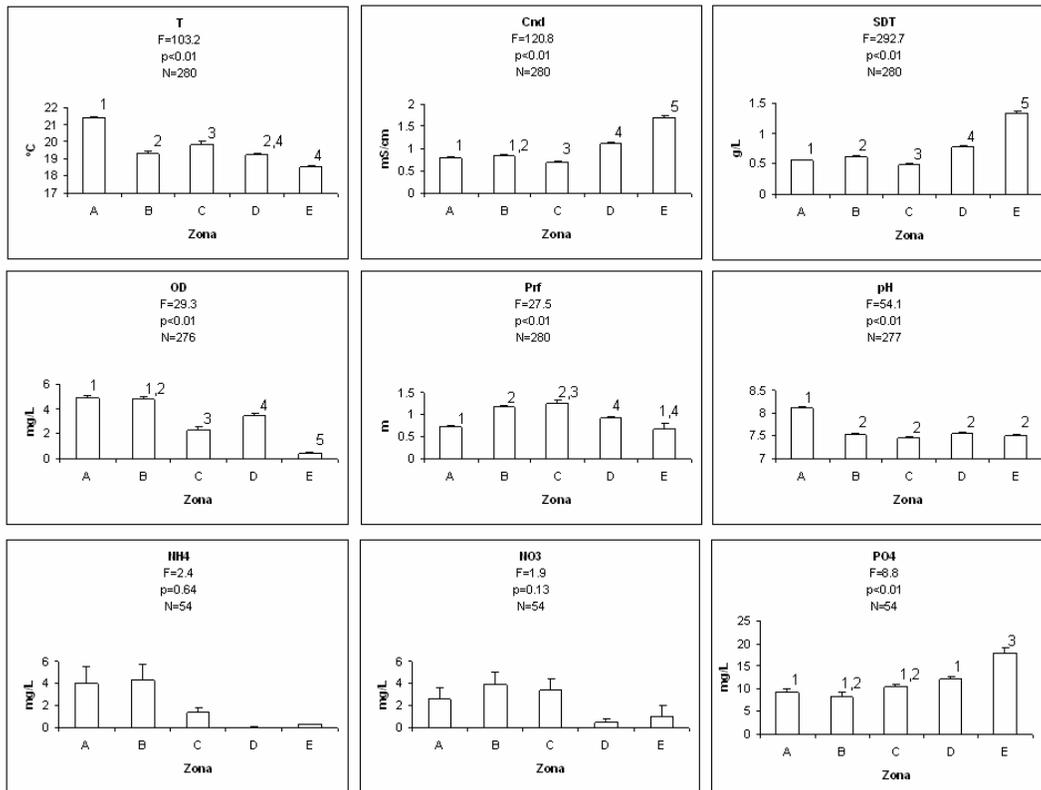


Figura 6. Análisis de varianza de los datos obtenidos en el muestreo de lluvias. Los números pequeños muestran las diferencias encontradas en el post hoc, donde números distintos representan diferencias significativas.

Los patrones encontrados en el muestreo de lluvias muestran que exceptuando los nutrientes y la temperatura, la mayoría de las variables disminuyeron su concentración (Figura 6).

Al igual que en el muestreo anterior, las zonas E y D obtuvieron las concentraciones más altas de conductividad; sólidos disueltos totales y fosfatos (Figura 6 y Anexo I Mapas: 4; 6 y 18). La zona A presentó los valores más altos de temperatura, oxígeno disuelto y pH (Figura 6 y Anexo I Mapas: 2; 8 y 12). Las zonas B y C alcanzaron los valores más altos en amonio y nitrato aún cuando no mostraron diferencias significativas con las demás (Figura 5 y Anexo 1 Mapas: 14 y 16).

Caracterización de las variables bióticas

Menidia jordani

Durante el muestreo de secas *Menidia jordani* fue la especie menos abundante con tan solo 97 individuos, de los cuales el 11.3% presentó algún tipo de afectación. Dentro de ellas las lesiones fueron las más frecuentes con un 10.3%, el uno por ciento restante presentó deformidades. La zona C presentó el más alto índice de lesiones, sin embargo, fue la zona A la única donde se encontraron las lesiones y deformidades a la par, en los organismos colectados (Tabla 3).

En el muestreo de lluvias el número de individuos se cuadruplicó alcanzando los 394 individuos, sin embargo, el análisis no mostró diferencias significativas con respecto al muestreo de secas, probablemente debido a la desviación estándar de los datos (Tabla 4). En cambio, la talla de los charales disminuyó en promedio un centímetro, lo cual puede sugerir un posible reclutamiento. También el número de afectaciones se incrementó (15.7%). Las lesiones fueron las más abundantes presentándose en 9.9% del total de organismos colectados. La incidencia de afectaciones más alta alcanzó el 25% de los individuos colectados en la zona B (Tabla 3).

Menidia jordani es la única de las cuatro especies de peces encontradas que es endémica. Si bien el bajo porcentaje de afectaciones pareciera ser alentador, no lo es ya que los organismos no alcanzan una talla mayor a cinco cm, y su abundancia es muy baja, lo cual nos hace suponer que algunas afectaciones tienen un efecto letal.

Tabla 3. Resumen de los datos obtenidos de las cuatro especies de peces capturadas durante ambos muestreos. Abd= Abundancia; D= Deformidad; E= Erosión; L= Lesión; T= Tumor; D.S.= Desviación Estándar; *= Total de individuos, %DELT=porcentaje conjunto de afectaciones; ND=No Determinado.

		Secas													
Zona	Canal	<i>Menidia jordanii</i>							<i>Goodea atripinnis</i>						
		Abd	Talla cm	Peso g	D	E	L	T	Abd	Talla cm	Peso g	D	E	L	T
A	Bordo	13	5.13	0.92	0	0	1	0	5	8.00	9.75	0	0	1	2
	Cuemanco	37	3.39	0.79	1	0	3	0	90	8.30	11.89	1	10	52	5
	Japón	0	ND	ND	0	0	0	0	5	8.56	14.38	0	1	4	0
	La Virgen	0	ND	ND	0	0	0	0	1	8.80	11.00	0	1	0	0
	Paso Águila	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Tlicuilli	0	ND	ND	0	0	0	0	1	8.30	11.00	0	1	0	0
	No. Individuos	50			1	0	4	0	102			1	13	57	7
% DELT	10			2	0	8	0	76.5			1	13	56	7	
B	Apampilco	0	ND	ND	0	0	0	0	2	9.65	19.50	0	2	0	0
	Apatlaco	11	4.51	1.05	0	0	1	0	2	10.70	19.50	0	2	0	0
	Infiernito	0	ND	ND	0	0	0	0	3	8.93	15.50	0	2	1	0
	Tezhuilo	7	4.73	1.10	0	0	0	0	1	10.40	20.00	0	1	0	0
	Urrutia	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	18			0	0	1	0	8			0	7	1	0
% DELT	5.6			0	0	5.6	0	100			0	88	12	0	
C	Candelaria	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Nvo León	0	ND	ND	0	0	0	0	6	8.43	11.50	0	1	2	0
	Sta Cruz	14	4.65	1.09	0	0	3	0	130	8.16	10.86	0	72	25	4
	Turístico	1	5.10	1.19	0	0	0	0	9	8.42	12.31	0	2	4	0
	No. Individuos	15			0	0	3	0	145			0	75	31	4
% DELT	20			0	0	20	0	75.8			0	52	21	2.8	
D	Amelaco	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Coacalco	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	El toro	14	4.32	1.01	0	0	2	0	7	10.09	20.50	1	0	5	1
	Toltenco	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	14			0	0	2	0	7			1	0	5	1
% DELT	14			0	0	14	0	100			14	0	71	14	
E	Sn Gregorio	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Sn Sebastian	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Tlapechicalli	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	0							0						
% DELT	0							0							
Media		11.3			1	0	10	0	77			0.8	36	36	4.6
D.S.		97*	4.28	0.95	1*	0*	10*	0*	262*	8.75	12.91	2*	95*	94*	12*
			1.80	0.20						1.51	4.83				

Tabla 3. Continuación

Zona	Canal	<i>Cyprinus carpio</i>							<i>Oreochromis niloticus</i>						
		Abd	Talla cm	Peso g	D	E	L	T	Abd	Talla cm	Peso g	D	E	L	T
A	Bordo	15	13.85	86.70	0	1	5	1	72	6.65	20.44	0	1	36	0
	Cuemanco	13	15.04	124.27	0	0	6	1	234	12.22	72.58	5	4	55	1
	Japón	9	12.95	89.17	0	4	1	0	67	14.96	102.07	0	8	29	0
	La Virgen	2	15.10	105.50	0	2	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Paso Águila	5	14.68	103.63	0	5	0	0	9	16.18	139.11	1	1	0	0
	Tlicuilli	27	12.88	89.18	0	23	1	0	4	15.15	109.50	0	2	1	0
	No. Individuos	71			0	35	13	2	386			6	16	121	1
% DELT	70.4			0	49	18	2.8	37.3			1.6	4.1	31	0.3	
B	Apampilco	22	12.47	74.63	0	16	2	0	1	3.80	2.00	0	0	1	0
	Apatlaco	23	14.50	98.35	0	10	3	0	167	13.30	77.08	7	1	37	0
	Infiernito	0	ND	ND	0	0	0	0	54	10.55	48.88	2	0	21	1
	Tezhuilo	8	12.44	67.38	1	0	3	0	54	13.82	86.57	2	0	12	0
	Urrutia	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	53			1	26	8	0	276			11	1	71	1
% DELT	66			1.9	49	15	0	30.4			4	0.4	26	0.4	
C	Candelaria	13	15.71	137.58	0	10	1	0	11	14.64	92.08	3	1	3	0
	Nvo León	6	13.12	97.40	0	1	4	0	9	11.64	57.22	0	0	4	0
	Sta Cruz	26	13.20	95.39	4	7	2	1	2	12.95	120.00	1	1	0	0
	Turístico	15	14.75	119.44	1	5	5	0	3	19.95	34.58	0	0	0	0
	No. Individuos	60			5	23	12	1	25			4	2	7	0
% DELT	68.3			8.3	38	20	1.7	52			16	8	28	0	
D	Amelaco	7	16.83	119.44	0	5	1	0	14	14.72	34.58	0	1	5	0
	Coacalco	1	12.00	54.00	0	0	0	0	1	4.50	3.00	0	0	1	0
	El toro	2	16.50	147.50	0	0	0	0	14	12.00	61.84	0	1	5	0
	Toltenco	3	18.60	110.50	0	1	2	0	4	17.18	151.50	0	0	1	0
	No. Individuos	13			0	6	3	0	33			0	2	12	0
% DELT	69.2			0	46	23	0	42.4			0	6.1	36	0	
E	Sn Gregorio	10	14.08	110.28	0	1	4	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Sn Sebastian	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Tlapechicalli	17	6.85	133.30	1	1	6	1	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	27			1	2	10	1	0						
% DELT	51.9			3.7	7.4	37	3.7	0							
% DELT	66.5			3.1	41	21	1.8	35.4			2.9	2.9	29	0.3	
Media		224*	13.21	100.29	7*	92*	46*	4*	720*	12.73	72.38	21*	21*	211*	2*
D.S.			4.43	49.42						3.69	43.95				

Tabla 3. Continuación.

		Lluvias													
		<i>Menidia jordanii</i>							<i>Goodea atripinnis</i>						
Zona	Canal	Abd	Talla	Peso	D	E	L	T	Abd	Talla	Peso	D	E	L	T
		cm	g						cm	g					
A	Bordo	35	3.23	0.75	0	0	11	1	9	8.36	11.96	0	7	0	0
	Cuemanco	21	3.37	0.79	0	0	4	0	67	8.21	12.29	0	50	10	1
	Japón	0	ND	ND	0	0	0	0	6	11.62	13.46	0	3	3	0
	La Virgen	15	3.05	0.71	0	0	1	0	9	9.06	16.61	0	4	5	0
	Paso Águila	2	3.25	0.76	0	0	0	0	1	8.20	10.00	0	1	0	0
	Tlicuilli	5	3.60	0.84	0	0	0	0	4	8.60	15.00	0	4	0	0
	Tlilac	0	ND	ND	0	0	0	0	7	8.18	11.58	0	7	0	0
	No. Individuos	78			0	0	16	1	103			0	76	18	1
	% DELT	22			0	0	21	1	92			0	74	17	1
B	Apampilco	5	6.62	1.55	0	0	0	0	9	8.12	11.20	0	5	4	0
	Apatlaco	59	3.47	0.81	0	1	8	2	15	7.99	13.20	0	12	0	2
	Infiernito	1	2.70	0.63	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Tezhuilo	55	3.06	0.71	0	16	3	0	6	8.45	11.00	0	1	3	0
	Urrutia	0	ND	ND	0	0	0	0	1	4.20	2.00	0	0	0	1
	No. Individuos	120			0	17	11	2	31			0	18	7	3
% DELT	25			0	14	9	2	90			0	58	23	9	
C	Candelaria	0	ND	ND	0	0	0	0	13	8.45	11.31	0	12	1	0
	Nvo León	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Sta Cruz	22	3.52	0.82	0	2	2	0	242	8.29	15.00	0	167	32	11
	Turístico	0	ND	ND	0	0	0	0	203	8.30	12.58	4	152	25	7
	No. Individuos	22			0	2	2	0	458			4	331	58	18
% DELT	18.2			0	9.1	9.1	0	89.7			0.9	72	13	3.9	
D	Amelaco	21	2.80	0.65	0	0	3	0	1	9.50	16.00	0	0	0	0
	Coacalco	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	El Toro	74	3.16	0.74	0	0	3	0	21	8.30	13.93	2	5	8	3
	Toltenco	79	2.65	0.62	1	0	4	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	74			1	0	10	0	22			2	5	8	3
% DELT	6.3			0.6	0	5.7	0	82			9	23	36	14	
E	Sn Gregorio	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	0							0						
	% DELT	0							0						
	% DELT	15.8			0.3	4.8	9.9	0.8	90			1	70	15	4.1
Media		394*	3.32	0.77	1*	19*	39*	3*	614*	8.36	13.11	6*	430*	91*	25*
D.S.			1.25	0.29						1.27	6.39				

Tabla 3. Continuación.

Zona	Canal	<i>Cyprinus carpio</i>							<i>Oreochromis niloticus</i>						
		Abd	Talla cm	Peso g	D	E	L	T	Abd	Talla cm	Peso g	D	E	L	T
A	Bordo	5	11.84	53.80	0	1	0	1	19	10.02	41.85	0	0	1	0
	Cuemanco	6	11.89	81.75	0	2	1	0	65	13.39	66.28	0	1	0	0
	Japón	8	7.87	19.50	0	1	1	0	15	12.33	62.55	2	0	1	0
	La Virgen	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Paso Águila	0	ND	ND	0	0	0	0	3	10.57	40.67	0	0	1	0
	Tlicuilli	10	14.09	101.33	0	6	4	0	3	11.80	78.00	0	1	1	1
	Tlilac	1	17.60	106.00	0	0	0	0	3	14.07	81.67	0	0	0	0
	No. Individuos	30			0	10	6	1	108			2	2	4	1
% DELT	56			0	33	20	3	8.4			1.9	1.9	3.7	0.9	
B	Apampilco	1	14.60	110.00	0	0	0	0	20	13.42	97.86	0	1	6	0
	Apatlaco	6	15.63	122.50	0	3	1	0	10	11.49	58.36	0	0	3	0
	Infiernito	2	12.30	58.50	0	0	0	0	18	13.30	77.68	1	0	9	1
	Tezhuilo	5	14.90	133.63	0	2	1	0	26	10.65	48.15	1	3	5	0
	Urrutia	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	14			0	5	2	0	74			2	4	23	1
% DELT	50			0	36	14	0	40.5			2.7	5.4	31	1.4	
C	Candelaria	0	ND	ND	0	0	0	0	3	13.40	52.50	0	0	0	0
	Nvo León	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	Sta Cruz	19	9.36	39.42	1	9	2	0	53	10.77	49.51	2	4	3	0
	Turístico	15	12.61	55.42	0	10	1	0	34	10.86	54.50	3	0	2	0
	No. Individuos	34			1	19	3	0	90			5	4	5	0
% DELT	68			3	56	9	0	16			6	4	6	0	
D	Amelaco	0	ND	ND	0	0	0	0	6	14.93	97.72	0	1	0	0
	Coacalco	2	13.30	83.00	0	0	0	0	5	16.25	124.50	0	3	1	0
	El Toro	2	15.60	82.00	0	0	0	1	26	10.90	50.10	0	2	3	0
	Toltenco	0	ND	ND	0	0	0	0	0	ND	ND	0	0	0	0
	No. Individuos	4			0	0	0	1	37			0	6	4	0
% DELT	25			0	0	0	25	27			0	16	11	0	
E	Sn Gregorio	0	ND	ND	0	0	0	0	3	5.98	7.00	0	2	0	0
	No. Individuos	0							3			0	2	0	0
	% DELT	0							67			0	67	0	0
	% DELT	59			1.2	42	13	2.4	21			3	6	11	1
Media	82*	0	12.42	73.91	1*	34*	11*	2*	312*	11.82	61.75	9*	18*	36*	2*
D.S.		1	4.33	49.13						3.59	39.51				

Tabla 4. Comparación de las medias de las abundancias de las cuatro especies de peces en ambos muestreos.

	Media Secas	Error Estándar	Media Lluvias	Error Estándar	T	Sign.
<i>M. jordani</i>	13.850	4.250	30.310	7.660	-1.878	0.077
<i>G. atripinnis</i>	20.150	11.310	38.370	18.474	-0.794	0.434
<i>C. carpio</i>	11.789	1.894	6.307	1.537	2.088	0.045
<i>O. niloticus</i>	42.353	15.855	18.352	4.427	1.458	0.162

Goodea atripinnis

Durante el muestreo de secas *Goodea atripinnis* fue la segunda especie más abundante registrando un total de 262 organismos, siendo la zona C donde se encontraron con más frecuencia. Sin embargo, el 77.48% presentó algún tipo

de afectación, siendo la especie con más afectaciones dentro de este muestreo. Las erosiones y lesiones fueron las más frecuentes con un 36% del total de individuos cada una. En las zonas B y D el total de los individuos colectados presentaron algún tipo de afectación. La zona D además presentó la incidencia más alta de tumores de todo el muestreo (Tabla 3).

Durante el muestreo de lluvias la especie más abundante fue *Goodea atripinnis* con un total de 614 organismos, la mayoría de los cuales se encontraron en la zona C. Sin embargo, no fueron significativamente más abundantes que el muestreo de secas debido probablemente a la desviación estándar de los datos (Tabla 4). Las tallas de este muestreo fueron ligeramente menores que en el periodo anterior. El número de individuos afectados se incrementó alcanzando un 90% del total. Una vez más las erosiones fueron las más frecuentes con un 70% del total de individuos. En esta ocasión las demás afectaciones se encontraron en pocos individuos siendo las lesiones las más frecuentes con un 15%. La zona A fue la que presentó la mayor cantidad de individuos afectados con un 92% de la población, las erosiones fueron las más frecuentes. En cambio la zona E fue la que presentó menos individuos afectados con 81% del total de individuos encontrados en esa zona, sin embargo, obtuvo las mayores incidencias de lesiones, tumores y deformidades.

Cyprinus carpio

Durante el muestreo secas se colectaron 224 individuos de la especie *Cyprinus carpio*, de los cuales el 67% presentó algún tipo de afectación. Siendo las erosiones las más frecuentes con un 41%. En la zona A 70% de los individuos colectados presentó algún tipo de afectación, principalmente erosiones. Sin embargo, fue en la zona E donde no sólo se presentaron los cuatro tipos de afectación sino que además éstos alcanzaron las frecuencias más altas.

El número de carpas encontradas durante el muestreo de lluvias disminuyó significativamente a poco menos de un tercio de la población con respecto al muestreo anterior obteniendo tan solo 82 organismos (Tabla 4). En promedio las tallas disminuyeron un centímetro con respecto al muestreo de secas. Las afectaciones también se redujeron presentándose en 59% de la población. Las

erosiones una vez más fueron las más frecuentes con un 41%. La zona con mayor cantidad de afectaciones fue la zona C con un 68% del total de individuos presentes.

Oreochromis niloticus

La especie más abundante durante el muestreo de secas fue *Oreochromis niloticus* con un total de 720 organismos, la mayoría de los cuales se registraron en la zona A. De esos individuos, el 35% presentaron algún tipo de afectación, siendo las lesiones las más frecuentes con un 29%. El 52% del total de individuos colectados en la zona C presentaron algún tipo de afectación, las demás zonas tuvieron valores por debajo de éste.

Durante el muestreo de lluvias el número de individuos se redujo en un 50% encontrando tan solo 312, la mayoría de ellos se encontraron en la zona A. La distribución diferencial de los individuos entre las distintas zonas incrementa la desviación estándar de los datos, por lo que no se encontraron diferencias significativas entre ambos muestreos. Las afectaciones también disminuyeron registrándose en un 21% del total de la población. Una vez más las lesiones fueron las más frecuentes con un 12%. En esta ocasión la zona E fue la que obtuvo la mayor cantidad de individuos afectados con un 67%. La segunda zona con mayor cantidad de individuos afectados fue la zona B con 41%.

Las especies *Mendia jordani* y *Goodea atripinnis*, presentaron un incremento poblacional en el periodo de lluvias, que coincidió con un aumento del número de afectaciones, lo contrario sucedió con *Cyprinus carpio* y *Oreochromis niloticus* que disminuyeron tanto en abundancia como en el total de afectaciones observadas. Si bien estos resultados sugieren que existe una relación entre el número de individuos y las afectaciones, esto no corresponde con lo encontrado al interior de cada zona en ambos muestreos. Donde las zonas con más individuos no necesariamente tenían la mayor cantidad de afectaciones.

Agrupación de las variables bióticas y abióticas por zonas

Los resultados obtenidos en el análisis discriminante de los datos del muestreo de secas (Figura 7) muestran una clara diferencia entre las cinco zonas propuestas en este estudio (Lambda de Wilks con una significancia < 0.001). Las zonas Chinampera (A), Urbana (B) y Turística (C) mostraron similitudes entre sí, contrario a lo esperado ya que el uso de suelo predominante de las dos últimas no es la chinampería como lo es para las zonas D y E. En cambio las zonas chinampera urbana (D) y chinampera tecnificada (E) fueron distintas a las anteriores y no mostraron semejanzas entre ellas. Una probable explicación a la similitud entre las tres primeras zonas sea la conectividad que existe entre las zonas A,B y C.

Las cinco zonas fueron consistentemente distintas entre sí, es decir, tanto las condiciones de las variables bióticas como las abióticas que se encontraron al interior de los canales son únicas para cada zona.

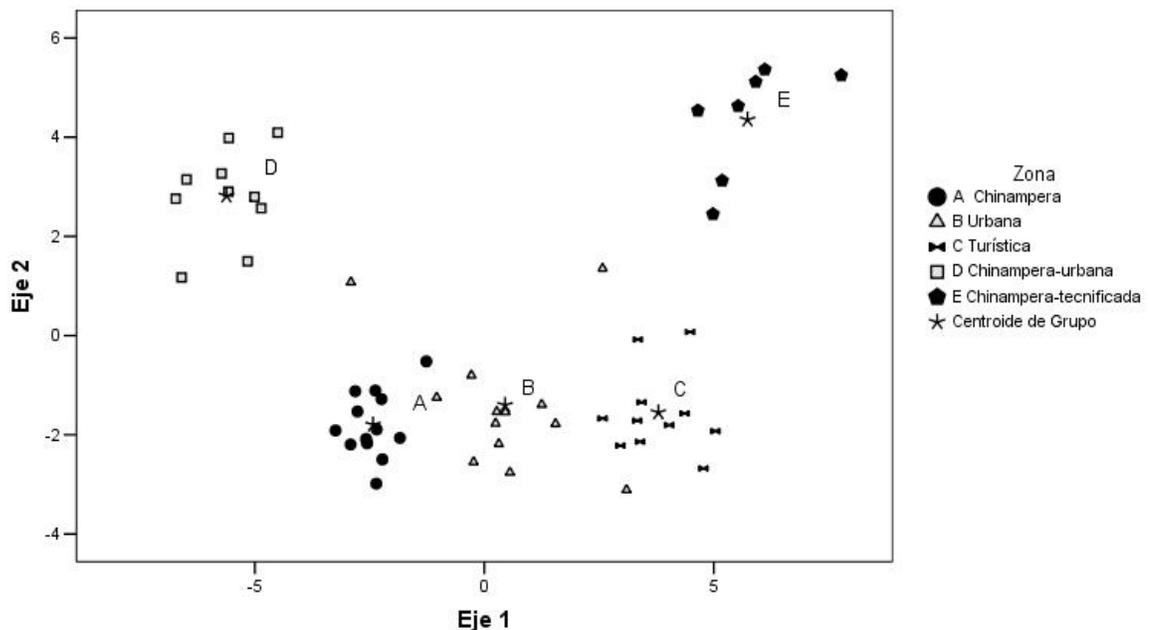


Figura 7. Análisis discriminante realizado con los datos fisicoquímicos y bióticos obtenidos durante el periodo de lluvias frías. Los dos primeros ejes explican el 85.8% de la varianza.

El análisis discriminante realizado con los datos obtenidos durante el periodo de lluvias (Figura 8) también muestra una clara separación entre las cinco zonas propuestas (con un valor de significancia para lambda de Wilks < 0.001). Una vez más las zonas Chinampera, Urbana y Turística muestran

similitudes entre sí pero en esta ocasión las zonas A y C muestran distancias de Mahalanobis más cortas. Si bien la zona D en esta ocasión se encuentra más cercana a las demás zonas, las distancias de Mahalanobis de las zonas D y E son mayores entre sí y con respecto a las demás.

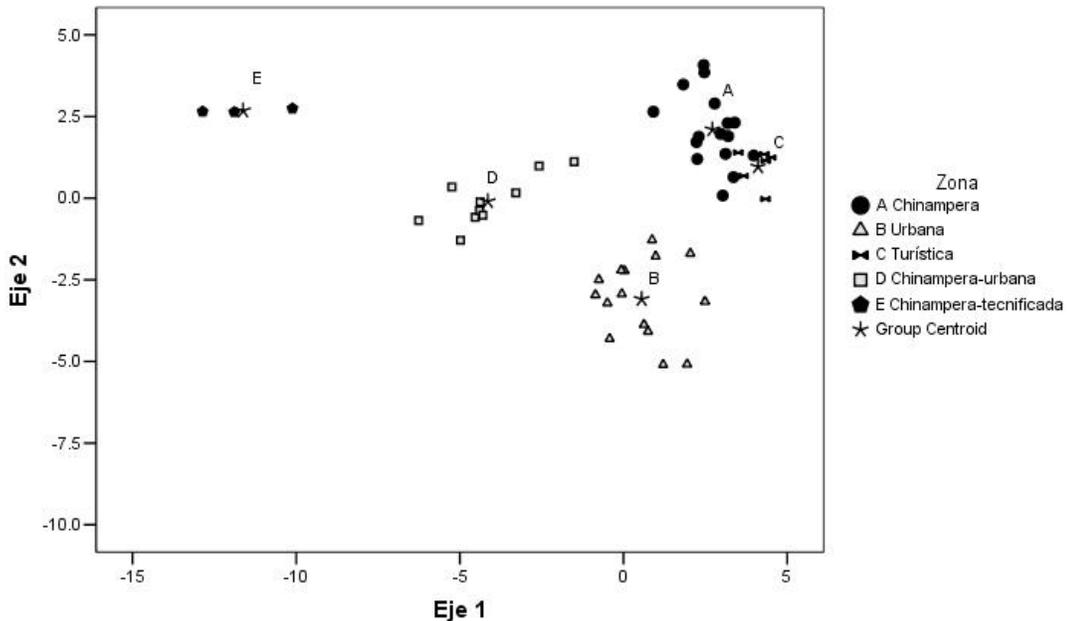


Figura 8. Análisis discriminante realizado con los datos fisicoquímicos y bióticos obtenidos durante el periodo de lluvias cálidas. Los dos primeros ejes explican el 82% de la varianza.

Las diferencias encontradas con respecto al muestreo anterior pueden estar relacionadas con el cambio en las condiciones estacionales. Estas diferencias también son perceptibles en las concentraciones de las variables fisicoquímicas (Tabla 2) y bióticas (Tabla 4) entre los muestreos. Si bien el cambio de estación modifica el patrón y muestra mayores similitudes entre algunas zonas, de ninguna manera modifica la identidad de cada una de ellas, ya que siguen siendo significativamente distintas entre sí.

Relación entre las variables bióticas y abióticas

Los resultados del análisis de redundancia (RDA) que se realizó con los datos del muestreo de secas mostraron que en sus dos primeros ejes se explica 91.9% del total de la varianza (Figura 9). Estos criterios nos llevaron a los siguientes resultados:

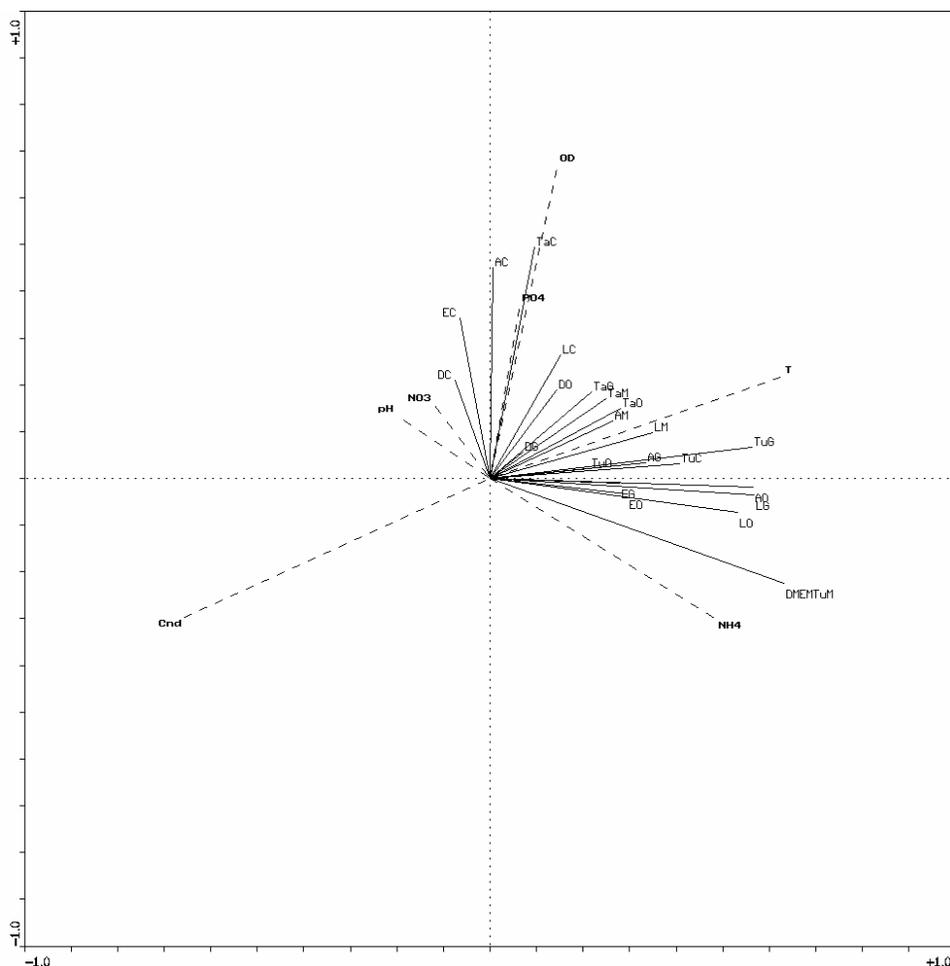


Figura 9. Análisis de Redundancia realizado con los datos obtenidos durante el periodo de secas. Variables físico químicas: **T**: Temperatura; **Cnd**: Conductividad; **OD**: Oxígeno disuelto; **pH**: potencial de Hidrógeno; **NH4**: Amonio; **NO3**: Nitratos; **PO4**: Fosfatos. Variables bióticas (una para cada especie) A: Abundancia; Ta: Talla; D: Deformidad; E: Erosión; L: Lesión; Tu: Tumor. Especies: C: *Cyprinus carpio*; G: *Goodea atripinnis*; M: *Menidia jordani*; O: *Oreochromis niloticus*. Por ejemplo: AC: Abundancia de *Cyprinus carpio*.

Tabla 4. Resumen de los autovalores del análisis de redundancia del primer muestreo.

Ejes	1	2	3	4	Varianza total
Autovalores	0.207	0.016	0.012	0.004	1
Correlación variables bióticas-ambientales	0.594	0.548	0.244	0.319	
Porcentaje acumulado de la varianza de los factores bióticos	20.7	22.3	23.5	23.9	
de la relación bióticas-ambientales	85.4	91.9	96.8	98.4	
Suma de todos los autovalores sin restricciones					1
Suma de los autovalores canónicos					0.243

Menidia jordani. La abundancia y la talla de esta especie estuvieron correlacionadas con los fosfatos, el oxígeno disuelto y la temperatura, esta

última también se relacionó con las lesiones. De manera contrastante, las deformidades, erosiones y tumores estuvieron estrechamente relacionados con el amonio (Figura 9).

Goodea atripinnis. Las variables de talla y deformidad estuvieron correlacionadas con las variables de fosfatos, oxígeno disuelto y temperatura. En cambio la abundancia, erosiones, lesiones y tumores, estuvieron influenciados por la temperatura y el amonio (Figura 9).

Cyprinus carpio. Las variables de talla; abundancia; deformidad y erosión de esta especie tuvieron una correlación positiva con: el pH; nitratos; fosfatos y el oxígeno disuelto. Las lesiones por su parte respondieron de igual manera a los fosfatos, oxígeno disuelto y temperatura. Por último los datos colectados de tumores para esta especie mostraron una clara relación con la temperatura y el amonio (Figura 9).

Oreochromis niloticus. Las variables de talla y deformidad estuvieron correlacionadas con los fosfatos, oxígeno disuelto y temperatura. Mientras que la abundancia, erosiones, lesiones y tumores estuvieron vinculados a la temperatura y el amonio (Figura 9).

Las tallas de *Menidia jordani*; *Goodea atripinnis* y *Oreochromis niloticus* estuvieron altamente correlacionadas con la temperatura, el oxígeno disuelto y los fosfatos, las deformidades de las dos últimas especies también presentaron esta relación.

En cambio, la temperatura y el amonio estuvieron correlacionados con los tumores de las cuatro especies. Estas mismas variables fisicoquímicas se relacionaron también con las deformidades, erosiones y lesiones de los charales, goodeas y tilapias (Figura 9).

En particular la conductividad mostró una clara correlación negativa con todas las demás variables, tanto bióticas como fisicoquímicas (Figura 9).

A partir del análisis de redundancia realizado con los datos del periodo de lluvias se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 10):

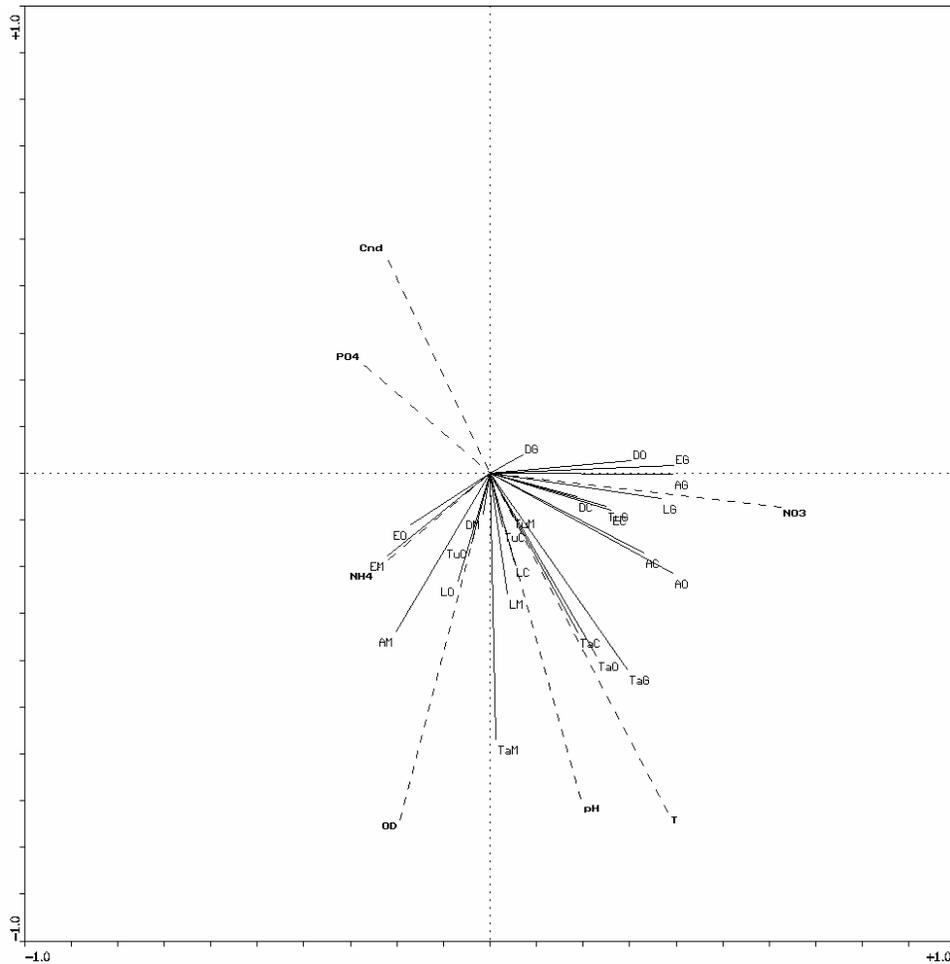


Figura 10. Análisis de Redundancia realizado con los datos obtenidos durante el periodo de lluvias. Variables físico químicas: **T**: Temperatura; **Cnd**: Conductividad; **OD**: Oxígeno disuelto; **pH**: potencial de Hidrógeno; **NH4**: Amonio; **NO3**: Nitratos; **PO4**: Fosfatos. Variables bióticas (una para cada especie) A: Abundancia; Ta: Talla; D: Deformidad; E: Erosión; L: Lesión; Tu: Tumor. Especies: C: *Cyprinus carpio*; G: *Goodea atripinnis*; M: *Menidia jordani*; O: *Oreochromis niloticus*. Por ejemplo: AC: Abundancia de *Cyprinus carpio*.

Tabla 5. Resumen de los autovalores del análisis de redundancia del segundo muestreo.

Ejes	1	2	3	4	Varianza total
Autovalores	0.136	0.023	0.007	0.003	1
Correlación variables bióticas-ambientales	0.426	0.478	0.296	0.319	
Porcentaje acumulado de la varianza					
de los factores bióticos	13.6	15.8	16.6	16.9	
de la relación bióticas-ambientales	79.4	92.8	97.1	99	
Suma de todos los autovalores sin restricciones					1
Suma de los autovalores canónicos					0.171

Menidia jordani. La abundancia de esta especie tuvo una correlación con el amonio y el oxígeno disuelto. Las tallas también dependieron del oxígeno pero además están influenciadas por el pH. En cuanto a las afectaciones, las deformidades mostraron relación con el oxígeno; las erosiones con el amonio; las lesiones con el pH y los tumores con la temperatura (Figura 10).

Goodea atripinnis. La abundancia, deformidades, erosiones, lesiones y tumores de esta especie estuvieron correlacionados principalmente con los nitratos. La talla en cambio, lo está con la temperatura (Figura 10).

Cyprinus carpio. La abundancia, deformidades y erosiones mostraron una correlación con los nitratos. La talla estuvo relacionada con la temperatura, en tanto que las lesiones y tumores con el pH (Figura 10).

Oreochromis niloticus. La abundancia y las deformidades de esta especie estuvieron relacionadas con los nitratos, la talla con la temperatura, las erosiones con el amonio mientras que las lesiones y tumores con el oxígeno disuelto (Figura 10).

Al igual que en el muestreo anterior, la conductividad presentó una correlación negativa con casi todas las variables excepto la talla de las carpas y la erosión de las tilapias. En esta ocasión los fosfatos también presentaron una relación negativa con todas las variables (Figura 10).

De manera general, la temperatura mostró una correlación con las tallas de goodea, carpa y tilapia y los nitratos con varias de las afectaciones de salud de *Goodea atripinnis*, *Cyprinus carpio* y *Oreochromis niloticus* (Figura 10).

En los resultados obtenidos de los dos muestreos (Figuras 9 y 10) se encontraron algunos patrones generales, así tenemos que las tallas de la mayoría de las especies estuvieron relacionadas con la temperatura, el oxígeno disuelto y los fosfatos. En cambio las abundancias en la época de secas se asociaron con la temperatura y en la de lluvias con los nitratos y el amonio. Por otra parte las afectaciones estuvieron relacionadas con el amonio y los nitratos.

Modelos de distribución Potencial

Los resultados obtenidos en la suma de los modelos de las especies *Menidia jordani* y *Goodea atripinnis* para el muestreo de secas presentan el 55% del área total de canales con al menos una especie predicha (Figura 11). De este porcentaje solo en el 25% coinciden las dos especies. La zona con la mayor cantidad de coincidencias de las dos especies es la zona A. Los dos modelos coincidieron en mostrar a los sólidos disueltos como la variable ambiental que más influencia tuvo (Anexo II, figuras 1 y 3).

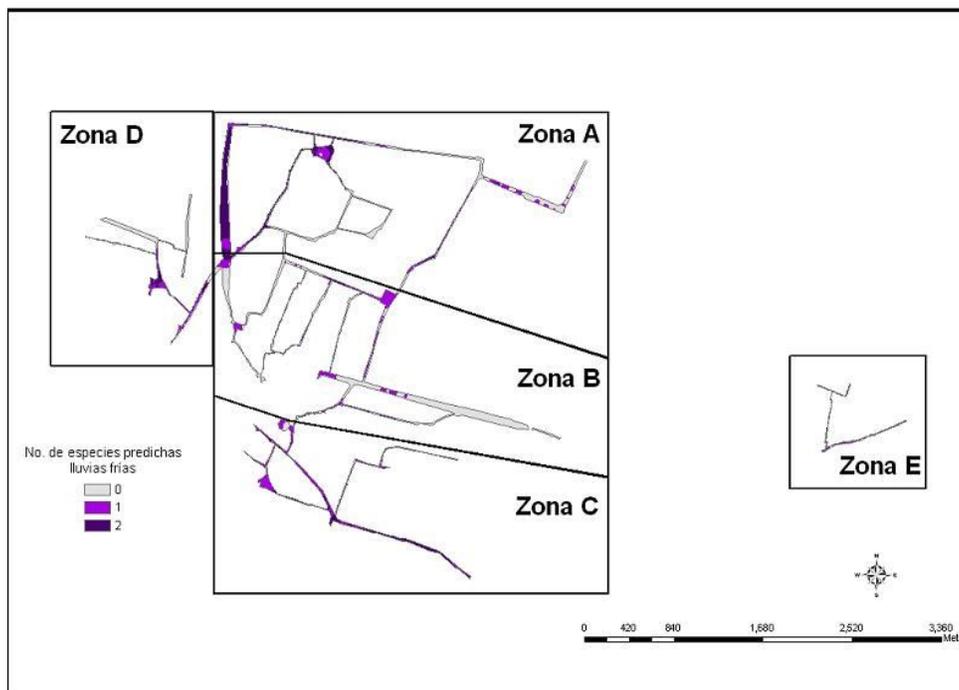


Figura 11. Suma de los modelos de distribución potencial obtenidos con maxEnt para *Menidia jordani* y *Goodea atripinnis*, durante el periodo de secas. La escala indica el número de coincidencias encontradas en ambos modelos.

En cuanto a los modelos de distribución potencial de cada especie durante muestreo de lluvias, encontramos que *Menidia jordani* obtuvo valores de predicción para un 46% del área total de los canales de Xochimilco, mientras que *Goodea atripinnis* solo obtuvo un 34.5% (Anexo II, figuras 1 y 3). Las variables fisicoquímicas más importantes para los charales fueron: conductividad eléctrica, sólidos disueltos y profundidad (Anexo II, figura 1), para las goodeas fueron: conductividad eléctrica, temperatura y sólidos disueltos (Anexo II, figura 3).

Los resultados obtenidos en la suma de los modelos de distribución potencial para *Menidia jordani* y *Goodea atripinnis* (Anexo II, figuras 2 y 4) durante el periodo de lluvias presentaron un 87.5% con valores de predicción para al menos una especie, de los cuales solo el 41% mostró coincidencias para las dos especies (Figura 12). La zona donde se encontraron la mayoría de las coincidencias fue una vez más la zona A. Para este muestreo la variable ambiental que fue relevante en ambos casos fue el oxígeno disuelto (Anexo II, figuras 2 y 4).

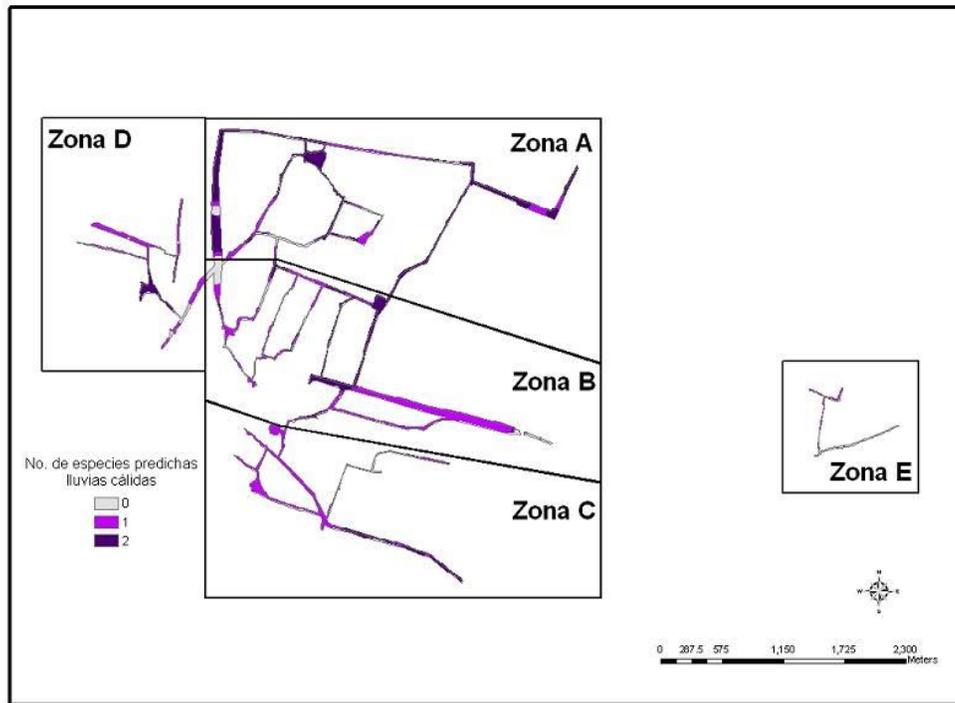


Figura 12. Suma de los modelos de distribución potencial obtenidos con maxEnt para *Menidia jordani* y *Goodea atripinnis*, durante el periodo de lluvias. La leyenda indica el número de coincidencias encontradas en ambos modelos.

En los análisis de distribución potencial para cada especie encontramos un incremento en el área predicha con respecto al muestreo anterior, ya que *Menidia jordani* obtuvo un 63% y *Goodea atripinnis* un 65.5% (Anexo II, figuras 2 y 4). Esto indica que al sumar ambos muestreos las dos especies están bien representadas en el sistema y coinciden en la mayoría de los sitios de predicción. Las variables ambientales más relevantes para el modelo de *Menidia jordani* son: amonio, pH y oxígeno (Anexo II, figura 2). En cambio para *Goodea atripinnis* lo fueron los sólidos disueltos, profundidad y oxígeno Anexo II, figura 4).

La suma de los modelos de distribución potencial obtenidos a partir de los datos recabados en secas para las especies exóticas *Cyprinus carpio* y *Oreochromis niloticus* mostraron que fueron seleccionados un 84.2% del total de píxeles (Anexo II, figuras 5 y 7). El 43.7% de ellos mostró coincidencias para las dos especies, la mayoría se localizaron en la zona B (Figura 13). Además para ambas especies las variables explicativas que coincidieron al ser más relevantes para cada modelo en particular fueron: amonio, sólidos disueltos y nitratos (Anexo II, figuras 5 y 7).

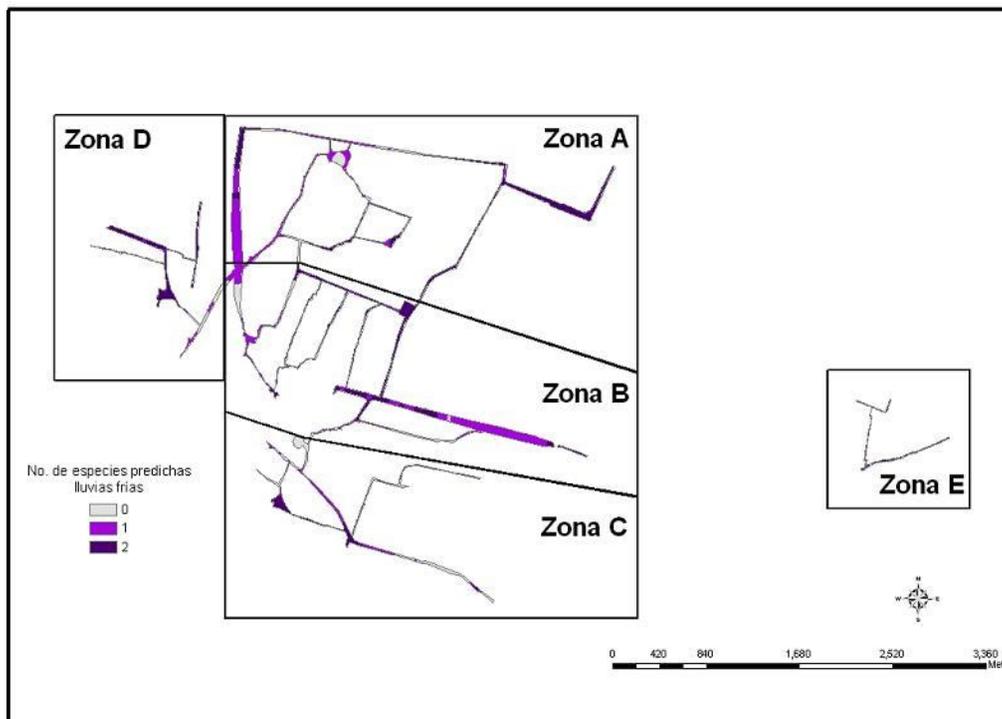


Figura 13. Suma de los modelos de distribución potencial obtenidos con maxEnt para *Oreochromis niloticus* y *Cyprinus carpio* durante el muestreo de secas. La leyenda indica el número de coincidencias encontradas en ambos modelos.

El modelo obtenido para *Cyprinus carpio* obtuvo el 52 % del total de píxeles seleccionados como nicho potencial siendo las variables más relevantes: amonio, sólidos disueltos, nitratos y fosfatos (Anexo II, figura 5). En cuanto a *Oreochromis niloticus* el 75.6% del área total obtuvo valores de predicción, las variables ambientales más relevantes fueron: amonio; sólidos disueltos; nitratos y oxígeno disuelto (Anexo II, figura 7).

Los modelos de distribución potencial para el muestreo de lluvias mostraron una disminución del 10% del área predicha con respecto al muestreo anterior, ya que el 74.7% del total de píxeles presentó predicciones para al menos una especie (Figura 14). En cuanto al área predicha para ambas especies la reducción fue más ligera obteniendo un área de predicción de 41.3%, en esta ocasión con mayor incidencia se registró en la zona A, en cambio la zona B fue una de las que presentó menor cantidad de píxeles pronosticados. En cuanto a las variables explicativas más relevantes para los modelos obtenidos ambas especies coincidieron en obtener valores altos para amonio y profundidad (Anexo II, figuras 6 y 8).

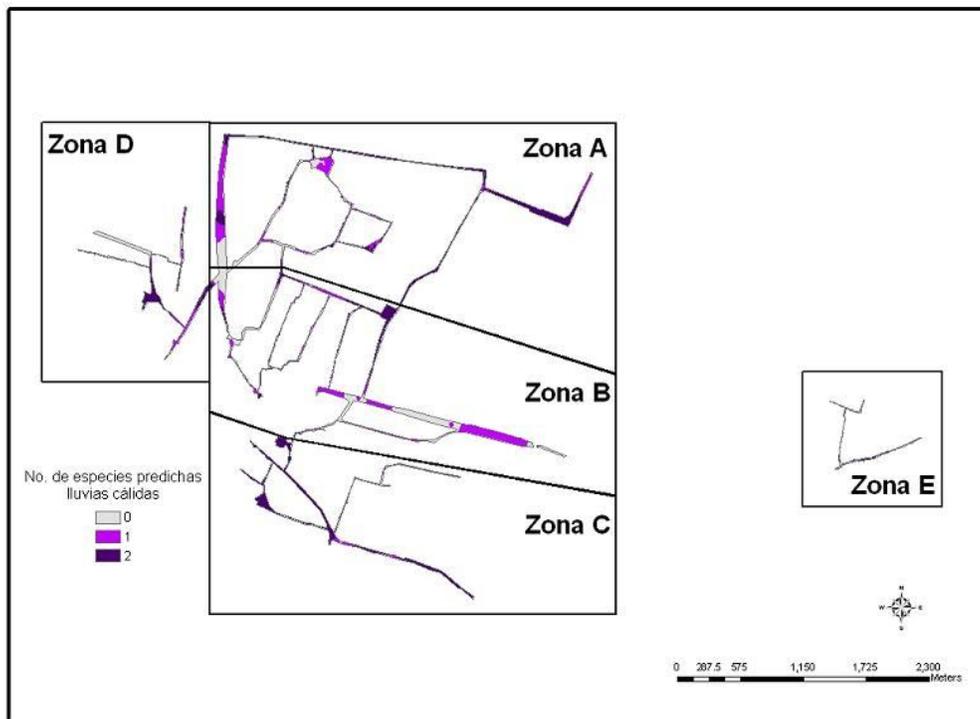


Figura 14. Suma de los modelos de distribución potencial obtenidos con maxEnt para *Oreochromis niloticus* y *Cyprinus carpio* durante el muestreo de lluvias. La leyenda indica el número de coincidencias encontradas en ambos modelos.

Los análisis de cada especie indican que el modelo de distribución potencial de *Cyprinus carpio* mostró un incremento en el área predicha obteniendo un 57.9% del total de píxeles. En cuanto a las variables explicativas con mayor efecto sobre el modelo encontramos algunos cambios, con respecto al muestreo de secas, siendo estas: amonio; nitratos; oxígeno disuelto y profundidad (Anexo II, figura 6). La especie *Oreochromis niloticus* en cambio

presentó una disminución del área predicha obteniendo el 57% del total de píxeles seleccionados, siendo las variables explicativas más relevantes: sólidos disueltos, profundidad, amonio y conductividad (Anexo II, figura 8).

Finalmente, durante el periodo de secas la suma de los modelos obtenidos para las especies *Menidia jordani*; *Goodea atripinnis*; *Cyprinus carpio* y *Oreochromis niloticus* obtuvo el 37% del total de los píxeles con valores de predicción para al menos tres especies, siendo la zona A la que presentó la mayor cantidad de coincidencias (Figura 15). De manera general las variables que resultaron ser relevantes para la mayoría de los modelos fueron: sólidos disueltos; nitratos; profundidad y fosfatos (Anexo II, figuras 1, 3, 5 y 7).

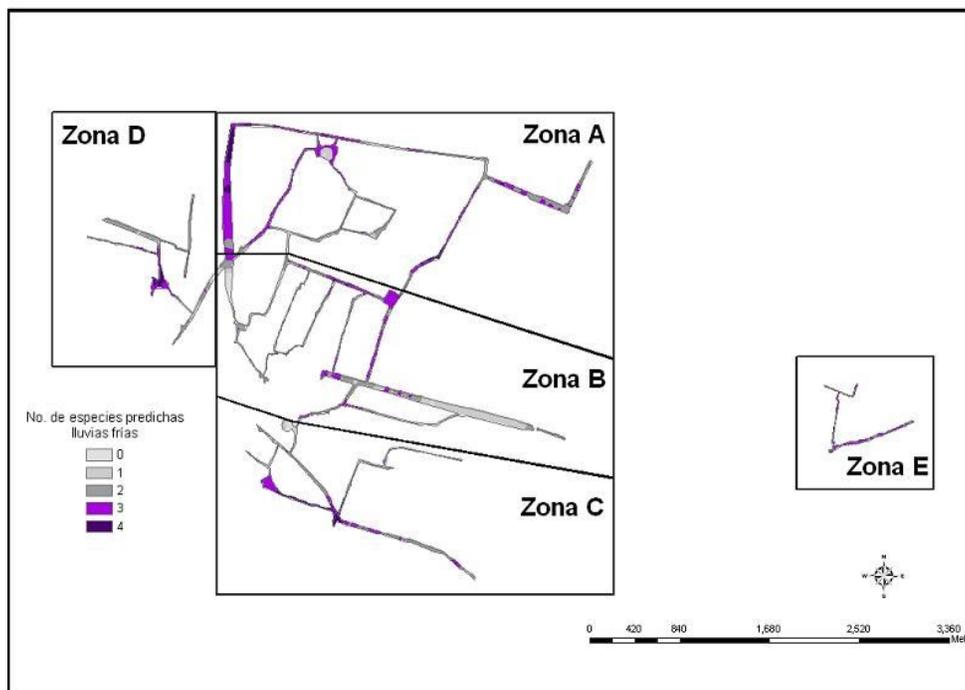


Figura 15. Suma de los modelos de distribución potencial obtenidos con maxEnt para las cuatro especies durante el muestreo de secas. La leyenda indica el número de coincidencias encontradas.

Los resultados obtenidos para el análisis de distribución potencial bajo las condiciones de la temporada de lluvias para las cuatro especies mostraron un incremento en el área de coincidencias para más de tres especies cubriendo el 52.6% del total de píxeles (Figura 16). Si bien los modelos muestran un incremento para la mayoría de las especies fueron las goodeas y los charales los que más aumentaron sus áreas. Las variables con mayor relevancia

durante este análisis fueron: amonio; sólidos disueltos; profundidad y oxígeno disuelto. La zona A fue donde se encontraron la mayoría de las predicciones para las cuatro especies, además la zona C también fue seleccionada casi en su totalidad (Anexo 2 figuras 2, 4, 6 y 8).

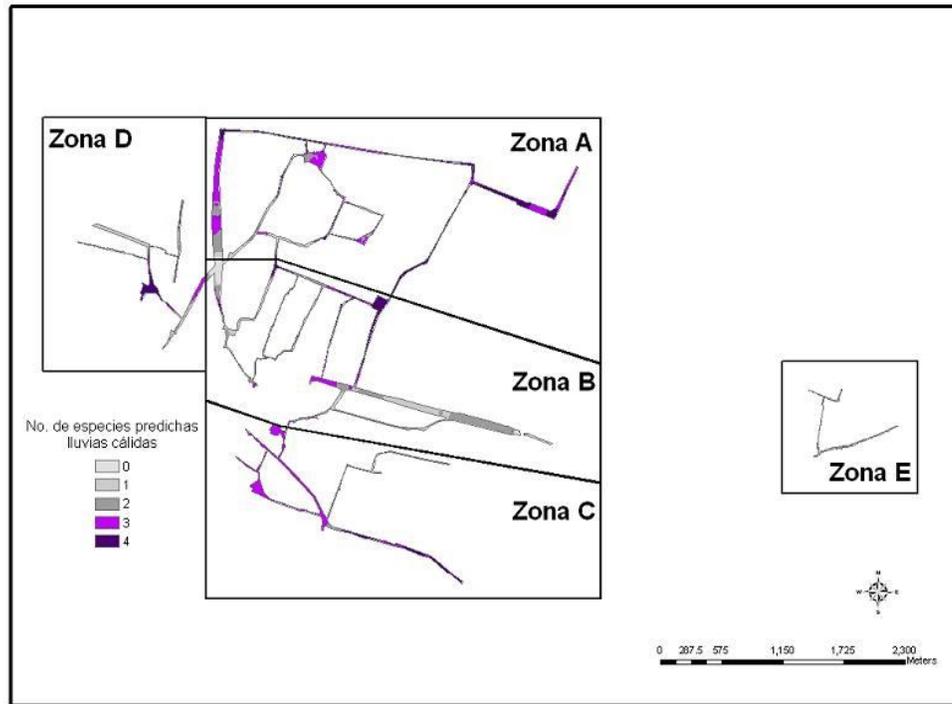


Figura 16. Suma de los modelos de distribución potencial obtenidos con maxEnt para las cuatro especies durante el muestreo de lluvias. La leyenda indica el número de coincidencias encontradas.

Los resultados de las sumas de ambos muestreos señalan que la zona A es la zona donde coinciden la mayoría de las especies, las variables que fueron más relevantes en las dos temporadas fueron: sólidos disueltos; amonio y profundidad (Anexo II, figuras 1 al 8).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que Xochimilco es un ecosistema heterogéneo y altamente degradado. Tanto las especies más resistentes (las introducidas) como las sensibles (las nativas a la Meseta Central de México) están afectadas por la calidad de agua.

Las condiciones fisicoquímicas en el lago de Xochimilco presentan heterogeneidad espacial asociada al uso de suelo, que se puede agrupar en zonas con distintas condiciones limnéticas (Zambrano *et al.*, 2009). Los resultados encontrados en el presente estudio corroboran, una vez más, la presencia de estas zonas (Contreras, 2006); además se encontró que las especies de peces que ahí habitan se ven afectadas de diferente manera por las condiciones presentes en cada una.

El análisis de redundancia proporcionó algunos indicios de las variables fisicoquímicas que pueden estar afectando tanto la salud como la talla y la abundancia de las cuatro especies de peces.

Caracterización de las zonas

El cruce de información obtenida en los distintos análisis permite realizar una categorización de las zonas con base en las condiciones físicoquímicas y bióticas dominantes, durante ambos muestreos, en cada una. Los valores más altos de algunas variables fueron utilizados para categorizar las zonas de peor a mejor calidad de hábitat como se describen a continuación:

Zonas D y E

Posiblemente en las zonas chinampera urbana (D) y chinampera tecnificada (E) la baja o nula presencia de las especies: *Menidia jordani*; *Goodea atripinnis*; *Cyprinus carpio* y *Oreochromis niloticus* se deben a que la calidad del agua está supeditada a las elevadas concentraciones de sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y fosfatos así como a la baja concentración de oxígeno disuelto.

Los modelos de distribución potencial muestran estas zonas con muy pocos valores de predicción. Donde la mayoría de los píxeles tienen predicciones para carpas o tilapias, las cuales son más resistentes a ambientes adversos que las goodeas y charales (Lyons *et al.* 2000). En la zona E las condiciones limitan el establecimiento de las cuatro especies, llegando a ser una zona muy poco apropiada para el mantenimiento de la vida. Además, los individuos colectados en estas zonas presentaron la mayor cantidad de afectaciones de salud.

Los resultados obtenidos al incluir las variables bióticas fueron esclarecedores, revelando que la zona D, que había sido calificada anteriormente como una de las más conservadas (Zambrano *et al.*, 2009) no tiene condiciones favorables para los peces. A pesar de que el uso de suelo de estas dos zonas aparentemente no tendrían más efectos negativos que los usos urbano o de invernaderos. Si bien en las zonas D y E se practica la chinampería esta no se realiza de manera tradicional como en la zona A, ya que el uso de agroquímicos es constante y poco regulado. Las dos zonas tienen poca conectividad con el resto de los canales. Además un buen porcentaje de las chinampas de la zona D han sido abandonadas (*obs. Pers.*) y las chinampas de la zona E estuvieron inundadas durante la década de los 90.

Existe evidencia que indica que los sólidos disueltos, los fosfatos y la conductividad eléctrica son variables que bajo ciertas condiciones pueden llegar a ser letales para los organismos acuáticos.

La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la cantidad de iones disueltos en el agua (Wetzel y Likens 2000). Diversos autores sugieren que dicha cantidad de iones aumenta con los aportes que provienen de escurrimientos del suelo y por la resuspensión de sedimentos (Avnimelech *et al.*, 1999; Okun *et al.* 2008; Persson y Svensson 2006; Schleiger, 2000; Webster *et al.*, 2001).

Existen pocos trabajos que relacionen los efectos de la conductividad eléctrica sobre las especies nativas en un cuerpo de agua. Sin embargo, estudios

preliminares de la EPA sugieren que los valores superiores a los 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ promueven la desaparición del 95% de las especies de invertebrados (USEPA, 2010). Este estudio sólo se ha realizado en una región de Estados Unidos (los Apalaches) y sigue bajo revisión. Pero los valores obtenidos en Xochimilco (de 900 a 1850 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en particular en las zonas D y E de hasta 2140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ están muy por arriba del estudio mencionado, por lo que es muy posible que aún cuando las conclusiones de dicha investigación pueden variar, el estar arriba un orden de magnitud sugiere que esta variable si puede estar afectando a las especies. Esto se puede explicar además porque los análisis de redundancia mostraron una relación negativa entre la conductividad y todas las variables bióticas.

Los sólidos disueltos totales (SDT) fueron relevantes para los modelos de distribución potencial de los charales, goodeas, carpas y tilapias.

Los sólidos disueltos totales son una medida de los iones, la materia orgánica y particulada presentes en el agua. En altas concentraciones disminuyen la transparencia del agua impidiendo el paso de la luz lo que afecta a los procesos fotosintéticos de la vegetación acuática. Incrementan la temperatura e impiden la disipación del calor lo que perjudica a la vida acuática adaptada a temperaturas menores (APHA, 1992).

Afecta los procesos de osmolaridad a nivel celular de los organismos acuáticos. Permitiendo el flujo de iones a su interior cuando los sólidos disueltos se encuentran en concentraciones bajas o induciendo el flujo de iones hacia el exterior cuando se encuentran en concentraciones altas. Estos cambios en la densidad celular de los peces dificulta su flotabilidad y por ende su permanencia en distintas profundidades de la columna de agua, lo que puede interferir en sus hábitos alimenticios.

Algunos autores sugieren que los peces recién eclosionados y los juveniles son más sensibles a las altas concentraciones de sólidos disueltos totales disminuyendo la eclosión de la especie *Morone saxatilis* cuando fue expuesta a 350 mg/L en la Bahía de Sn Francisco (Kaiser Engineers, 1969).

Las concentraciones de fosfatos registradas en Xochimilco muestran que es un sistema hipereutrofizado es decir mayor a 100 µg/L (Ramesh-Reddy y DeLaune, 2008; Zambrano *et al.*, 2009). Si bien en la mayoría de los sistemas acuáticos el fósforo es una variable limitante ya que es escaso, las perturbaciones antropogénicas suelen aumentar su concentración en el agua, debido principalmente a los fertilizantes y las descargas de aguas residuales de zonas urbanas y de invernaderos (Mazari-Hiriart *et al.*, 2008). Los sistemas hipereutróficos pueden afectar negativamente a los organismos acuáticos, ya que promueven el aumento en la productividad primaria, la aparición de grandes poblaciones de algas y el establecimiento de condiciones anóxicas en el sistema (Carpenter *et al.*, 1998; Mazari-Hiriart *et al.*, 2008 Ramesh-Reddy y DeLaune 2008).

Además el fósforo es un nutriente que no se elimina fácilmente del sistema, ya que su ciclo no incluye una liberación a la atmósfera. Su acumulación a corto plazo suele ser regulada por la vegetación y el perifiton. A largo plazo dependerá de la asimilación de los suelos, por lo que su eliminación del sistema puede llegar a tardar décadas (Ramesh Reddy y DeLaune 2008).

Como se mencionó anteriormente, la zona E presentó las más bajas concentraciones de oxígeno en los dos muestreos. La USEPA (1986) publicó una recomendación para los cuerpos de agua de un mínimo de 4 mg/L de oxígeno. Los resultados del análisis de redundancia muestran una correlación entre el oxígeno disuelto y las tallas, abundancias y deformidades de algunas de las especies muestreadas. Esto coincide con lo encontrado por Yip y Wong (1977) quienes sugieren que las concentraciones inferiores a la recomendada por la EPA inducen condiciones de estrés y hasta letales en diversas especies acuáticas.

Con base en lo descrito para sólidos disueltos, conductividad eléctrica, fosfatos y oxígeno disuelto podemos inferir que las condiciones presentes en esta zona son poco favorables para las cuatro especies de peces. La conductividad afecta a las especies de invertebrados que son el soporte alimenticio de las especies nativas. Los sólidos disueltos totales disminuyen la flotabilidad, la

capacidad reproductiva de los peces y facilitan la permeabilidad celular. Además limitan la penetración de luz en el cuerpo de agua promoviendo una reducción en la densidad de vegetación acuática sumergida lo que merma la cadena alimenticia. Los fosfatos pueden estar relacionados con los bajos niveles de oxígeno, promoviendo el establecimiento de comunidades bacterianas que probablemente incidan en la salud de los peces.

Si bien el uso de suelo principalmente dedicado a la chinampería sugería que las zonas D y E estarían entre las más conservadas, esto no sucedió. El uso de técnicas derivadas de la agricultura intensiva (Merlín-Uribe, 2009) parecen estar modificando tanto las condiciones ambientales como la capacidad de establecimiento y bienestar de las especies acuáticas que habitan en los canales; al grado de limitar la presencia y abundancia de las mismas. El efecto de estas técnicas de producción parecieran superar los de las zonas urbana y turística. Es por ello que, las zonas chinampera-urbana y chinampera-tecnificada se encuentran entre las más degradadas de Xochimilco.

Zonas B y C

En las zonas Urbana (B) y Turística (C) todas las especies estuvieron presentes y fueron abundantes. Sin embargo el número de afectaciones fue alto, esto probablemente estuvo asociado a las altas concentraciones de amonio y nitrato característicos de estas zonas y muy probablemente estuvieron asociados al uso intensivo de fertilizantes. Los modelos de distribución potencial mostraron algunas áreas donde coincidieron las predicciones de las cuatro especies de peces. A diferencia de las zonas D y E las especies más sensibles, goodeas y charales, sí obtuvieron valores de predicción en varios canales.

Lo anterior sugiere que si bien las altas concentraciones de amonio y nitratos no favorecen la salud ni la capacidad de establecimiento de los peces, tampoco los limitan ni llegan a ser letales.

Existe evidencia que sugiere que estas variables son tóxicas desde concentraciones más bajas que las encontradas en estos canales, y esto se corrobora con la alta densidad de afectaciones en la salud de los peces encontrados en esta zona. Por lo que consideramos que si bien, las concentraciones estimadas de amonio y nitrato en estas zonas no presentaron diferencias significativas con respecto a las demás, las concentraciones de estos nutrientes y sus efectos son relevantes.

El nitrógeno es uno de los nutrientes limitantes en todos los ecosistemas debido a su alta tasa de asimilación y liberación a la atmósfera. Sin embargo, las actividades humanas han contribuido a incrementar su concentración en los cuerpos de agua. La entrada de estos nutrientes en el sistema se debe posiblemente al tipo de uso de suelo. Por ejemplo, los invernaderos y los suelos altamente urbanizados contribuyen en gran medida al incremento en las concentraciones de amonio y nitratos en el agua por una serie de aportes de manera directa o indirecta, como son escurrimientos, transporte por el viento, sedimentación, etc. (Hippe *et al.* 1994; Jha *et al.* 2007).

Los peces son particularmente sensibles a estos nutrientes ya que actúan sobre la hemoglobina y hemocianina, reduciendo su capacidad de transportar oxígeno (Jensen, 1996; Scott y Crunkilton, 2000; Cheng y Chen, 2002). La diferencia entre la reactividad del amonio y los nitratos radica en la permeabilidad branquial ya que es mayor la capacidad de absorber el amonio (Jensen, 1996; Cheng y Chen, 2002; Camargo *et al.*, 2003). La exposición al amonio se ha relacionado con lesiones externas en peces (ojos, agallas y piel) (Camargo *et al.*, 2003).

La EPA (2009) advierte que en los casos de exposición crónica al amonio, es decir que estén permanentemente expuestas a las condiciones, las concentraciones superiores a 1 mg/L en condiciones de pH cercanos a 8 perjudican a los peces. Mendoza (2009) sugiere que concentraciones por arriba de los 0.20 mg/L de cloruro de amonio es letal para el 80% de los embriones y larvas de *Ambystoma mexicanum*. Las concentraciones de amonio registradas en estas zonas durante los dos muestreos fueron superiores a las

recomendadas por la EPA. Además también se registraron las incidencias más altas en afectaciones a la salud para las cuatro especies.

Existen pocas referencias en la literatura que evalúen la toxicidad crónica de los nitratos, esto se debe a que los efectos varían entre las distintas especies y a que hasta hace poco tiempo no eran considerados tóxicos. Camargo *et al.* (2005) sugieren que los nitratos en concentraciones superiores a los 10 mg/L son letales para la mayoría de las especies acuáticas, y advierten que concentraciones aún inferiores a ésta pueden ser mortales para las especies más sensibles. Mendoza (2009) encontró que el nitrato de sodio en concentraciones superiores a 4 mg/L es letal para los primeros estadíos del axolote. Algunos estudios sugieren que las especies más sensibles se ven afectadas a concentraciones tan bajas como 2.3 mg/L (Kincheloe *et al.*, 1979).

Los nitratos pueden tener distintos efectos sobre los organismos acuáticos, éstos pueden variar desde una disminución en la capacidad de los glóbulos rojos para transportar oxígeno, hasta severas afectaciones en las agallas hígado y los riñones (Cheng y Chen, 2002; Hrubec, 1996; Jensen, 1996; Scott y Crunkilton, 2000).

La exposición de los peces a este compuesto es crónica es decir, por un largo periodo de tiempo por lo que consideramos que la concentración recomendada por Kincheloe *et al.* (1979) es la más apropiada para interpretar los resultados. Las concentraciones de nitratos registradas en las zonas B y C superaron los 2.3 mg/L llegando a ser hasta 5 veces mayor. Es posible que la combinación de las altas concentraciones de amonios y nitratos esté relacionada con la alta incidencia en afectaciones a la salud de los peces.

La presencia de uso de suelo urbano y de invernaderos tienen como consecuencia la aparición de: drenajes irregulares, escurrimientos provenientes del uso de fertilizantes y materia orgánica en descomposición, todo esto es causante de las altas concentraciones de amonio y nitratos (Ramesh-Reddy y DeLaune, 2008). Las zonas B y C además están relacionadas entre sí a pesar de tener pocos canales que las interconecte esto se debe a que la circulación

del agua en el sistema de canales es de Sureste a Noroeste, lo que mantiene a la zona B bajo la influencia de las condiciones fisicoquímicas presentes en la zona C.

Contrario a lo esperado las zonas más conservadas después de la zona chinampera tradicional (Zambrano *et al.*, 2008) son las zonas urbana y turística. Esto no se debe a la presencia de las condiciones idóneas para la vida acuática. Si no porque el ecosistema está altamente degradado al punto en el que la presencia de altas concentraciones de nutrientes no disminuyen la capacidad de establecimiento de las especies acuáticas, aunque sí merman su estado de salud. Así encontramos que las zonas que están sujetas a mayor presión por un cambio de uso de suelo hacia uso habitacional, en los cuales se tiende a desecar los canales, juegan un papel vital para la supervivencia de las especies acuáticas.

Zona A

En contraste con las zonas anteriormente descritas, la zona chinampera presenta las concentraciones más bajas de amonio y nitratos, así como conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, los valores de oxígeno disuelto y temperatura más altos de todo el sistema, en ambos muestreos. Esto explica la baja incidencia de afectaciones en la salud de los peces, lo que no significa que estuvieran ausentes. Además fue posible encontrar presencia de las especies *Menidia jordanii*; *Goodea atripinnis*; *Cyprinus carpio* y *Oreochromis niloticus* y se registraron poblaciones abundantes. Los modelos de distribución potencial concuerdan con estos resultados ya que esta zona es la que presenta más píxeles con coincidencias para las cuatro especies.

La temperatura es un factor determinante en el crecimiento y mortalidad de diversas especies de peces, en el caso de las carpas se ha reportado que la temperatura mínima tolerable es cercana a la congelación del agua (Hofmann y Fischer, 2003; Schmidt-Nielsen, 1997; Soderberg, 1992). Las temperaturas óptimas de crecimiento de carpa y tilapia están por arriba de los 20 y 21°C respectivamente (El-Sayed *et al.*, 1996). Las temperaturas en el campo,

estuvieron cercanas a las óptimas de laboratorio, y por ello esta variable fue una de las más relevantes en ambas temporadas en el análisis estadístico; para la mayoría de las tallas de las especies muestreadas.

Las variables de temperatura y oxígeno tienen una relación inversa, es decir a mayor temperatura menor concentración de oxígeno y viceversa (Wetzel y Likens, 2000). Los altos valores registrados para las dos variables en la zona A resultan contradictorios con lo anterior. Sin embargo, es probable que en las demás zonas las altas concentraciones de fosfatos y sólidos disueltos totales influyan en la disminución de oxígeno debido al establecimiento de condiciones eutróficas o por la poca penetrabilidad de la luz en el cuerpo de agua (APHA, 1992; Ramesh-Reddy y DeLaune, 2008; Zambrano *et al.*, 2009). La zona A presentó las concentraciones más bajas de fosfatos y sólidos disueltos lo cual puede ayudar a explicar la alta concentración de oxígeno aún a temperaturas superiores a las registradas en las demás zonas.

La zona A se encuentra inmersa en la zona núcleo del Área Natural Protegida, por ello su uso de suelo está restringido, sin embargo, las condiciones encontradas en el interior de los canales distan mucho de ser las más recomendables. La cercanía y conectividad con las zonas B y C aunado a la orientación del flujo de agua permiten que toda el agua fluya hacia esta zona desembocando en el canal de Japón. Esto implica que si bien la zona A puede ser la más conservada, se verá influenciada por todas las demás ya que en ella se encuentra la salida del agua del ecosistema. Algunas de las variables registradas en sus canales se encontraron cercanas al límite recomendado por la EPA, y esto coincidió con algunas especies con alta incidencia de afectaciones.

La falta de regulación en cuanto al uso de suelo en las demás zonas promueven una mayor presión sobre la zona A. Esto se debe a que las especies de peces tienen la capacidad de dispersarse y buscar las condiciones más favorables para establecerse, incrementando con ello la presión sobre los recursos y la competencia entre las distintas especies. Así tenemos que si bien la zona A es la mejor conservada, es a su vez la más frágil. El área

comprendida por los canales que la componen es insuficiente a nuestro criterio para sustentar poblaciones saludables de todas las especies acuáticas. Por lo que es vital controlar el cambio de uso de suelo de las demás zonas y promover el establecimiento de condiciones más favorables para todas las especies.

Variabilidad Temporal

La variabilidad temporal del sistema, en particular en los sólidos totales y la conductividad, puede estar relacionada con el plan de erradicación de especies exóticas que se llevó a cabo durante los meses de enero a mayo del 2008. El hábito bentívoro de las carpas está altamente relacionado con la resuspensión de sedimentos (Avnimelech *et al.*, 1999; Okun *et al.*, 2008; Persson y Svensson, 2006; Webster *et al.*, 2001). Este forrajeo induce un aumento en los sólidos disueltos totales, conductividad y turbidez de los cuerpos acuáticos (Zambrano *et al.*, 1998; Zambrano *et al.*, 2001).

Durante el plan de erradicación se extrajeron peces de manera diferencial en las zonas. Mientras que en la zona A se extrajeron 101.4 ton, en la B 47.7 ton en la C 1.2 ton y 9.73 ton para la zona D; la zona E no se incluyó en ese proyecto. En total se redujeron 160 toneladas de los canales. Esta reducción se puede relacionar con los cambios temporales de conductividad y sólidos disueltos, que cambió en todas las zonas, excepto en la zona E.

El cambio en las condiciones abióticas entre ambos muestreos y la disminución de las especies exóticas favorecieron a las poblaciones de especies nativas, las cuales fueron más abundantes durante el periodo de lluvias cálidas. Esto también se reflejó en los resultados de los modelos de distribución potencial donde se obtuvo un aumento de las áreas de predicción para las especies nativas. Obteniendo un incremento del 16% de píxeles seleccionados con distribución potencial.

Las carpas y tilapias en Xochimilco están compitiendo por los recursos alimenticios con algunas especies nativas (Zambrano *et al.* 2010). Si bien las especies exóticas se pueden utilizar como biomonitores, (es decir aquellas

especies que por su función, abundancia o estatus pueden indicar la calidad de un ecosistema) éstas a su vez pueden estar afectando a las especies nativas por competencia. Por lo que las zonas de mayor probabilidad de coincidencia de las cuatro especies estarán sujetas a una mayor presión de competencia por los recursos. De acuerdo con los resultados obtenidos en los modelos de distribución potencial el área de coincidencia de las cuatro especies también aumentó en un 16% de los muestreos de secas a lluvias, este incremento se debió principalmente a las especies nativas.

Esto implica que la reducción del número de individuos de las especies exóticas favorece también al probable establecimiento de las condiciones necesarias para que las especies nativas estén presentes. Si bien en esos mismos sitios existe una mayor probabilidad de que se encuentren las carpas y tilapias, al estar en un número reducido las probabilidades de interacción y escasez de recursos se ven reducidas. Además esto podría estar incidiendo también en el estado de salud de los peces ya que la incidencia de afectaciones en las cuatro especies disminuyó con respecto al muestreo anterior.

CONCLUSIONES:

- El Lago de Xochimilco es un sistema muy heterogéneo que puede ser dividido en cinco zonas significativamente distintas entre sí con base en condiciones bióticas y abióticas.
- La conductividad eléctrica, sólidos disueltos, amonio, nitratos y fosfatos son determinantes tanto en el estado de salud de los peces como en su distribución potencial.
- La zonas pueden ser caracterizadas a partir de algunas variables, formando tres grupos:
 - 1) La zona E y D que tienen altos valores de sólidos disueltos, conductividad eléctrica y fosfatos, asociados a el abandono de tierras y el uso de agroquímicos. Estas condiciones hace a las zonas chinampera urbana y chinampera tecnificada poco aptas para soportar a la comunidad de peces, impidiendo el establecimiento de los charales y las goodeas. En cuanto a la salud de los peces estas zonas registraron una mayor frecuencia de lesiones y tumores.
 - 2) Las zonas urbana y turística que tienen altas concentraciones de amonio y nitratos, promovidos por el uso intensivo de agroquímicos y los drenajes irregulares. Si bien estas condiciones no limitan el establecimiento de poblaciones de todas las especies si merman la salud de los peces, en particular de los charales, las goodeas y las tilapias, siendo las deformidades y erosiones los tipos de afectaciones más frecuentes.
 - 3) La Zona A que se encuentra en el Área Natural protegida por lo que su uso de suelo está regulado y que presenta las concentraciones más bajas de las variables relevantes en las demás zonas. Esto permite el establecimiento de todas especies con una incidencia menor en el

número de afectaciones en comparación con las demás zonas. Sin embargo, siguen siendo muy altas comparadas con otros sistemas similares.

- La aplicación del plan de erradicación de especies exóticas contribuye a modificar las condiciones abióticas en el sistema, en particular la conductividad y los sólidos disueltos, promoviendo el establecimiento de las especies nativas en todas las zonas.

RECOMENDACIONES

Es necesario continuar con realizando proyectos de mitigación de las especies exóticas para mejorar las condiciones abióticas del sistema y ayudar en el reestablecimiento de especies nativas.

Realizar proyectos que contemplen la regularización del uso de suelo y control del uso de agroquímicos en los medios de producción, así como evitar el abandono de la tierra.

Realizar monitoreos constantes que incluyan abundancia y DELT de *Goodea atripinnis* y *Menidia jordani*, además de conductividad eléctrica, sólidos disueltos, amonio nitratos y fosfatos para contar con información que retroalimente a los proyectos anteriormente mencionados.

Es necesario además, evaluar el efecto que tienen otras variables como las bacterias, algas, hongos y disruptores endócrinos que pueden estar influyendo de manera determinante en el detrimento del ecosistema.

Realizar estudios de transportación de sólidos para poder encontrar los orígenes de los productos que promueven el establecimiento de las condiciones adversas en el ecosistema.

REFERENCIAS

- Aguilar, A., Espinosa, A.C., Caraballo Perichi, C., 2006. El manejo del agua. Tema Central en Xochimilco, En Xochimilco un Proceso de gestión participativa. ed. C. Caraballo, pp. 183 - 190. UNESCO, México D.F.
- APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Water Works Association and Wastewater, Washington, D.C.
- Avnimelech, Y., Kochva, M., Hargreaves, J.A., 1999. Sedimentation and Resuspension in Earthen Fish Ponds. *Journal of the World Aquaculture Society* 30, 401-409.
- Camargo, J.A., Alonso, A., Salamanca, A., 2005. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates. *Chemosphere* 58, 1255-1267.
- Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., Smith, V.H., 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8, 559-568.
- Cisneros, I.P., 2005. Aspectos ambientales relacionados con la calidad del agua en Xochimilco, Distrito Federal. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. p. 91. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.,.
- Contreras, V., 2006. Distribución potencial del *Ambystoma mexicanum* en los canales de la zona chinampera de Xochimilco., Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. p. 49. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Contreras, V., Martínez-Meyer, E., Valiente, E., Zambrano, L., 2009. Recent decline and potential distribution in the last remnant area of the microendemic Mexican axolotl (*Ambystoma mexicanum*) *Biological Conservation* 142, 2881-2885.
- Cheng, S.-Y., Chen, J.-C., 2002. Study on the oxyhemocyanin, deoxyhemocyanin, oxygen affinity and acid-base balance of *Marsupenaeus japonicus* following exposure to combined elevated nitrite and nitrate. *Aquatic Toxicology* 61, 181-193.
- de la Vega-Salazar, M. Y., 2006. Estado de conservación de los peces de la familia Goodeidae (Cyprinodontiformes) en la mesa central de México. *Revista de Biología Tropical* 54, 163-177.
- Duhon, S.T., 1997. The Axolotl and its Native Habitat-Yesterday and Today. *Axolotl Newsletter*, Indiana University, Indiana, 14-17.

- El-Sayed, A.F.M., El-Ghobashy, A., Al-Amoudi, M., 1996. Effects of pond depth and water temperature on the growth, mortality and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture Research* 27, 681-687.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17, 43-57.
- FAO, 2004-2011. Programa de información de especies acuáticas. *Cyprinus carpio*. Programa de información de especies acuáticas. Texto de Peteri, A. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO [en línea]. Roma. Actualizado 1 Enero 2004. [Citado 26 Julio 2011]. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Cyprinus_carpio/es.
- FAO, 2008-2011. Cultured Aquatic Species Information Programme *Oreochromis niloticus*. Programa de información de especies acuáticas. Texto de Rakocy, J. E. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO [en línea]. Roma. Actualizado 18 Febrero 2005. [Citado 15 Junio 2011]. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis_niloticus/es.
- Fausch, K.D., Karr, J.R., Yant, P.R., 1984 Regional application of an index of biotic integrity based on stream fish communities. *Transactions of the American Fisheries Society*, 39–55.
- Freyhof, J., Kottelat, M., 2008. *Cyprinus carpio*, IUCN 2011. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2011.1. www.iucnredlist.org. Citado 25 Julio 2011.
- G.D.F., 2006. Programa de Manejo del Área Natural Protegida con carácter de Zona de Conservación Ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, Gaceta Oficial del Distrito Federal. Enero de 2006. pp.164
- GISD, 2011. Global Invasive Species Database, *Oreochromis niloticus*, Disponible en: <http://www.issg.org/database/species/ecology.asp?si=1322> [Julio 2011].
- Graue, W.V., 1998. Estudio Genético y Demográfico de la población del anfibio *Ambystoma mexicanum* (Caudata: Ambystomatidae) del Lago de Xochimilco. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Thatham, R.L., Black, W.C., 1998. Multivariate data analysis, 5th edn. Prentice Hall, New Jersey.
- Hippe, D., Wangsness, D., Frick, E., Garrett, J., 1994. Water quality of the Apalachicola-Chattahoochee-Flint and Ocmulgee River basins related to flooding from tropical storm Alberto; pesticides in urban and agricultural watersheds; and nitrate and pesticides in ground water, Georgia, Alabama, and Florida. ed. USGS, Atlanta.

- Hofmann, N., Fischer, P., 2003. Impact of temperature on food intake and growth in juvenile burbot. *Journal of Fish Biology* 63, 1295-1305.
- Hrubec, T.C., 1996. Nitrate toxicity: a potential problem of recirculating systems. *Aquacultural Engineering Society Procedures*, 41–48.
- Ibáñez, A.L., García-Calderón, J.L., Torres-Orozco, R., 2008. Aspectos reproductivos de una población del charal *Menidia jordani* (Woolman) del lago de Metztlán, Hidalgo. *Hidrobiológica* 18, 1-9.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2002. Cuaderno Estadístico Delegacional de Xochimilco, Distrito Federal. <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanolsistemas/cenoz/info/df/m013/anexos/present.htm>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) 2011. Sitio del INEGI en Internet: www.inegi.org.mx.
- Jensen, F.B., 1996. Uptake, elimination and effects of nitrite and nitrate in freshwater crayfish (*Astacus astacus*). *Aquatic Toxicology* 34, 95-104.
- Jha, P., Barat, S., Sarkar, K., 2007. Comparative effect of live food and manured treatments on water quality and production of ornamental carp, *Cyprinus carpio* var. *koi* L., during winter, summer, monsoon and post-monsoon growout experiments in concrete tanks. *Journal of Applied Ichthyology* 23, 87-92.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 1991. Mining Geostatistics, Fifth edition. Academic Press Limited, San Diego, California.
- Kincheloe, J.W., Wedemeyer, G.A., Koch, D.L., 1979. Tolerance of developing salmonid eggs and fry to nitrate exposure. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 23, 575-578.
- Kaiser Engineers, 1969. San Francisco Bay-Delta water quality control program: final report to the State of California. Ed. California State, Water Resources Control Board. Kaiser Engineers.
- Kravchenko, A.N., 2003. Influence of Spatial Structure on Accuracy of Interpolation Methods. *Soil Science Society of America Journal* 67, 1564-1571.
- Legendre, P., Gallagher, E.D., 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecología* 129, 271-280.
- Lyons, J., Gutiérrez-Hernández, A., Díaz-Pardo, E., Soto-Galera, E., Medina-Nava, M., Pineda-López, R., 2000. Development of a preliminary index of biotic integrity (IBI) based on fish assemblages to assess ecosystem condition in the lakes of central Mexico. *Hydrobiología* 418, 57-72.

- Mazari-Hiriart, M, Ponce-de-León, S, López-Vidal, Y, Islas-Macías, P, Amieva-Fernández, RI, Quiñones-Falconi, F. 2008 Microbiological Implications of Periurban Agriculture and Water Reuse in Mexico City. *PLoS ONE* 3 (5)
- Mendoza Almeralla, C., 2009. Efectos en el desarrollo y supervivencia de embriones y larvas recién eclosionadas de *Ambystoma mexicanum* por exposición a diferentes concentraciones de nitrito, nitrato y amonio. Tesis de Maestría Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM. México, D. F. p. 72.
- Merlín-Urbe, Y., 2009. Evaluación de dos sistemas de manejo de recursos naturales de Xochimilco con indicadores de sustentabilidad Tesis de Maestría. Instituto de Ecología, A. C, Xalapa, Veracruz. p. 213
- Miller, D.L., Hughes, R.M., Karr, J.R., Leonard, P.M., Moyle, P.B., Schrader, L.H., Thompson, B.A., Daniels, R.A., Fausch, K.D., Fitzhugh, G.A., Gammon, J.R., Halliwell, D.B., Angermeier, P.L., Orth, D.J., 1988. Regional Applications of an Index of Biotic Integrity for Use in Water Resource Management. *Fisheries* 13, 12 - 20.
- Miranda, R., Galicia, D., Monks, S., Pulido-Flores, G., 2010. First record of *Goodea atripinnis* (Cyprinodontiformes: Goodeidae) in the state of Hidalgo (Mexico) and some considerations about its taxonomic position. *Hidrobiológica* 20, 185-190.
- 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. 30 de diciembre de 2010
- Okun, N., Brasil, J., Attayde, J.L., Costa, I.A.S., 2008. Omnivory does not prevent trophic cascades in pelagic food webs. *Freshwater Biology* 53, 129-138.
- Olvera-Blanco, Y.M., Gómez-Márquez, J.L., Peña-Mendoza, B., Gaspar-Dillanes, T., Pérez, C., 2009. Reproductive biology of *Menidia jordani* (Atheriniformes: Atherinopsidae) in Xochimilco Lake, Mexico. *Ciencia Pesquera* 17, 65-75.
- Persson, A., Svensson, J.M., 2006. Effects of benthivorous fish on biogeochemical processes in lake sediments. *Freshwater Biology* 51, 1298-1309.
- Ramesh Reddy, K., DeLaune, R.D., 2008. Biogeochemistry of wetlands Science and Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida.
- Rojas, T., 2004. Las cuencas lacustres del Altiplano Central. *Arqueología Mexicana* 12, 20-27.

- Rojas, T., Pérez, J.G., 1985. La cosecha del agua en la cuenca de México y la pesca en el medio lacustre y chinampero de San Luis Tlaxiátemalco. CIESAS, Museo Nacional de Culturas Populares. México, D. F.
- Scott, G., Crunkilton, R.L., 2000. Acute and chronic toxicity of nitrate to fathead minnows (*Pimephales promelas*), ceriodaphnia dubia, and Daphnia magna. *Environmental Toxicology and Chemistry* 19, 2918-2922.
- Schaffer, H.B., 1989. Natural History, Ecology, and Evolution of the Mexican "Axolotls". *Axolotl Newsletter*, Indiana University, Indiana, 5-12.
- Schleiger, S.L., 2000. Use of an Index of Biotic Integrity to Detect Effects of Land Uses on Stream Fish Communities in West-Central Georgia. *Transactions of the American Fisheries Society* 129, 1118 — 1133.
- Schmidt-Nielsen, K., 1997. Animal Physiology Adaptation and Environment, 5th ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Simon, T.P. ed., 1998. Assessing the sustainability and biological integrity of water resources using fish communities CRC-Press, Florida.
- Snoeks, J., Laleye, P., MacBeath, T., 2007. *Goodea atripinnis*, In IUCN 2010 IUCN Red List of Threatened Species. Version 2010.4 www.iucnredlist.org. 2011 Citado 15 June 2011.
- Soderberg, R.W., 1992. Linear Fish Growth Models for Intensive Aquaculture. *The Progressive Fish-Culturist* 54, 255-258.
- Steinman, A., D., Denning, R., 2005. The role of spatial heterogeneity in the management of freshwater resources, In *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. eds G.M. Lovett, M.G. Turner, C.G. Jones, K.C. Weathers. Springer, USA.
- Steinman, A.D., Conklin, J., Bohlen, P.J., Uzarski, D.G., 2003. Influence of cattle grazing and pasture land use on macroinvertebrate communities in freshwater wetlands. *Wetlands*, 877–889.
- USEPA, 1986. Quality Criteria for Water. United States Environmental Protection Agency. Office of Water, p. 477, Washington, D.C.
- USEPA, 2009. Draft 2009 Update aquatic life ambient water quality criteria for ammonia – freshwater, ed. Office of Water. United States Environmental Protection Agency, p. 192, Washington, D.C.
- USEPA, 2010. A field-based aquatic life benchmark for conductivity in Central Appalachian streams. Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment Washington, D.C.
- Valiente, E.L., 2006. Efecto de las especies introducidas en Xochimilco para la rehabilitación del hábitat del ajolote (*Ambystoma mexicanum*). Tesis de

Maestría. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.

- Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F., 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32, 95-105.
- Webster, I., Ford, P.W., Hancock, G., 2001. Phosphorus dynamics in Australian lowland rivers. *Marine and Freshwater Research* 52, 127–137.
- Wetzel, R.G., Likens, G.E., 2000. *Limnological Analysis*, 3rd edn. Springer New York.
- Yip, S.W., Wong, M.H., 1977. The effects of sewage sludge on the growth rate of carp, *Cyprinus carpio* L. *Environmental Pollution* (1970) 14, 127-132.
- Zambrano, L., Contreras, V., Mazari-Hiriart, M., Zarco-Arista, A., 2009. Spatial Heterogeneity of Water Quality in a Highly Degraded Tropical Freshwater Ecosystem. *Environmental Management* 43, 249-263.
- Zambrano, L., Mosig Reidl, P., McKay, J., Griffiths, R., Shaffer, B., Flores-Villela, O., Parra-Olea, G., Wake, D., 2008. *Ambystoma mexicanum*. IUCN 2011. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2011.1., www.iucnredlist.org.
- Zambrano, L., Perrow, M., Macías-García, C., Aguirre-Hidalgo, V., 1998. Impact of introduced carp (*Cyprinus carpio*) in subtropical shallow ponds in Central Mexico. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery* (Formerly Journal of Aquatic Ecosystem Health) 6, 281-288.
- Zambrano, L., Reynoso, V.H., Herrera, G., 2004. Abundancia y estructura poblacional del axolotl (*Ambystoma mexicanum*) en los sistemas dulceacuícolas de Xochimilco y Chalco, In Base de datos SNIB-Conabio proyecto AS004 Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City.
- Zambrano, L., Scheffer, M., Martínez-Ramos, M., 2001. Catastrophic response of lakes to benthivorous fish introduction. *Oikos* 94, 344-350.
- Zambrano, L., Valiente, E., Vander Zanden, M., 2010. Food web overlap among native axolotl (*Ambystoma mexicanum*) and two exotic fishes: carp (*Cyprinus carpio*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Xochimilco, Mexico City. *Biological Invasions* 12, 3061-3069.
- Zambrano, L., Vega, E., Herrera, L.G., Prado, E., Reynoso, V.H., 2007. A population matrix model and population viability analysis to predict the fate of endangered species in highly managed water systems. *Animal Conservation* 10, 297–303.

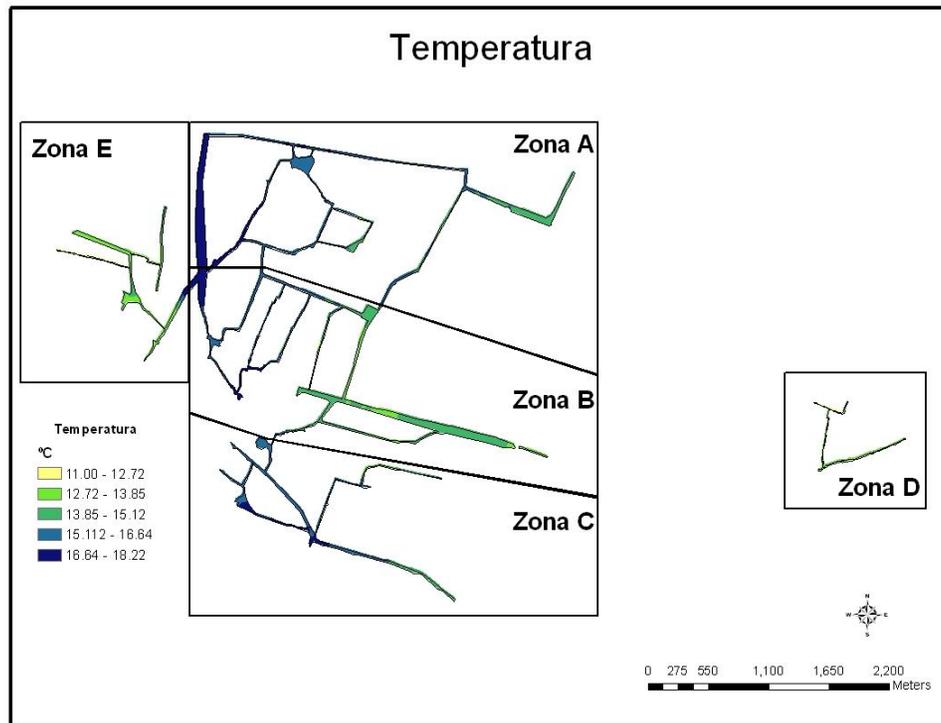
Zutshi, B., Raghu-Prasad, S.G., Nagaraja, R., 2008. Anthropogenic impact on the lakes ecosystem in Hi-Tech City, Bangalore, Karnataka, In Proceedings of Taal 2007: The 12th World Lake Conference. eds M. Sengupta, R. Dalwani, pp. 1786-1793.

Zuur, A.F., Ieno, E.N., Smith, G.M., 2007. Analysing Ecological Data. Springer Science, USA.

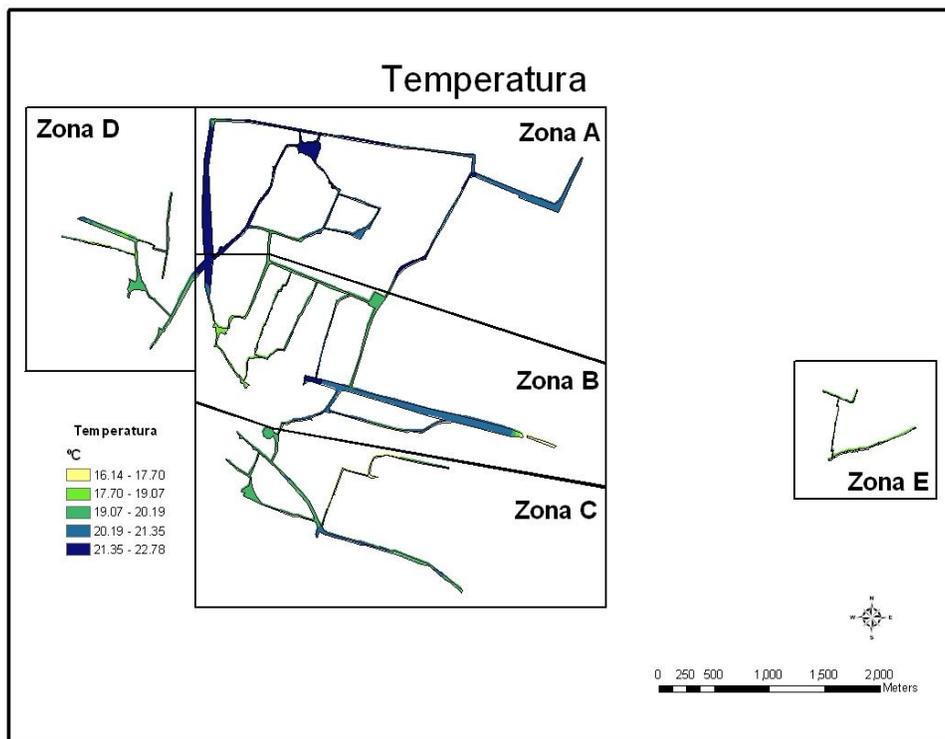
Anexos

Anexo I.

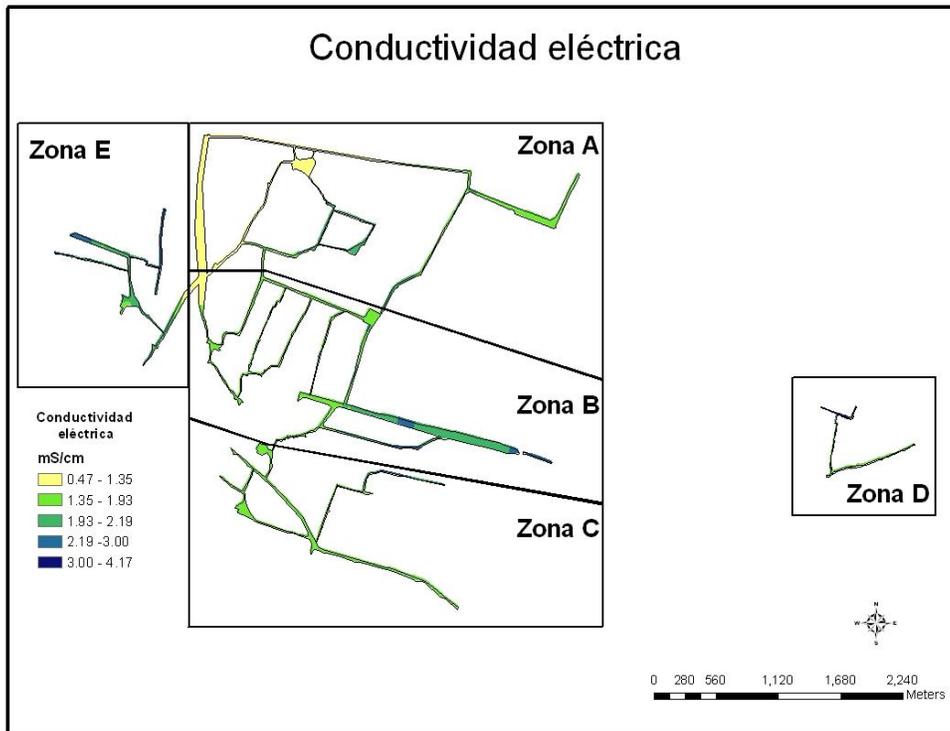
Modelos de interpolación obtenidos para los periodos de secas y lluvias.



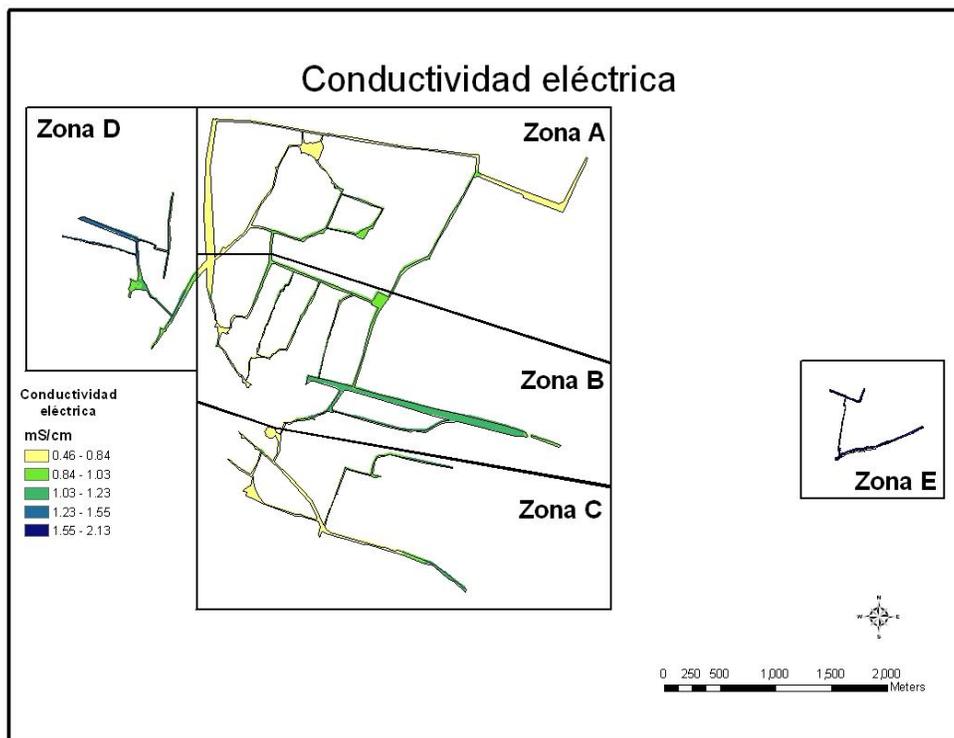
Mapa 1. Interpolación de los valores de temperatura para el periodo de secas. El valor del REMPSE del modelo fue de 0.3886.



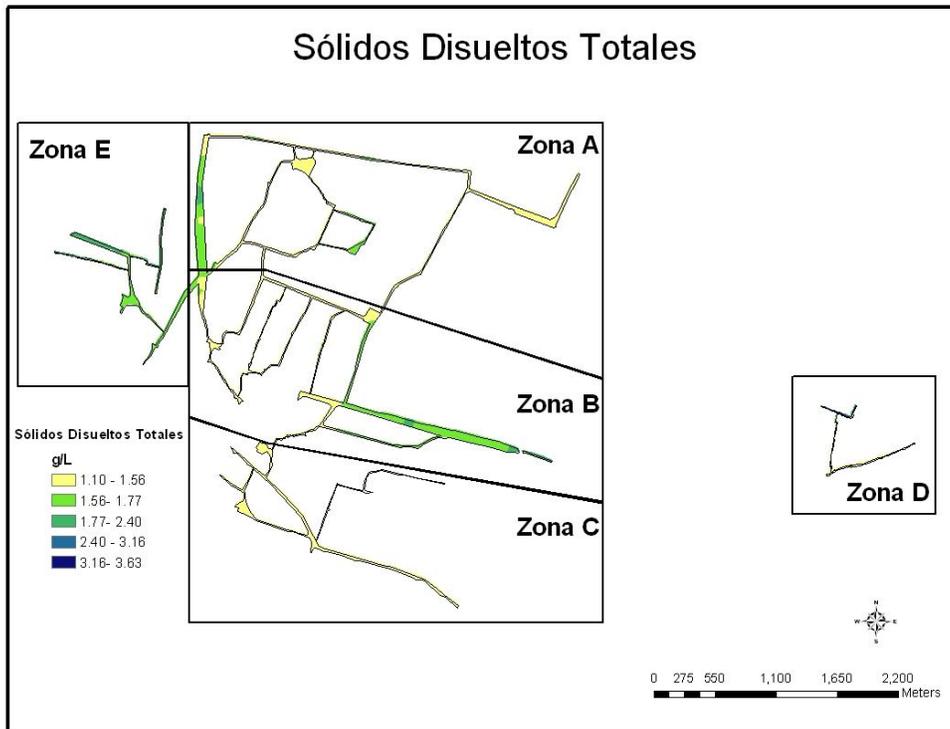
Mapa 2. Interpolación de los valores de temperatura para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.5058.



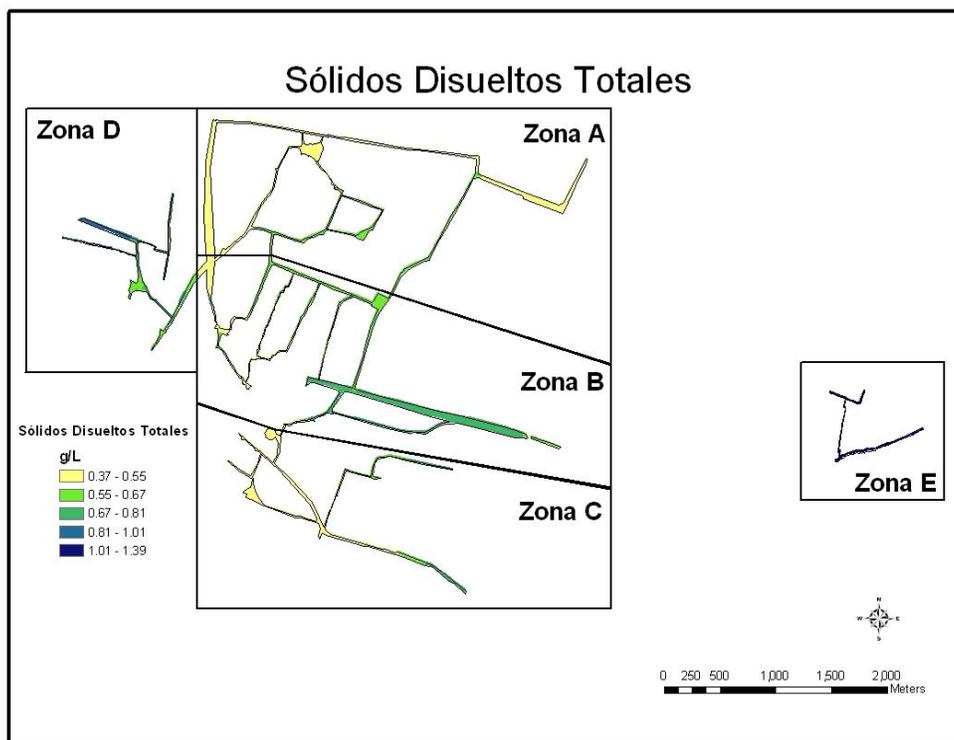
Mapa 3. Interpolación de los valores de conductividad para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.1842.



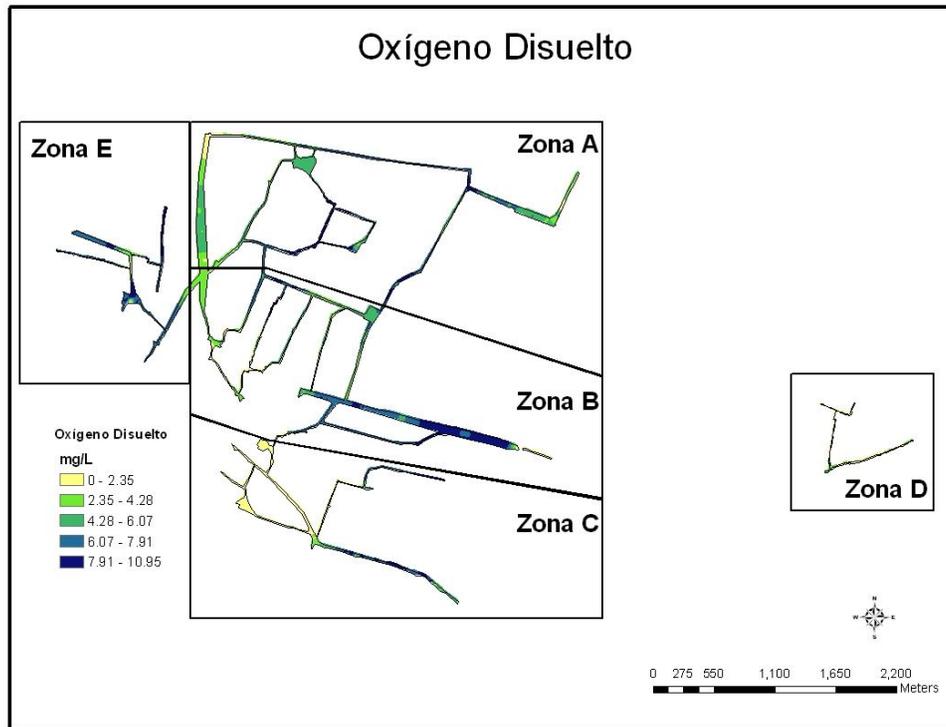
Mapa 4. Interpolación de los valores de conductividad para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.1718.



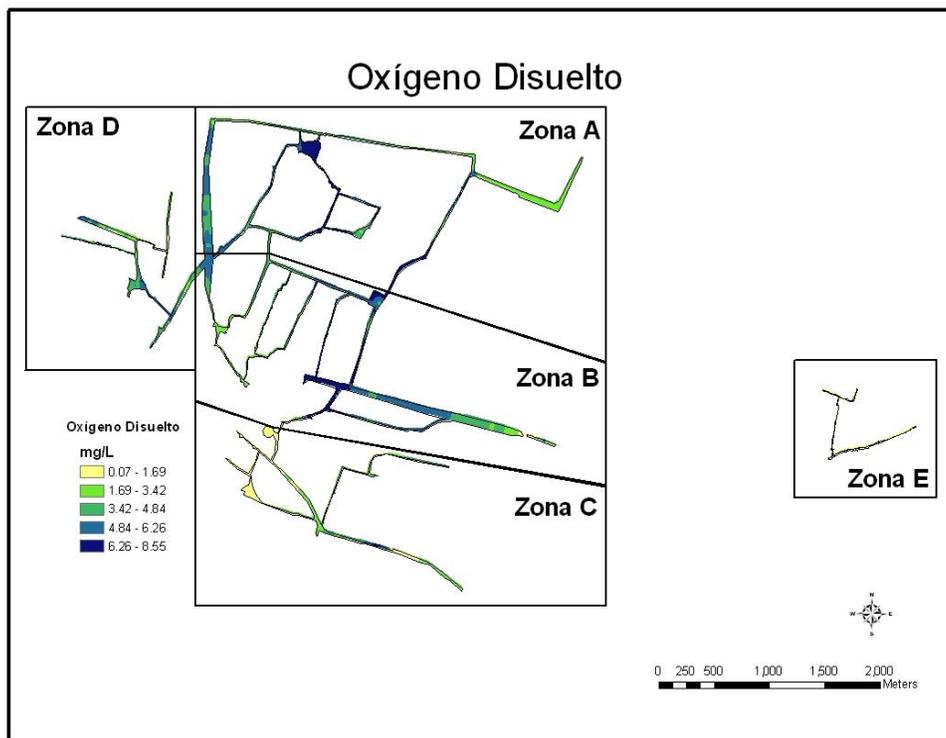
Mapa 5. Interpolación de los valores de sólidos disueltos totales para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.1556.



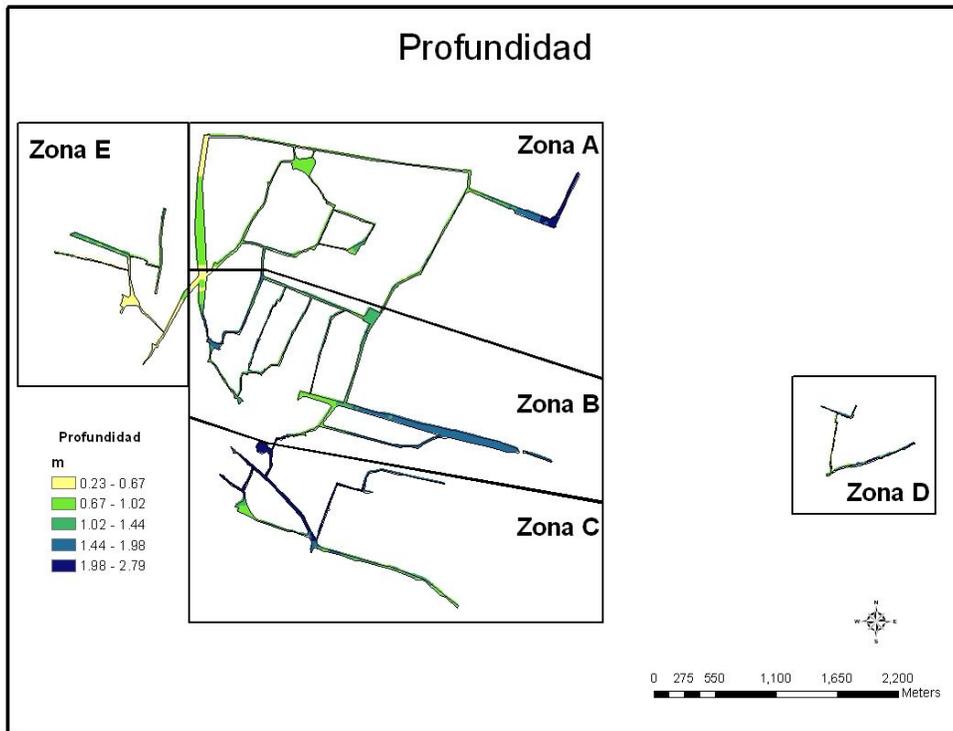
Mapa 6. Interpolación de los valores de sólidos disueltos totales para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.03607.



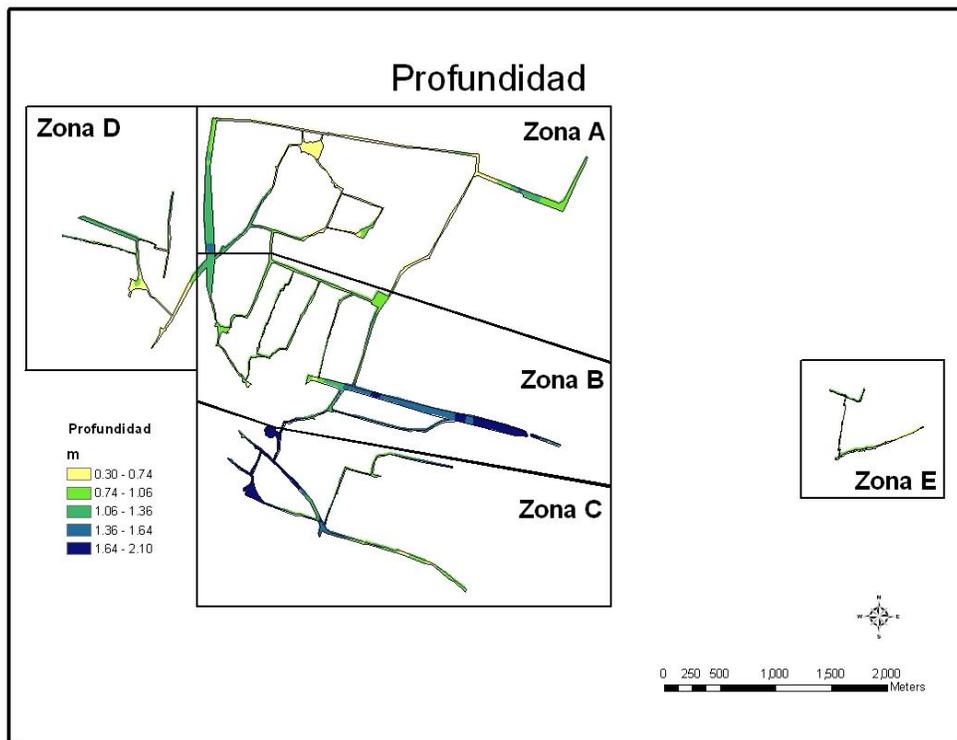
Mapa 7. Interpolación de los valores de oxígeno disuelto para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 1.246.



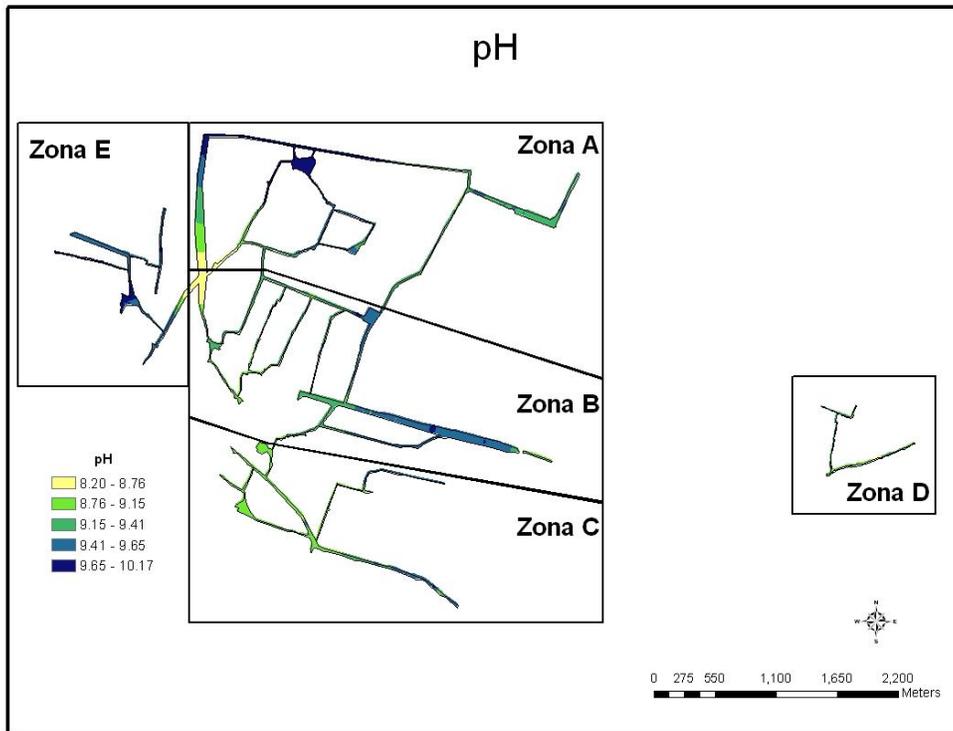
Mapa 8. Interpolación de los valores de oxígeno disuelto para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 1.033.



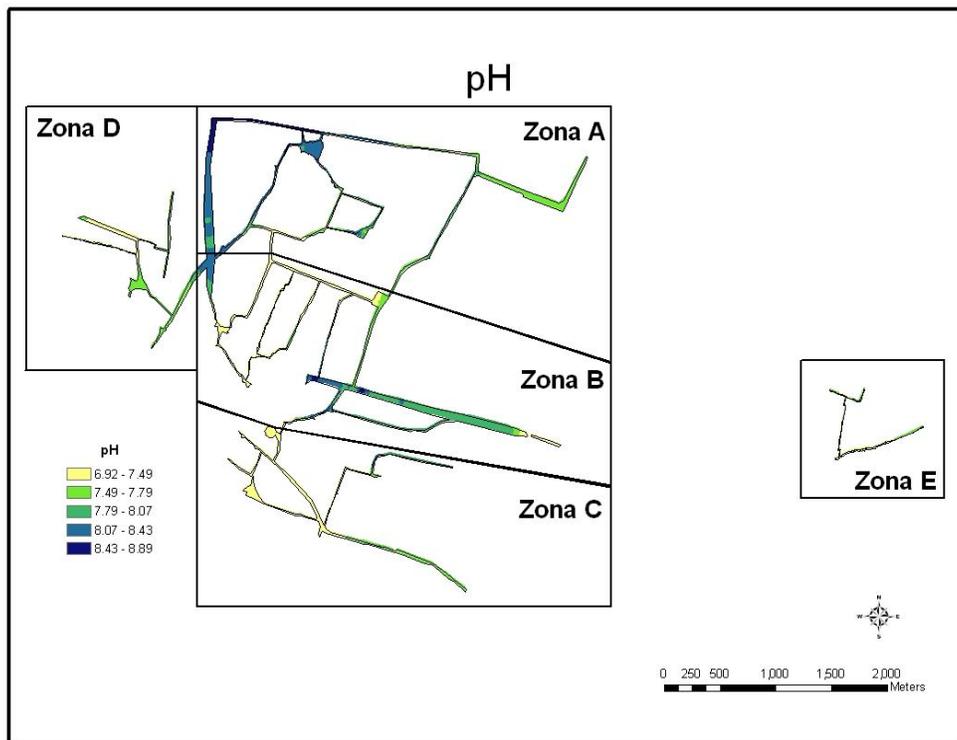
Mapa 9. Interpolación de los valores de profundidad para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.286.



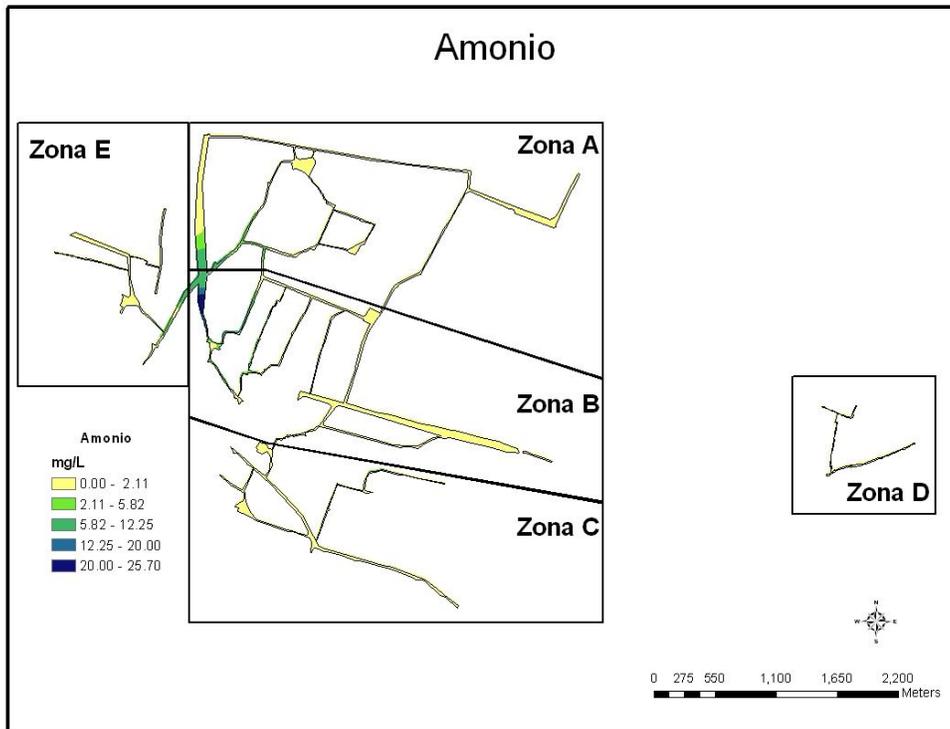
Mapa 10. Interpolación de los valores de profundidad para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.2459.



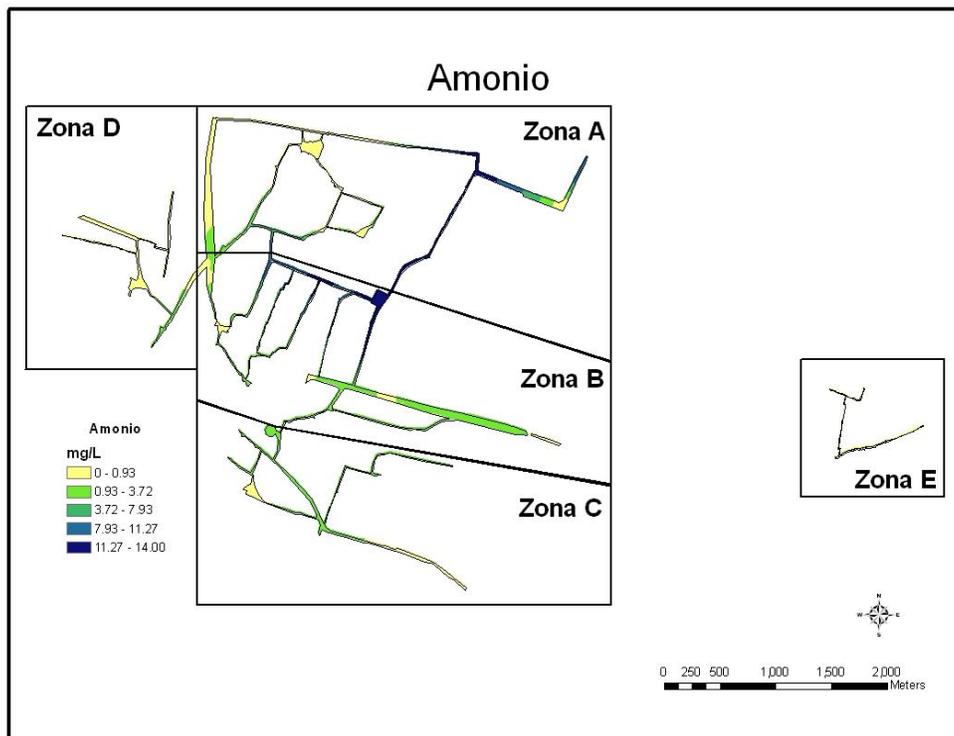
Mapa 11. Interpolación de los valores de pH para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.1186.



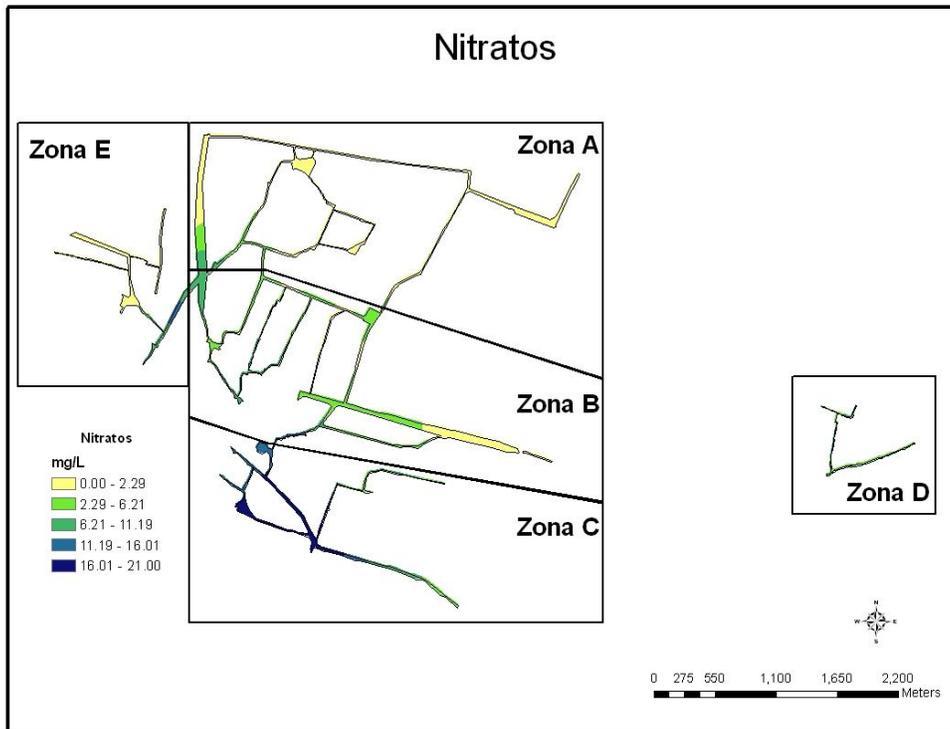
Mapa 12. Interpolación de los valores de pH para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 0.1346.



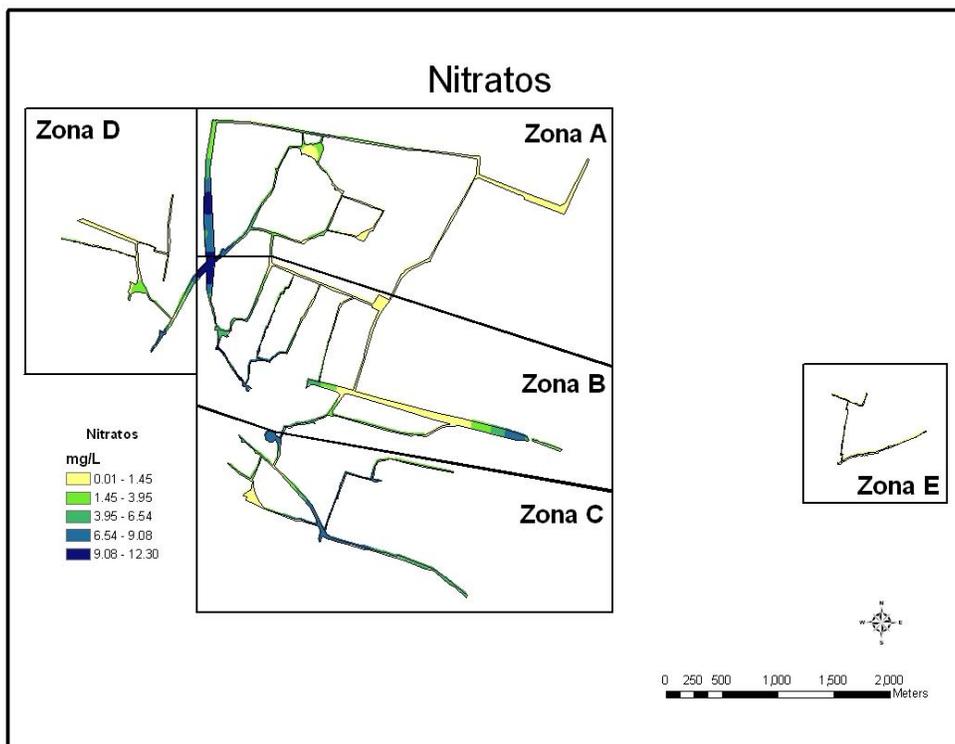
Mapa 13. Interpolación de los valores de amonio para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 1.279.



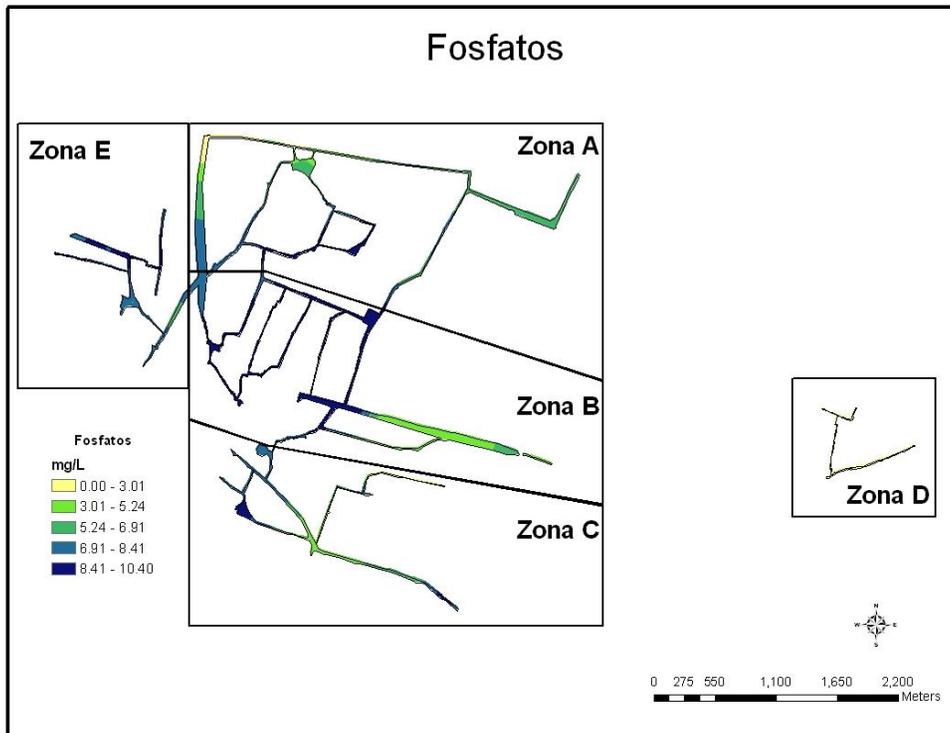
Mapa 14. Interpolación de los valores de amonio para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 2.655.



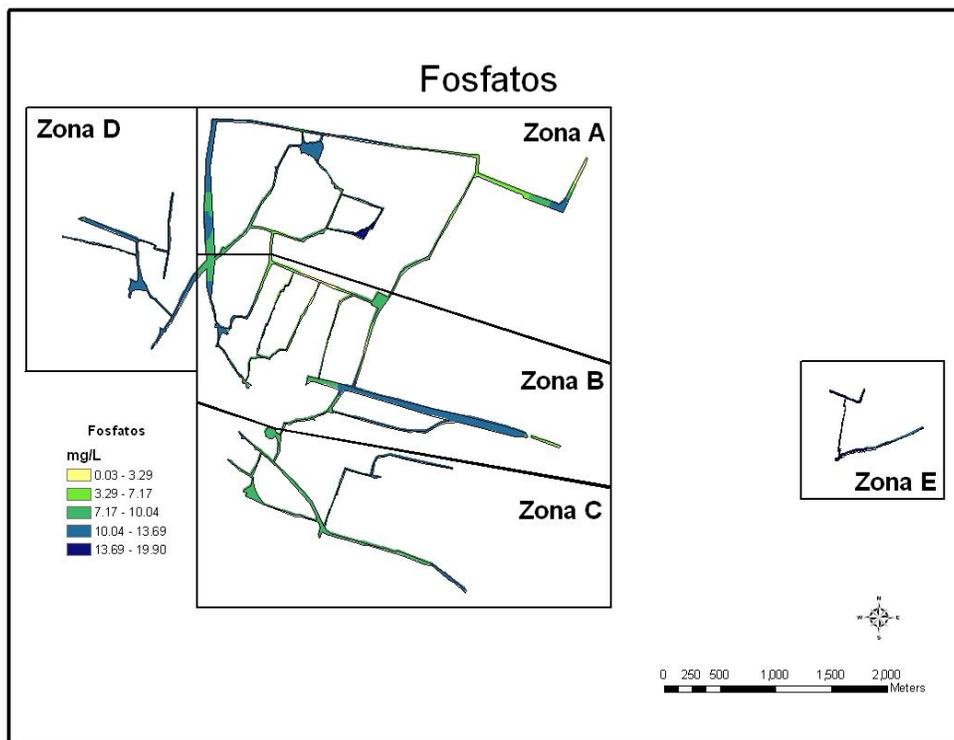
Mapa 15. Interpolación de los valores de nitratos para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 3.729.



Mapa 16. Interpolación de los valores de nitratos para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 3.328.



Mapa 17. Interpolación de los valores de fosfatos para el periodo de secas. El valor del RMPSE del modelo fue de 2.149.



Mapa 18. Interpolación de los valores de fosfatos para el periodo de lluvias. El valor del RMPSE del modelo fue de 2.985.

Anexo 2.

Modelos de distribución potencial para las cuatro especies de peces durante los muestreos de secas y lluvias.

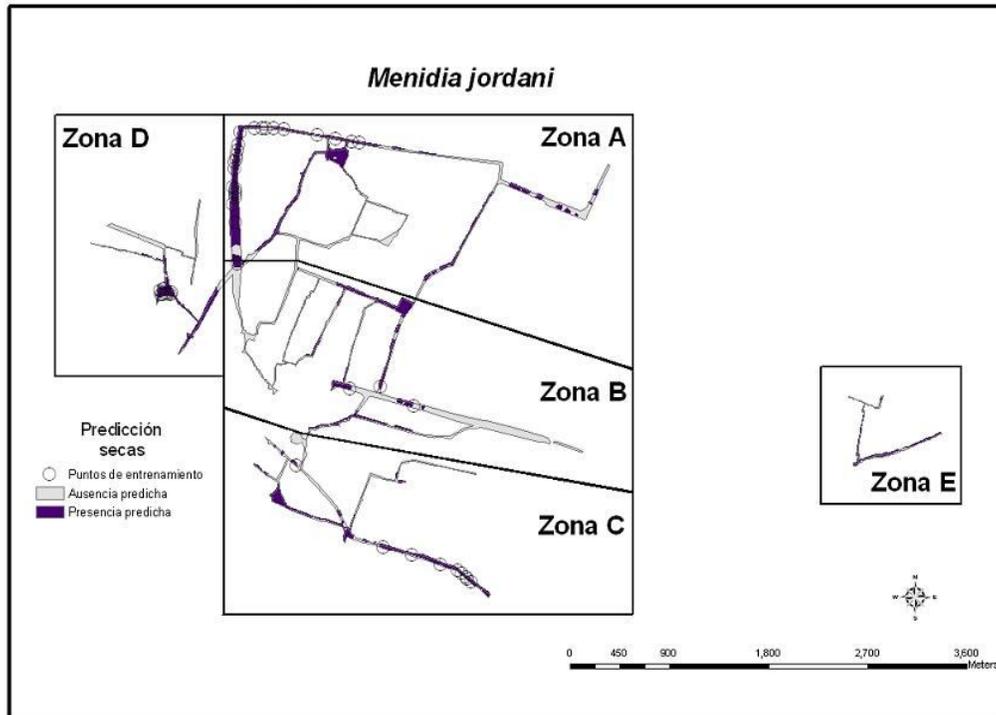


Figura 1. Modelo de distribución potencial para la especie *Menidia jordani* durante el muestreo de secas (p value= 2.206E-4. Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: sólidos disueltos=29.6%; profundidad=17.3%; fosfatos=12.9%.

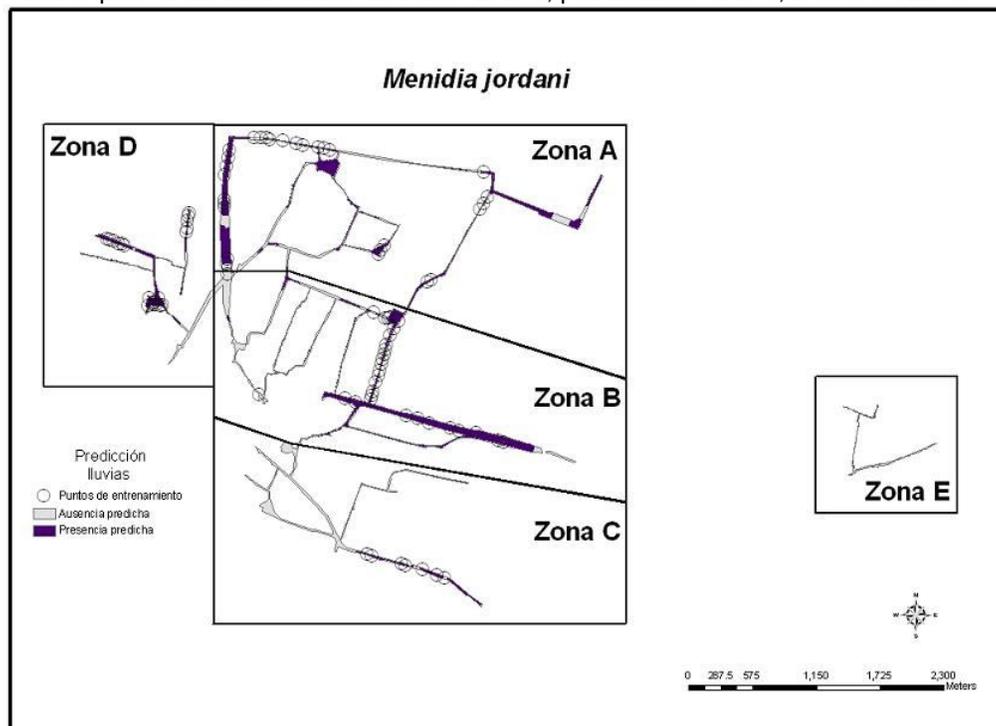


Figura 2. Modelo de distribución potencial para la especie *Menidia jordani* durante el muestreo de lluvias. (p value= 1.608E-1). Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: amonio=32.6%; pH=24.1%; oxígeno=23.8%.

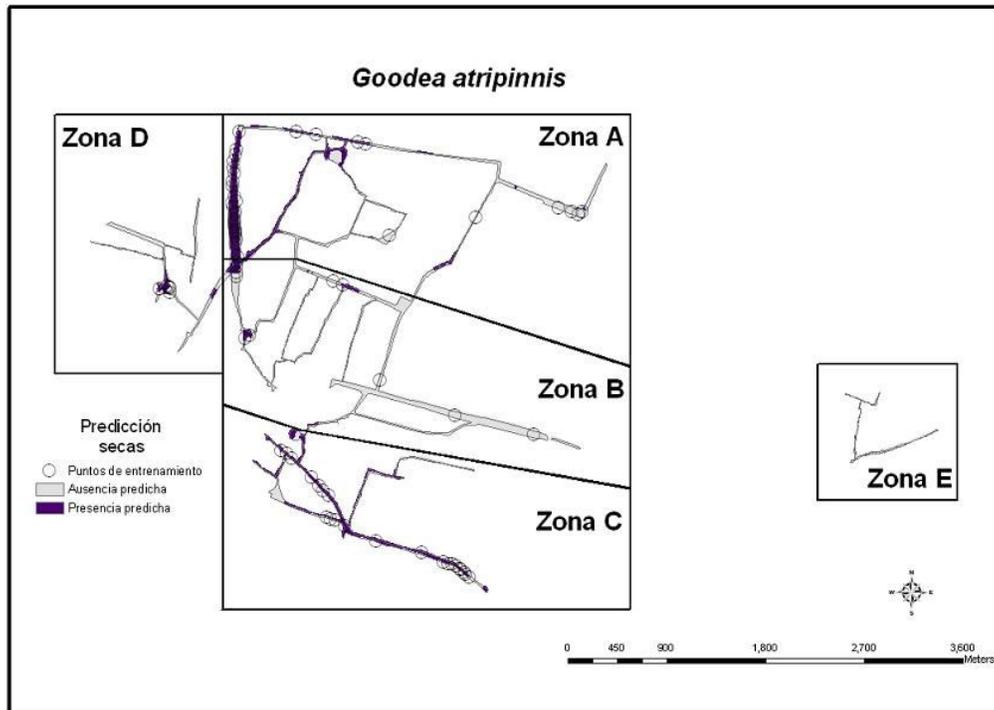


Figura 3. Modelo de distribución potencial para la especie *Goodea atripinnis* durante el muestreo de secas ($p \text{ value}=1.958E-2$). Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: sólidos disueltos=36.9%; temperatura=20.5%; nitratos=11.7%.

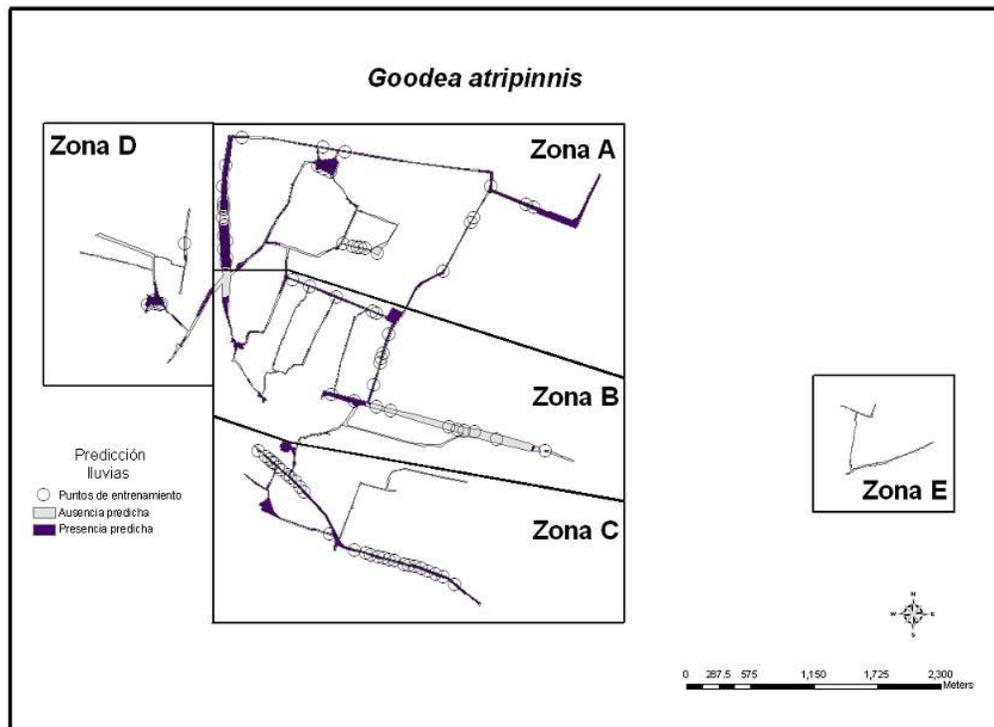


Figura 4. Modelo de distribución potencial para la especie *Goodea atripinnis* durante el muestreo de lluvias ($p \text{ value}=1.02E-1$). Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: sólidos disueltos=24.5%; profundidad=23.1%; oxígeno=13.4%.

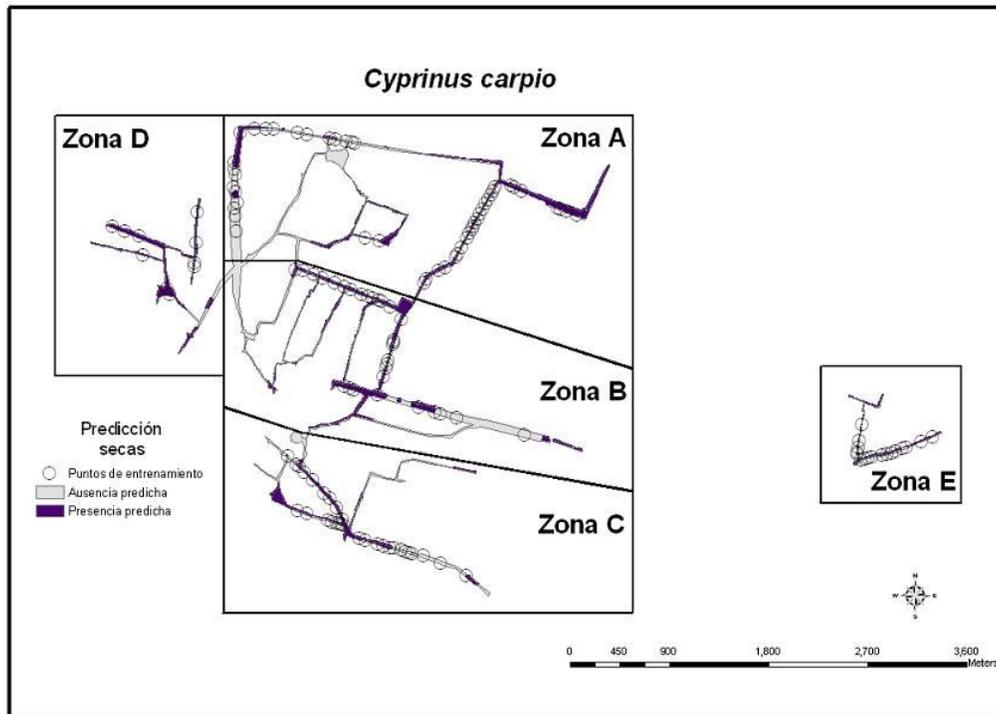


Figura 5. Modelo de distribución potencial para la especie *Cyprinus carpio* durante el muestreo de secas (p value= $5.468E-1$). Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: amono= 39.5%; sólidos disueltos=20.6%; nitratos=10.8%.

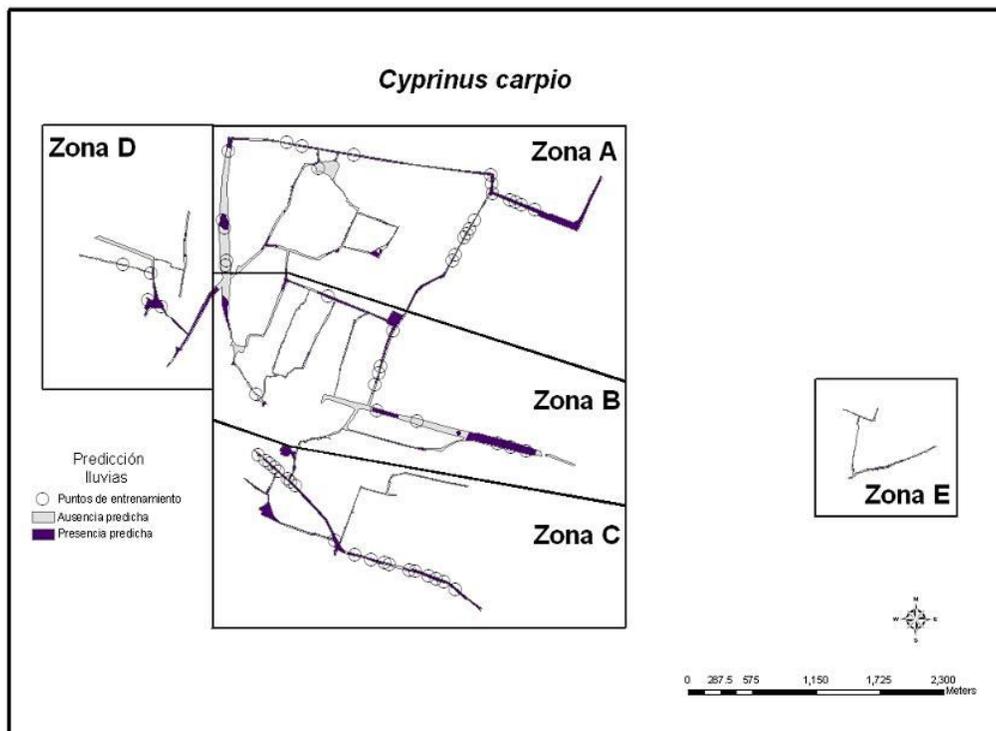


Figura 6. Modelo de distribución potencial para la especie *Cyprinus carpio* durante el muestreo de lluvias. (p value= $1.086E-1$). Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: amono= 26.1%; nitratos=20.9% oxígeno disuelto=18.4%.

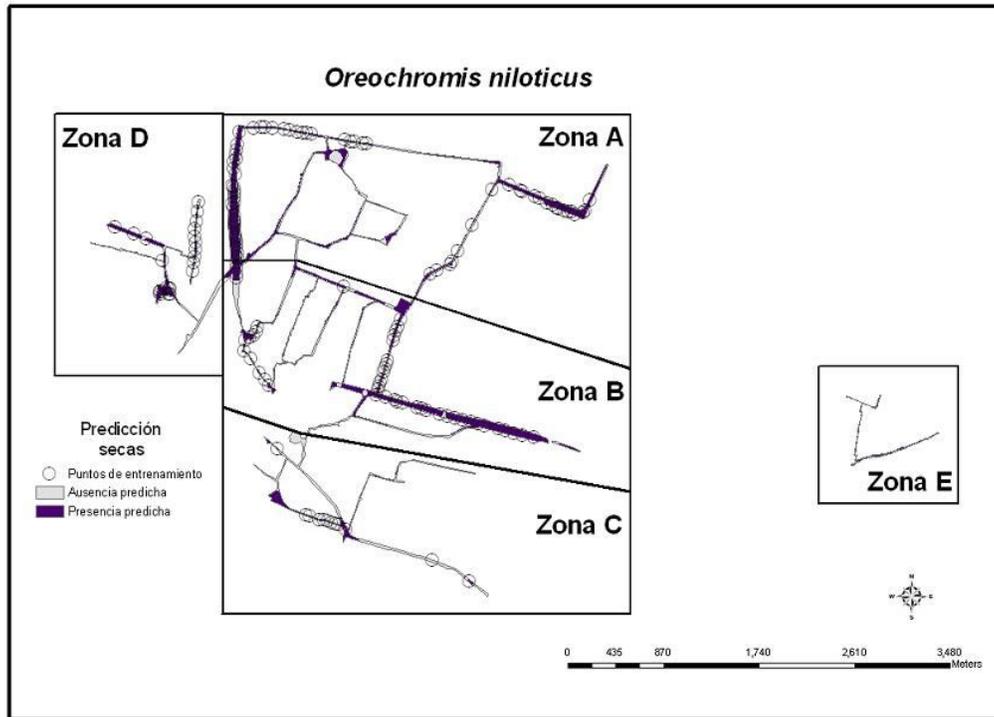


Figura 7. Modelo de distribución potencial para la especie *Oreochromis niloticus* durante el muestreo de secas (p value= $3.046E-3$). Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: amonio=19.8%; sólidos disueltos=17.6%; nitratos=16.9%.

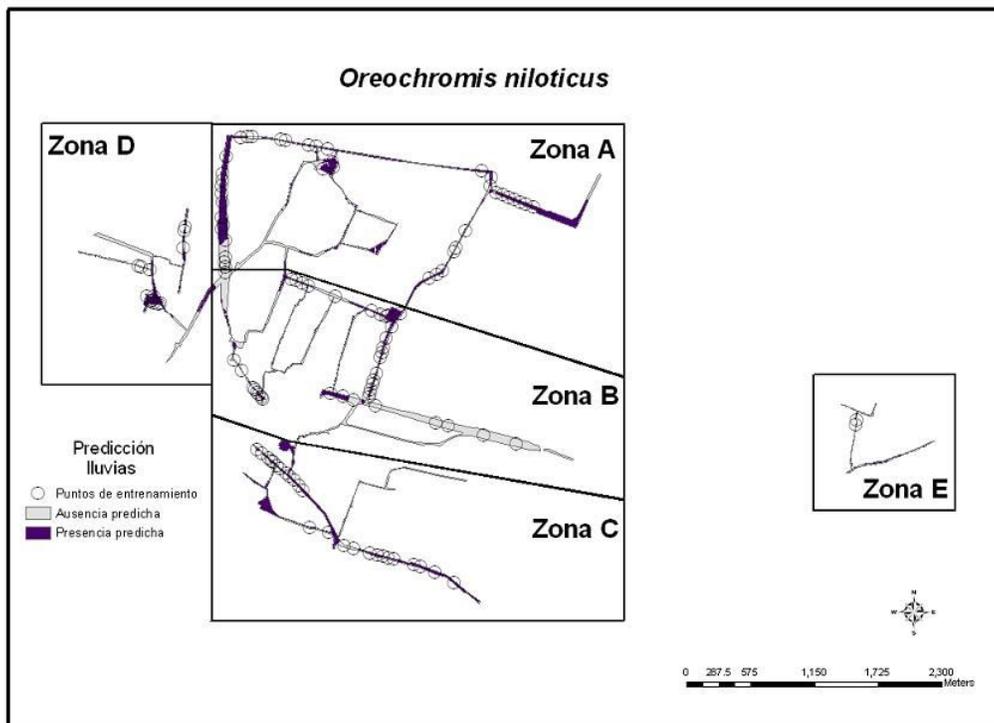


Figura 8. Modelo de distribución potencial para la especie *Oreochromis niloticus* durante el muestreo de lluvias. (p value= $2.194E-2$). Porcentajes de contribución de las variables ambientales más relevantes para el modelo: sólidos disueltos=29%; profundidad=20.2%; amonio=13.5%.