



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE ECOLOGÍA
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

ANÁLISIS INTEGRAL DE UN AGROECOSISTEMA PERIURBANO EN REHABILITACIÓN,
CIUDAD DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

PATRICIA PÉREZ BELMONT

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: Dra. Marisa Mazari Hiriart
Instituto de Ecología

COMITÉ TUTOR: Dr. Luis Zambrano González
Instituto de Biología
Dra. Silke Cram Heydrich
Instituto de Geografía

MÉXICO, D.F. MAYO, 2014



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 el Subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas, en su sesión ordinaria del día 27 de enero de 2014, aprobó el jurado para la presentación de su examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** del Posgrado en Ciencias Biológicas, de la alumna **PÉREZ BELMONT PATRICIA** con número de cuenta: **301697165**, con la tesis titulada **"ANÁLISIS INTEGRAL DE UN AGROECOSISTEMA PERIURBANO EN REHABILITACIÓN, CIUDAD DE MÉXICO"**, bajo la dirección de la **DRA. MARISA MAZARI HIRIART**:

Presidente: DRA. HELENA COTLER ÁVALOS
Vocal: DR. CARLOS DÍAZ ÁVALOS
Secretario: DRA. SILKE CRAM HEYDRICH
Suplente: DRA. ANA CECILIA ESPINOSA GARCÍA
Suplente: DR. LUIS ZAMBRANO GONZÁLEZ

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

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 03 de abril de 2014

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 darme la oportunidad de continuar con mi formación académica al realizar este proyecto.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por brindarme el apoyo económico para poder realizar mis estudios de posgrado.

A la **Beca Packard** por el apoyo económico para obtener los recursos necesarios para la realización de este proyecto.

Al **Gobierno del Distrito Federal** y la **Comisión de Recursos Naturales** de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal quien otorgó el apoyo económico para ejecutar el proyecto.

A los miembros del **Comité Tutor**, la Dra. Marisa Mazari Hiriart del Instituto de Ecología de la UNAM, el Dr. Luis Zambrano González del Instituto de Biología de la UNAM y la Dra. Silke Cram Heydrich del Instituto de Geografía de la UNAM.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi padre de quien heredé las fuerzas, el coraje y las ganas de luchar para sacar adelante todo lo que me he propuesto a pesar de cualquier adversidad. A Cris, mi mejor amiga y compañera. A mi familia.

Agradezco a la gente de Xochimilco y San Gregorio que nos dio todas las facilidades para trabajar y que con gran amabilidad apoyaron en este proyecto aportando con su conocimiento y ayuda.

A, mi tutora Marisa Mazari, gracias por todo el apoyo y la confianza depositada en mí para realizar esta tesis, gracias por las oportunidades para colaborar en otros proyectos y en las actividades del laboratorio que han ayudado en mi formación como profesionista, científica, pero sobre todo como persona.

A todos mis compañeros y amigos del laboratorio de Ecología Química, los que siguen y los que ya no están. Gracias por compartir todo su conocimiento y ayudarme a comprender un tema que era completamente nuevo para mí. A todos aquellos que colaboraron en los muestreos, al procesamiento de las muestras y el análisis de los resultados; la mayoría de los días fueron tan cargados de trabajo que sin ustedes definitivamente no lo hubiera logrado. Gracias también por hacerme pasar ratos tan agradables y llenos de risas en momentos en los que el cansancio hace que casi pierdas la cabeza.

Gracias a los compañeros de otros laboratorios, como el laboratorio de Restauración Ecológica del Instituto de Biología quienes también apoyaron con su experiencia a la realización de la tesis y compartieron conmigo este enorme proyecto y sobre todo los deseos de luchar por la conservación de Xochimilco.

Quisiera también agradecer a mis compañeros de Restauración Ecológica y Desarrollo A.C., principalmente a la Directora Elsa Valiente, quien me dio la oportunidad de continuar trabajando en Xochimilco para así poder aportar conocimiento no solo a la ciencia por ser ciencia, sino directamente a la sociedad para intentar dar salida a la problemática que actualmente se vive en Xochimilco y en la ciudad.

Agradezco también a los miembros del jurado la Dra. Helena Cotler, la Dra. Ana Espinosa, Dra. Silke Cram, Dr. Luis Zambrano y al Dr. Carlos Díaz que colaboraron con sus comentarios e ideas a este trabajo.

Gracias a Gustavo Pérez y Víctor Argáez por su apoyo a resolver mis enormes dudas matemáticas y ayudarme con mi monstruo, la estadística.

A mis amigos, mi segunda familia, gracias por acompañarme en este proceso, por escucharme y por interesarse en este tema que nos atañe a todos los que vivimos en esta ciudad.

Índice

Resumen	1
Abstract	5
Abstract	5
Introducción	8
<i>Las chinampas de Xochimilco como agroecosistema</i>	10
<i>Problemática ambiental</i>	13
<i>Medidas de rehabilitación</i>	16
Objetivos	18
<i>Objetivo general</i>	18
<i>Objetivos particulares</i>	18
Metodología	19
<i>Sitio de estudio</i>	19
<i>Descripción de las chinampas de estudio</i>	21
<i>Métodos de campo</i>	30
<i>Métodos de laboratorio</i>	33
<i>Parámetros fisicoquímicos</i>	33
<i>Análisis bacteriológico</i>	35
<i>Análisis de bacteriófagos</i>	36
<i>Análisis estadístico</i>	38
Resultados y discusión	39

Caracterización de la chinampa Texhuilo, como sitio en rehabilitación	39
<i>Parámetros fisicoquímicos</i>	40
<i>Nutrientes</i>	48
<i>Parámetros microbiológicos</i>	54
<i>Bacterias coliformes fecales y enterococos fecales</i>	54
<i>Bacteriófagos</i>	58
<i>Análisis estadístico de la chinampa Texhuilo</i>	59
Comparación entre los sitios de estudio	63
<i>Parámetros fisicoquímicos</i>	63
<i>Nutrientes</i>	67
<i>Parámetros microbiológicos</i>	69
<i>Bacterias coliformes fecales y enterococos fecales</i>	69
<i>Bacteriófagos</i>	73
<i>Análisis estadístico entre sitios de estudio</i>	74
Análisis de metales	79
Análisis bacteriológico de hortalizas	83
Conclusiones	87
Recomendaciones	89
Literatura citada	91
Anexos	98

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de la producción agrícola de riego y temporal para el año 2012 del Distrito Federal por Delegación (SIAP, 2014).....	12
Tabla 2. Índice CF/EF para los cinco sitios de estudio durante el ciclo anual 2011-2012.....	71
Tabla 3. Matriz de componentes principales para la matriz agua.....	75
Tabla 4. Matriz de componentes principales para la matriz sedimento.....	78

Índice de figuras

Figura 1. Imagen satelital con los cinco sitios de muestreo (Google Earth, 29 dic., 2013).....	22
Figura 2. Imagen satelital con los puntos de muestreo en la chinampa piloto Texhuilo (Google Earth, 29 dic., 2013).....	24
Figura 3. Imagen satelital de la Estación Cuemanco-UNAM y sus puntos de muestreo (Google Earth, 29 dic., 2013).....	26
Figura 4. Imagen satelital de la chinampa Trancatitla de la UNAM y sus puntos de muestreo (Google Earth, 29 dic., 2013).....	27
Figura 5. Imagen satelital de San Gregorio y los puntos de muestreo (Google Earth, 29 dic., 2013).....	28
Figura 6. Imagen satelital del barrio y canal La Santísima con los puntos de muestreo (Google Earth, 29 dic., 2013).....	29
Figura 7. Parámetros fisicoquímicos en agua de tres canales de la chinampa Texhuilo para el ciclo anual 2011-2012.....	43
Figura 8. Valores de DBO ₅ , DQO y porcentaje de CO para agua y sedimento de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.....	47
Figura 9. Fósforo (P) y nitrógeno (N) analizados en la matriz agua y sedimento para tres apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.....	51
Figura 10. Fracciones nitratos (NO ₃ ⁻), nitrógeno amoniacal (N-NH ₃) y ortofosfatos (PO ₄ ⁻³) evaluados en la matriz agua tres apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.....	53
Figura 11. Bacterias CF, EF en agua, suelo y sedimento para la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.....	57
Figura 12. Bacteriófagos en agua de los apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.....	58

Figura 13. Gráficas de interacción de los parámetros en agua de los apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.....	60
Figura 14. Gráficas de interacción de los parámetros en sedimento de los apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.....	61
Figura 15. Parámetros fisicoquímicos en agua de los apantles de las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.....	64
Figura 16. Valores de CO, DBO ₅ y DQO para agua y sedimento en las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.....	66
Figura 17. Fósforo total y nitrógeno total en la matriz agua y sedimento para las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.....	68
Figura 18. Fracciones nitratos (NO ³⁻), nitrógeno amoniacal (N-NH ₃) y (PO ₄ ⁻³) en la matriz agua y sedimento para las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012...	69
Figura 19. Bacterias CF y EF en agua, suelo y sedimento de la cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.....	72
Figura 20. Cantidad de bacteriófagos encontrados en la matriz agua de los cinco sitios de muestreo durante el ciclo anual 2011-2012.....	73
Figura 21. Chinampas de estudio con respecto al componente 1 (a) y componente 2 (b) para la matriz agua.....	75
Figura 22. Chinampas de estudio con respecto al componente 1 (a) y componente 2 (b) para la matriz sedimento.....	77
Figura 23. Metales presentes en las matrices agua, sedimento, suelo y hortalizas colocados de mayor a menor concentración por sitio de muestreo.....	81
Figura 24. EF para cada tipo de hortaliza en los cinco sitios de muestreo durante el ciclo anual 2012.....	86

Resumen

Los ecosistemas del mundo están siendo sobreexplotados y deteriorados debido a la alta demanda de recursos por la población humana y a diversos factores que influyen en el mal manejo de los recursos. Para evitar que el deterioro se incremente es necesario comprender y analizar la problemática ambiental y la dinámica de los ecosistemas con el fin de llevar a cabo un uso más adecuado de los recursos y lograr la transición hacia la sostenibilidad.

Existen sitios con un potencial importante para el desarrollo sostenible de las ciudades y uno de ellos es el agroecosistema de Xochimilco ubicado en la zona periurbana de la ciudad de México, cuyo sistema de producción chinampero tradicional es un ejemplo de sostenibilidad ya que aprovecha los elementos tanto biológicos como físicos en su totalidad y de una manera integral (Wilken, 1995; González-Pozo, 2010). Sin embargo, las chinampas de Xochimilco forman parte de un agroecosistema que actualmente presenta una problemática ambiental, que incluyen contaminación agrícola y urbana, cambios en las prácticas agrícolas y tradicionales y en el uso de suelo; esto contribuye a la pérdida de servicios ecosistémicos y de biodiversidad, así como también representa un riesgo potencial a la salud de los habitantes de la ciudad. Es por ello que grupos de investigación y de la sociedad civil están en la búsqueda de estrategias que ayuden a la rehabilitación de dicho sistema. Estas medidas por lo tanto deben ser evaluadas en cuanto a su efectividad en función de los cambios de variables tanto fisicoquímicas como biológicas del sistema ya que de tener resultados favorables en la recuperación de las funciones del agroecosistema podrían replicarse para tratar de dar solución a los actuales problemas que este agroecosistema presenta.

El presente estudio evalúa la efectividad de acciones de rehabilitación en una chinampa piloto de Xochimilco ubicada en una zona del agroecosistema en donde se llevan a cabo principalmente actividades agrícolas chinamperas. Para el análisis de esta chinampa piloto se consideraron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en las matrices agua, sedimento, suelo y hortalizas. Se comparó a la chinampa piloto nombrada Texhuilo con chinampas de zonas contrastantes del agroecosistema que consisten principalmente en el uso de suelo y en las actividades que se llevan a cabo en ciertas zonas del sitio, algunas de ellas son el turismo, el uso habitacional, la agricultura tecnificada y agricultura tradicional.

Los resultados de los análisis mostraron una heterogeneidad en los canales de la chinampa piloto en la que se consideraron puntos de muestreo que corresponden a apantles (canales internos) con un manejo de rehabilitación y apantles no manejados. Se determinó que esto se puede deber a que los sistemas acuáticos responden de manera tipo umbral y es difícil determinar un cambio en un periodo de tiempo corto; como ocurrió en este caso (ciclo anual 2011-2012).

Para realizar el análisis comparativo en las cinco chinampas estudiadas se optó por la realización de un Análisis de Componentes Principales con la finalidad de reducir el número de variables y así poder explicar de mejor manera el comportamiento de los sitios. Este análisis se aplicó a los datos de agua y sedimento. Las diferencias entre las chinampas estudiadas permiten determinar que la chinampa piloto Texhuilo posee características que corresponden a la zona de agricultura tradicional ya que coincide con otra chinampa de la misma zona; sin embargo el sitio urbano también se comporta de manera similar ya que coinciden en estos sitios valores de parámetros como los nutrientes y la presencia de

microorganismos. Otras chinampas que pertenecen a la zona de transición entre lo agrícola, urbano y turístico también presentan una agrupación determinada por parámetros como la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y el oxígeno disuelto.

En relación a los sedimentos, las variables presentan comportamientos similares entre las chinampas, mostrando una estabilidad y concordancia entre sitios de estudio, que a pesar de tener una tendencia similar, se muestran bajo rangos distintos y cada uno con variación por temporada de muestreo. Los sedimentos además presentaron concentraciones de al menos cinco órdenes de magnitud mayores que en el agua de algunos parámetros como nutrientes y microorganismos, de ello se supone que el sedimento además de ser un componente estable en todo el agroecosistema, funciona como reservorio de estos elementos.

Las hortalizas analizadas presentan microorganismos en la superficie de las hojas como coliformes fecales y enterococos fecales. Los datos no muestran diferencias claras entre el tipo de manejo o uso de suelo de la chinampa con el tipo de hortaliza. Se infiere que la presencia de estos microorganismos se deba al proceso de riego por encima de los cultivos con agua de los canales, su detección puede estar influenciada por el tiempo de riego previo a la toma de muestra, al tiempo de exposición de los microorganismos a condiciones de radiación, la misma calidad del agua con la que han sido regadas, entre otros.

Es necesario enfocar proyectos y propuestas de recuperación de la chinampería tradicional ya que de ello depende principalmente que las condiciones del sistema cambien con una tendencia positiva, mejorando no sólo las condiciones ambientales, sino también la calidad de vida de los habitantes de Xochimilco y por lo tanto de los habitantes de la ciudad de México. Estas medidas deben plantearse considerando a todos los componentes del sistema

y deben hacerse de manera específica para cada sitio debido a que la heterogeneidad del agroecosistema no sólo delimita áreas extensas, sino que está presente a escala de una chinampa.

Abstract

The world's ecosystems have been overexploited and degraded due to human activities, the increased demand of natural resources and a poor management of ecosystems. To prevent the increases deterioration, is necessary to understand and analyze environmental problems and ecosystem dynamics in order to promote the sustainability.

There are important sites with a potential for the sustainable development of cities. In Mexico City the agroecosystem of Xochimilco has that potential because the traditional agriculture system called chinampas uses all of the biological and physical elements of the wetland being an example of sustainable agriculture (Wilken, 1995; González-Pozo, 2010). However, Xochimilco has important environmental problems that include agriculture and urban pollution, changes in the traditional agricultural practices and land use; this contributes to the losses of ecosystem services, loss of the biodiversity, potential health risk to the human population, etc. Research groups from different academic institutes and civil society, have been looking and applying strategies to improve the environmental conditions and rehabilitate the system. These strategies and actions should be evaluated to know their effectiveness in terms of changes in physicochemical and biological conditions of the system because if this methods result positive can be replicated in more sites of the agroecosystem.

This study evaluates the effectiveness of rehabilitation actions in a pilot chinampa in Xochimilco located in an area with mostly agricultural activities. The pilot chinampa Texhuilo was compared with another four chinampas located in contrasting areas of the agroecosystem, to choose them was considered the land use and the activities in the area

such as tourism, technically agriculture, traditional agriculture and residential or urban. The parameters considered in the study were physicochemical and microbiological, and were measured in water and sediment of the channels between the chinampa and in soil and vegetables cultivated in the chinampa in an annual cycle (2011-2012).

The data shows that there is heterogeneity in the water and sediment parameters within the channels in the pilot chinampa and in the four seasons, every channel have different management, one of them has rehabilitation actions and the other two don't. The results probably are due to the dynamics of aquatic systems; they tend to respond in a threshold, is difficult to determine a change in a short period of time, in this case an annual cycle (2011-2014).

To compare the five chinampas with contrasting characteristics it was made an analysis of principal components for water and sediment variables. We observed three groups based on different values of some parameters. The results indicate that the pilot chinampa is related more to other chinampa with traditional agriculture and both present parameters with high values of nutrients and microbiological parameters like fecal coliforms and enterococci, indicating organic pollution. The results also determine similar characteristics in other two chinampas, one of them has activities of technical agriculture and the other was immersed in a transition zone of agriculture, urban and tourism. This last group is similar in some parameters like electric conductivity, dissolved oxygen and total dissolved solids, these parameters present also higher values than in the first group. The sediments characteristics has less variability between the chinampas but the high values of nutrients, heavy metals and organic matter measure as organic carbon indicate an accumulation in the sediments that

needs to be consider in rehabilitation programs to prevent the resuspension in the water column.

There are also presence of microorganisms such as fecal coliforms and enterococci in the vegetables. There are not clear differences between the kind of vegetable or the type of management in the cultures of the five evaluated chinampas, we infer that the presence of microorganisms in vegetables are due to the irrigation process that is made over the vegetables with channel water.

Is necessary to focus projects and strategies to recover the traditional agriculture of chinampería, this represent changes in the system conditions in a positive way, not only improving environmental conditions, but also gives a better quality of life to the citizens of Mexico city and Xochimilco habitants. The strategies most consider all the components of the agroecosystem and the heterogeneity that is present not only in a big scale but in a small area such as a chinampa.

Introducción

En las últimas décadas, la economía y el desarrollo de las naciones ha demandado una enorme cantidad de recursos naturales que se pierden a tasas aceleradas, lo cual, junto con la enorme cantidad de desechos contaminantes derivados de las actividades humanas, ha impactado de manera considerable a los ecosistemas, modificando la dinámica y los procesos que ocurren en ellos (Vitousek *et al.*, 1997). Mundialmente ha habido una serie de debates en torno a la problemática o crisis ambiental y gracias a ello han surgido posturas que van desde las más conservacionistas que consideran medidas como el “crecimiento cero” para salvaguardar los recursos naturales, hasta las tendencias moderadoras que consideran que el crecimiento económico va de la mano con el ambiente, siendo esta misma relación la que puede ayudar a resolver la problemática ambiental bajo la cual está expuesta la humanidad (Velázquez, 2012). Una de las tendencias en la política a nivel internacional para enfrentar la crisis ambiental es la de implementar un esquema de desarrollo integral que busque satisfacer las necesidades humanas tanto de las generaciones actuales como de las futuras, tomando en cuenta aspectos sociales, económicos y ambientales, a ello se le conoce como “desarrollo sostenible” (NU, 2005; WCED, 1987). Uno de los retos del desarrollo sostenible lo constituyen las diversas dimensiones bajo las cuales debe accionar, entre ellas la cultural, social, económica y ecológica, lo cual requiere de acciones conjuntas desde diversas disciplinas (Sarandón, 2002).

Dado que todos los ecosistemas en el mundo están siendo aprovechados por el hombre, la forma de estudiar y comprender la problemática ambiental para dirigir el desarrollo hacia la sostenibilidad, es mediante una visión socio-ecológica de los sistemas (Castillo *et al.* 2005;

Collins *et al.*, 2010). De esta manera se entiende al ambiente como un socioecosistema, a partir del cual el hombre recibe beneficios conocidos como servicios ecosistémicos, que de acuerdo con el *Millennium Ecosystem Assessment* (2005) son servicios de provisión (como alimento y agua), regulación (del clima, control de inundaciones y sequías, etc.), soporte (ayudan a la formación de suelos y ciclo de nutrientes) y culturales (recreativos, espirituales y de paisaje).

Los servicios ecosistémicos por lo tanto, proporcionan bienestar al ser humano, siendo uno de los principales pilares la salud y la seguridad alimentaria. El incremento en la población mundial demanda una enorme cantidad de alimentos, para lo cual se requieren de grandes extensiones de suelo dedicado al cultivo que modifica el paisaje natural y la vegetación original (WCED, 1987; Bradshaw, 2002; MEA, 2005).

La producción agrícola es por lo tanto un punto clave para el desarrollo sostenible, en este sentido, los sistemas agrícolas pueden ser considerados como ecosistemas transformados, en los que coexisten procesos biológicos y humanos que determinan las características de los mismos, por lo que se les puede llamar agroecosistemas (Conway, 1987; Soriano y Aguilar, 1998).

Las chinampas de Xochimilco como agroecosistema

Las chinampas de Xochimilco, ubicadas en las reminiscencias del sistema lacustre de la cuenca de México, al sur de la ciudad de México pueden considerarse como agroecosistemas ya que en ellas se conjuntan actividades productivas y por lo tanto económicas y sociales, que forman parte de la cultura mexicana desde tiempos prehispánicos.

Este agroecosistema está formado por chinampas cuyo nombre en náhuatl es *chinamitl* que significa seto o cerca de cañas. Las chinampas son terrenos de cultivo artificiales formados por sedimentos del fondo del lago de tal manera que emergen a manera de islote con una altura aproximada de 50 cm sobre el espejo del agua. Los terrenos son rectangulares y angostos de manera que quedan inmersos en una red de canales que permite la irrigación natural al interior generando un suelo fértil ideal para uso agrícola (Coe, 1964; Rojas, 1995). Este sistema ha convertido a las chinampas en uno de los agroecosistemas más productivos debido al máximo aprovechamiento de los recursos. Cada chinampa puede considerarse como un subsistema del sistema lacustre o sistema chinampero, así como también lo son los canales que forman el subsistema acuático (Bojórquez y Villa, 1995).

El sistema de producción chinampero tradicional es un ejemplo de sostenibilidad ya que aprovecha los elementos biológicos y físicos en su totalidad y de manera integral (Wilken, 1995; González-Pozo, 2010). El sistema posee una etapa de siembra en semilleros o *almácigos* que constan de camas de agua-lodo del fondo de los canales, segmentadas en cubos en los que una vez seco el sedimento se colocan las semillas para el cultivo en los llamados *chapines*, los almácigos se ubican a la orilla de la chinampa, permitiendo que el

resto del terreno sea cultivado por las plantas previamente germinadas en los chapines, maximizando los tiempos de siembra, de cultivo y de cosecha (Coe, 1964; Rojas, 1995; González-Pozo, 2010). El resto de los elementos del agroecosistema se aprovechan en beneficio de los cultivos. El agua de los canales o *apantles* que rodean a la chinampa le da al suelo la humedad necesaria para los cultivos; el suelo y los sedimentos de los cuales se construye la chinampa poseen una enorme cantidad de materia orgánica y nutrientes que fertilizan de manera natural los cultivos. La vegetación nativa incluye al ahuejote (*Salix bonplandiana*) que se siembra en los bordes de la chinampa proporcionando estabilidad al terreno y protección a los cultivos (González-Pozo, 2010). Las técnicas utilizadas en la producción chinampera no requieren de maquinaria especializadas, son usadas herramientas sencillas que no impactan negativamente al agroecosistema.

Estas características hacen del sistema chinampero un medio de cultivo intensivo altamente productivo y sostenible, convirtiéndolo en una de la zonas agrícolas más importantes económicamente para la cuenca de México (Rojas, 1995). Para el cierre del año 2012, la Delegación Xochimilco tuvo el cuarto lugar de superficie sembrada del Distrito Federal con 1,663 ha (SIAP, 2014). Se carece de información estadística confiable sobre la superficie cultivada con el sistema chinampero tradicional, algunos reportes mencionan que el cultivo chinampero abarca entre 650 y 1,000 ha (López *et al.*, 2006; Merlín, 2009). La ganancia de la producción en Xochimilco para el 2012 fue de aproximadamente \$220 millones, que representó el 18.36% del valor de la producción agrícola total para el D.F. (Tabla 1), ocupando el segundo lugar después de Milpa Alta con el 58.04% (SIAP, 2014).

En las chinampas de Xochimilco existen al menos tres ciclos de cultivo agrícola al año; los principales cultivos son el maíz, las hortalizas (rábano, espinaca, acelga, verdolaga, lechuga, epazote, calabaza, quelites) y las flores de ornato (nochebuena, cempaxúchitl, alhelí, belén, begonia, entre otras). Actualmente existe también una problemática agrícola en el agroecosistema de Xochimilco debido principalmente a factores como el abandono de tierras, cambio de uso de suelo, uso de técnicas modernas y pérdida de las técnicas agrícolas tradicionales, invasión de la mancha urbana, ausencia de títulos formales de propiedad, entre otros (López *et al.*, 2006).

Tabla 1. Resumen de la producción agrícola de riego y temporal para el año 2012 del Distrito Federal por Delegación (SIAP, 2014).

Delegación	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Valor producción (miles de pesos)
Álvaro Obregón	120.26	104.76	2,017.80
Cuajimalpa de Morelos	105.04	105.04	2,782.57
Magdalena Contreras	414.15	405.80	6,534.97
Milpa Alta	8,053.08	8,046.08	694,649.12
Tlahuac	2,845.62	2,829.37	99,621.34
Tlalpan	6,139.10	6,064.90	171,522.04
Xochimilco	1,663.00	1,613.60	219,693.90

Problemática ambiental

Históricamente, el sistema lacustre de la cuenca de México ha tenido una importante influencia humana que ha transformado por completo el ambiente, creando un medio que actualmente conjunta lo natural con lo artificial y lo rural con lo urbano.

El valor ecológico y cultural de las chinampas de Xochimilco ha sido reconocido de manera internacional, algunos nombramientos que ha adquirido son los de Humedal de Importancia Internacional, otorgado en 1971 por la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (Listado RAMSAR, 1971) y el reconocimiento como Patrimonio Natural y Cultural de la Humanidad, por la Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en 1987. A nivel nacional en 1989 se estableció como parte del Plan Nacional de Desarrollo el *Rescate Ecológico y Económico de Xochimilco*; en 1992, por decreto presidencial se estableció como Área Natural Protegida (ANP), y se estableció bajo la categoría de Zona Sujeta a Conservación Ecológica denominada “*Ejididos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco*”, con una superficie de 2,600 ha (DOF, 1992). El deterioro que actualmente sufre este agroecosistema se debe principalmente al incumplimiento de los lineamientos de las distinciones y de los planes de manejo antes mencionados; además de la sobrexplotación de los recursos, principalmente de carácter hídrico, el crecimiento de la mancha urbana y la invasión por asentamientos humanos irregulares en el ANP, la pérdida de la agricultura tradicional y la aplicación de técnicas agrícolas que incluyen el uso de maquinaria pesada y agroquímicos, el abandono de la tierra y la transformación del uso de suelo en las chinampas, el turismo, la contaminación de los suelos y el agua, el deficiente manejo y aplicación tanto de normas como de políticas

públicas, entre otros (Bojórquez y Villa, 1995; Valiente *et al.*, 2010). El recurso hídrico del agroecosistema de Xochimilco ha sido explotado para abastecer a los habitantes de la ciudad de México. Existen 425 pozos en operación por parte de la autoridad local del D.F., de los cuales 77 se encuentran dentro de los límites de las Delegaciones Xochimilco y Tláhuac, su profundidad promedio es entre 200 y 400 m, suministran entre 15 y 60 m³/s de agua a las delegaciones de Xochimilco, Tláhuac, Iztapalapa, Benito Juárez, Coyoacán, Tlalpan, Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc (Aguilar *et al.*, 2006; GDF, 2007). La extracción de agua a través de pozos ha generado hundimientos en las zonas donde predominan suelos arcillosos, que además son favorecidos por el peso de la urbanización, lo cual ha también tenido como consecuencia problemas de inundación en las zonas bajas (GDF, 2007; BM, 2013). Debido a la sobreexplotación de los recursos y las bajas tasas en la recarga de los acuíferos, el sistema recibe suministros de agua residual tratada provenientes de las plantas de tratamiento San Luis Tlaxialtemalco, la planta San Lorenzo y la planta del Cerro de la Estrella que aporta la mayor cantidad (Bojórquez y Villa, 1995; Aguilar *et al.*, 2006). El aporte total de agua tratada es de 2,579,040 m³/mes (0.995 m³/s) durante la temporada de estiaje y 2,283,552 m³/mes (0.881 m³/s) durante la temporada de lluvias (Aguilar *et al.*, 2006).

El ANP forma parte del Suelo de Conservación del D.F.; sin embargo, se reporta para la Delegación Xochimilco un total de 314 Asentamientos Humanos Irregulares (AHI) que abarcan un total de 626 ha (GDF, 2012), estos AHI carecen de drenaje por lo que el agua residual doméstica se descarga en los canales, contribuyendo así con la contaminación tanto del agua superficial como de los suelos (Bojórquez y Villa, 1995) y en menor grado del agua subterránea (Espinosa-García *et al.*, 2008).

Los contaminantes que se han reportado en el agroecosistema son detergentes, metales pesados, plaguicidas, desechos industriales, microorganismos patógenos como bacterias y virus (principalmente de origen fecal humano y de animales domésticos), desechos sólidos y materia orgánica; su presencia principalmente afecta procesos ecológicos que ocurren en el agroecosistema, contribuyendo a la pérdida de la biodiversidad, procesos de eutrofización, afectaciones a la salud humana por la presencia de microorganismos patógenos, metales pesados y los efectos de disruptores endócrinos (Solís, 2006; Aguilar, 2007; Espinosa-García *et al.*, 2008; Mazari-Hiriart *et al.*, 2008; Sandoval, 2008; Contreras *et al.*, 2009; Espinosa-García *et al.*, 2009; Zambrano *et al.*, 2009; Chávez-López *et al.*, 2011; Díaz-Torres *et al.*, 2013). Se cuenta con escasos registros acerca de la contaminación en sedimentos y cultivos, lo cual es de suma importancia debido a las implicaciones que esto tiene en la salud de quienes consumen los productos agrícolas y quienes los cultivan ya que se ha encontrado la presencia de bacterias de origen fecal en los cultivos irrigados con aguas de los canales de las chinampas de Xochimilco (Rosas *et al.*, 1984).

Estos estudios se han enfocado en la caracterización de los componentes del sistema lacustre como el suelo, los sedimentos, cultivos y principalmente el agua, aunque de manera aislada; se ha estudiado poco la problemática del agroecosistema desde una perspectiva integral. Ya que todos los componentes del sistema están relacionados, es necesario comprender cómo ocurren las interacciones y los procesos entre ellos para poder tener una visión mucho más amplia y así poder proponer medidas efectivas para la recuperación de sus funciones y que sea sostenible.

Medidas de rehabilitación

Debido a la problemática ambiental, el potencial que tiene el agroecosistema de Xochimilco como un medio de producción sostenible se está perdiendo, a pesar del reconocimiento que se le ha dado. Es por ello que es necesaria la implementación de estrategias con acciones concretas que permitan la recuperación de este potencial, de manera que se mantengan también las actividades socioeconómicas y culturales.

Una estrategia para lograr la recuperación de un ecosistema es la restauración ecológica que se define como el proceso de ayudar el restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido; para ello se busca regresar a un estado original del ecosistema con base en sus atributos que son la estructura y función (Bradshaw, 2002). Conforme el grado de degradación de un ecosistema aumenta, la restauración se hace más difícil (Lindig-Cisneros *et al.*, 2003). Esta situación ocurre en Xochimilco, por lo que resultaría imposible regresar al ecosistema original ya que se trata de un sistema inmerso en una megaciudad de más de 10 millones de habitantes. Bajo dichas circunstancias la *rehabilitación* (derivada de la restauración) funciona como una estrategia adecuada, ya que se trata de la reparación de las funciones, procesos, productividad y servicios que ofrece un ecosistema, para mejorar la salud e integridad del mismo, buscando una condición óptima (SER, 2004). Como parte de dichas acciones puede considerarse el aprovechamiento de los recursos ya que puede utilizarse también como herramienta para la rehabilitación (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007).

La información generada sobre la salud e integridad del agroecosistema así como de cada subsistema de chinampas ha servido para la generación de propuestas para su rehabilitación (Valiente *et al.*, 2010; Zambrano *et al.*, 2009). Sin embargo, para que los proyectos tengan consecuencias positivas, es necesario tener un enfoque integral en el que se monitoreen y evalúen las características físicas, químicas y biológicas mediante el uso de indicadores tanto a nivel espacial como temporal, de esta manera sería posible determinar la efectividad de dichas acciones de rehabilitación, que de tener resultados favorables, podrían ser aplicables a mayor escala (Labadz *et al.*, 2002; Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007).

El agroecosistema de Xochimilco se encuentra bajo una condición de deterioro ambiental y es por ello que se han realizado esfuerzos de rehabilitación a pequeña escala en una chinampa como modelo o piloto para tratar de mejorar las condiciones del sistema. Estas condiciones deben ser monitoreadas y evaluadas para así poder identificar los cambios en sus características biológicas y fisicoquímicas en una escala de tiempo y espacio. Dicha caracterización es importante que se realice tanto en la chinampa en la que se ha efectuado el manejo con fines de rehabilitación, como en otros sitios del agroecosistema que tengan condiciones de manejo distintas para así poder tener valores de referencia y una evaluación realista, además de poder identificar si el manejo enfocado a la rehabilitación puede replicarse a otras chinampas. Esto requiere de un tiempo de observación dado que se trata de la restitución de las funciones y procesos que se llevan a cabo en una chinampa de manera natural.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la efectividad de acciones de rehabilitación en chinampas de Xochimilco, con base en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en agua, sedimento, suelo y hortalizas.

Objetivos particulares

Caracterizar una chinampa piloto en rehabilitación con base en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en las matrices agua, sedimento, suelo y hortalizas durante un ciclo anual.

Determinar la relación entre una chinampa piloto en rehabilitación y cuatro chinampas que poseen características contrastantes en función del uso del suelo, con base en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en cuatro matrices.

Evaluar la presencia de metales pesados en agua, suelo, sedimento y hortalizas cinco chinampas con características contrastantes.

Detectar la presencia de microorganismos en hortalizas pertenecientes a cinco chinampas que poseen características contrastantes.

Metodología

Sitio de estudio

El agroecosistema de Xochimilco se encuentra en la cuenca de México al sur de la ciudad de México en la Delegación Xochimilco. La cuenca de México originalmente fue de tipo endorreica; sin embargo, de manera artificial posee actualmente una salida, principalmente hacia el río Tula (Rojas, 1995). La cuenca de México se ubica en la parte central del Eje Neovolcánico Transversal, con una extensión de 9,600 km². El fondo de la cuenca está formado por depósitos aluviales y lacustres, formando una llanura que cubre 40% del área total y tiene una elevación aproximada de 2,240 msnm (González-Pozo, 2010). Un sistema montañoso con una altitud de hasta 5,000 msnm rodea a la cuenca y contribuye a la recarga de los acuíferos, algunos ríos como el San Buenaventura que aportaban agua superficial al sistema lacustre de Xochimilco, además de numerosos manantiales que brotaban en el borde y al interior del lago de Xochimilco (Rojas, 1995). Las características orográficas le dan a la región un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw1, clasificación Köppen), cuya temperatura varía entre 12° y 18°C, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales. La precipitación media anual va de los 700 a los 900 mm, las lluvias más abundantes se presentan entre los meses de junio y septiembre, las menos abundantes entre los meses de enero y marzo (INEGI, 2007).

Alrededor del año 1000 d. C. el sistema lacustre comprendía una extensión de 1,500 km², formado por cinco lagos poco profundos unidos de norte a sur: Tzompanco (Zumpango), Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco (Ezcurra *et al.*, 2006). Estos lagos, representaron en tiempos prehispánicos una fuente importante de abastecimiento de agua y alimentos. El agua

en los lagos poseía características distintas; las aguas de los lagos del norte eran salobres, mientras que la de los lagos del sur era dulce. Esto propició que en tiempos prehispánicos las principales actividades productivas se llevaran a cabo al sur de la cuenca, en los lagos de Xochimilco y Chalco (Rojas, 1995).

Actualmente permanecen reminiscencias del antiguo lago de Xochimilco que ha quedado reducido a pequeños cuerpos de agua, vasos de captación y una red de canales con 203 km de longitud (Aguilar *et al.*, 2006). Las chinampas dedicadas al cultivo se encuentran en el llamado Distrito de Riego, en el Ejido de San Gregorio Atlapulco y en la zona chinampera, en la que se incluyen superficies de Xochimilco, San Gregorio Atlapulco y San Luis Tlaxialtemalco. Existen también áreas destinadas a las actividades culturales, deportivas y recreativas, entre las que destacan el Parque Ecológico de Xochimilco, el Deportivo Cuemanco, el Mercado de Flores de Cuemanco y la Pista Olímpica de Remo y Canotaje “Virgilio Uribe” (GODF, 2006).

El agroecosistema de Xochimilco posee vegetación halófila constituida por pastizales bajos; acuática y subacuática en la que destacan los tulares de diversas especies y vegetación flotante como la lentejilla (*Lemna minuscula*), el chilacastle (*Wolffia columbiana*) y el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*); así como vegetación terrestre cuyas principales especies son el ahuejote (*Salix bonplandiana*) y ahuehuete (*Taxodium mucronatum*). En el Área Natural Protegida (ANP) se han registrado 180 especies de plantas, cuatro de ellas bajo alguna categoría de riesgo de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2001. En relación a la fauna se reportan 139 especies de vertebrados para el ANP: 21 de peces, 6 de anfibios, 10 de reptiles, 79 de aves y 23 de mamíferos (GODF, 2006); de éstas, 11 se encuentran

enlistadas dentro de alguna categoría de protección de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2001. Algunas especies son de importancia ya que son endémicas de Xochimilco como el charal del Valle de México (*Chirostoma humboldtianum*) y el ajolote (*Ambystoma mexicanum*) (GODF, 2006). Otro aspecto en relación a la avifuna es la importancia que tiene la zona lacustre de Xochimilco como sitio de residencia de aves migratorias provenientes del norte del continente durante los meses de noviembre a marzo (CONABIO, 2012).

Descripción de las chinampas de estudio

Con base en la medición de parámetros de calidad del agua en algunos estudios se han definido cinco áreas principales en el agroecosistema (Mazari-Hiriart *et al.*, 2008; Zambrano *et al.*, 2009; Contreras *et al.*, 2009; Contreras, 2012):

- a) *Chinampera*, inmersa en el área natural protegida sin influencia urbana (ubicada al norte del ANP).
- b) *Urbana*, con canales rodeados de asentamientos urbanos tanto regulares como irregulares e invernaderos (ubicada al sur del ANP).
- c) *Turística*, cuyos asentamientos urbanos y la agricultura intensiva favorecen el incremento en la contaminación del humedal (ubicada al sur de la zona urbana).
- d) *Chinampera-urbana*, inmersa en una matriz urbana con una aparente producción chinampera tradicional (ubicada al oeste).
- e) *Chinampera tecnificada*, cuyas técnicas de producción incluyen el uso intensivo de agroquímicos y de maquinaria; ubicada al este, en el ejido de San Gregorio Atlapulco.

Esta zonificación permitió la selección de cinco chinampas de estudio en las que se llevan a cabo distintas actividades con diversos usos de suelo específicos. Las chinampas son las siguientes: *Texhuilo*, chinampa piloto en la que se llevan a cabo acciones de rehabilitación y que se ubica en la zona chinampera; *Cuemanco*, ubicado en la zona catalogada como chinampera-urbana; *Trancatitla*, que pertenece a la zona chinampera; *San Gregorio*, que forma parte del área chinampera-tecnificada y *La Santísima*, inmersa en la zona urbana (Figura 1). El área de las chinampas consideradas en este estudio va desde los 700 m² a los 6,000 m² y se encuentran rodeadas tanto por un canal que representa el aporte principal de agua de profundidades cercanas a un metro o mayores y un ancho también mayor a un metro, así como de apantles de menor profundidad y ancho.



Figura 1. Imagen satelital con los cinco sitios de muestreo (Google Earth, 29 diciembre 2013).

Chinampa piloto Texhuilo

Chinampa experimental o piloto que comprende un área de 6,000 m² y está ubicada en las coordenadas 490807 E/2131186 N. Esta chinampa ha sido cultivada por un largo periodo de tiempo con hortalizas, principalmente lechuga, verdolaga, acelga y espinaca, durante este tiempo se ha evitado el uso de agroquímicos y se mantiene un tipo de agricultura chinampero tradicional. Desde hace cuatro años, se han implementado proyectos de rehabilitación de los apantles para mejorar las condiciones del agua con el objetivo de propiciar un ambiente adecuado para las especies nativas como el ajolote (*Ambystoma mexicanum*), especie endémica y en peligro de extinción de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010). Para ello, las principales medidas de rehabilitación que se llevan a cabo son la apertura, desazolve y bombeo constante de agua en los apantles; el control de las especies invasoras como la tilapia (*Oreochromis niloticus*) y la carpa (*Cyprinus carpio*) mediante la colocación de mallas a la entrada de los apantles; y el mantenimiento del cultivo tradicional evitando el uso de agroquímicos ya que se sabe que la agricultura tradicional crea un ambiente adecuado para la sobrevivencia del ajolote (Valiente *et al.*, 2010). Estas acciones son efectuadas por el grupo Restauración Ecológica y Desarrollo A.C. (REDES), en conjunto con el dueño de la chinampa, el señor Anastasio Santana Velasco, agricultor de cuarta generación.

En los apantles rehabilitados se han creado refugios para analizar la sobrevivencia y la capacidad de carga de los apantles para ajolotes procedentes de laboratorio, estos estudios se han realizado en el Laboratorio de Restauración Ecológica del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Para la toma de muestras de agua y sedimento en esta chinampa se consideró como punto 1 al apantle con refugios de ajolotes, el punto 2 corresponde al canal de entrada que se considera como el canal de aporte hacia los apantles que rodean la chinampa y el punto 3 es un apantle cuya ubicación y pendiente se considera como apantle de salida del agua, al cual no se le da mantenimiento alguno; el área enmarcada es el terreno cultivado en donde se tomaron las muestras de hortalizas y suelo (Figura 2).



Figura 2. Imagen satelital con los puntos de muestreo en la chinampa piloto Texhuilo (Google Earth, 29 diciembre 2013).

Estación Cuemanco – UNAM

Ubicada en las coordenadas 489173 E/2132386 N, la estación Cuemanco (CU) se encuentra al sur del Embarcadero de Cuemanco y al este de la Pista Olímpica de Remo y Canotaje “Virgilio Uribe”. Tiene un área aproximada de 1000 m². Posee un apantle interno con comunicación al Canal Cuemanco, en dicho apantle se consideraron dos puntos de muestreo

(punto 1 y 2) para el análisis de agua y sedimento, el tercer punto de muestreo se ubica a la salida de dicho apantle hacia el Canal de Cuemanco (Figura 3). En este último punto dentro del apantle hay depósitos de material procedente de dragados que se han efectuado en la zona (Roberto Altamirano, comunicación personal).

En este terreno no se tienen cultivos, pertenece a equipos deportivos de la UNAM y está rodeado por terrenos cuyo uso de suelo principalmente es recreativo, a un costado se encuentran las instalaciones de la Policía Ribereña de la SSP-DF y del Embarcadero Turístico de Cuemanco. Durante el año 2012 se realizó una rehabilitación del apantle interno como parte de la investigación realizada en el Laboratorio de Restauración Ecológica del Instituto de Biología de la UNAM, en el que también se instalaron refugios para ajolotes procedentes del mismo laboratorio. Entre las acciones que se llevaron a cabo fueron: limpieza del canal, clausura del canal para evitar fauna nociva, construcción de refugios para ajolotes y bombeo de agua que propicia la circulación para mejorar la calidad de la misma.

Dado que la vocación del terreno no es agrícola, las muestras de suelo y hortalizas se tomaron en chinampas cultivadas ubicadas al otro lado del Canal Cuemanco.



Figura 3. Imagen satelital de la Estación Cuemanco-UNAM y sus puntos de muestreo (Google Earth, 29 diciembre 2013).

Chinampa Trancatitla

Se localiza en las coordenadas 489765 E/2131401 N, la vocación de esta chinampa ha sido agrícola cuyo cultivo principal es el maíz, aunque también se cultivan flores de ornato y algunas hortalizas, su área aproximada es de 1,000 m². En esta chinampa también se realizan estudios de investigación del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM. La chinampa se ubica sobre el Canal Trancatitla en donde se estableció el punto de muestreo 1, los puntos 2 y 3 corresponden a apantles internos en donde también se tomaron muestras de agua y sedimento (Figura 4). Los apantles durante el estudio no tuvieron mantenimiento, como dragados o limpieza de vegetación acuática. El terreno de la chinampa también carece de mantenimiento principalmente a las orillas, ya que no tiene vegetación de soporte o estacado lo que provoca el desgajamiento del terreno sobre los

apantles. La chinampa cuenta con una letrina para los trabajadores cercana al punto de muestreo 3, el área delimitada en la figura corresponde a la zona en donde se tomaron muestras de hortalizas y suelo (Figura 4).



Figura 4. Imagen satelital de la chinampa Trancatitla de la UNAM y sus puntos de muestreo (Google Earth, 29 diciembre 2013).

Chinampa en San Gregorio

Históricamente esta zona corresponde a chinampas principalmente dedicadas a actividades agropecuarias, se ubica en las coordenadas 495025 E/2129904 N. Se encuentra en el ejido de San Gregorio Atlapulco y tiene un área aproximada de 1,800 m². En la zona de muestreo existen cultivos a cielo abierto de una variedad de hortalizas como lechuga, verdolaga, cilantro, epazote, etc. El tipo de agricultura que hay en la zona de San Gregorio es una fusión de agricultura tradicional con algunas técnicas modernas como son el uso de plásticos para semilleros, el uso de malla sobre o antigranizo, la aplicación de agroquímicos: plaguicidas y

fertilizantes, y bombeo del agua del canal para el riego de los cultivos, el cual varía dependiendo de los requerimientos del cultivo (López *et al.*, 2006). En algunas ocasiones también se apoyan del uso de maquinaria para las labores agrícolas y hay presencia de algunos invernaderos. Los puntos de muestreo se establecieron en tres zonas del Canal San Sebastián que también rodea la ciénaga conocida como la Laguna del Muerto (Figura 5).



Figura 5. Imagen satelital de San Gregorio y los puntos de muestreo (Google Earth, 29 diciembre 2013).

La Santísima

Ubicada en las coordenadas 490185 E/2130066 N, esta chinampa presenta gran influencia urbana, con asentamientos irregulares que carecen de un sistema de drenaje, por lo que el agua residual se vierte directamente a los canales que los circundan. Se puede encontrar un poco de vegetación de ornato asociada a las casas y en menor medida vegetación como estructura de soporte de las chinampas, mismas que han perdido su función original y ahora se ocupan como suelo urbano. En algunas chinampas cercanas hay invernaderos pero en

general la vocación de la tierra se ha convertido a uso de suelo habitacional. Las muestras de agua y sedimento se tomaron en el Canal La Santísima adyacente al Barrio de La Santísima y cerca del Canal Apatlaco. La chinampa seleccionada es en realidad un terreno abandonado con una pequeña casa de lámina, posee un área aproximada de 700 m² y al no ser cultivada no recibe agua directa sobre el terreno para riego; ya que no posee cultivos se tomaron muestras de algunas hierbas o *quelites* comestibles que crecen de manera natural en el terreno enmarcado en la Figura 6.



Figura 6. Imagen satelital del barrio y canal La Santísima con los puntos de muestreo (Google Earth, 29 diciembre 2013).

Métodos de campo

Los muestreos en los cinco sitios se llevaron a cabo durante un ciclo anual, abarcando tres temporadas en función de la precipitación. Estas temporadas fueron: temporada fría-seca (fs-1) durante el mes de noviembre de 2011, temporada cálida-seca (cs) durante el mes de marzo de 2012, temporada cálida-lluviosa (cli) en el mes de agosto de 2012 y nuevamente en la temporada fría-seca (fs-2) en el mes de noviembre del 2012. Se tomó un muestreo prospectivo el correspondiente a la temporada fría-seca del 2011, en el que únicamente se tomaron muestras de agua y sedimento. Para la temporada fría-seca del 2012 se tomaron muestras de las cuatro matrices: agua, sedimento, suelo y hortalizas.

En cada una de las chinampas, se eligieron tres puntos de muestreo para el análisis de agua, para ello se trató de considerar un canal o apantle de aporte (de mayor longitud, ancho y profundidad) y uno o dos apantles internos que tuvieran influencia sobre las chinampas elegidas (estos apantles de menor longitud, ancho y profundidad). Se tomaron muestras por triplicado de cada matriz a evaluar.

Para la toma de muestras de agua se utilizó una botella muestreadora de acero inoxidable, las muestras fueron almacenadas en frascos estériles de polipropileno de alta densidad con volumen de 1 L (APHA, 2005; Toranzos *et al.*, 2007) y se tomaron a dos terceras partes de la profundidad del canal, considerándose ésta una muestra representativa de la columna de agua (Hynes, 1983). Las muestras fueron almacenadas y transportadas a 4°C, hasta su análisis en el laboratorio de acuerdo con los tiempos establecidos (APHA, 2005).

Para el muestreo de sedimento de los canales, se utilizó una draga Ekman de acero inoxidable, la profundidad dependió del canal y de la temporada debido a los cambios en el nivel del agua. El sedimento extraído se guardó en bolsas de plástico estériles marca Whirl-pak con un volumen aproximado de 300 mL y se conservaron a 4°C hasta su análisis en laboratorio.

Las muestras de suelo se tomaron siguiendo un diseño de muestreo compuesto, obteniendo así una estimación válida de los parámetros en superficie. Para la obtención de la muestra compuesta se dividió el terreno en cuatro cuadrantes iguales, se tomaron dentro de cada cuadrante tres muestras sumando un total de 12. Se tomó la muestra en los primeros 15 cm del suelo con ayuda de una pala y de un recipiente con un volumen aproximado de 230 cm³, previo a la toma de muestra se eliminó una capa superficial de hojarasca de aproximadamente 2 cm, el equipo con el que se tomó la muestra se lavó entre cada muestreo con etanol. Se mezclaron todas las muestras en una cubeta estéril y se utilizó el método por cuarteo para conseguir una muestra compuesta final de aproximadamente 1 kg (Knaebel, 2007). Las muestras compuestas se tomaron por triplicado, se guardaron en bolsas estériles marca Whirl-pak y se transportaron a 4°C.

La elección de las hortalizas para colecta se hizo en función de los cultivos existentes al momento del muestreo. Se tomaron aquellas hortalizas que se consumen en crudo, preferentemente hojas. Se tomaron muestras por triplicado y se eligieron dos cultivos por sitio. Para la toma de muestra se cortaron las hojas por encima de la superficie del suelo evitando el contacto con las partículas del suelo. Se tomó una cantidad aproximada de 50 g

de muestra, se almacenaron en bolsas estériles marca Whirl-pak y se transportaron a 4°C hasta su análisis en laboratorio.

Los análisis bacteriológicos para cada matriz evaluada se llevaron a cabo durante las siguientes 24 horas de acuerdo con los tiempos recomendados (APHA, 2005; Mudroch y MacKnight, 1994). Para los análisis de bacteriófagos en los días posteriores las muestras se almacenaron a 4°C.

Métodos de laboratorio

Parámetros fisicoquímicos

Los datos en agua de pH, Conductividad Eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$), Sólidos Disueltos Totales (SDT, g/L), salinidad (mg/L), potencial de óxido reducción (ORP, mV), concentración de Oxígeno Disuelto (OD, mg/L) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$), fueron tomados con la sonda multiparámetros YSI-M6601 (Yellow Springs, U.S.). La profundidad y transparencia se midieron con un disco de Secchi.

El análisis químico de fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT), así como sus fracciones: ortofosfatos (PO_4^{-3}), nitrógeno amoniacal (N-NH_3) y nitratos (NO_3^-) en las muestras de agua se llevó a cabo con el espectrofotómetro portátil marca HACH Modelo DR2400 (U.S.), de acuerdo con las técnicas propuestas en el manual de operación (HACH, 2002):

- Fósforo total (PT), método PhosVer3 con digestión ácida USEPA (0.06 a 3.50 mg/L P); método de molibdato con digestión ácida con persulfato (1 a 100 mg/L PO_4^{-3}).
- Ortofosfatos (PO_4^{-3}), método aminoácido (0.23 a 30 mg/L PO_4^{-3}), ácido ascórbico PhosVer3 USEPA (0.02 a 2.5 mg/L PO_4^{-3}).
- Nitrógeno total (NT), método de digestión con persulfato (10 a 50 mg/L N) (0.5 a 25.0 mg/L N).
- Nitrógeno amoniacal (N-NH_3), método de salicilato (0.02 a 2.5 mg/L N-NH_3) (0.4 a 50 mg/L N-NH_3).
- Nitratos método de reducción por cadmio (0.01 a 0.50 mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$).

Para llevar a cabo la digestión de las muestras de PT y NT, se utilizó el digestor Digital Reactor Block 200 de la marca HACH Modelo DRB200.

El análisis de PT y NT en muestras de sedimento se llevó a cabo conforme a la metodología establecida en APHA (2005) y de acuerdo con la NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001a) y NMX-AA-026-SCFI-2001 (DOF, 2001b), respectivamente.

Se analizaron los siguientes metales pesados: arsénico (As), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), cromo (Cr) y mercurio (Hg). La elección de estos se efectuó con base en lo reportado en los canales de Xochimilco (Sandoval, 2008; Solís *et al.*, 2006). La metodología utilizada es la que dicta la NMX-AA-051-SCFI-2001 (APHA, 2005; DOF, 2001c), cuyo principio es la detección de metales por espectrofotometría de absorción atómica, la cual se basa en la generación de átomos en estado basal y en la medición de la cantidad de energía absorbida por estos, este dato es directamente proporcional a la concentración de ese elemento en la muestra analizada. En estudios previos (Sandoval, 2008) no se encontraron diferencias significativas entre temporadas de un ciclo anual en los análisis de metales pesados para distintos sitios de estudio en el sistema lacustre de Xochimilco, por lo que las muestras para el presente trabajo se tomaron en temporadas distintas.

Los límites de detección para el análisis de agua en esta metodología en mg/L son: As >0.0002, Pb >0.006, Cu >0.02 y Zn >0.006. Los límites de detección para el análisis en sedimento, suelo y hortalizas en mg/kg son: As >0.001, Pb >0.02, Cu >0.05 y Zn >0.02.

El análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) se efectuó de acuerdo con la NMX-AA-030-SCFI-2001 (APHA, 2005; DOF, 2001d), para el análisis de Demanda Química de Oxígeno (DQO) siguiendo la NMX-AA-028-SCFI-2001 (APHA, 2005; DOF, 2001e) y para

el porcentaje de Carbono Orgánico (CO%) la NOM-021-SEMARNAT-2000 (APHA, 2005; DOF, 2002).

Las muestras de sedimentos se analizaron en el laboratorio certificado IDECA, S.A. de C.V., de acuerdo con las técnicas mencionadas previamente.

Análisis bacteriológico

Para los análisis bacteriológicos se utilizaron como indicadores de contaminación fecal bacterias del grupo coliformes y enterococos. Se utilizó el método de filtración a través de membrana, utilizando membranas de 0.45 μm de acetato de celulosa (Millipore MF tipo HA, Millipore Corp. Bedford) para cuantificar Coliformes Fecales (CF) y Enterococos Fecales (EF) (APHA, 2005; Murray, 1995).

Se realizaron modificaciones a la técnica de filtración por membranas para el análisis bacteriológico en sedimento, suelo y hortalizas. Previo a la filtración, se obtuvo una solución en la que se eluyeron las muestras en un buffer salino de fosfatos (PBS 1X) a pH 7. Para sedimento y suelo se pesaron 10 gr y se eluyó con 90 mL de buffer y para hortalizas 15 gr con 50 mL de buffer. A cada elución se le agregó 1 mL de Tween 80 al 0.1% como surfactante para homogenizar la muestra y romper posibles agregados (Vega, 2006). Las muestras se homogenizaron con un vortex GENIE Modelo SI-T236. Debido a la alta densidad bacteriana se realizaron diluciones con buffer PBS 1X para la cuantificación de las colonias que van desde 1 mL de muestra en 10 mL de buffer (10^{-1}) hasta 10^{-5} (0.00001 mL de muestra en 10 mL de buffer).

Las muestras de agua también se diluyeron en buffer de fosfatos a pH 7 para facilitar la cuantificación de bacterias (APHA, 2005), para ello se tomó inicialmente 1 mL de la muestra en 9 mL de buffer y se realizaron las diluciones subsecuentes. Se homogenizaron con un vortex y se filtraron a través de membrana. Una vez filtrada la muestra, las membranas se colocaron en los siguientes medios de cultivo selectivos:

- Agar m-FC (Becton Dickinson, Cockeysville, MD) para CF.
- Agar Streptococcus KF (Becton Dickinson, Cockeysville, MD) para EF.

Las bacterias CF se incubaron a una temperatura de 44.5 ± 5 °C durante 24 horas y las EF a 35 ± 0.5 °C por 48 horas (APHA, 2005; Murray, 1995). Posteriormente se cuantificaron reportándose en unidades formadoras de colonias por cada 100 mL (UFC/100 mL).

Análisis de bacteriófagos

Para el análisis de bacteriófagos en agua se concentraron 5 L de muestra mediante el método de ultrafiltración (Polaczyk *et al.*, 2008). Para ello se utilizaron cartuchos para hemodiálisis Hemoflow F80A con membranas de 15-20 KDa y una bomba peristáltica (MasterFlex L/S Cole-Parmer Instrument Co. U.S.). Los cartuchos se desinfectaron haciendo circular a través de ellos 1 L de solución de hipoclorito de sodio al 4% durante 30 min, posteriormente se circuló 1 L de solución de tiosulfato de sodio al 1% durante 40 min para inactivar la acción oxidante del hipoclorito de sodio y finalmente se circuló 1 L de solución de polifosfato de sodio (NaPP) al 0.1% con la finalidad de evitar la adsorción de microorganismos en la superficie de las fibras de polisulfona del cartucho.

Una vez preparado el cartucho, se concentraron las muestras a las cuales se les agregó 1 g/L de NaPP para favorecer la desagregación en la muestra. El volumen final fue de aproximadamente 100 mL, las muestras se conservaron en refrigeración a -20°C hasta su análisis.

El tratamiento para las hortalizas consiste en una elución de 25 g de muestra en 50 mL de una solución estéril de PBS 1 X y NaCl 1 M manteniéndose en agitación durante 30 min. Posteriormente la muestra se filtró en filtros Stericup-GV (Millipore) con membrana de 0.22 µm. La muestra filtrada se centrifugó en tubos Amicon-Ultra 15 (Millipore) de 100 KDa durante 20 min siguiendo las instrucciones del fabricante, la muestra se recuperó y re-suspendió en 1 mL de solución buffer de fosfatos, conservándose a -20°C hasta su análisis (Espinosa *et al.*, 2012; Vázquez, 2012).

El grupo de bacteriófagos utilizado como indicador de virus entérico fue el colifago de tipo F-RNA, cuya cepa hospedera es *Escherichia coli* HS pFamp (con resistencia a ampicilina, No. ATCC 700891). Para la detección de colifagos se utilizó el método de doble capa de agar, tomando como base el protocolo certificado International Standard “Water Quality Detection and Enumeration of Bacteriophages” ISO 10705-1:1995. Para el cultivo de bacteria hospedera se utilizó un medio líquido TSB (caldo de soya y tripticaseína, Bixon) adicionando antibiótico (ampicilina-estreptomicina). Se mezclan 0.5 mL de bacteria en cultivo con 5 mL de medio semilíquido TSB (también con antibiótico, 1 mL por cada 100 mL de medio) y 0.5 mL de la muestra; se vierten en un medio sólido TSB en cajas de petri de 100 x 15 mm previamente preparadas. Una vez solidificado el medio, se incubaron durante 18 horas a 37°C. Posteriormente se realizó el conteo de placas y se hicieron los cálculos

correspondientes para reportar los resultados como unidades formadoras de placa por cada 100 mililitros (UFP/100 mL) de acuerdo con las fórmulas establecidas en USEPA (2001).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico exploratorio de los datos y se obtuvieron gráficas de interacción para cada chinampa, para ello se utilizó el paquete estadístico R versión 3.0.2. Para analizar todas las variables y determinar el comportamiento de los sitios de muestreo en conjunto se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) por medio del programa SPSS versión 18.0.

Resultados y discusión

Para lograr los objetivos el proyecto, se abordó como un estudio de caso la chinampa Texhuilo, para caracterizarla con base en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en las cuatro matrices consideradas en este estudio, a lo largo de un ciclo anual. Para el resto de las chinampas estudiadas se utilizó como referencia la chinampa en rehabilitación, para así poder evaluar si dichas medidas han generado cambios sobre los parámetros a lo largo del ciclo anual. El caso de las hortalizas se evaluó de manera general, considerando todas las chinampas evaluadas ya que no se cuenta con un muestreo consistente en relación con el tipo de cultivo, ya que las muestras se tomaron en función del cultivo presente en el momento del muestreo.

Caracterización de la chinampa Texhuilo, como sitio en rehabilitación

En estudios previos se ha observado una heterogeneidad en la calidad del agua, cuya distribución basada en interpolaciones en diferentes regiones del sistema de chinampas de Xochimilco, que abarcan desde la zona agrícola, la zona de transición entre ésta y la zona urbana, la misma zona urbana y la zona de turismo; esto muestra que la influencia de las actividades humanas es capaz de modificar considerablemente la calidad del agua en un sistema como el estudiado (Zambrano *et al.*, 2009).

La chinampa Texhuilo ha tenido un manejo especial desde el año 2009 con el objetivo de rehabilitar la chinampa y como medida de conservación, principalmente el manejo se ha enfocado en modificar la calidad del agua en apantles, mismos que funcionan como refugios de ajolotes. Para ello se le da un mantenimiento específico al apantle que consta de la

limpieza de maleza a la orilla de canal, el control de la entrada de fauna nociva para el ajolote y el bombeo de agua constante dentro del apantle, lo que se supone permitirá una mejora en la calidad del agua, para que éste hábitat no sólo sirva para ofrecer mejores condiciones para la sobrevivencia del ajolote, sino también para que sea utilizada en el riego de los cultivos, tratando de mejorar las condiciones de la chinampa en general.

La toma de muestras de agua y sedimento se realizó en tres apantles que poseen las siguientes características:

Texhuilo 1. Apantle que funciona como refugio de ajolotes, aproximadamente con 1 m de ancho y 50 cm de profundidad.

Texhuilo 2. Canal de entrada a la chinampa con 2 m de ancho y una profundidad de 70 cm aproximadamente, con actividad constante de entrada y salida de canoas.

Texhuilo 3. Apantle con una profundidad aproximada de 20 cm y ancho de 70 cm, no cuenta con un mantenimiento constante y el flujo de agua es prácticamente nulo por su ubicación con respecto a canales de mayor tamaño.

Parámetros fisicoquímicos

El Oxígeno Disuelto (OD) es un parámetro fundamental para determinar la calidad del agua, ya que resulta esencial para la vida de los organismos acuáticos aerobios, cuando éstos niveles caen por debajo de 5.0 mg/L, la vida acuática corre riesgo e incluso podría llegar a ser mortal para algunos organismos en condiciones menores a 2 mg/L (Abarca, 2007; DOF, 2011). Se observa que el apantle Texhuilo 2 posee los valores más altos de OD entre 9 y 12 mg/L (Figura 7a), esto puede deberse a que el canal tiene un mayor flujo de agua proveniente de la Laguna Texhuilo y mayor movimiento debido a la constante entrada y

salida de canoas en comparación con los apantles Texhuilo 1 y Texhuilo 3 al interior de la chinampa. Los valores más bajos se observan en el apantle de los refugios Texhuilo 1 (Figura 7a), en el que a pesar de ser un canal con mantenimiento, la baja profundidad y la poca circulación del agua pueden influir en las bajas concentraciones de OD que en este caso van de 0 a 0.5 mg/L, estos valores pueden generar severas afectaciones a la vida acuática debido a la poca disponibilidad de oxígeno para sobrevivir, la excepción para el apantle Texhuilo 1 es en la temporada fría-seca (1) en la que se registró un valor de 5.33 mg/L de OD (Abarca, 2007).

La temperatura es un parámetro que influye en diversos procesos biológicos y fisicoquímicos en el agua, entre ellos afecta la solubilidad del oxígeno: a mayor temperatura, menor es la concentración de OD. En los cuerpos de agua templados, como el sistema lacustre de Xochimilco, la variación de la temperatura es mayor que en sistemas costeros (Romero, 1999; Abarca, 2007). En los apantles de la chinampa Texhuilo no se observa una correlación clara entre estos dos parámetros (Figura 7a y 7b). Las temperaturas más altas para todos los apantles se registraron en la temporada cálida-lluviosa en un intervalo de 16 a 20°C, y las más bajas durante la temporada fría-seca (2) en un intervalo de 10 a 14°C, siendo el apantle sin mantenimiento Texhuilo 3 el de mayor temperatura en ambas temporadas (Figura 7b).

Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) y la Conductividad Eléctrica (CE) son parámetros estrechamente relacionados y que se detectan en el agua de manera directamente proporcional, por un lado los SDT son sustancias como cationes y aniones disueltas en el agua y que quedan como residuo al evaporarse y la CE es la expresión numérica de la capacidad del agua para transportar una corriente eléctrica, por lo que depende de la

concentración de sustancias disueltas ionizadas en el agua y la temperatura (Abarca, 2007). La relación entre ambos parámetros se observa muy claramente en la Figura 7c y 7d, durante la temporada cálida-lluviosa los valores de SDT incrementan significativamente en los apantles Texhuilo 1 y Texhuilo 2, con un registro de 1.3 y 1.4 g/L respectivamente, comparado con el resto de los apantles en todas las temporadas que se mantienen por debajo de 0.7 g/L para SDT (Figura 7c). La CE presenta una tendencia similar a los SDT, en la temporada cálida-lluviosa los apantles Texhuilo 1 y Texhuilo 2 presentan mayor CE que el resto, en este caso se registró una CE de 2091 y 1928 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente; los demás apantles mostraron para todas las temporadas valores por debajo de 1062 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 7d).

El intervalo de pH de los apantles de la chinampa Texhuilo se encuentra entre 6 y 10 (Figura 7e), mismo que se considera adecuado para la vida acuática y puede representar una baja toxicidad en el sistema (Abarca, 2007). Muchas de las reacciones biogeoquímicas de los sistemas naturales que ocurren como parte de los ciclos de C, N, O, S, P y metales traza involucran reacciones de óxido-reducción (Reddy y De Laune, 2008). Se midió el potencial de óxido-reducción (ORP) en el agua de los apantles que presentó valores principalmente negativos en un intervalo de -324 a -56 mV (Figura 7f), que representan condiciones de bajas concentraciones de OD o anoxia, estos valores fueron consistentes con los obtenidos de OD observados en la Figura 7a (Maier *et al.*, 2009).

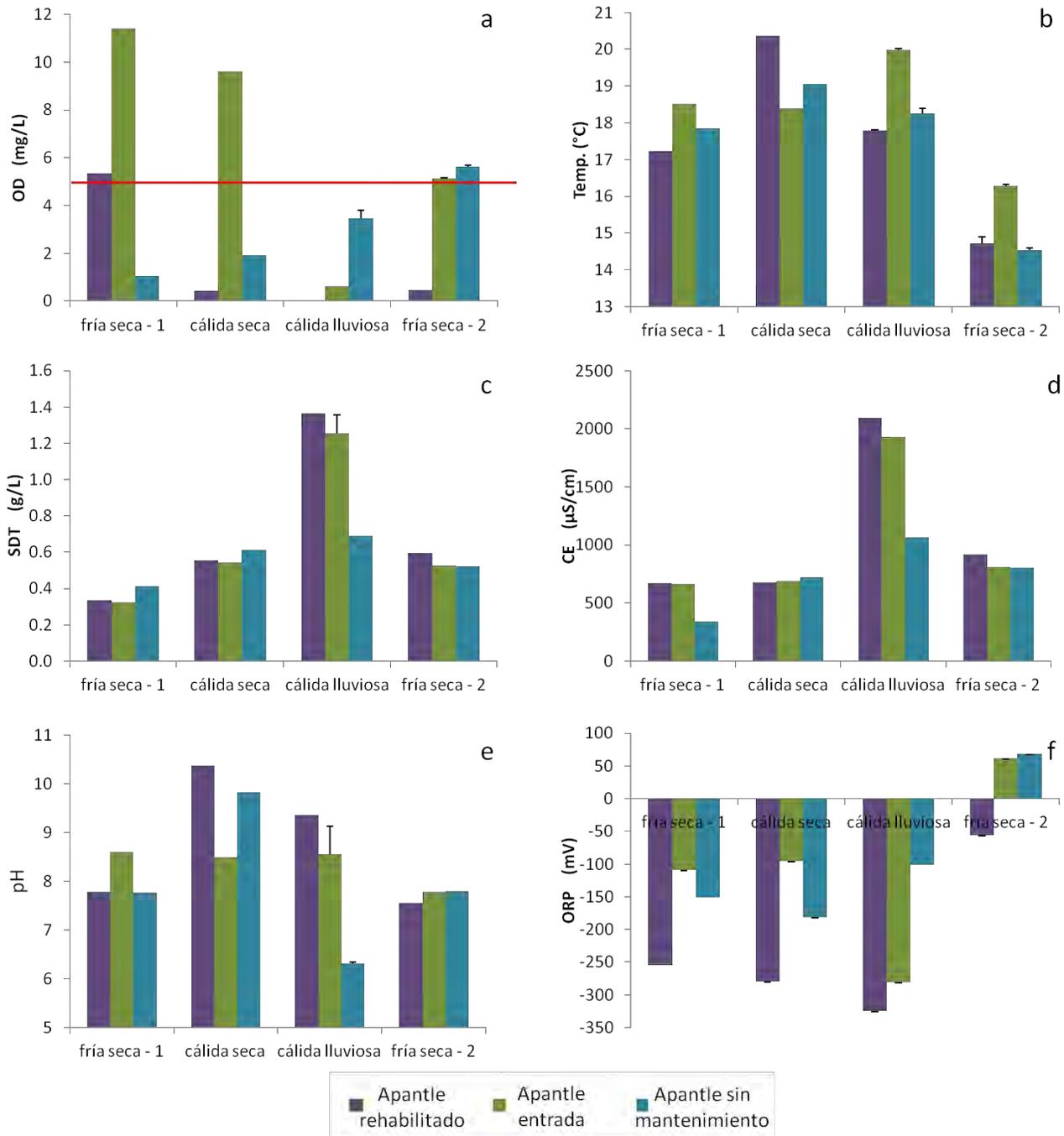


Figura 7. Parámetros fisicoquímicos en agua de tres apantles de la chinampa Texhuilo para el ciclo anual 2011-2012. Línea roja: valor bajo el cual la vida acuática corre riesgo de acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.

La acumulación de materia orgánica en cuerpos de agua puede afectar negativamente los niveles de OD, los humedales como el agroecosistema de Xochimilco tienen tasas de productividad primaria que exceden los procesos de descomposición, lo que resulta en una acumulación de materia orgánica (Reddy y De Laune, 2008). Se determinó el porcentaje de carbono orgánico (% CO) para los apantles en la chinampa Texhuilo tanto para el agua como para el sedimento, los valores en agua son más altos que en sedimento y van de 5.2 a 23% (Figura 8a), mientras que en sedimento van de 3.6 a 18% (Figura 8b). Para estimar la cantidad de materia orgánica disponible para degradación de organismos heterótrofos se utilizaron los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (Dodds, 2002).

La DBO₅ representa la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos durante un periodo específico de incubación (cinco días) para la biodegradación de la materia orgánica y para la oxidación de la materia inorgánica, mientras que la DQO es la cantidad de un oxidante específico que reacciona con la muestra bajo condiciones controladas y es utilizado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales (APHA, 2005; Abarca, 2010). Ambos valores están relacionados con la concentración de OD en los cuerpos de agua, cuando los valores de DBO₅ y DQO son altos, la cantidad de OD disuelto es baja.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) determina ciertos criterios para la calidad de aguas superficiales con base en estos parámetros, para la DBO₅ se establece que el agua superficial es de calidad *aceptable* en el intervalo de 6 a 30 mg/L ya que el grado de contaminación permite que el sistema pueda autodepurarse (Abarca, 2007). En su mayoría,

los apantles Texhuilo 1 y Texhuilo 2 se encuentran bajo este intervalo para todas las temporadas de muestreo, a excepción del apantle Texhuilo 1 en la temporada fría-seca (1) que tiene una DBO_5 de 34 mg/L y el apantle Texhuilo 2 que tiene un valor de 47 mg/L en la temporada cálida-lluviosa, para ambos apantles este parámetro muestra una disminución hacia la temporada fría seca (2); el apantle Texhuilo 3 que carece de manejo, posee valores entre 23 y 61 mg/L, los cuales corresponden a agua *contaminada* en el intervalo de 30 a 120 mg/L de acuerdo a los criterios de la CONAGUA (2005) (Figura 8c). La NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998) establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Dado que los canales de Xochimilco se abastecen de agua residual tratada podemos ver que los valores de DBO_5 rebasan dicha norma cuyo Límite Máximo Permissible (LMP) es de 20 mg/L, aunque la norma aplica para el reuso de aguas residuales tratadas sirve como referente ya que se rebasa el LMP de DBO_5 en todos los sitios durante las distintas temporadas, excepto en los apantles Texhuilo 1 y Texhuilo 2 en la última temporada (se muestra en la Figura 8C con una línea en rojo). Como referente también existe la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 2003a) que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, cuyo LMP es de 75 mg/L para el parámetro DBO_5 , en el caso de Texhuilo no se rebasa el límite en ningún caso.

Para los valores de DQO la CONAGUA establece un intervalo de 40 a 200 mg/L para agua *contaminada*, todos los valores a excepción del apantle TE1 en la temporada cálida seca que tiene un valor de 31 mg/L, caen bajo este criterio e incluso lo rebasan para el caso del apantle TE3 durante la temporada cálida lluviosa que tuvo una concentración de 315 mg/L, esto implica que la cantidad de contaminantes orgánicos en el agua es alta (Figura 8e).

Para la matriz sedimento ambos parámetros DBO_5 y DQO, incrementan en tres órdenes de magnitud en comparación con los del agua (Figura 8d y 8f), lo que indica que hay un exceso de materia orgánica acumulada en el sedimento que aún está por degradarse. La DBO_5 más alta registrada para la matriz sedimento fue de 115,050 mg/kg en el apantle Texhuilo 3 durante la temporada cálida-seca y la más baja de 12,230 mg/kg para el apantle Texhuilo 2 durante la temporada fría-seca (2), en general los valores más altos se registraron para la temporada cálida-seca y los más bajos para la temporada fría-seca (2) (Figura 8e). La DQO muestra el mismo patrón, teniendo los valores más altos en cálida-seca y los más bajos en fría-seca (2), el intervalo va de 20,979 a 310,560 mg/kg, siendo el apantle Texhuilo 1 el que posee los valores máximos y mínimos (Figura 8f).

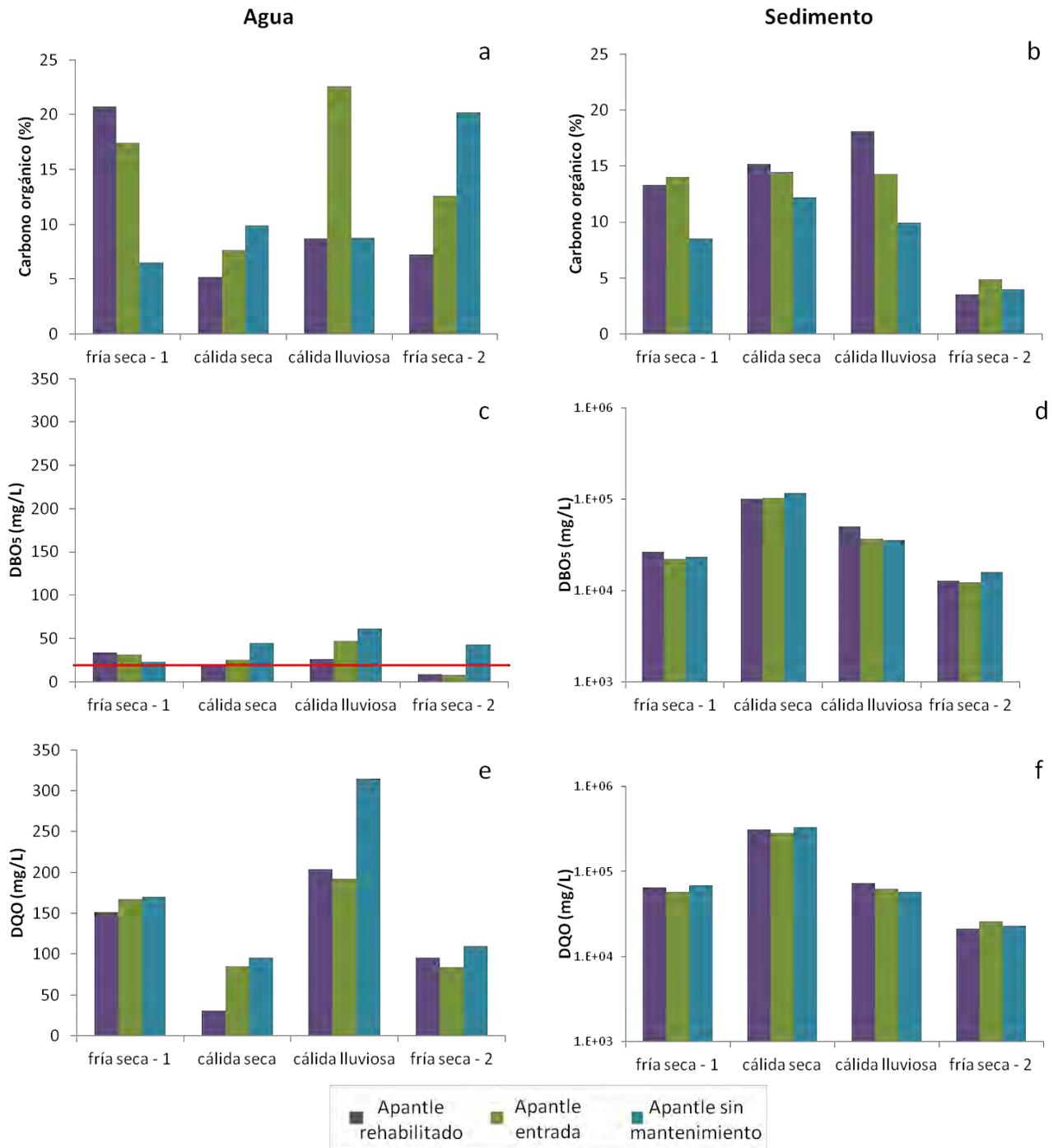


Figura 8. Valores de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y porcentaje de carbono orgánico para agua y sedimento de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012. Línea roja: límite máximo permisible de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Nutrientes

Los nutrientes son esenciales para el crecimiento de los organismos, por lo que representan la base de las redes tróficas en sistemas acuáticos, principalmente el fósforo y el nitrógeno; dichos nutrientes determinan la actividad de los organismos y dependiendo de las concentraciones a las que se encuentran pueden ser limitantes para el crecimiento y la producción de los organismos (Dodds, 2002). De esta manera, los parámetros de fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT) ayudan a determinar el estado trófico de sistemas acuáticos, si el estado trófico se incrementa, también lo harán las concentraciones de nutrientes y por lo tanto aumenta la productividad del sistema (Doods, 2002). Existen diversas clasificaciones que determinan el estado trófico o el grado de eutrofización de acuerdo con las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el sistema, a menores concentraciones se considera que el sistema es oligotrófico y a mayor concentración hipereutrófico (Salas y Martino, 1991).

En los apantles de la chinampa Texhuilo se detectaron concentraciones de PT entre 5.4 y 22 mg/L durante todas las temporadas a excepción de un valor de 32 mg/L para el apantle Texhuilo 3 durante la temporada cálida-seca (Figura 9a). El intervalo detectado para NT en los apantles fue de 2.2 a 12.8 mg/L (Figura 9c). Se habla de un estado hipereutrófico cuando las concentraciones de PT rebasan los 0.1 mg/L y de NT rebasan la concentración de 1.2 mg/L (Doods, 2002). De acuerdo con estos valores los tres apantles de la chinampa Texhuilo presentan un estado hipereutrófico durante las cuatro temporadas de muestreo.

Los nutrientes al estar relacionados con el estado trófico de los sistemas acuáticos pueden determinar la cantidad de biomasa en un sistema, cuando uno de los nutrientes principales (fósforo o nitrógeno) se encuentra en menor concentración, se dice que dicho nutriente es el limitante, es decir que es utilizado en mayor cantidad para la producción de biomasa y que alcanza su mínimo antes que otros nutrientes (Salas y Martino, 1991). Para la chinampa Texhuilo se observa que el fósforo está en concentraciones superiores a las del nitrógeno, casi en una proporción dos a uno (media para PT: 10.76 mg/L y media para NT: 5.65 mg/L), por lo que aparentemente el nutriente limitante en este caso es el nitrógeno; sin embargo, es común que los humedales como el de Xochimilco estén limitados por el fósforo o que tengan un fenómeno co-limitante, en el que ambos intervienen en dicho proceso (Dodds, 2002). La disponibilidad de los nutrientes en cuerpos de agua puede depender de las características geológicas, por ejemplo los fosfatos tienden a unirse a las arcillas y se transportan lentamente en sistemas acuáticos. El nitrógeno por el contrario tiende a perderse por desnitrificación en condiciones anóxicas como es el caso de los apantles de Texhuilo y en general en todo el agroecosistema; de igual manera las actividades humanas y el uso del suelo determinan la cantidad de nutrientes, por ejemplo en áreas de agricultura intensiva suelen ser ricas en fósforo (Dodds, 2002).

En México, la normatividad aplicable únicamente considera el PT como nutriente contaminante en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 2003a), en ella se establece un LMP de 20 mg/L, el cual se rebasa únicamente en el apantle TE2 y TE3 durante la temporada cálida seca. Se observa una acumulación de PT y NT en sedimento ya que los valores aumentan entre cuatro y cinco órdenes de magnitud con respecto a lo detectado en agua. Los intervalos para

el PT en sedimento van de los 10,847 a 39,326 mg/kg (Figura 9b) y para el NT de 1,193 a 11,164 mg/kg que además presenta una disminución hacia la temporada fría-seca (2) (Figura 9d), no se observan diferencias significativas entre los apantles para las cuatro temporadas.

Las altas concentraciones de nutrientes en sedimento pueden representar un riesgo ya que se podría incrementar o mantener por un tiempo prolongado el estado hipereutrófico del sistema ya que la acumulación de nutrientes en el sedimento puede liberarse hacia la columna de agua al removerse los sedimentos (Wetzel, 2001). En el caso de Xochimilco esto puede favorecerse ya sea por el paso de las canoas y trajineras impulsadas por remo o estaca, o por las prácticas agrícolas de extracción del agua-lodo para la fabricación de los almácigos.

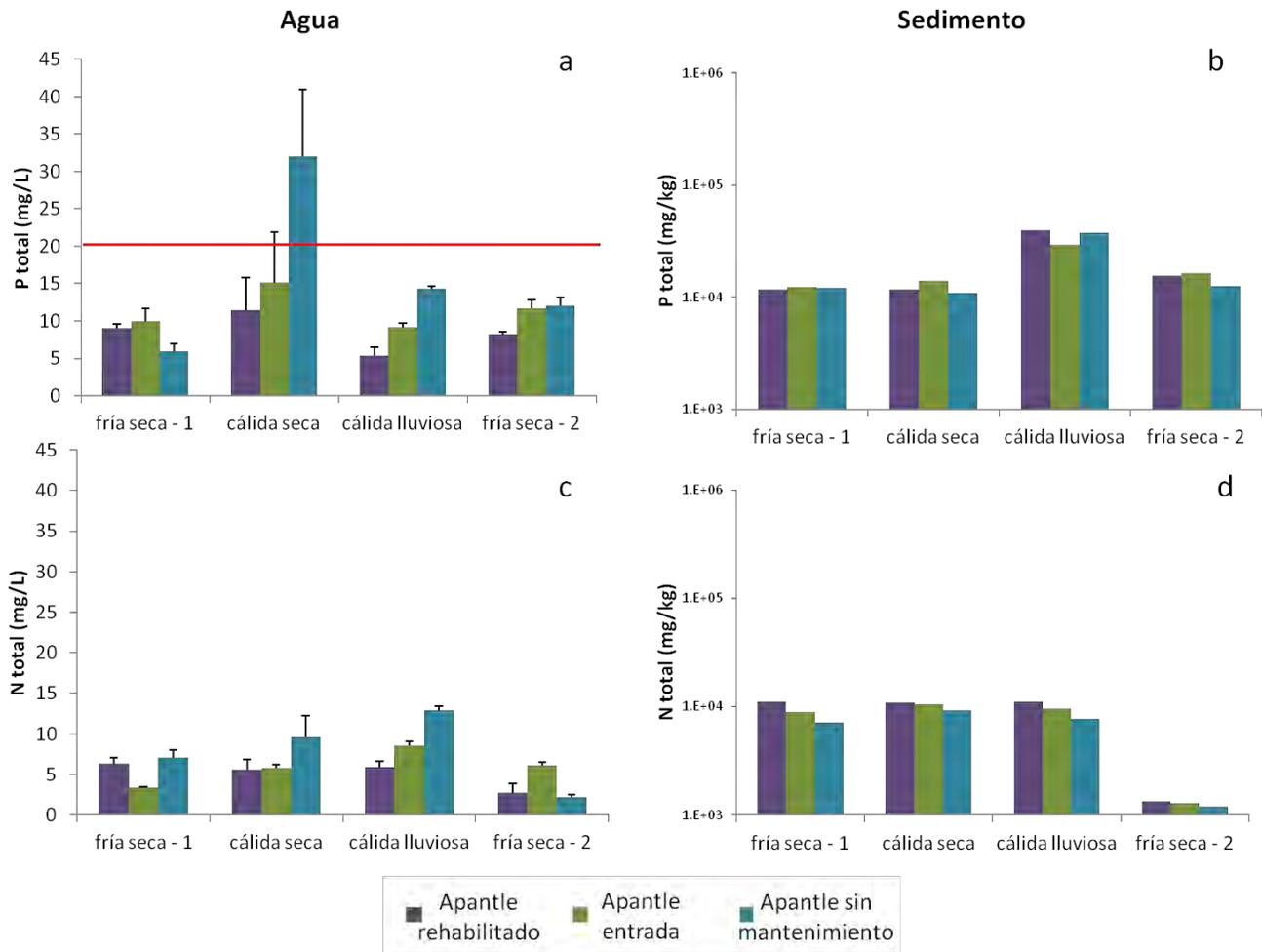


Figura 9. Fósforo (P) y nitrógeno (N) analizados la matriz agua y sedimento para tres apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012. Línea roja: límite máximo permisible en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

El nitrógeno puede encontrarse como las fracciones Nitrógeno Amoniacal ($N-NH_3$) y nitratos (NO_3^-). Para la fracción NO_3^- los valores mayores a 0.3 mg/L representan un estado eutrófico del sistema (Wetzel, 2001), éste valor se rebasa en los apantles Texhuilo 2 y Texhuilo 3 durante la temporada cálida-seca cuyas concentraciones son de 6.9 y 8.6 mg/L, respectivamente (Figura 10a). Las concentraciones de $N-NH_3$ para aguas superficiales no contaminadas son entre 0 y 5 mg/L y para cuerpos de aguas eutróficas con condiciones anaerobias o anóxicas por arriba de 10 mg/L, en ningún apantle se rebasa esta condición ya

que el intervalo observado fue de 0 a 4.06 mg/L (Figura 10b). Los ortofosfatos (PO_4^{-3}) son la única forma de fósforo inorgánico soluble utilizable, representan el 90% del PT y su disponibilidad puede afectarse por la cantidad de sólidos suspendidos (Wetzel, 2001). Las concentraciones de PO_4^{-3} para los apantles en Texhuilo van de 6.2 a 18 mg/L, siendo la temporada cálida-lluviosa la que tiene los valores más bajos en contraste con la temporada fría-seca (1) que presenta los valores más altos; sin embargo, no se observa una tendencia clara tanto por temporada como por apantle (Figura 10c). En general las fracciones de nutrientes analizadas en el agua de los apantles es consistente con los resultados que arrojan las variables totales, es decir, NT y PT. La variación entre temporadas de la concentración de los nutrientes en el agua puede estar influenciada por un efecto diluyente en los apantles por la precipitación en temporada de lluvias o por un efecto de lavado de los suelos también ocasionado por la lluvia que provoca que los nutrientes y sólidos se depositen en los apantles por escorrentía.

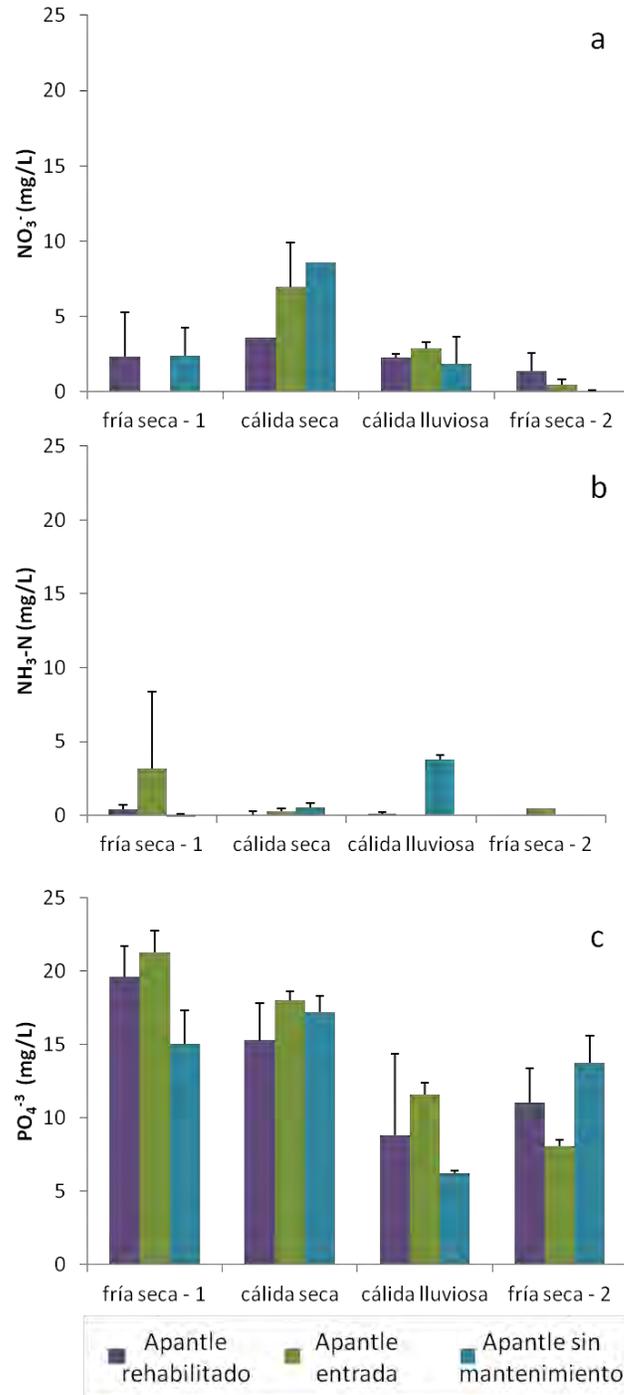


Figura 10. Fracciones nitratos (NO₃⁻), nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y ortofosfatos (PO₄⁻³) evaluados en la matriz agua tres apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.

Parámetros microbiológicos

Bacterias coliformes fecales y enterococos fecales

El uso de ciertos grupos de bacterias como indicadores puede mostrar la presencia potencial de microorganismos patógenos, las bacterias coliformes se encuentran en el intestino del hombre y de animales de sangre caliente, por lo que son excretadas en las heces. En el agua, las bacterias coliformes se encuentran en cantidades proporcionales al grado de contaminación fecal y su ausencia por lo tanto indica que el agua es bacteriológicamente segura para consumo, su presencia también es indicativa de que puede haber otros microorganismos causantes de enfermedades (Maier *et al.*, 2009). El grupo de coliformes fecales (CF) incluye los géneros *Escherichia* y *Klebsiella* y son de tipo Gram -, los enterococos fecales (EF) son bacterias tipo Gram+ y pertenecen a los géneros *Enterococcus* y *Streptococcus* (Maier *et al.*, 2009).

La normatividad aplicable para México en relación con las bacterias indicadoras de contaminación fecal considera a las CF y establece LMP (Anexo I), la NOM-001-SEMARNAT-1996 establece un LMP de 1,000 NMP/100 mL (DOF, 2003) y NOM-003-SEMARNAT-1997 establece un LMP de 240 NMP/100 mL (DOF, 1998). Para la chinampa Texhuilo se rebasan ambas normas en los tres apantles durante la temporada fría-seca (1) en las que se detectaron hasta valores entre 1×10^3 y 1×10^5 , se observa que disminuyen considerablemente hacia el resto de las temporadas en las que no se rebasa lo establecido las normas excepto el apantle sin manejo Texhuilo 3 que presentó valores de 300 UFC/100 mL en ambas temporadas cálida-lluviosa y fría-seca (2) (Figura 11a).

En el apantle Texhuilo 2 se obtuvo un conteo mayor de EF en la matriz agua durante las temporadas fría-seca (1), cálida-lluviosa y fría-seca (2), el conteo más alto fue de 12,442 UFC/100 mL (Figura 11b). Las condiciones del sedimento pueden impedir el crecimiento de las bacterias CF ya que en general este grupo tiene tasas de sobrevivencia cortas con respecto al grupo EF (Toranzos *et al.*, 2007), probablemente a ello se deba que las CF no se detectaron más que en la temporada cálida-lluviosa en la matriz sedimento (Figura 11c), en cambio los EF sí se detectaron de manera consistente en sedimento para todas las temporadas y apantles mostrando un incremento hacia la temporada fría-seca (2) en donde obtuvo un conteo de 50,000 UFC/100 mL en el apantle sin manejo Texhuilo 3 (Figura 11d).

Cabe señalar que los órdenes de magnitud incrementan considerablemente en el suelo comparados con los valores registrados en agua y sedimento. En agua encontramos un intervalo de 1×10^1 a 1×10^5 , en sedimento tenemos valores máximos de 1×10^5 y en suelo incrementa un orden más de magnitud hasta 1×10^6 (Figura 11f), esto se observa principalmente para las bacterias EF ya que nuevamente el grupo CF varía significativamente sin mostrar una tendencia aparente (Figura 11e).

Los sedimentos suelen ser los sitios en donde ocurre la mayor degradación de la materia orgánica y por lo tanto son sitios de alta actividad microbiana, lo mismo sucede con las capas de suelo que poseen grandes cantidades de materia orgánica; es común en sistemas acuáticos que las poblaciones de bacterias (en nuestro caso medidas por los conteos de CF y EF) sean mayores en varios órdenes de magnitud con respecto a los de la columna de agua (Wetzel, 2001). Los altos conteos que se observaron para los grupos CF y EF en las tres matrices de Texhuilo indican que hay una actividad microbiana importante que podría

favorecer la degradación de materia orgánica acumulada y el consumo de nutrientes; sin embargo, también se pueden favorecer condiciones de anoxia que perjudiquen a otras formas de vida acuáticas (Wetzel, 2001). Los resultados obtenidos en relación con los sedimentos son de suma importancia ya que representan procesos importantes en el sistema que pueden llegar a ser desfavorables de no manejarse adecuadamente.

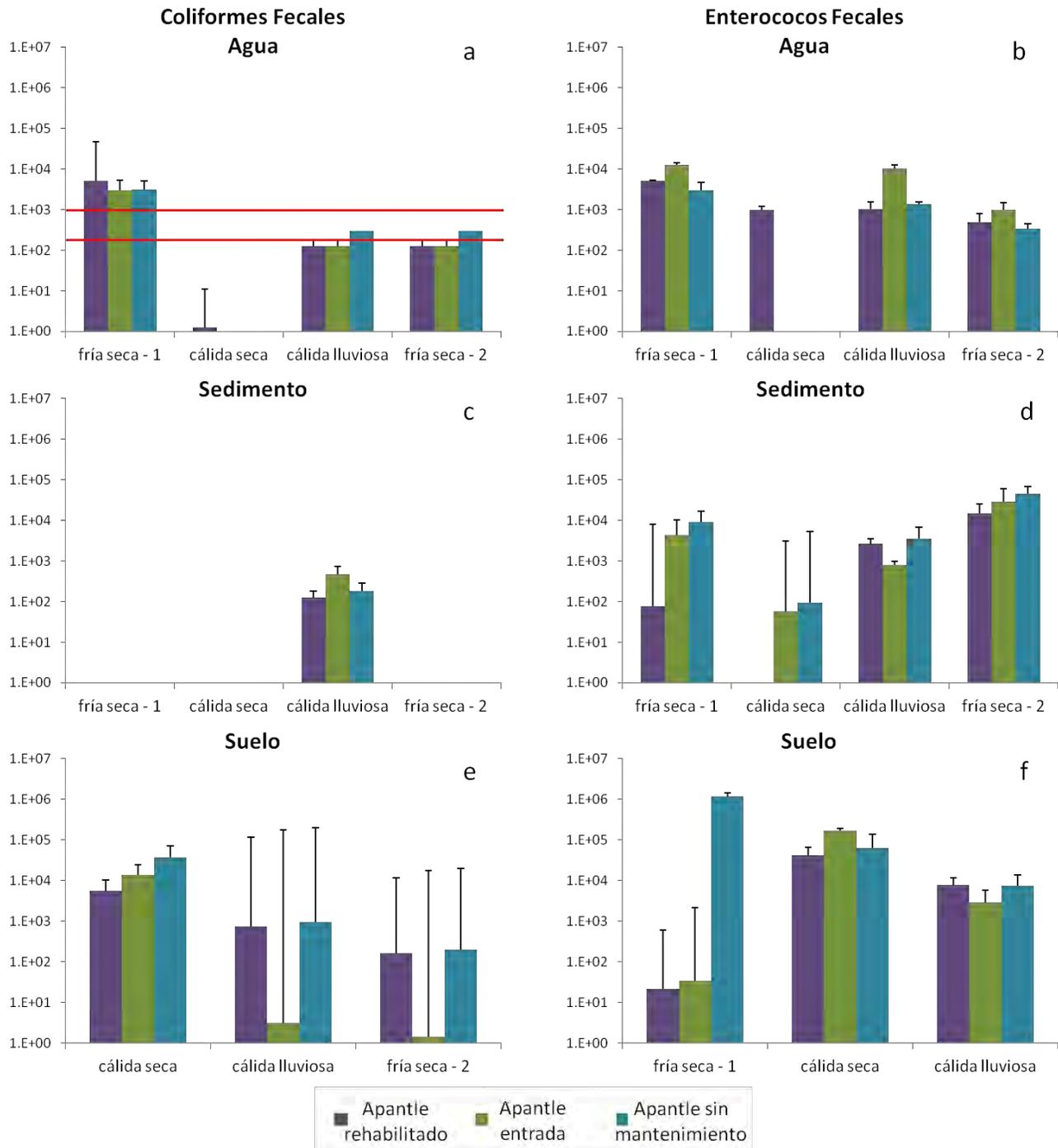


Figura 11. Bacterias coliformes fecales y enterococos fecales en agua, suelo y sedimento para la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012. Línea roja superior: límite máximo permisible para CF en la NOM-001-SEMARNAT-1996 línea inferior: NOM-003-SEMARNAT-1997 línea inferior. Unidades: UFC/100mL.

Bacteriófagos

La presencia constante de bacteriófagos en aguas contaminadas hace que sean un potencial indicador de contaminación de origen fecal de tipo viral, esto se debe a su estructura, morfología, tamaño y comportamiento en ambientes acuáticos (Maier *et al.*, 2009).

La determinación de bacteriófagos en los apantles de la chinampa Texhuilo presentó datos poco consistentes en las réplicas del muestro. No se detectaron bacteriófagos para las temporadas fría-seca (1) y fría-seca (2), tampoco hubo conteos para el apantle Texhuilo 1. Se alcanzan valores de hasta cuatro órdenes de magnitud, siendo el apantle Texhuilo 1 con manejo el que presentó el mayor conteo durante la temporada cálida-seca (Figura 12).

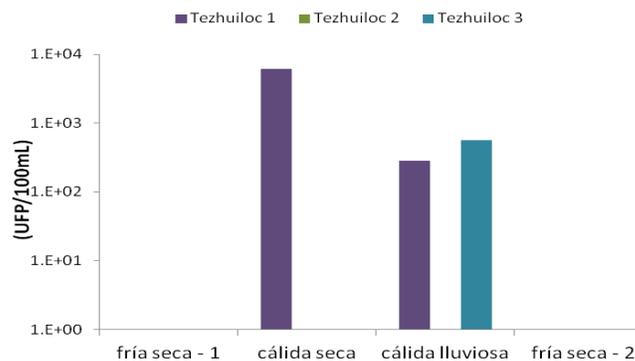


Figura 12. Bacteriófagos en agua de los apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.

Análisis estadístico de la chinampa Texhuilo

Los apantles de la chinampa Texhuilo se diferencian por tres tratamientos, un apantle con mantenimiento, apantle de entrada como aporte de agua a los apantles internos y un apantle sin uso, es decir, sin mantenimiento. Para observar el comportamiento de todos los parámetros analizados en este estudio se realizaron graficas de interacción para determinar el comportamiento de las variables por cada tratamiento en las cuatro temporadas de muestreo. El número de muestras para la chinampa Texhuilo fue de 36 para ambas matrices, agua y sedimento.

Para el caso de las variables en la matriz agua observamos una heterogeneidad en los apantles ya que se comportan independientemente uno del otro además de la variación que presentan por temporada. En algunas variables como el Oxígeno Disuelto, el pH y el DBO₅, los apantles se comportan cada uno de maneras distintas con una variación por temporada. En otras variables como Conductividad Eléctrica (CE), fósforo total (PT) y Coliformes Fecales (CF), la tendencia para todos los apantles es la misma en cada temporada pero el rango de los valores es distinto, principalmente el apantle sin mantenimiento posee valores bajos para CE y CF y altos para PT (Figura 13).

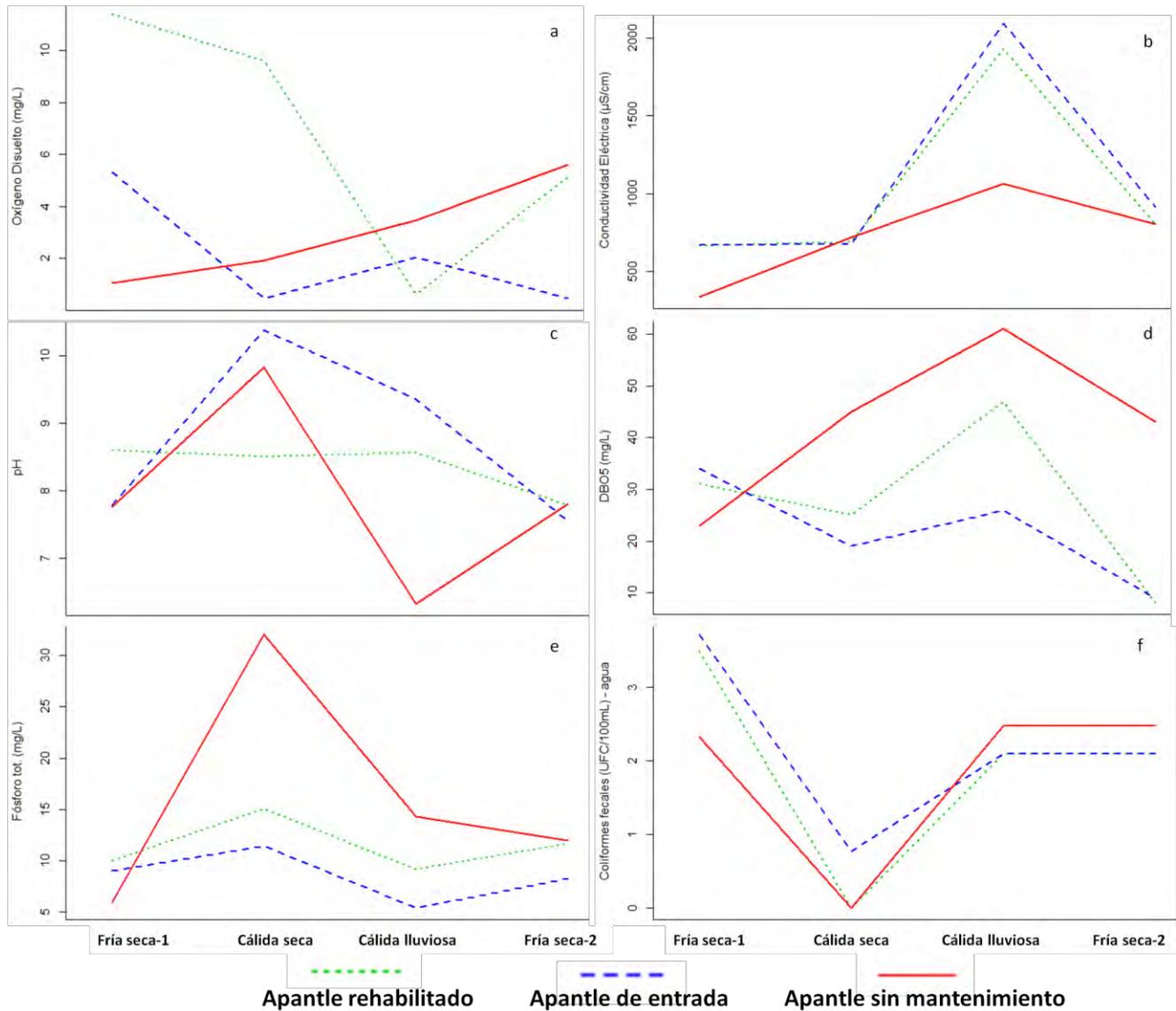


Figura 13. Gráficas de interacción de los parámetros en agua de los apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.

Las variables analizadas en sedimento muestran tendencias mucho más claras y similares entre los apantles de la chinampa Texhuilo con variaciones particulares debidas a las temporadas de muestreo, esto se observa en algunos parámetros como el OD, CF, PT y NT (Figura 14). Estos resultados implican que el sedimento es una matriz que se mantiene estable y que no se modifica por el uso o mantenimiento de los apantles, probablemente el

impacto al remover el sedimento sea a corto plazo y lo que afecta las concentraciones de los parámetros es la estacionalidad marcada principalmente por cambios en la temperatura y precipitación.

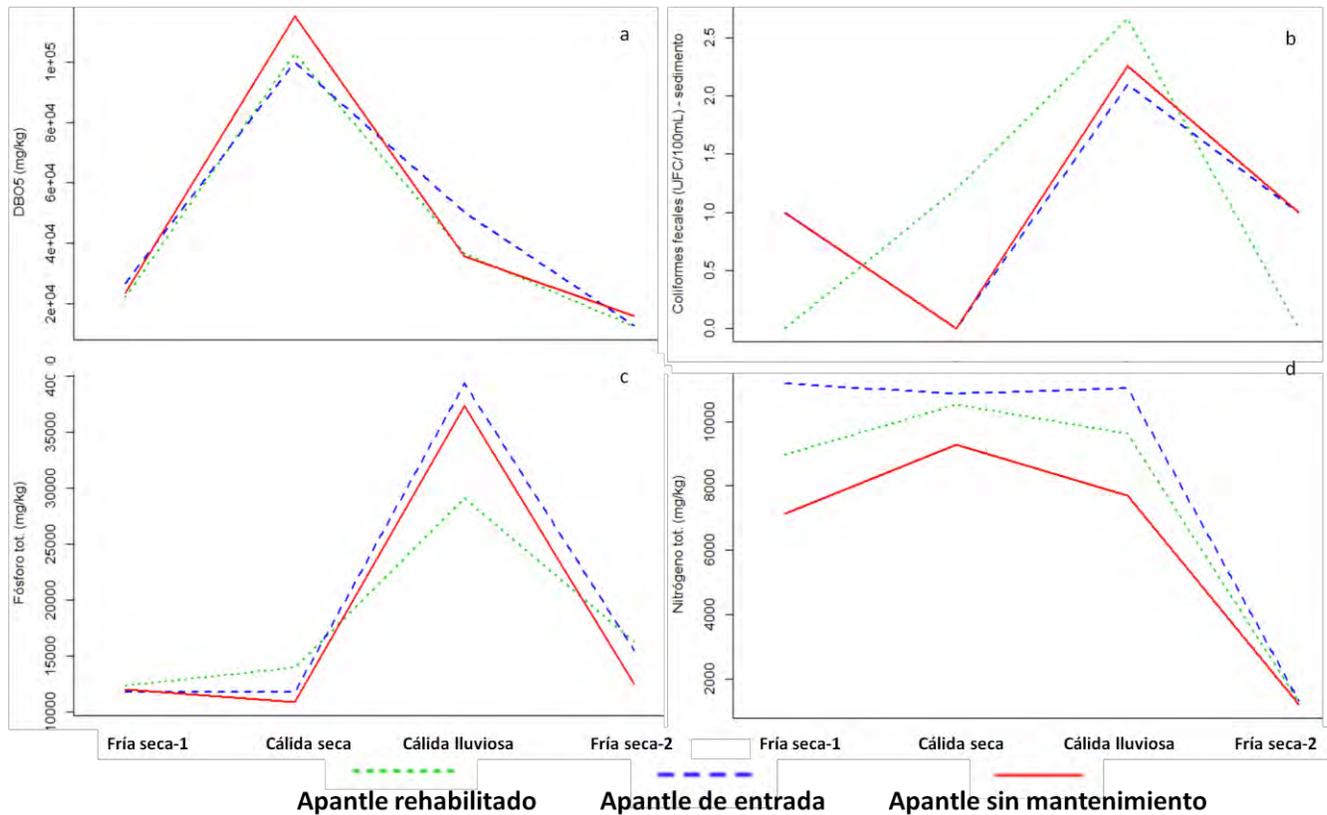


Figura 14. Gráficas de interacción de los parámetros en sedimento de los apantles de la chinampa Texhuilo durante el ciclo anual 2011-2012.

Las gráficas de interacción muestran sólo tendencias de comportamiento de las variables entre apantles y temporadas. El manejo en los apantles se propuso como medida de rehabilitación ya que se ha visto que una acción determinada, como el bombeo de agua del apantle, puede modificar las características del agua (Valiente *et al.*, 2010); sin embargo, es probable que tanto el mantenimiento como el monitoreo de los parámetros abióticos de calidad del agua deba ser mucho más constante, de manera mensual o incluso semanal,

para hacer más evidente y sensible el cambio en los parámetros del agua asociado con una acción en particular, ya que si se caracteriza a nivel de temporadas, los resultados no son evidentes. Por otro lado se sabe que las respuestas en sistemas acuáticos a la rehabilitación funcionan como tipo umbral, de esta manera un sistema puede no estar respondiendo de manera aparente, pero responderá una vez que se atraviesa este límite, de manera que pudiera ser abrupta (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2010), éste podría ser el caso de la chinampa piloto Texhuilo.

Comparación entre los sitios de estudio

Parámetros fisicoquímicos

En relación al Oxígeno Disuelto (OD), la chinampa Texhuilo presenta concentraciones de 2 a 6 mg/L, en el resto de los sitios predominan los valores por debajo de 5 mg/L, con la excepción de Trancatitla, en el que se observa un valor de 20 mg/L, este valor probablemente se deba a una interferencia en la medición (Figura 15a). Respecto a la temperatura se observa una tendencia similar entre sitios pero con diferencias propias de la estacionalidad, las temperaturas más altas se registran en la temporada cálida lluviosa y disminuyen en la fría seca-2 del año 2012, menores que el año anterior en la temporada fría seca-1 (Figura 15b).

Los sitios Texhuilo, San Gregorio y Trancatitla un comportamiento similar para los parámetros Sólidos Disueltos Totales (SDT) (Figura 15c) y Conductividad Eléctrica (CE) (Figura 15d), los valores más bajos los tienen los sitios San Gregorio y Santísima, mientras que Texhuilo tiene valores intermedios en un intervalo de 0.4 a 1 g/L y de 550 a 1,600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Todos los sitios presentan un incremento tanto de SDT como de CE en la temporada cálida lluviosa, en la que las lluvias pueden propiciar el arrastre de partículas y el lavado de suelos que hagan que estos valores incrementen. El pH para todos los sitios se registró entre 7 y 10, siendo Texhuilo y La Santísima los sitios con el pH más alcalino durante la temporada cálida-seca y cálida lluviosa respectivamente; en relación a este parámetro, Cuemanco es el sitio que posee un comportamiento distinto con respecto del resto (Figura 15e), Texhuilo se distingue también por tener valores de Potencial de Óxido-Reducción (ORP) predominantemente negativos con respecto al resto de los sitios, todos tienen

variación debido a la temporada, la cual tiende a presentar valores negativos en la temporada cálida lluviosa y valores positivos en la fría seca-2, lo cual es congruente con la disminución tanto de la temperatura como de la cantidad de OD (Figura 15f).

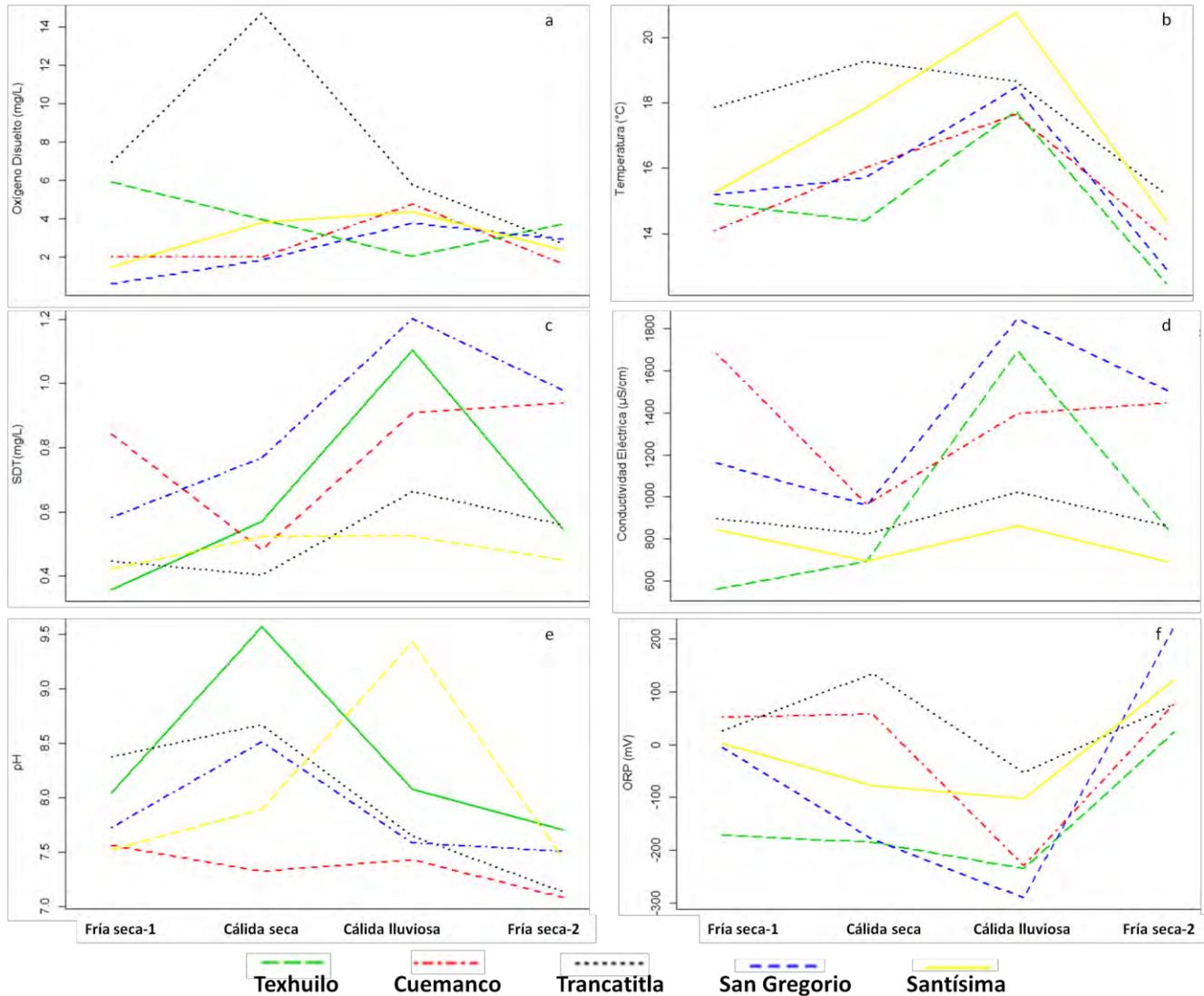


Figura 15. Parámetros fisicoquímicos en agua de los apantles de las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.

El porcentaje de Carbono Orgánico (CO) es más alto en agua que en sedimento, esto se debe probablemente al tipo de metodología utilizada para su obtención. El promedio para

todos los sitios de CO en agua es de un 10.7% y en sedimento de 8.3%; se observa que el sitio Trancatitla tiene porcentajes altos y San Gregorio bajos para la matriz agua y se comportan de manera opuesta a pesar de ambos pertenecer a zonas agrícolas (Figura 16a); Cuemanco presenta los porcentajes más bajos para la matriz sedimento (Figura 16b), no se observa ninguna tendencia clara para este parámetro principalmente en sedimento.

En cuanto a la normatividad aplicable en México, los valores de DBO₅ en agua rebasan la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece un LMP de 20 mg/L en todas las temporadas para la chinampa Texhuilo, únicamente el sitio Trancatitla rebasa lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (LMP 75 mg/L) durante la temporada cálida-lluviosa (Figura 16c). Los sitios Texhuiloc, Cuemanco y Trancatitla se comportan de manera similar con variaciones por temporada, a diferencia de San Gregorio y La Santísima. La DQO no presenta tampoco una tendencia clara entre sitios; sin embargo, Texhuilo tiene los valores más altos, en promedio de 140 mg/L para todas las temporadas, en comparación con el resto de los sitios que se encuentran entre 80 y 90 mg/L (Figura 16e).

Se aprecia que los valores de DBO₅ y DQO incrementan cuatro órdenes de magnitud en la matriz sedimento en comparación con los del agua, como se mostró anteriormente para el caso particular de Texhuilo, se observan tendencias similares para todos los sitios con excepción de San Gregorio, las diferencias por temporadas indican un incremento durante la temporada cálida-seca y disminución en la temporada cálida lluviosa (Figuras 14d y 14f). Esta tendencia entre los sitios para el sedimento muestra que los parámetros se mantienen similares en el agroecosistema independientemente de la zona, cuya variación depende

principalmente de la temporalidad. El sitio San Gregorio se muestra considerablemente distinto al resto ya que además tiene valores más bajos de estos parámetros.

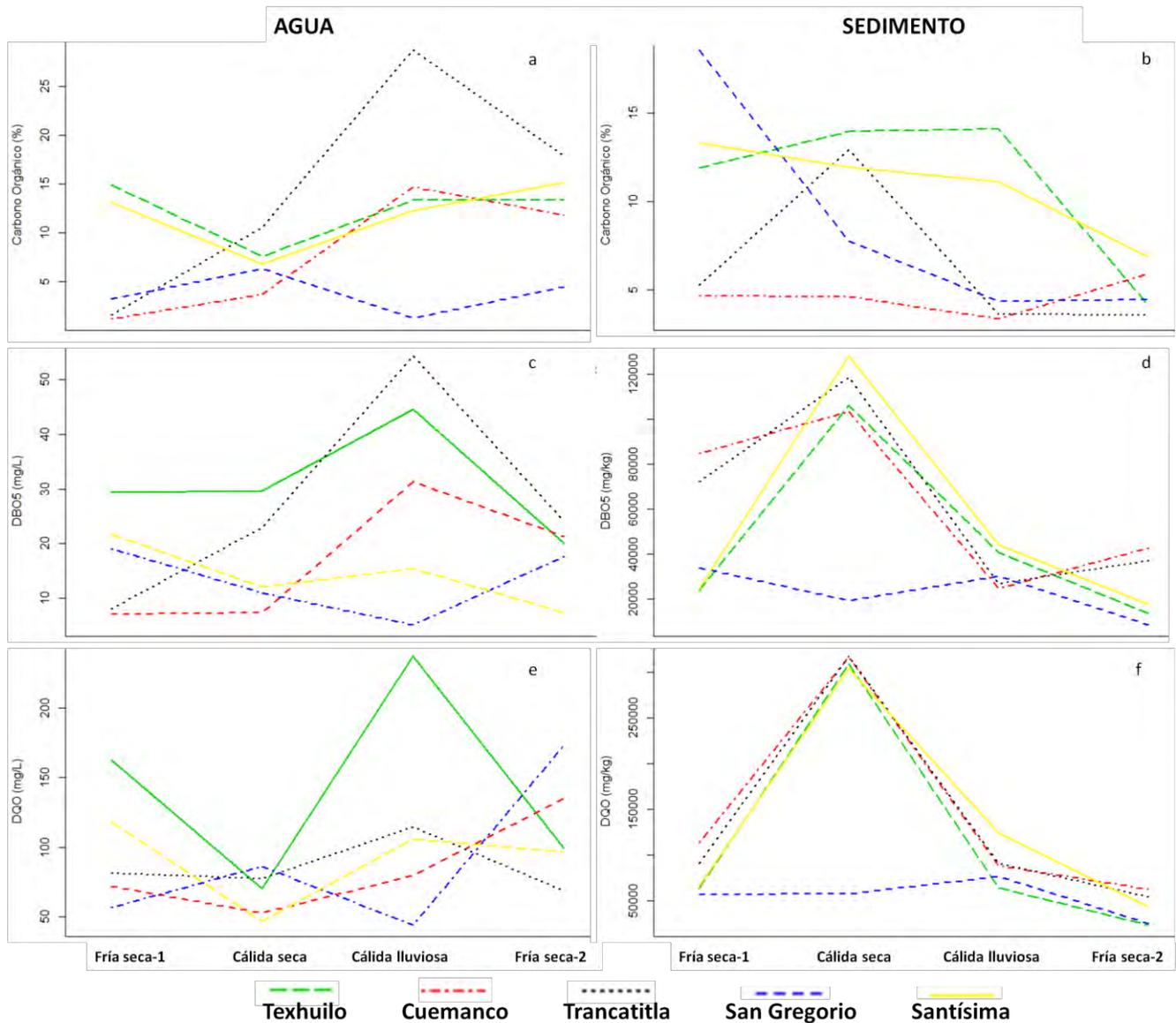


Figura 16. Valores de CO, DBO₅ y DQO para agua y sedimento en las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.

Nutrientes

En relación al fósforo total (PT) en agua no se rebasa lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 2003a) que establece el LMP de 20 mg/L (Figura 17a), comparativamente las concentraciones de PT son mayores que las de nitrógeno total (NT) (Figura 17c), para ambos parámetros se distingue que los sitios que tienen menores concentraciones son Cuemanco y San Gregorio para la mayoría de las temporadas. La tendencia para es similar para los sitios excepto La Santísima en cuando a PT aunque en las concentraciones sean distintas para cada sitio, en el caso de NT no es posible determinar una tendencia ya que cada sitio se comporta de manera diferente al resto (Figura 17a y 15b).

Al igual que en el análisis particular de Texhuilo, se observa que incrementan ambos parámetros cuatro órdenes de magnitud en sedimento (Figuras 15b y 15d), se observa una tendencia similar para todos los sitios en el caso del PT, lo que refuerza los resultados mencionados en el apartado anterior que indica que las características del sedimento varían principalmente por las condiciones propias de cada temporada. Las altas concentraciones indican también una acumulación de estos nutrientes en dicha matriz, por lo que si se practicasen las técnicas de agricultura tradicional el suelo podría enriquecerse de manera considerable para los cultivos que demandan estos nutrientes.

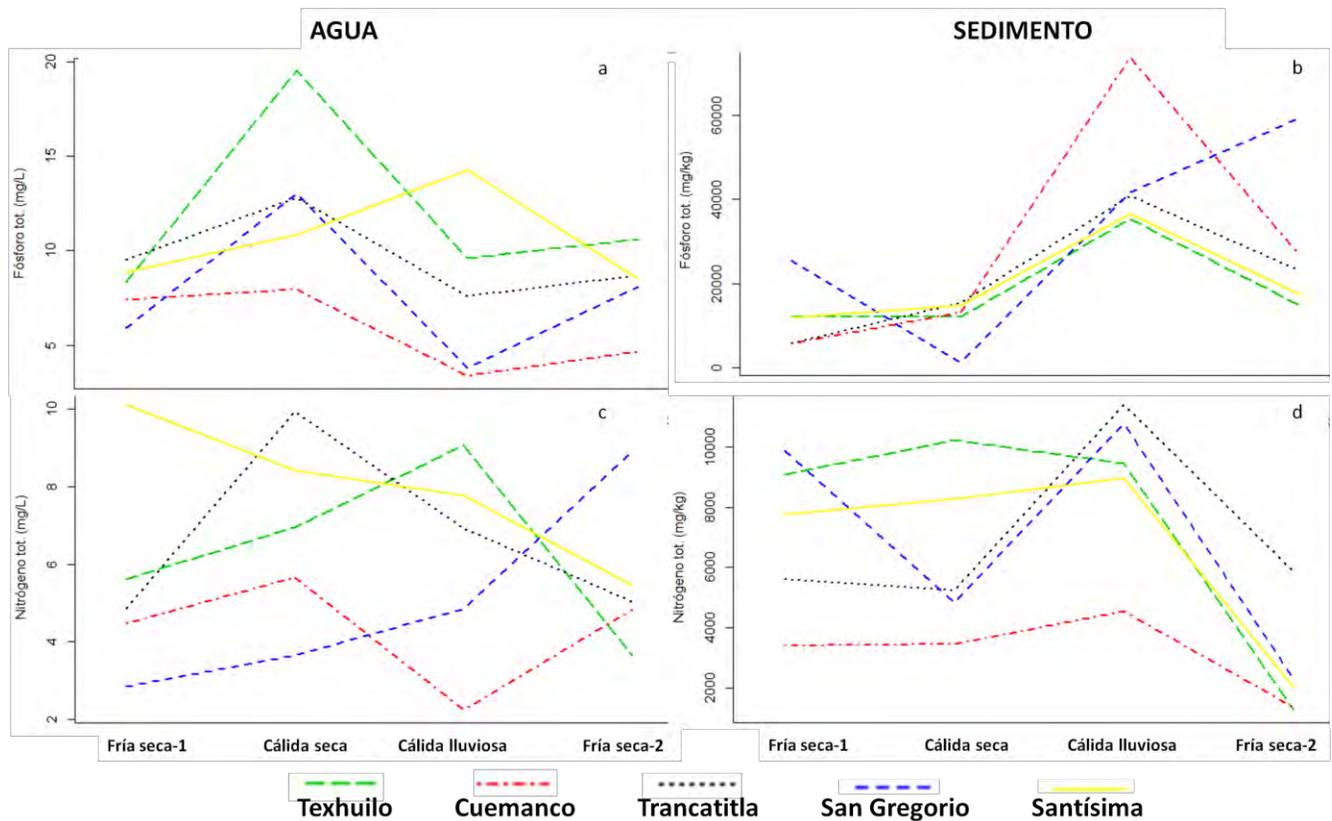


Figura 17. Fósforo total y nitrógeno total en la matriz agua y sedimento para las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.

Los valores varían no sólo para las concentraciones de nutrientes totales, sino también para sus fracciones. Los nitratos (NO_3^-) se encuentran en menor proporción con respecto al nitrógeno amoniacal (Figura 18a y 16b). En el caso de nitrógeno amoniacal (N-NH_3) el sitio Texhuilo tiene las concentraciones más bajas y los sitios San Gregorio y Santísima las más altas (Figura 18b). La tendencia es similar en Cuemanco y Trancatitla para N-NH_3 y PO_4^{3-} . Los ortofosfatos (PO_4^{3-}) son la fracción de nutrientes con las concentraciones más altas, lo que es consistente con los valores altos de PT sobre los de NT (Figura 18c).

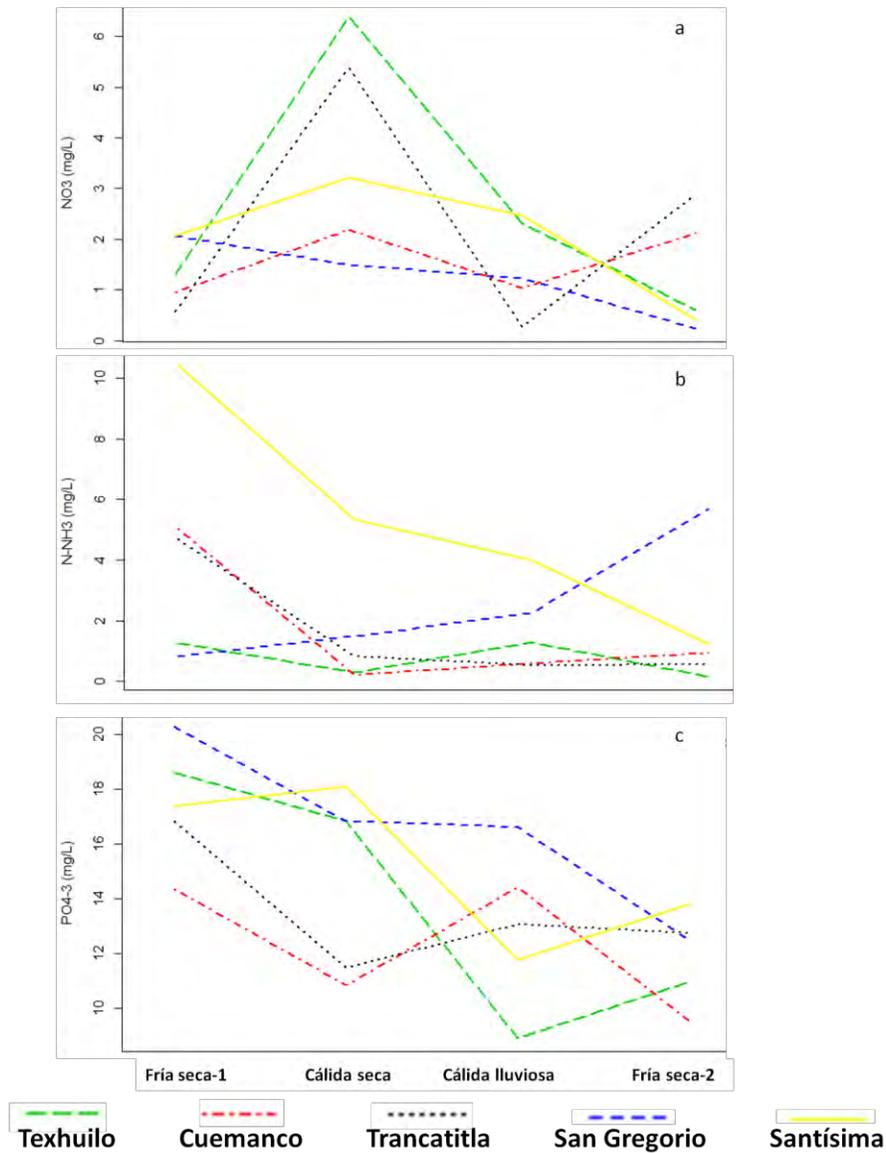


Figura 18. Fracciones nitratos (NO_3^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_3) y (PO_4^{-3}) en la matriz agua y sedimento para las cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.

Parámetros microbiológicos

Bacterias coliformes fecales y enterococos fecales

La carga de contaminantes de tipo orgánico, principalmente de origen fecal, propicia la presencia de coliformes fecales (CF) y enterococos fecales (EF) en el ambiente, es por ello

que los mayores conteos de CF se observan en el sitio Santísima tanto para la matriz agua (Figura 19a) como para sedimento (Figura 19c), ya que es la zona con mayor influencia urbana, que además carece de drenaje.

En todas las gráficas de interacción para los parámetros bacteriológicos podemos observar que en general los datos para CF son muy variables tanto por temporada como por sitio en las tres matrices: agua, sedimento y suelo (Figura 19a, 17b y 17c), esto puede deberse a que las bacterias CF tienen tasas de sobrevivencia más cortas que las bacterias del grupo enterococos, sobretodo en cuerpos de agua con características como las de Xochimilco (Toranzos *et al.* 2007).

Nuevamente los sitios Cuemanco y Trancatitla presentan tendencias similares variando únicamente por temporada de muestreo para todas las matrices, al igual que Texhuilo y La Santísima, esto indica que el comportamiento en el caso de los parámetros microbiológicos no están relacionados con la zona a la que pertenezcan, es decir, si son del área chinampera tradicional, tecnificada, urbana, etc.

Para la normatividad aplicable para México, principalmente durante la temporada cálida-lluviosa y fría-seca (2) en los sitios Cuemanco, Trancatitla y San Gregorio, y durante todas las temporadas para el sitio Santísima, se rebasan los LMP de CF tanto para la NOM-001-SEMARNAT-1996 (1,000 UFC/100 mL), como para la NOM-003-SEMARNAT-1997 (1,000 UFC/100 240 mL), Figura 19a (las gráficas se presentan en escala logarítmica).

El parámetro EF muestra una variación muy amplia entre sitios y temporadas para las tres matrices: agua, suelo y sedimento. Cabe resaltar que los órdenes de magnitud son elevados,

en agua se alcanza un orden de magnitud de 1×10^5 (Figura 19b), en sedimento de 1×10^1 hasta 1×10^6 (Figura 19d) y en suelo de 1×10^2 a 1×10^6 (Figura 19f).

Utilizando ambos parámetros microbiológicos es posible obtener un índice CF/EF que brinda una idea general del origen de la contaminación en agua, que resulta aún cuando presenta limitaciones por las diferentes tasas de sobrevivencia, la escala va de predominancia de contaminación fecal humana (>4), mezcla de desechos humanos y otros contaminantes (2-4), mezcla de desechos animales y otros contaminantes (0.7-2); y contaminación predominantemente animal (<0.7) (Toranzos *et al.*, 2007). De acuerdo con esta escala, podemos corroborar que el origen de la contaminación en el sitio Santísima es predominantemente humano, así como también en Trancatitla y San Gregorio durante la temporada cálida-lluviosa. En el sitio Cuemanco la contaminación es en buena medida de origen humano con una mezcla de otro tipo de contaminantes, en este caso el sitio se encuentra en una zona chinampera-urbana ya que hay actividades turísticas en el embarcadero Cuemanco, así como algunas instalaciones como la de la Policía Ribereña y salones de fiestas. Para Texhuilo el índice muestra evidencia de contaminación por desechos animales domésticos con mezcla de desechos humanos (Tabla 2).

Tabla 2. Índice CF/EF para los cinco sitios de estudio durante el ciclo anual 2011-2012.

Sitio de muestreo	Índice CF/EF			
	fs-1	cs	cII	fs-2
Texhuilo	0.7	0.0	0.1	0.3
Cuemanco	0.1	0.0	2.2	3.2
Trancatitla	0.0	0.0	5.7	7.2
San Gregorio	0.0	0.2	6.6	2.5
Santísima	6.6	49.2	10.7	5.4

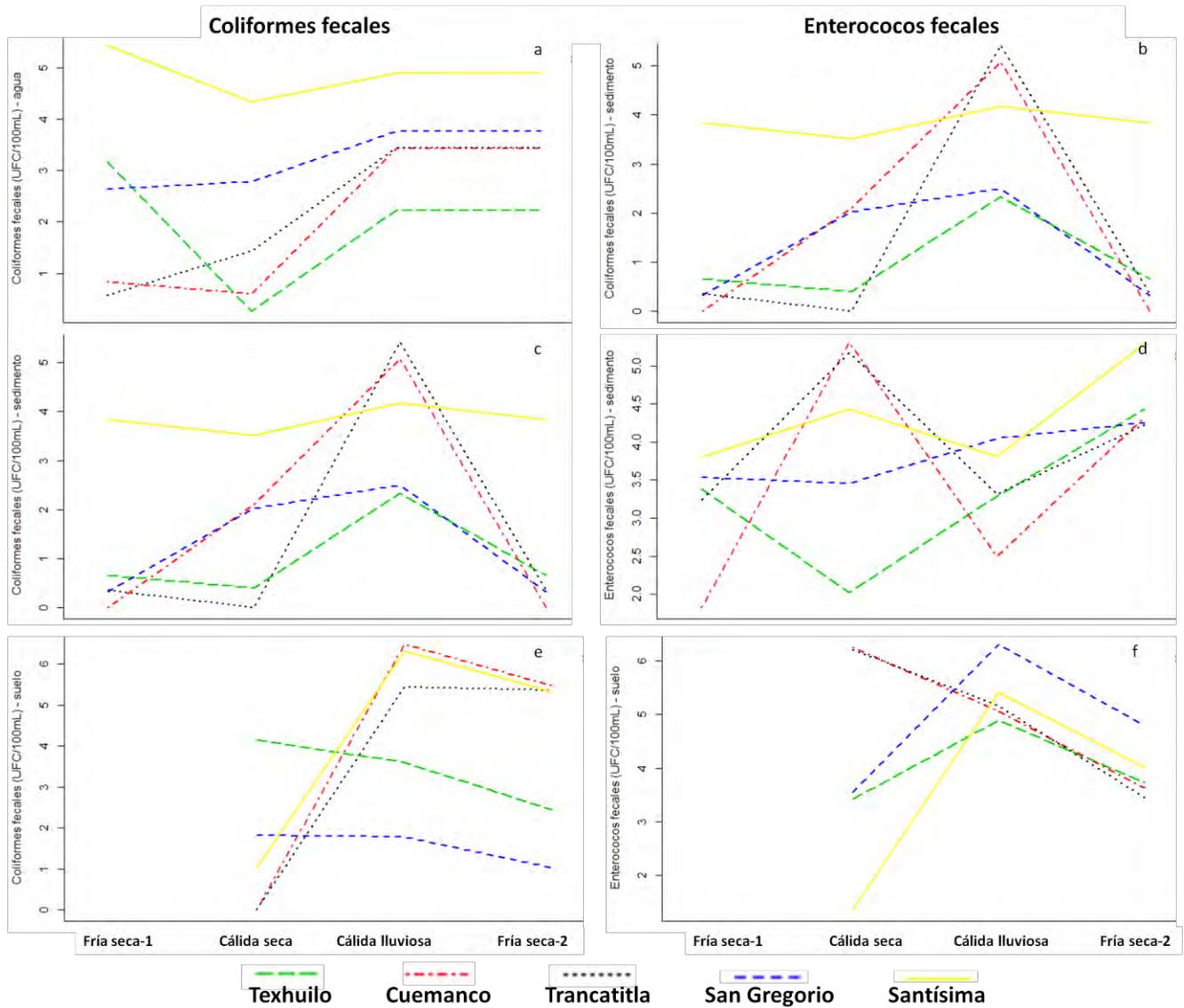


Figura 19. Bacterias coliformes fecales y enterococos fecales en agua, suelo y sedimento de la cinco chinampas estudiadas durante el ciclo anual 2011-2012.

Bacteriófagos

No se obtuvieron muestras positivas durante la temporada cálida-seca para Texhuilo, Cuemanco y Trancatitla ni durante la temporada fría seca (2) en los sitios Cuemanco y Trancatitla, por el contrario en San Gregorio y Santísima se detectaron bacteriófagos en todas las temporadas con órdenes de magnitud que van de 1×10^2 a 1×10^6 (Figura 20), Santísima al ser una zona urbanizada presenta niveles altos en los indicadores microbiológicos por las descargas de aguas residuales de las casas a los canales, en el caso de San Gregorio es una zona de agricultura tecnificada que además se ubica cerca de zonas con ganado y tiene cierta influencia de la zona urbana.

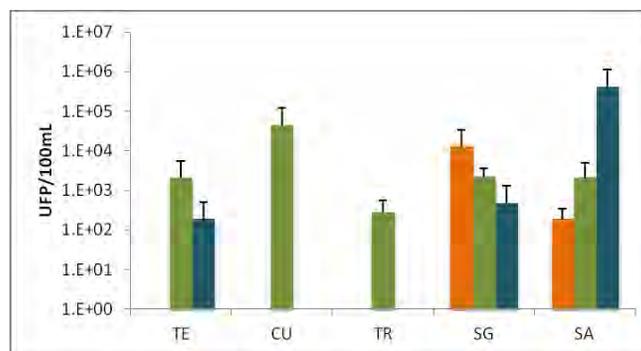
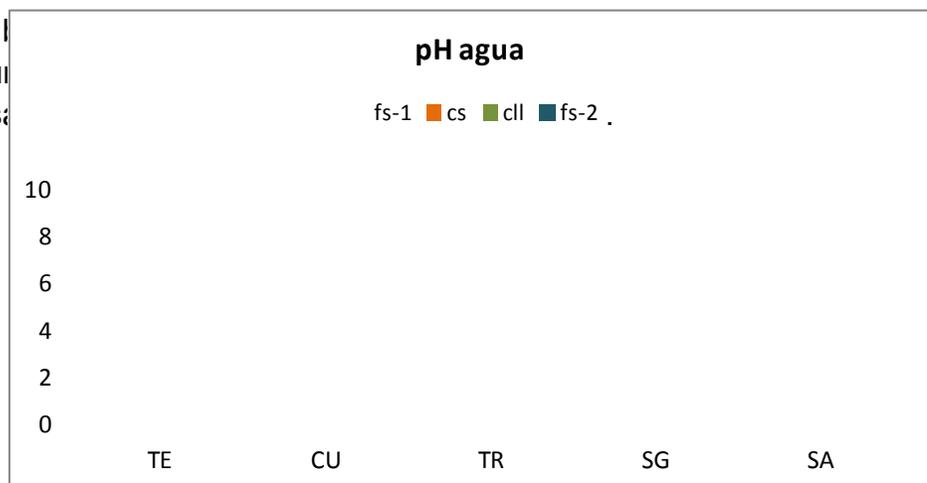


Figura 20. Cantidad de bacteriófagos en las muestras durante la temporada cálida lluviosa y



de (ja),

Análisis estadístico entre sitios de estudio

Para poder explicar el comportamiento de los sitios con respecto a las temporadas de muestreo y a las distintas características que poseen por el uso de suelo, el tipo de agricultura y rehabilitación (tratamientos) se realizó la prueba estadística de Análisis de Componentes Principales (ACP), de esta manera fue posible reducir la dimensión del número de variables, para ello la prueba de esfericidad de Barlett determinó que las variables tienen un valor de significancia de 0.0001 (Anexo II). El ACP se realizó de manera separada para la matriz agua y para la matriz sedimento.

El ACP para la matriz agua arrojó un total de cinco componentes principales que explican un 72.488% de la varianza total de los datos (Anexo II). Con respecto al componente 1 al obtener las gráficas de todos los sitios observamos que se agrupan hacia los valores positivos las chinampas Cuemanco (CU) y San Gregorio (SG), estas chinampas pertenecen a la zona *chinampera-urbana* y *chinampera-tecnificada*, respectivamente. Hacia los valores negativos se agrupan las chinampas Texhuilo (TE), Trancatitla (TR) que forman parte de la zona *chinampera tradicional* y la Santísima (SA) de la zona *urbana* (Figura 21a). En este caso, las variables positivas que agrupan a CU y SG son la Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT) y salinidad; por otro lado las variables negativas que agrupan al resto de los sitios están dadas principalmente por las fracciones de nutrientes fósforo total, PO₄-3, nitrógeno total y NO₃⁻, además del oxígeno disuelto (OD) y el pH (Tabla 3). Para el segundo componente de la matriz agua, los sitios se agrupan de manera muy similar, pero las variables que determinan su agrupación se observan contrarias al primer componente, es decir que los valores negativos, en este caso de las variables OD, salinidad

y pH se presentan en las chinampas CU y SG, y los valores positivos principalmente de las variables Carbono Orgánico (CO), DBO_5 , DQO, Coliformes Fecales (CF) y Enterococos Fecales (EF) se presentan para las chinampas TE, TR y SA (Figura 21b). Esto indica que los sitios TE, TR y SA, poseen mayor contaminación de origen microbiológico y los sitios CU y SG poseen probablemente mayor contaminación de origen químico.

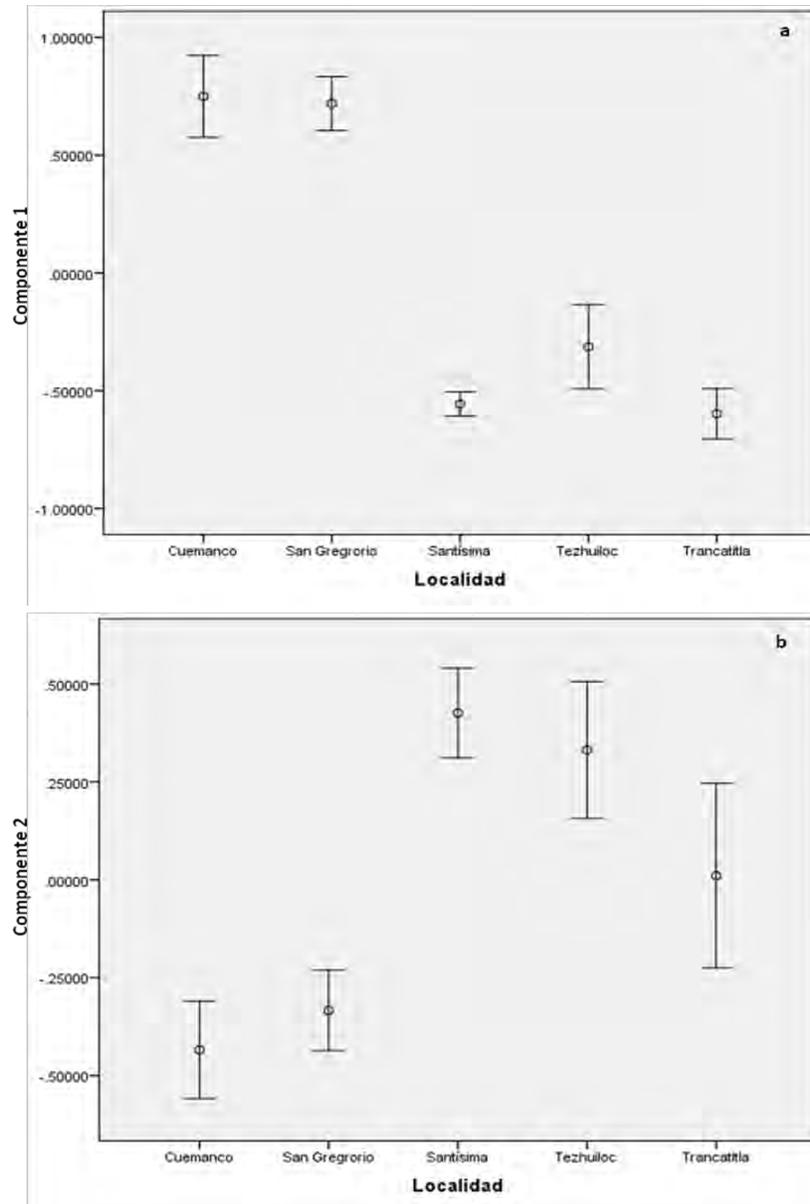


Figura 21. Chinampas de estudio con respecto al componente 1 (a) y componente 2 (b) para la matriz agua.

Tabla 3. Matriz de componentes principales para la matriz agua.

Variable	Componente				
	1	2	3	4	5
Ph	-.424	-.167	.318	.271	.523
Conductividad eléctrica	.910	.003	.266	.176	.054
Sólidos disueltos tot.	.884	.068	.300	.171	.176
Salinidad	.900	-.013	.298	.201	.113
Oxígeno disuelto	-.455	-.002	.328	-.127	-.331
Carbono Orgánico	-.214	.754*	.108	-.423	.149
DBO ₅	-.084	.777*	.411	-.263	.107
DQO	.201	.738*	.247	.086	-.103
Fósforo tot.	-.606	.117	.304	.348	.238
PO ₄ ⁻³	-.282	-.187	-.314	.072	.438
Nitrógeno tot.	-.366	.483	.167	.572	-.286
N-NH ₃	.007	.173	-.416	.640	-.347
NO ₃ ⁻	-.395	-.074	.411	.400	.175
Coliformes fecales	.121	.505	-.686	.112	.132
Enterococos fecales	.131	.453	-.601	.118	.343

El ACP para las variables en sedimento arrojó tres componentes principales que explican el 71.2% de la varianza total de los datos (Anexo II). En la gráfica del primer componente en relación a los sitios de estudio se observa que las chinampas CU, TE, TR y SA se agrupan al tener valores positivos principalmente de las variables DBO₅, DQO y CO (Figura 22a, Tabla 4). Por el contrario, el sitio SG se separa del resto principalmente por las variables fósforo total y CF cuyos valores son negativos en el primer componente (Figura 22a). Con respecto al segundo componente, la variabilidad observada es mayor para todos los sitios ya que no se observa alguna agrupación clara; en este caso los valores negativos para las chinampas se deben a las variables DBO₅ y EF, y los valores positivos a las variables nitrógeno total, CO y CF (Figura 22b, Tabla 4). Como se mencionó en secciones anteriores, las variables

muestran mayor estabilidad en la matriz sedimento y no se observan diferencias entre los sitios de estudio, así como tampoco por temporada.

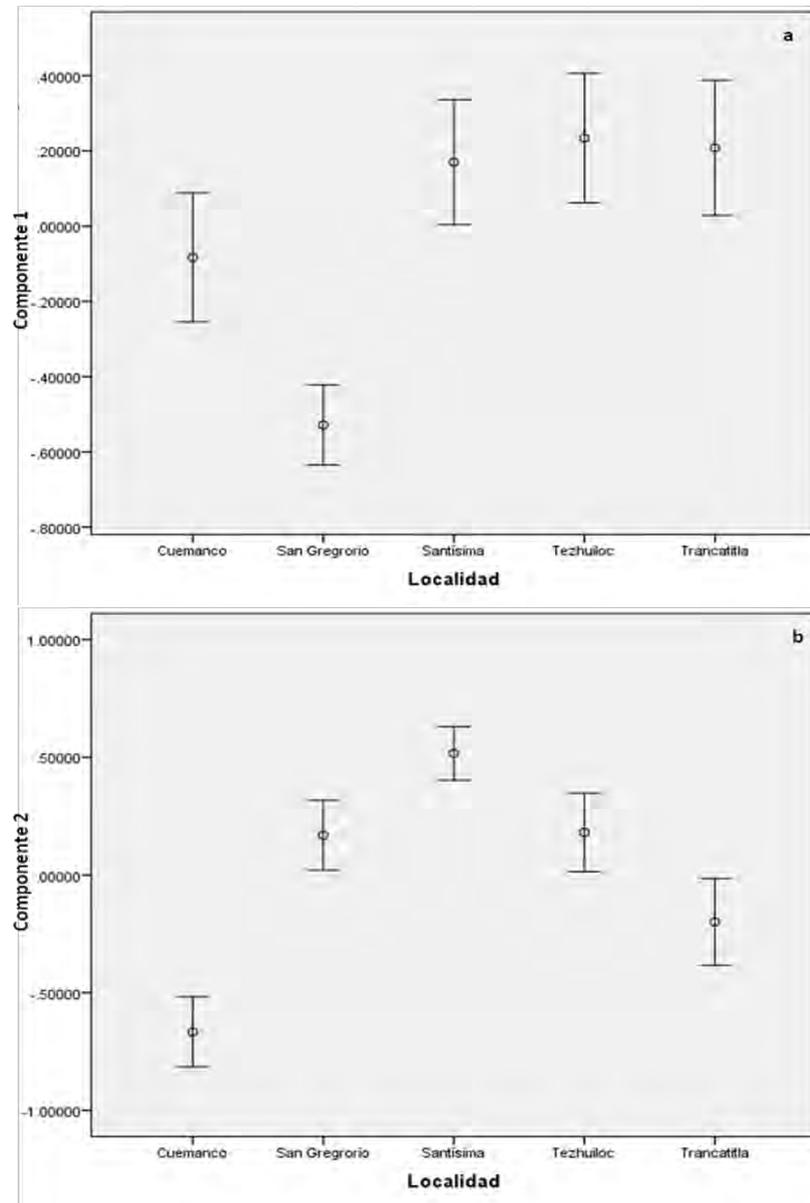


Figura 22. Chinampas de estudio con respecto al componente 1 (a) y componente 2 (b) para la matriz sedimento.

Tabla 4. Matriz de componentes principales para la matriz sedimento.

Variable	Componente		
	1	2	3
Fósforo tot.	-.583	.334	.293
Nitrógeno tot.	.274	.823	-.207
Carbono Orgánico	.521	.519	-.226
DBO ₅	.905	-.135	.206
DQO	.866	-.012	.362
Coliformes Fecales	-.283	.588	.580
Enterococos Fecales	.014	-.179	.670

Análisis de metales

Los metales pesados son elementos que se encuentran de manera natural en el ambiente; sin embargo, las concentraciones pueden incrementarse por la contaminación derivada de las actividades humanas, algunos metales como el Cromo (Cr), Arsénico (As) y Mercurio (Hg) están presentes en agroquímicos como plaguicidas y fungicidas; la actividad minera también contribuye a su liberación en el ambiente y por las aguas residuales derivadas de la industria en general (Maier *et al.*, 2009).

Se evaluó la concentración de los metales pesados: arsénico (As), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) en las cuatro matrices: agua, sedimento, suelo y hortalizas. Los resultados se muestran en el Anexo II para los cinco sitios estudiados.

Se realizó un análisis comparativo con la normatividad mexicana y con recomendaciones a nivel internacional para determinar si su presencia en el agroecosistema en Xochimilco representa algún grado de toxicidad tanto para el ambiente como para las personas que practican alguna actividad en ellas. La NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 2003a) establece los LMP de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Anexo I), los valores detectados para la matriz agua no rebasan los LMP recomendados en dicha norma para agua con la característica de “uso en riego agrícola” (Anexo III).

Para sedimentos no existe una normatividad mexicana específica; sin embargo, se puede considerar lo establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2003b) en la cual se determinan los límites máximos permisibles de contaminantes para lodos y biosólidos susceptibles de aprovechamiento. En su terminología, un biosólido se define como: “lodos

que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento”. Dada esta definición se puede considerar a los sedimentos de los canales de Xochimilco como un tipo de biosólido ya que son utilizados para la agricultura, específicamente en la producción de almácigos. En ninguna de las muestras analizadas en este estudio se rebasan los límites establecidos por dicha norma (Anexo III).

El organismo estadounidense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) ha publicado una serie de referencias para definir aguas con afectaciones “agudas” o “crónicas” y para predecir un gradiente de toxicidad con base en las concentraciones de metales pesados, tanto en aguas superficiales como en sedimentos de cuerpos de aguas continentales; los valores obtenidos en agua de los canales de Xochimilco rebasan únicamente lo establecido por la NOAA en Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en el sitio Cuemanco, lo que corresponde de acuerdo a sus categorías a un cuerpo de agua con una afectación “aguda” (NOAA, 2004). En cuanto a sedimentos los sitios que tienen “posibles afectaciones” en relación con la toxicidad son la chinampa Texhuilo para As, La Santísima para As, Cu y Zn; y San Gregorio para Cu y Hg (Anexo III) (NOAA, 2004).

En el caso del suelo en los cinco sitios de estudio y para las hortalizas analizadas en Texhuilo (lechuga italiana, lechuga sangría, cilantro, verdolaga y quelites), las concentraciones más altas las presentó el Zn y las menores el Hg (Figura 23). Para las matrices agua y sedimento los metales predominantes son el Zn y el Pb en todos los sitios de estudio.

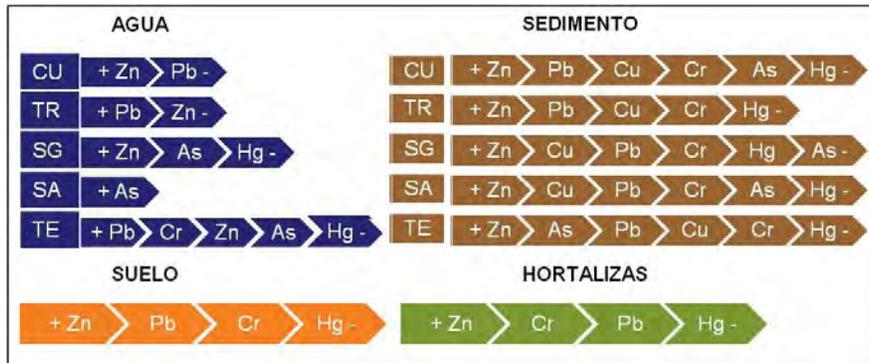


Figura 23. Metales presentes en las matrices agua, sedimento, suelo y hortalizas colocados de mayor a menor concentración por sitio de muestreo.

A pesar de que las concentraciones encontradas de metales pesados no representan un grado de toxicidad severo (NOAA, 2004), es importante señalar que su presencia interviene en una serie de procesos que son importantes para los humedales, por ejemplo, a esas concentraciones la microbiota puede sufrir debido a la toxicidad que le generan metales como el As, Pb y Hg, aunque algunos metales también pueden resultar esenciales para el metabolismo como el Zn y el Cu en bajas concentraciones (Maier *et al.*, 2009).

Los metales generalmente se encuentran en las matrices ambientales como cationes, es decir, que poseen cargas positivas, esto favorece su adsorción a superficies que poseen cargas negativas como las arcillas minerales, sales aniónicas como fosfatos y sulfatos, así como materia orgánica; de igual manera pueden adsorberse a las membranas de los microorganismos cargadas negativamente provocándoles una toxicidad (Maier *et al.*, 2009). El comportamiento químico de los metales también está dado por las condiciones de óxido reducción y de pH; bajo condiciones aeróbicas (+800 – 0 mV) y pH ácidos los metales pueden encontrarse solubles en formas de cationes, en contraste con condiciones

anaerobias (0 a -400 mV) y de pH alcalinos en los que los metales se encuentran insolubles y se favorece su precipitación (Maier *et al.*, 2009). Se sugiere por lo tanto que dadas las condiciones del agua en general en el agroecosistema de Xochimilco, con valores de ORP negativos y pH entre 7 y 10 para agua, pH de 6.2 a 7.4 en sedimento y de 7 a 7.7 en suelo, los metales permanecen insolubles y precipitados en el sedimento, lugar en donde se registró la mayor concentración de metales.

Análisis bacteriológico de hortalizas

Se analizaron varios tipos de hortalizas en las cinco chinampas de estudio, no hubo homogeneidad en el tipo de hortaliza colectada debido a que se tomaron muestras del cultivo presente en el momento del muestreo. Estas hortalizas están regadas con el agua de los canales que rodean a las chinampas excepto en el caso de La Santísima, ya que se eligió un terreno con un uso de suelo habitacional y no agrícola, en él crecen plantas de manera silvestre y entre ellas algunos quelites comestibles y acelgas que fueron colectadas para este estudio. Las hortalizas que se analizaron fueron: lechuga italiana, lechuga en almácigo, cilantro, epazote, espinaca, quelite, quelite cenizo, verdolaga, lengua de vaca, perejil y acelga, en todos los casos se utilizaron 25 gr de muestra.

Únicamente en cinco casos se obtuvieron conteos de CF extraídas del lavado de las hojas de las hortalizas en un orden de 1×10^4 a 1×10^5 , por lo que no se refleja de manera consistente la presencia de este grupo de bacterias en las plantas (se tomaron un total de 30 muestras, dos por sitio en tres temporadas y cada una por triplicado, dando una muestra de $n=90$). Por otro lado el indicador EF arrojó datos en todas las muestras, esta diferencia en la detección de cada indicador se puede deber a que la tasa de sobrevivencia de las CF es más corta que la de EF y las bacterias en la superficie de las hojas están expuestas al viento, la lluvia y la radiación solar, condiciones que las afectan (Toranzos *et al.*, 2007).

Al analizar los datos de EF por tipo de hortalizas no se observaron diferencias significativas, se observó que la densidad radica en los tiempos de riego y probablemente en la etapa del cultivo, a pesar de que se procuró tomar muestras en etapa de cosecha (Figura 24). Las prácticas de cultivo en Xochimilco incluyen la siembra y germinación de las semillas en

almácigos, semilleros que se hacen utilizando sedimento o agua-lodo que se extrae de los canales, una vez que las plántulas alcanzan cierto talle son trasplantadas al terreno de cultivo (González-Pozo, 2010). Una de las muestras analizadas fue una lechuga en etapa de plántula en almácigo de la chinampa Texhuilo, en la que se detectaron EF en un orden de 1×10^4 UFC/100 mL (Figura 24a), es por ello que se sugiere que la etapa del cultivo influye en la cantidad de bacterias que hay en su superficie debido a la gran cantidad de bacterias presentes en los sedimentos como ya se mencionó anteriormente.

Ya que no se observaron diferencias entre tipos de hortalizas se puede suponer que la presencia de este tipo de indicadores se deba principalmente al riego. El riego actualmente se efectúa por encima de los cultivos bombeando agua de los canales. Los órdenes de magnitud en los que se detectaron EF por sitio fueron de 1×10^2 a 1×10^3 en la chinampa Texhuilo (Figura 24a), de 1×10^1 a 1×10^4 en la el sitio Cuemanco (Figura 24b), de 1×10^1 a 1×10^5 en la chinampa Trancatitla (Figura 24c), de 1×10^2 a 1×10^5 en la chinampa San Gregorio (Figura 24d) y de 1×10^2 a 1×10^3 en el sitio Santísima (Figura 24e), siendo los valores más altos detectados en Trancatitla, San Gregorio y Cuemanco. Si relacionamos estos datos con la densidad de EF en agua, podemos ver que San Gregorio tiene valores elevados de EF en agua, al igual que Santísima, en este último caso la cantidad de EF en el agua no influye sobre la de las hortalizas ya que se tomaron muestras de plantas “silvestres” y no cultivadas.

En un estudio efectuado hace 30 años, se analizó la presencia de CF en hortalizas de la zona de San Gregorio, reportan una densidad de CF entre 1×10^2 a 1×10^3 (NMP/100 mL) en 100 gr de muestra (Rosas *et al.*, 1984). Esto sugiere que la contaminación de origen fecal

tanto en agua como en hortalizas se ha mantenido e incluso incrementado a lo largo del tiempo probablemente por la influencia de los asentamientos humanos y las descargas de aguas residuales al sistema. En un estudio más reciente se reporta también la presencia de CF en lechuga y cilantro cultivados en Xochimilco, analizaron también la presencia de bacterias después de la desinfección por cloración y se observó una remoción de casi el 100%, es por ello que es de suma importancia que se tomen medidas tanto en el agua que es utilizada para el riego como en la desinfección de las hortalizas previo al consumo (Chávez, 2002).

La presencia de fagos que se detectó tanto en agua como en hortalizas en este trabajo, puede representar un riesgo potencial para la salud humana ya que estudios previos han determinado que las prácticas de riego permiten la transferencia de virus, no sólo bacteriófagos como indicadores de la posible presencia de virus, sino también de virus entéricos que pueden prevalecer en las hortalizas hasta siete días (Espinosa-García, 2009; Vázquez, 2012). Por lo tanto es de suma importancia procurar que la calidad del agua sea adecuada en relación a la contaminación microbiológica y en la desinfección de hortalizas para el consumo humano.

En las hortalizas analizadas se detectaron órdenes de magnitud de hasta 1×10^4 en Cuemanco y Trancatitla, hasta 1×10^2 en San Gregorio y 1×10^1 en Santísima, en Texhuilo no se detectaron bacteriófagos en ninguna hortaliza.

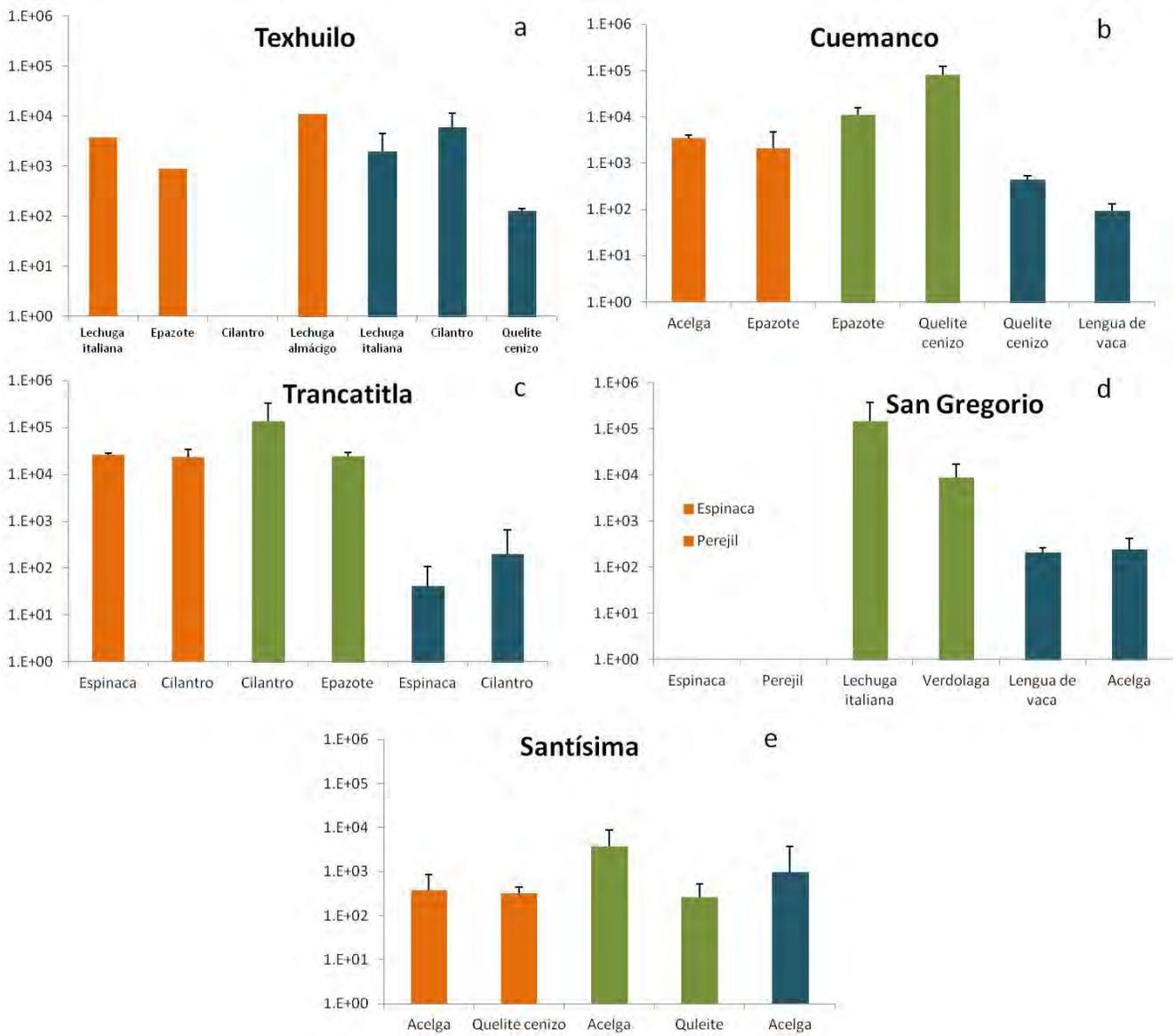


Figura 24. EF para cada tipo de hortaliza en los cinco sitios de muestreo durante el ciclo anual 2012. Temporadas cálida seca (naranja), cálida lluviosa (verde) y fría seca 2 (azul) ■ cs ■ cl ■ fs-2 .

Conclusiones

- El agroecosistema de Xochimilco presenta una alta estratificación geográfica, es decir, una alta heterogeneidad que no sólo se debe a la actividad predominante del área en la que se encuentra (turística, urbana, agrícola tecnificada o tradicional) sino a las condiciones de cada chinampa a menor escala. Dicha heterogeneidad se refleja en las variables tanto de las matrices agua, sedimento, suelo y hortalizas; es por ello que al considerar la implementación de algún plan de manejo o de rehabilitación es necesario tener en cuenta que éstas medidas deben estar planteados para cada sitio o chinampa en particular y con el objetivo de recuperar funciones que involucren varios componentes del agroecosistema.
- El Análisis de Componentes Principales permite ver una relación entre la chinampa piloto Texhuilo y la chinampa Trancatitla, esto es congruente ya que ambos sitios se encuentran en una zona previamente catalogada como chinampera-tradicional. El sitio La Santísima también se agrupa con estas dos chinampas en el análisis de ACP para agua. Principalmente las variables que explican que estas chinampas se agrupen son los relacionados con actividad microbiana.
- Los sitios Cuemanco y San Gregorio poseen condiciones similares con base a los parámetros analizados en el Análisis de Componentes Principales tanto para la matriz agua como para la matriz sedimento, estas chinampas corresponden a la zona chinampera-urbana y a la chinampera-tecnificada respectivamente. Se puede decir que las prácticas agrícolas que implican el uso de técnicas modernas como el uso de agroquímicos están modificando al sistema de manera similar a la urbanización,

aunque no de manera tan evidente como en La Santísima que se encuentra en un área altamente urbanizada y que tiene características que lo hacen distinto del resto de los sitios estudiados en algunos de los parámetros.

- Las concentraciones de más de cuatro órdenes de magnitud de las variables DB_{O_5} , DQO, fósforo y nitrógeno que se registraron en los sedimentos muestran de una acumulación tanto de nutrientes como de materia orgánica en esta matriz. En su mayoría, los parámetros analizados en sedimento presentan comportamientos similares aunque con rangos distintos y con una variación principalmente estacional. Esto refleja que las condiciones del agroecosistema siguen siendo ideales para la agricultura ya que aporta los elementos necesarios para fertilizar los terrenos, por lo que no se requiere de fertilizantes y se reduce tanto el trabajo como la inversión de los agricultores.
- La concentración de metales en agua y sedimento, en lo referente a las recomendaciones de carácter internacional, representan una afectación “aguda” para el agua en el sitio Cuemanco y “posibles afectaciones” en el caso de sedimentos de los sitios La Santísima (zona principalmente urbana), Cuemanco y San Gregorio (zona chinampera-urbana y chinampera-tecnificada).
- La presencia de bacterias en las hojas de las hortalizas puede ser regulada por condiciones ambientales como la radiación; sin embargo, se detectó la presencia de microorganismos en las hojas probablemente debido al tipo de riego utilizado en los cultivos que actualmente se realiza bombeando agua de los canales sobre los cultivos.

Recomendaciones

- Es necesario enfocar proyectos y propuestas de recuperación de la chinampería tradicional ya que de ello depende principalmente que las condiciones del sistema cambien en forma positiva, si se retoma el uso de las chinampas como un subsistema de manera integral considerando también el uso y mantenimiento de los apantles, se podrían modificar las condiciones bióticas y abióticas hacia una mejora de la calidad del agua y la calidad de los cultivos para que así se reactive el enorme potencial que tiene este agroecosistema como un sistema de agricultura sustentable. Esto no sólo mejoraría ambientalmente al agroecosistema, sino también la calidad de vida de los habitantes de Xochimilco y por lo tanto de los habitantes de la ciudad de México.
- Al rehabilitar una chinampa es importante tomar en cuenta que el manejo debe ser constante ya que los cambios se dan por lo general a pequeña escala y en periodos de tiempo cortos, es necesario también considerar el monitoreo de parámetros sencillos de calidad del agua como la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales, que bastan para determinar los cambios en el sistema. Para poder detectar de manera más clara los efectos de una acción de rehabilitación en particular, es necesario que tanto el mantenimiento y limpieza de los apantles, como el monitoreo de los parámetros sea continuo, idealmente se debería contar con un dispositivo digital instalado de manera fija que proporcione datos durante el todo el día y la noche de manera anual.
- Retomar las prácticas de chinampería tradicional y mejorar la calidad del agua con la que se riegan los cultivos mediante técnicas sencillas puede mejorar también la

calidad de los productos cultivados en Xochimilco, ya que mediante estas prácticas se les puede proporcionar un valor agregado al ser producidos bajo un esquema de agricultura sustentable, lo cual es de interés tanto para los agricultores como para los consumidores, de esta manera también se recuperarían los servicios ecosistémicos para los habitantes de la ciudad de México que se están perdiendo. Para ello también es necesario evitar el uso de agroquímicos, mejorar la calidad del agua tratada que se vierte a los canales y regular las descargas de aguas residuales para evitar que incrementen las concentraciones de contaminantes como nutrientes, metales y microorganismos al sistema. De igual manera se debe de poner especial atención a los sedimentos para evitar la remoción de los mismos, ya que esto podría derivar en la liberación de metales y otros compuestos a la columna de agua.

Literatura citada

Abarca F. J. Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: Sánchez O., M. Herzig, E. Peters, R. Márquez-Huitzil y L. Zambrano (Ed.). 2007. *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. D.F. 2007.

American Public Health Association (APHA), American Water Work Association, Water Environmental Federation. 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21^a ed. Port City Press. Washington, D. C. 9-56 a 9-76.

Aguilar A., A. C. Espinosa-García y C. Caraballo. 2006. El manejo del agua tema central en Xochimilco. En: UNESCO-México. 2006. *Xochimilco, Un proceso de gestión participativa*. UNESCO. 183-199 pp.

Aguilar M. J. 2007. Detección de factores de virulencia de *Escherichia coli*, *Shigella* y *Salmonella* en agua superficial y subterránea de Xochimilco. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Biología Ambiental. México. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México. 43 pp.

Banco Mundial. 2013. *Agua urbana en el Valle de México: ¿un camino verde para mañana?* Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. México D.F., México. 73 pp.

Bradshaw A. D. Introduction and philosophy. En: Perrow M. y A. J. Davy. 2002. *Handbook of Ecological Restoration. Vol. I. Principles of Restoration*. Cambridge University Press. Cambridge. 444 pp.

Bojórquez L. y Villa F. 1995. El ecosistema lacustre. Xochimilco y el deterioro de las chinampas. En: Rojas T. (coord.). 1995. *Presente, pasado y futuro de las chinampas*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Patronato del Parque Ecológico de Xochimilco, México. D.F. 324 pp.

Castillo A., A. Magaña, A. Pujadas, L. Martínez y C. Godínez. 2005. Understanding the Interaction of Rural People with Ecosystems: A Case Study in a Tropical Dry Forest of Mexico. *Ecosystems* 8: 630–643.

García-Gómez R., J. Chávez-Espinosa, A. Mejía-Chávez, C. Durán-de-Bazúa. 2002. Microbiological determinations of some vegetables from the Xochimilco zone in Mexico City, Mexico. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 44(1):24-30.

Chávez-López C., A. Blanco-Jarvio, M. Luna-Guido, L. Dendooven, N. Cabirol. 2011. Removal of methyl parathion from a chinampa agricultural soil of Xochimilco Mexico: A laboratory study. *European Journal of Soil Biology* 47:264-269.

Collins S. L., S. R. Carpenter, S. M. Swinton, D. E. Orenstein, D. L. Childers, T. L. Gragson, N. B. Grimm, J. M. Grove, S. L. Harlan, J. P. Kaye, A. K. Knapp, G. P. Kofinas, J. J. Magnuson, W. H. McDowell, J. M. Melack, L. A. Ogden, G. P. Robertson, M. D. Smith y A. C. Whitmer. 2010. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment* doi:10.1890/100068.

Coe M. D. 1964. The chinampas of Mexico. *Scientific American* 211(1):90-98.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2005. *Estadísticas del Agua 2005*. Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, D.F. México.

Comisión Nacional para la Biodiversidad (CONABIO). 2012. Guía de campo, Aves de la Ciudad de México. Consulta en línea: http://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/pdf/guia_aves_comunes.pdf, abril de 2014.

Contreras V., E. Martínez-Meyer, E. Valiente-Riveros y L. Zambrano. 2009. Recent decline and potencial distribution in the last remnant area of the microendemic Mexican axolotl (*Ambystoma mexicanum*). *Biological Conservation* 142:2881-2885.

Contreras V. 2012. Variables bióticas y abióticas como indicadores de heterogeneidad en el lago de Xochimilco, Distrito Federal. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Biología Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México. 64 pp.

Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional 1971. *Lista de Humedales de importancia internacional. Ramsar*. Disponible en: <http://www.ramsar.org/pdf/sitelist.pdf>.

Conway, G. R. 1987. The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems* 24(2):95-117.

Diario Oficial de la Federación. 1992. *DECLARATORIA* que establece como una prioritaria de preservación y conservación en del equilibrio ecológico y se declara como área natural protegida, bajo la categoría de zona sujeta a conservación ecológica, la superficie que se indica de los ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, D.F. (Segunda publicación). 11 mayo de 1995.

Diario Oficial de la Federación. 1998. *NOM-003-SEMARNAT-1997*. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. 28 de septiembre de 1998.

Diario Oficial de la Federación. 2001a. *NMX-AA-029-SCFI-2001*. Análisis de aguas - Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. 17 de abril de 2001.

Diario Oficial de la Federación. 2001b. *NMX-AA-026-SCFI-2001*. Análisis de agua - Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. 3 de marzo de 2011.

Diario Oficial de la Federación. 2001c. *NMX-AA-051-SCFI-2001*. Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. 25 de marzo de 1980.

Diario Oficial de la Federación. 2001d. *NMX-AA-030-SCFI-2001*. Análisis de aguas - Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. 17 de abril de 2001.

Diario Oficial de la Federación. 2001e. *NMX-AA-028-SCFI-2001*. Análisis de aguas - Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. 17 de abril de 2001.

Diario Oficial de la Federación. 2002. *NOM-021-SEMARNAT-2000*. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis. 31 de diciembre de 2002.

Diario Oficial de la Federación. 2003a. *NOM-001-SEMARNAT-1996*. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 23 de abril de 2003.

Diario Oficial de la Federación. 2003b. *NOM-004-SEMARNAT-2002*. Protección ambiental.- Lodos y Biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. 15 de agosto de 2003.

Diario Oficial de la Federación. 2010. *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. 30 diciembre de 2010.

Diario Oficial de la Federación. 2010. *Ley Federal de Derechos*. 15 de diciembre de 2011.

Díaz-Torres E., R. Gibson, F. González Farías, A. E. Zarco-Arista y M. Mazari-Hiriart. 2013. Endocrine disruptors in the Xochimilco wetland, Mexico City. *Water Air Soil Pollution* 224:1586.

Dodds W. K. 2002. *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications*. Academic Press. San Diego. 569 pp.

Espinosa-García A. C., M. Mazari-Hiriart, R. Espinosa, L. Maruri-Avidal, E. Méndez, C. F. Arias. 2008. Infectivity and genome persistence of rotavirus and astrovirus in groundwater and surface water. *Water Research* 42:2618-2628.

Espinosa-García A. C., C. F. Arias, S. Sánchez-Colón y M. Mazari-Hiriart. 2009. Comparative study of enteric viruses, coliphages and indicator bacteria for evaluating water quality in a tropical high altitude system. *Environmental Health* 8:49.

- Espinosa-García A. C., P. Jesudhasan, R. Arredondo, M. Cepeda, M. Mazari-Hiriart, K. D. Mena y S. D. Pillai. 2012. Sensitivity of Poliovirus Type 1 chat strain and Rotavirus SA-11 to E-Beam irradiation on iceberg lettuce and spinach: quantifying the reduction in potential health risks. *Applied Environmental Microbiology* 78(4):988-93.
- Ezcurra E., M. Mazari-Hirirart, Pisanty I. y Aguilar A. 2006. *La cuenca de México*. Fondo de Cultura Económica. México D.F., México. 286 pp.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2006. Acuerdo por el que se aprueba el programa de manejo del área natural protegida con carácter de zona de conservación ecológica "Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco". 11 de enero de 2006.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). 2007. *Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México*. D.F. 59 pp.
- GDF 2012. *Atlas Geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal*. Secretaría del Medio Ambiente, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal, México, D.F. 96 pp.
- González-Pozo A. (coord). 2010. *Las Chinampas de Xochimilco al despuntar el siglo XXI: inicio de su catalogación*. Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F., México. 279 pp.
- HACH. 2002. *Water Analysis Handbook*. 4a. ed. Hach Company. California. 1260.
- Hynes H. B. N. 1983. *The Ecology of Running Waters*. 4ª ed. Liverpool University Press. Liverpool: 1-13.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. *Cuaderno Estadístico Delegacional de Xochimilco, Distrito Federal*. Mapas.
- International Standard Organization. 1995. *Water quality – Detection and enumeration of bacteriophages*. ISO 10705-1:1995.
- Knaebel D. B. 2007. Surface Soil Microbial Sampling Methods. En: Hurst C. J., R. L. Crawford, J. L. Garland, D. A. Lipson, A. L. Millis y L. D. Stetzenbach. 2007. *Manual of Environmental Microbiology*. 3a Ed. ASM Press. Washington D.C. 597-607 pp.
- Labadz J.C., D. P. Butcher y D. Sinnott. Wetlands and still waters. En. Perrow M. y A. J. Davy. 2002. *Handbook of Ecological Restoration. Vol. I. Principles of Restoration*. Cambridge University Press. Cambridge. 444 pp.
- Lindig-Cisneros R., J. Desmond, K. E. Boyer y J. B. Zedler. 2003. Wetland Restoration Thresholds: Can a degradation transition be reversed with increased effort? *Ecological Applications* 13: 193-205.

Línding-Cisneros R. y L. Zambrano. Aplicaciones prácticas para la conservación y restauración de humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: Sánchez O., M. Herzig, E. Peters, R. Márquez-Huitzil y L. Zambrano (Ed.). 2007. *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. D.F. 2007.

López A., Guerrero M., C. Hernández y A. Aguilar. 2006. Rehabilitación de la zona chinampera. En: UNESCO-México. 2006. *Xochimilco, Un proceso de gestión participativa*. UNESCO. México D.F., México. 201-229 pp.

Maier M. R., I. L. Pepper y C. P. Gerba. 2009. *Environmental Microbiology*. 2a ed. Academic Press. China. 598 pp.

Mazari-Hiriart M., S. Ponce-de-León, Y. López-Vidal, P. Islas-Macías, R. I. Amieva-Fernández, F. Quiñones-Falconi. 2008. Microbiological Implications of Periurban Agriculture and Water Reuse in Mexico City. *PLOS ONE* 3(5):e2305.

Merlín U. Y. 2009. Evaluación de dos sistemas de manejo de recursos naturales de Xochimilco con indicadores de sustentabilidad. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Ecología A.C. Veracruz, México. 214 pp.

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water, Synthesis*. World Resources Institute. Washington D.C. 68.

Mudroch, A. y S. D. MacKnight, S. D. 1994. *Handbook of Techniques for Aquatic Sediment Sampling*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan.

Murray, P. R., E. J. Baron, M. A. Pfaller, F. C. Tenover y R. H. Tenover. (Ed.). 1995. *Manual of Clinical Microbiology*. American Society for Microbiology. Washington D.C. 1482.

Naciones Unidas. 2005. *Objetivos de desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe*. United Nations Publications. 333 pp.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2004. Screening Quick Reference Table for Inorganics in Solids. Consulta en línea:

http://www.gesamp.org/data/gesamp/files/file_element/4a2a322c8acb2c26cc0234685eac71fa/SQuiRTs.pdf,

enero de 2014.

Polaczyk A. L., J. Narayanan, T. L. Cromeans, D. Hahn, J. M. Roberts, J. E. Amburgey y V. R. Hill. 2008. Ultrafiltration-based techniques for rapid and simultaneous concentration of multiple microbe classes from 100-L tap water samples. *Journal of Microbiological Methods* 73: 92-99.

Reddy K. R. y R. D. De Laune, 2008. *Biogeochemistry of wetlands*. Science and Applications. CRC Press. N.Y. 774 pp.

Rojas R. Las chinampas del Valle de México. En: Rojas T. (coord.). 1995. *Presente, pasado y futuro de las chinampas*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Patronato del Parque Ecológico de Xochimilco, México. D.F. 324 pp.

Romero J. 1999. *Calidad del agua*. 2ª ed. México D.F., México. 273 pp.

Rosas I., A. Báez y M. Coutiño. 1984. Bacteriological quality of crops irrigated with wastewater in the Xochimilco plots, Mexico City, Mexico. *Applied Environmental Microbiology* 47(5): 1074-1079.

Salas H. J. y P. Martino. 1991. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research* 25(3):341-350.

Sandoval J. 2008. Evaluación de la calidad del agua en los canales de Xochimilco para su recuperación ecológica. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Biología Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México. 96 pp.

Sarandón S. J. 2002. La agricultura como actividad transformadora del ambiente. El impacto de la agricultura intensiva de la Revolución Verde. En: Sarandón S.J. (editor). *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*. Ediciones Científicas Americanas. La Plata, Argentina. 20:393-414.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Consulta en línea: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>, enero de 2014.

Society for Ecological Restoration. *Principios de SER Internacional sobre la restauración ecológica*. Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. Versión 2. Consulta en línea: <http://www.ser.org/docs/default-document-library/spanish.pdf>, enero de 2014

Solís C., J. Sandoval, H. Pérez-Vega y M. Mazari-Hiriart. 2006. Irrigation water quality in southern Mexico City based on bacterial and heavy metal analyses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 249:592-595.

Soriano, A. y M. R. Aguiar. 1998. Estructura y funcionamiento de los agroecosistemas. *Ciencia e Investigación* 50:63-73.

Toranzos G. A., G. A. McFeters, J. J. Borrego y M. Savill. 2007. Detection of Microorganisms in Environmental Freshwaters and Drinking Waters. En: Hurst C. J., R. L. Crawford, J. L. Garland, D. A. Lipson, A. L. Millis y L. D. Stetzenbach. 2007. *Manual of Environmental Microbiology*. 3a ed. American Society for Microbiology Press. Washington D. C. 597-607.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2001. *Manual of Methods for Virology*. EPA 600/4-84/013(N16). Washington D.C.

- Valiente E., A. Tovar, H. González, D. Eslava-Sandoval y L. Zambrano. 2010. Creating refuges for the axolotl. *Ecological Restoration* 28(3):257-261.
- Vázquez N. 2012. Infectividad de rotavirus recuperados de lechugas utilizadas como matrices experimentales de adsorción. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México. 59 pp.
- Vega E. 2006. Attachment and survival of ciruses on lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata* L.): role of physicochemical and biotic factors. Doctor of Philosophy thesis. Texas University. Texas, Estados Unidos. 190 pp.
- Velázquez F. E. Participación para la sustentabilidad. Enfoques, proyectos y apuestas. En: González G.A. (coord.). 2012. *Reflexiones del desarrollo local sostenible*. Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F., México. 442 pp.
- Vitousek P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenko y J. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494–99.
- Wilken, G. C. ¿Porqué persisten las chinampas? Características esenciales de un sistema sostenible. En: Rojas T. (coord.). 1995. *Presente, pasado y futuro de las chinampas*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Patronato del Parque Ecológico de Xochimilco, México. D.F., México. 324 pp.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology, Lake and River Ecosystems*. Academic Press. 3^a ed. San Diego. 1006 pp.
- World Commission on Environment and Development. 1987. *Our common future*. Naciones Unidas. Consulta en línea: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>, enero de 2014.
- Zambrano L., V. Contreras, M. Mazari-Hiriart, A. E. Zarco-Arista. 2009. Spatial Heterogeneity of Water Quality in a Highly Degraded Tropical Freshwater Ecosystem. *Environmental Management* 43:249-263.

Anexos

Anexo I. Legislación y normatividad aplicable en materia de agua.....89

**Anexo II. Prueba de Bartlett y matriz de varianzas del Análisis de Componentes
Principales.....90**

**Anexo III. Concentración de metales pesados en las matrices agua, suelo, sedimento y
hortalizas.....92**

Anexo I. Legislación y normatividad aplicable en materia de agua.

Instrumento legal	Descripción	Límites Máximos Permisibles (LMP)
NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	<p>Uso para riego, descargas en embalses naturales y artificiales. Promedio Mensual (mg/L): PT 20, NT 40, DBO₅ 75, As 0.2, Cu 4, Pb 0.5, Zn 10, Cr 1; Hg 0.01; CF 1000 NMP/100 mL.</p> <p>Uso para riego, descarga en suelo agrícola. Promedio mensual (mg/L): As 0.2, Cu 4, Pb 5, Zn 10, Cr 0.5, Hg 0.005; CF 1000 NMP/100 mL.</p>
NOM-003-SEMARNAT-1997	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.	Reuso en servicios al público con contacto directo: CF 240 NMP/100ML, DBO ₅ 20 mg/L, SDT 20 mg/L.
NOM-004-SEMARNAT-2002	Protección ambiental.- Lodos y Biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.	<p>Biosólidos para aprovechamiento agrícola: CF 2 x 10⁶ UFC/mL,</p> <p>Biosólido de tipo “excelente” y “bueno” para uso agrícola (respectivamente): As 41 y 75, Cu 1500 y 4300, Cr 1200 y 3000, Hg 17 y 57 Pb 300 y 840 y Zn 2800 y 7500 (mg/kg en base seca).</p>
Ley Federal de Derechos en materia de agua, 2012.	Lineamientos de calidad del agua.	<p>Riego agrícola (uso tipo 2): CF 1000 NMP/100 mL.</p> <p>Protección a la vida acuática (uso tipo 3, agua dulce y humedales): OD 5 mg/L.</p>

Anexo II. Prueba de Bartlett y matriz de varianzas del Análisis de Componentes Principales

Matriz agua

Prueba de Bartlett para ACP de la matriz AGUA		
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	1711.842
	gl	105
	Sig.	.000

Varianza total explicada para ACP de la matriz AGUA

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	3.667	24.448	24.448	3.667	24.448	24.448
2	2.527	16.850	41.298	2.527	16.850	41.298
3	2.093	13.950	55.248	2.093	13.950	55.248
4	1.496	9.972	65.221	1.496	9.972	65.221
5	1.090	7.268	72.488	1.090	7.268	72.488
6	.916	6.104	78.592			
7	.786	5.237	83.829			
8	.777	5.183	89.012			
9	.489	3.257	92.269			
10	.374	2.492	94.761			
11	.316	2.110	96.871			
12	.275	1.832	98.703			
13	.114	.760	99.464			
14	.046	.304	99.768			
15	.035	.232	100.000			

Matriz sedimento

Prueba de Bartlett para ACP de la matriz SEDIMENTO		
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	476.379
	gl	21
	Sig.	.000

Varianza total explicada para ACP de la matriz SEDIMENTO

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	2.334	33.348	33.348	2.334	33.348	33.348
2	1.454	20.773	54.120	1.454	20.773	54.120
3	1.138	16.259	70.380	1.138	16.259	70.380
4	.988	14.111	84.491			
5	.580	8.289	92.781			
6	.436	6.235	99.016			
7	.069	.984	100.000			

Anexo II. Concentración de metales pesados en las matrices agua, suelo, sedimento y hortalizas.

Sitio de muestreo	Metales en la matriz agua (mg/L)						Metales en la matriz sedimento (mg/Kg)						
	AS	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	AS	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	
CU	<0.0002	<0.006	0.0833	0.3825	<0.008	<0.0002	0.03	10.38	15.38	36.32	5.60	0.01	
TR	<0.0002	<0.006	0.0567	0.0060	<0.008	<0.0002	<0.001	12.46	15.09	42.15	2.67	0.00	
SG	0.0024	<0.006	<0.02	0.0060	<0.008	0.0008	0.11	44.28	19.23	117.17	8.95	0.27	
SA	0.0022	<0.006	<0.02	<0.006	<0.008	<0.0002	27.10	58.75	27.93	164.57	27.45	0.12	
TE	0.0045	<0.006	0.0240	0.0060	0.0120	0.0004	23.82	11.57	12.18	29.97	11.02	0.09	
Normatividad													
*NOM-001	0.2	4	5	10	0.5	0.005	**NOM-004	41	1500	300	2800	1200	17
***NOAA	0.85	0.013	0.065	0.12	0.57	0.0014	Umbral	5.9	35.7	35	123.1	37.3	0.174
							Posible efecto	17	197	91.3	315	90	0.486

Sitio de muestreo	Metales en la matriz suelo (mg/Kg)			
	Pb	Zn	Cr	Hg
CU	16.60	112.17	3.76	0.05
TR	12.40	22.60	2.48	0.10
SG	12.57	56.10	5.34	0.31
SA	24.75	75.30	8.55	0.23
TE	19.76	59.77	6.27	0.06

Tipo de hortaliza	Metales en hortalizas en Texhuilo (mg/Kg)							
	AS	Cu	Pb	Zn	Cr	Hg	Cd	Ni
L. Italiana	<0.001	<0.02	<0.05	2.99	0.47	0.004	<0.01	<0.05
Quelites	<0.001	<0.02	0.55	16.34	0.35	0.002	<0.01	<0.05
Cilantro	<0.001	<0.02	0.38	3.50	<0.05	<0.001	<0.01	<0.05
L. Sangría	<0.001	<0.02	<0.05	2.77	0.76	0.008	<0.01	<0.05
Verdolagas	<0.001	<0.02	<0.05	2.39	0.30	0.002	<0.01	<0.05

* NOM-001-SEMARNAT-1996: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

** NOM-004-SEMARNAT-2002: Protección ambiental.- Lodos y Biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

*** NOAA. Screening Quick References for Inorganic Solids. Valores que indican una afectación de tipo "aguda" en la calidad de agua superficial en cuerpos de agua dulce y valores que indican una baja toxicidad en sedimento de cuerpos de agua dulce.