



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

MODELO DE INTERCONEXIÓN ENTRE LA CALIDAD  
DEL AGUA Y LA ATMÓSFERA EN EL NUEVO LAGO  
DE CHALCO, MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:  
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A :

KAREM MONSERRAT ROBLES PALACIOS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO OMAR ARELLANO AGUILAR

2018

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.





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.



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.

## **Datos del jurado**

### **1. Datos del alumno**

Robles Palacios  
Karem Monserrat  
5535006791  
Universidad Nacional  
Autónoma de México,  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
309308474

### **2. Datos del Tutor**

Dr. Rodolfo Omar  
Arellano Aguilar

### **3. Datos del sinodal 1**

Dra. María del Socorro  
Lozano García

### **4. Datos del sinodal 2**

Dra. Claudia Alejandra  
Ponce de León Hill

### **5. Datos del sinodal 3**

Dra. Margarita Erna  
Caballero Miranda

### **6. Datos del sinodal 4**

Dra. Erika Danaé  
López Espinoza

### **7. Datos del trabajo escrito**

Modelo de interconexión  
entre la calidad del agua y  
la atmósfera en el nuevo  
lago de Chalco, México.  
61p.  
2017

# Agradecimientos

---

A la UNAM, por todo el conocimiento y las oportunidades que me ha dado, pero especialmente a la Facultad de Ciencias, mi segunda casa.

A la DGAPA, por la beca otorgada y el apoyo económico del proyecto PAPIIT-IV00215 Cambio Climático y Medio Ambiente en la historia del lago de Chalco para la realización de este trabajo.

A mi tutor Dr. Omar Arellano-Aguilar, gracias por la oportunidad que me diste para desarrollar este trabajo, por ser un excelente asesor, consejero y tener una enorme paciencia.

A la Dra. Claudia Ponce de León Hill por permitirme realizar los análisis en el laboratorio de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias.

A M. en C. Manuel Hernandez Quiroz por su asistencia y apoyo en el trabajo de laboratorio.

A la Dra. Socorro Lozano porque cada vez que el camino universitario me unía a ella siempre me recibió con las puertas abiertas, apoyándome y alentándome a superarme.

A mis amigos de la universidad (Abel y Daniela) porque ustedes fueron fuente de alegría y motivación para cursar y concluir esta etapa.

Al clan Troyes del grupo Scout 191 porque desde que llegué a ellas no ha habido día en el que no desee superarme, principalmente a mi madrina, mi consejera de vida, Jessica Escobar.

A mis papás (David y Carmen) por su amor, comprensión y apoyo en todo lo que me propongo. A mi nueva familia, gracias por tu paciencia y apoyo en la conclusión de este trabajo que es el primero de muchos que nos esperan en la vida que tengamos juntos.

Finalmente, gracias a Dios por todas las bendiciones que me ha dado, entre ellas ser parte de la UNAM y de este proyecto.

# Índice

---

Resumen.....	1
I. Introducción .....	2
Naturaleza de los lagos .....	2
Productividad de los lagos .....	4
Historia del lago de Chalco.....	6
Justificación .....	8
Hipótesis.....	8
Objetivo.....	9
Objetivos particulares .....	9
II. Marco metodológico .....	9
Zona de estudio.....	9
Metodología.....	11
Trabajo de campo.....	11
Evaluación de metales pesados en muestras de agua .....	12
Análisis estadístico .....	13
III. Resultados .....	17
Análisis temporal y superficial de los parámetros fisicoquímicos evaluados <i>in situ</i> .....	17
Determinación de metales pesados.....	27
Análisis anual de los parámetros atmosféricos.....	29
Modelo de correlación entre factores climáticos y la calidad del agua superficial del lago...	31
IV. Discusión .....	37
Parámetros fisicoquímicos .....	37
Interacción entre compartimentos agua/aire.....	42
V. Conclusiones.....	45
VI. Recomendaciones .....	47
VII. Referencias.....	48
Anexo .....	51

# Resumen

---

Este estudio tuvo como objetivo analizar la respuesta de la calidad del agua superficial del lago de Chalco ante la variación temporal de factores meteorológicos. Los parámetros indicadores de la calidad del agua analizados *in situ* fueron: la temperatura del agua, oxígeno disuelto (OD), pH, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), potencial óxido reducción (ORP) y salinidad; mientras que los *ex situ* fueron la concentración de metales pesados como: aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Al}^{3+}$ ), cromo VI ( $\text{Cr}^{6+}$ ), cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ), dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), zinc (Zn), níquel (Ni), así como la demanda química de oxígeno (DQO) en un periodo del 2015-2016. Los resultados del análisis exploratorio indicaron que la distribución superficial de los parámetros evaluados *in situ* variaron fuertemente de los extremos al centro del lago. Los valores cercanos al promedio se registraron en el centro del lago mientras que los máximos y mínimos en las orillas.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales 2016 (LFD) aplicado para la protección de la vida acuática en agua dulce y la NOM-067-ECOL-1994, los metales pesados llegaron a sobrepasar algunos de los meses evaluados. El Zinc sobrepasó los límites en Abril, Mayo, Junio, Agosto, Noviembre y Diciembre del 2015. Los compuesto de aluminio sobrepasaron los límites para Abril, Mayo, Junio y Diciembre del 2015 y Enero, Febrero, Marzo y Abril del 2016 y el DQO sobrepasó los límites en Febrero, Marzo y Mayo del 2016. Asimismo, el pH siempre estuvo por arriba de los límites y el OD registró valores por debajo del valor recomendado en 4 meses de 8 analizados. Es decir, que durante todo el periodo existieron parámetros que sobrepasaron el límite óptimo pero no todos coincidieron en los mismos meses, manteniendo una mala calidad del agua en todo momento.

Respecto a la respuesta de los parámetros fisicoquímicos evaluados *in situ* con los meteorológicos se encontraron tres grupos de variables que se correlacionaron fuertemente. El Componente principal 1 ( $\text{CP}_1$ ) conformado por la velocidad del viento (WS), la humedad relativa (HR) y la radiación solar (UVA y UVB) se correlacionó con el pH y representó el 39.88% de la varianza total. El segundo  $\text{CP}_2$  conformado por la CE y los SDT con el 32.89% de la varianza se correlacionó negativamente con el ORP. El último  $\text{CP}_3$  correlacionó positivamente la temperatura del agua con la del aire y negativamente con el OD representando el 12.76% de la varianza total.

Estos resultados indican que existe una influencia del compartimento aire sobre el compartimento agua y de acuerdo a los resultados y a las correlaciones se concluye que, si la temperatura del aire aumenta, la temperatura del agua también lo hará propiciando la disminución de OD en el medio, mientras que a mayor HR, WS y radiación solar el pH tenderá a aumentar, basificando aún más el medio.

# I. Introducción

---

## *Naturaleza de los lagos*

Los lagos son cuerpos de agua epicontinental formados bajo la presencia de una cuenca o depresión en donde el agua se acumula (Lanza & García, 2002). Su formación puede tener diversos orígenes geológicos o antropogénicos que definen la geomorfología de la base del lago. Hutchinson (1957) define 76 tipos de lagos de acuerdo al origen geomorfológico. No obstante, Wetzel (2001) resume 9 grupos que se mencionan a continuación: de origen tectónico, por actividad volcánica, deslizamientos de tierra (avalanchas), actividad glaciaria, actividad de ríos, acción del viento, actividad en la línea de costa, origen orgánico y reservorios (origen antropogénico).

Los factores geológicos en conjunto con los procesos climáticos del lugar determinarán las características fisicoquímicas del agua, controlando los procesos biogeoquímicos que a su vez definen la calidad del agua (Wetzel, 2001).

Según Wetzel (1983), debido al efecto de la latitud y altitud en el clima, los lagos tienden a tener comportamientos específicos en la distribución de calor en la columna de agua (estructura térmica) de acuerdo a su ubicación (Fig. 1). Conforme a ello, en la latitud en que se encuentra delimitado México, son comunes los lagos que se mezclan una vez al año y que alcanzan temperaturas mínimas de 4°C, es decir, los monomícticos cálidos.

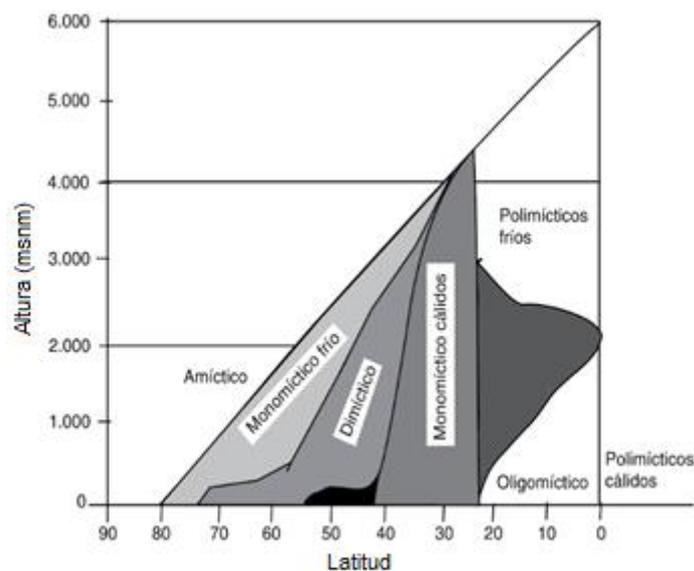
Cuando el lago pasa de la mezcla a la estratificación, se separa la parte superior caliente (epilimnion) de la inferior fría (hipolimnion), por lo que se impide la interacción de la capa superior con el sedimento. De esta manera se aíslan comunidades y procesos en cada una de las diferentes capas, y los nutrientes y la necromasa procedente del epilimnion, o los liberados desde el sedimento son retenidos en el hipolimnion hasta que se produce la mezcla (Jeppesen et al., 1997b).

Sin embargo, si comparamos el lago de Pátzcuaro con el de Zirahuén, ambos ubicados en Michoacán, con latitudes y altitudes similares (Tabla 1), encontramos que la estructura térmica es distinta. El de Pátzcuaro es polimíctico, es decir, se mezcla más de

una vez al año; mientras que el de Zirahuén es monomíctico cálido mezclándose una vez al año debido al efecto de la profundidad.

Para que existan los lagos monomícticos cálidos se debe contar con profundidades aproximadamente mayores a los 5 metros promedio, mientras que los lagos poco profundos suelen tener menos de 3 metros, no obstante, puede variar de acuerdo al clima de la región (Mazzeo et al., 2002; Meerhoff & Jappensen, 2009)

Los lagos poco profundos tienden a ser polimícticos ya que suelen mezclarse de forma recurrente o continua gracias al menor esfuerzo que requiere el viento en comparación de uno profundo. El estrecho contacto entre el sedimento y el agua, provoca un rápido reciclaje de nutrientes y una alta productividad. Por esta razón es más probable encontrar que los lagos someros sean más productivos que los profundos (Jeppesen et al., 1997b).



**Figura 1.** Representación esquemática de acuerdo con la clasificación térmica de los lagos organizados según la latitud y altitud (Wetzel, 1983).

Tabla 1. Ejemplos de lagos profundos y someros en el Cinturón Volcánico Transmexicano (Lanza & García, 2002)						
Lago	Coordenadas geográficas	Altitud (msnm)	Profundidad máxima (m)	Profundidad media (m)	Clasificación térmica	Estado trófico
Zirahuén	19° 26' N	2075	40	----	Monomíctico cálido	Oligo-mesotrófico
Pátzcuaro	19° 45' N	2036	9.4	4	Polimíctico	Mesotrófico

## *Productividad de los lagos*

La productividad de un lago se puede determinar con la caracterización de su estado trófico (del griego Trofein=alimento) o estado de alimentación (Mazzeo et al., 2002).

Olem & Flock, 1990, distinguen tres estados tróficos:

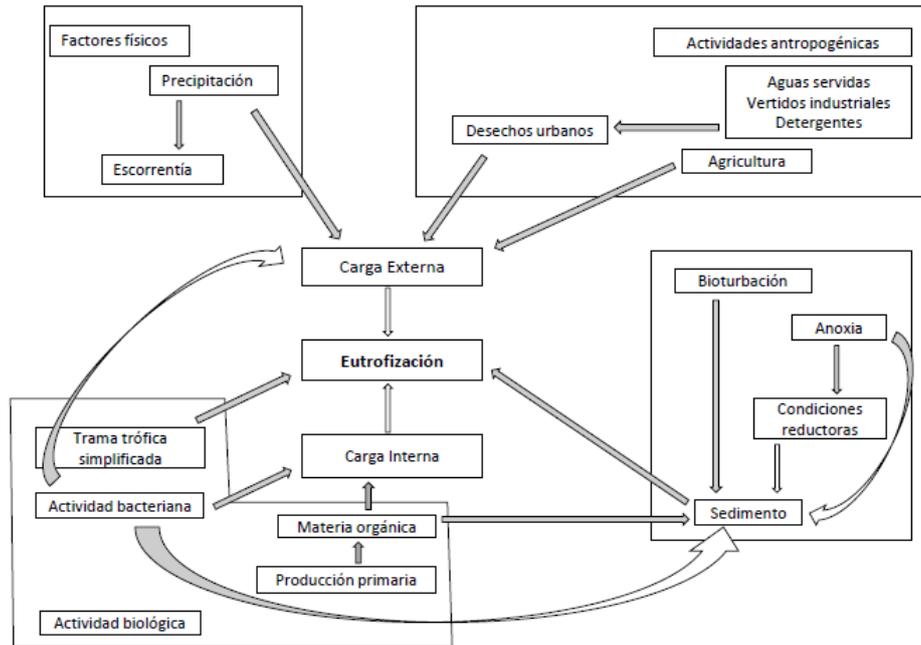
A.- Oligotrofia: baja concentración de nutrientes y productividad biológica

B.- Mesotrofia: niveles intermedios de nutrientes y productividad.

C.- Eutrofia: elevada concentración de nutrientes y alta productividad.

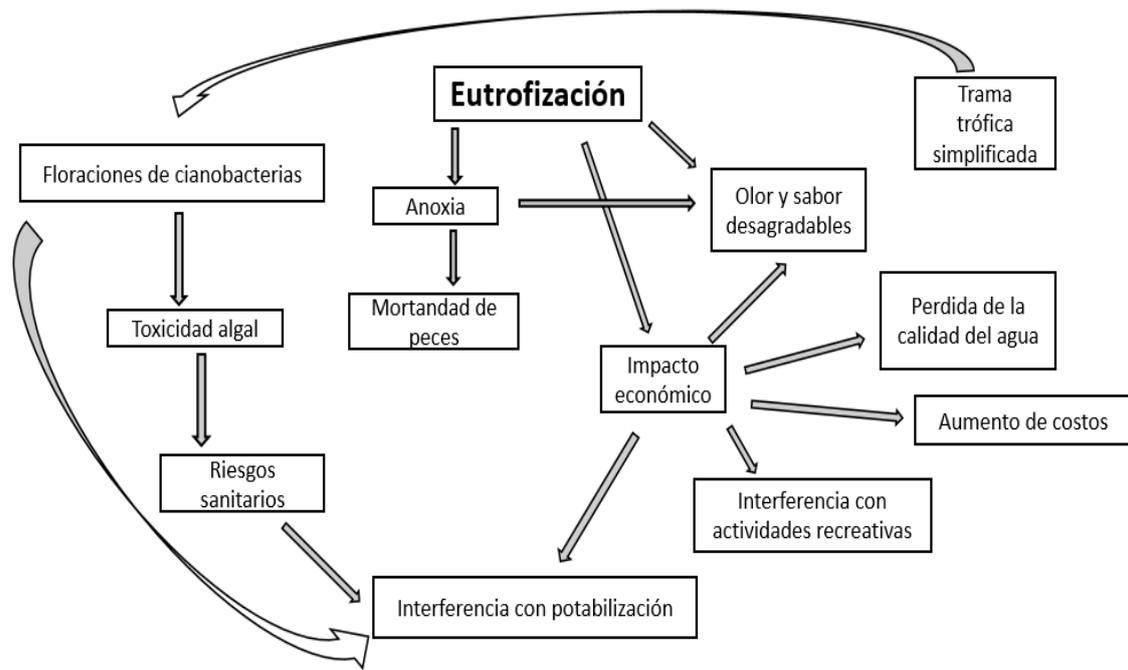
Para pasar del estado oligotrófico a uno eutrófico y mantenerse en él se requieren de diversos factores que promuevan el aporte, movimiento y reciclaje de nutrientes en el cuerpo de agua (Mazzeo et al., 2002). El esquema de la Fig. 2, marca los factores que generan las cargas externas e internas que desencadenan y mantienen las respuestas del proceso de eutrofización. La carga interna se refiere a los procesos o factores que se producen dentro del agua, los cuales se relacionan con la actividad biológica tanto en la columna del agua como en el sedimento; así como los procesos relacionados con la concentración de oxígeno disuelto en el medio. Mientras que, las cargas externas son aquellos que tienen un origen fuera del agua y se dividen en dos principales grupos: los de origen antropogénico como son los desechos urbanos o los fertilizantes provenientes de la agricultura, y los factores físicos como es la precipitación que se incluye dentro de los factores meteorológicos, entre otros.

El aumento del estado trófico modifica el ambiente fisicoquímico del agua, deteriorando su calidad y volviéndose un problema en el uso y manejo del sistema acuático. De acuerdo al esquema de la Fig. 3, las principales consecuencias del proceso de eutrofización se deben al aumento de la biomasa de productores primarios y secundarios en el sistema; que se traduce en una notoria modificación de la transparencia y coloración del agua fundamentalmente como consecuencia del incremento del fitoplancton.



**Figura 2.** Principales factores y procesos que desencadenan y mantienen las respuestas del proceso de eutrofización (tomado de Mazzeo et al., 2002)

El aumento de la productividad promueve diferencias verticales en la concentración de oxígeno, registrándose valores más elevados en la superficie producto de la actividad fotosintética del fitoplancton, y valores cercanos a cero en el fondo como resultado de la degradación de la materia orgánica. Por otra parte, la excesiva generación de materia orgánica supera la capacidad de degradación del sistema, determinando su acumulación en el sedimento, mientras que el déficit de oxígeno contribuye al predominio de la descomposición anaeróbica que genera gases sulfhídrico o metano, lo que se traduce en problemas de olor y sabor del agua. El consumo de CO<sub>2</sub> por los procesos de fotosíntesis basifica el agua y los procesos de descomposición (liberan CO<sub>2</sub>) la acidifican (Wetzel, 2001; Mazzeo et al., 2002).



**Figura 3.** Esquema con las principales consecuencias del proceso de eutrofización en los sistemas acuáticos y sus usos (tomado de Mazzeo et al., 2002).

## Historia del lago de Chalco

En la década de 1980, se construyeron y pusieron en marcha catorce pozos en la Planicie de Chalco al sureste de la Ciudad de México, denominado Sistema Mixquic-Santa Catarina con el objetivo de satisfacer parte de la creciente demanda de agua a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Desde 1985 la operación de estos pozos ha causado hundimientos de hasta 40 cm al año en el centro de la planicie de Chalco y las predicciones numéricas muestran que para el 2020 el hundimiento total de la tierra alcanzará aproximadamente 12 metros (Ortiz-Zamora & Ortega-Guerrero, 2010). Dicho hundimiento ha propiciado la acumulación de agua pluvial y con ello la formación de un cuerpo de agua superficial que cubre actualmente 1000 ha (Fig. 6), representando una amenaza a la zona urbana circunvecina durante la época de lluvias (Ortiz & Ortega 2007).

Este nuevo cuerpo de agua se ha formado en el suelo lacustre del antiguo lago que ocupaba el valle de Chalco, en consecuencia, el desarrollo de la vida acuática y flora nativa reconocen las condiciones naturales, por lo que la adaptación de la vida acuática



Los estudios realizados en el lago de Chalco relacionados con el análisis de la calidad del agua son escasos. Barreiro et al., (1997) realizaron un estudio sobre la calidad del agua en un periodo entre diciembre de 1993 y noviembre de 1994 reportando la temperatura del agua oscilando entre los 13.3 y 22°C en horas diurnas, la salinidad entre 1.4 y 5.8 partes por mil, el oxígeno disuelto entre 1.4 y 17.5 mg/l, el pH entre 8.9 y 9.1 H<sup>+</sup>, la profundidad promedio 0.9 m y la concentración de nutrientes.

## *Justificación*

De acuerdo con un informe de la SEDESOL (2011), la presencia del nuevo lago permite la recuperación de un ecosistema lacustre y la creación de una reserva ambiental a la zona metropolitana. Sin embargo, también puede ser un foco de contaminación biológica por la fuerte presión antropogénica que ha sufrido a lo largo de los años. Por tales motivos, es fundamental considerar la condición dinámica del crecimiento del nuevo lago de Chalco y sus implicaciones ambientales (Ortiz & Ortega 2007).

Una manera de evaluar su dinámica es a través del seguimiento de factores ambientales y su interconexión mediante la aplicación de modelos de compartimentos ambientales (Foran & Ferenc, 1997), de esta manera se obtienen indicadores que contribuyen por un lado a entender la dinámica del cuerpo de agua y por el otro, parámetros que permiten generar escenarios a futuro así como datos que contribuyen a un manejo integral del sistema. El propósito de este trabajo fue evaluar la interconexión que existe entre los compartimentos agua-aire, mediante el análisis de las variaciones de la calidad del agua superficial del lago y las características meteorológicas locales.

## *Hipótesis*

La calidad del agua en el nuevo lago de Chalco está influenciada por las condiciones atmosféricas locales por lo que al identificar los parámetros de enlace se podrá avanzar en la comprensión de la dinámica actual del lago.

## *Objetivo*

Aplicar un modelo de interconexión de compartimentos agua-aire como aproximación en la descripción ambiental del lago de Chaco durante un ciclo anual.

### *Objetivos particulares*

- Realizar un monitoreo anual de los parámetros fisicoquímicos indicadores de la calidad del agua del lago.
- Obtener los datos de los parámetros atmosféricos locales y analizar su comportamiento por un año.
- Determinar los factores que influyen a través de la interacción entre los compartimentos agua-aire.

## **II. Marco metodológico**

---

### *Zona de estudio*

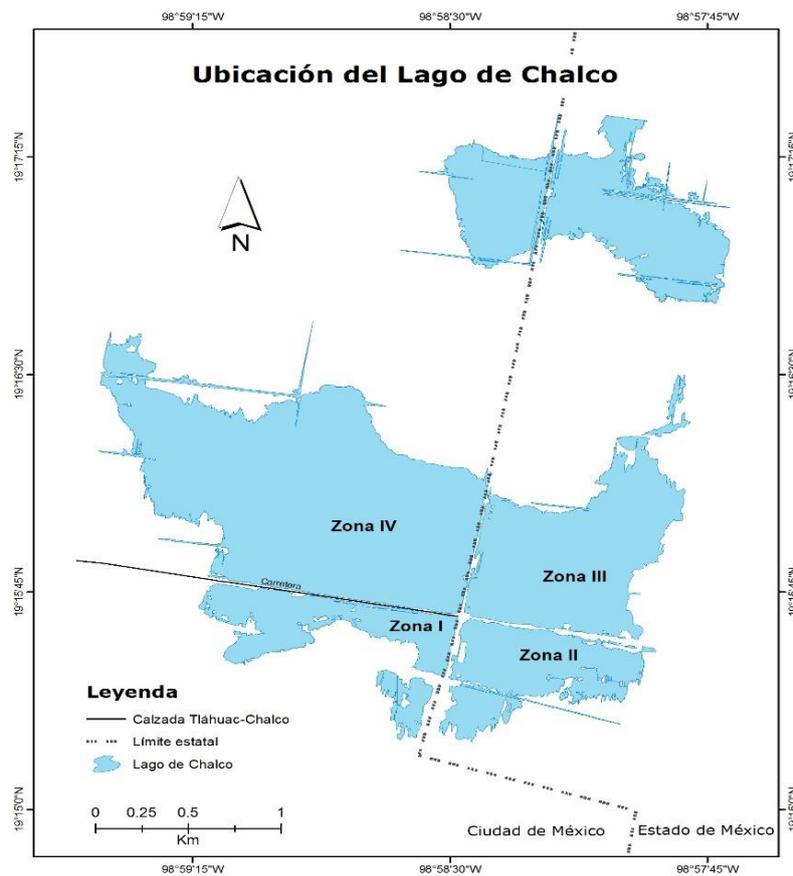
El lago de Chalco se ubica en la planicie lacustre de Chalco, al sureste de la ciudad de México con coordenadas centrales: 19°16'5''N; 98°58'23''O a 2,231 msnm, entre la delegación Tláhuac y el Estado de México. La zona de influencia del lago abarca una superficie de entre 1000 a 1500 ha (Meléndez-Herreda & Brinnqüist-Cervantes, 1997). El lago es eutrófico de agua dulce y recibe sus aguas de la lluvia y por escurrimiento (Ayala et al., 2013).

El clima de la zona es templado subhúmedo, con temperaturas medias anuales de 16-18° C (García, 1973). La temporada de lluvias va de junio a octubre y alcanza niveles máximos de agosto a octubre; mientras que la temporada de secas se extiende de noviembre a mayo (Arriaga et al, 2000).

Como se puede observar en el contorno de la figura 8 obtenido mediante el software ArcMap, el lago está dividido en IV secciones por dos vías vehiculares: la avenida Tláhuac-Chalco y un camino de terracería, que delimita el Distrito Federal del Estado de

México (Fig.8). A su vez, las secciones están interconectadas por tubos subterráneos y presentan diferencias en cuanto a tamaño, cobertura vegetal y actividades humanas (Meléndez-Herrada y Binnqüist-Cervantes, 1997), además en los alrededores se realizan actividades agrícolas y ganaderas (Barreiro-Güemes et al., 1997).

El muestreo se realizó en la zona IV, que corresponde a la de mayor extensión con 101 ha. Los niveles de profundidad del lago varían de acuerdo a la temporada de lluvias y oscilan entre 1200 a 2000 mm anuales (Arriaga et al., 2000). Esta área tiene presencia de tular concentrada en la orilla sur, a la que se adicionan al oeste otros mosaicos pequeños de vegetación (Ayala et al., 2013).



**Figura 8.** Ubicación y superficie del lago de Chalco en el 2015

## Metodología

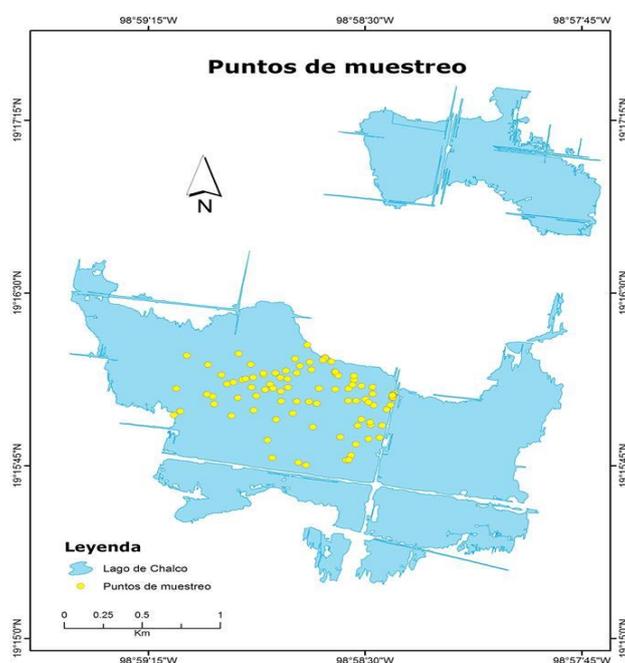
### Trabajo de campo

El muestreo en el lago de Chalco se realizó en el periodo de abril del 2015 hasta mayo del 2016, realizando un muestreo mensual en un horario aproximado de las 10 a las 14 hrs (Fig. 9). Para la obtención de metales pesados se establecieron 3 estaciones de muestreo en el centro del lago donde se colectaron muestras de agua superficial por duplicado para los meses de abril, mayo, junio, agosto, noviembre y diciembre del 2015 y enero, febrero, marzo, abril y mayo del 2016, sin embargo, las condiciones meteorológicas impidieron que se lograra llegar a los mismas tres estaciones durante los muestreos, por lo que no todas coincidieron en el centro. Las muestras se trasladaron en una cama de hielo hasta su almacenamiento en el laboratorio de la Unidad Ambiental de la Facultad de Ciencias.



**Figura 9.** Trabajo de campo en el lago de Chalco 2015-2016

El registro de los parámetros fisicoquímicos *in situ* como temperatura [°C], pH [H<sup>+</sup>], conductividad [μS/cm], potencial de óxido reducción (ORP) [mV], oxígeno disuelto [mg/l], sólidos disueltos totales (SDT) [ppm] y salinidad [ppm] se realizó en la superficie del agua por triplicado para los meses de abril, mayo, junio, agosto, noviembre y diciembre del 2015 y febrero y mayo del 2016 utilizando la sonda multiparamétrica modelo HI 9829 de *Hanna Instruments*. Para lo cual se hizo la medición para las mismas tres estaciones fijas en las que se colectaron las muestras para determinar la presencia de metales pesados y en otros 10 sitios elegidos de forma aleatoria, excepto para el mes de abril del 2015, el cual solo consiste en siete sitios aleatorios (Fig. 10).



**Figura 10.** Estaciones de muestreo realizados en el periodo 2015-2016

## Evaluación de metales pesados en muestras de agua

Las muestras se mantuvieron almacenadas en una temperatura de 4 °C hasta el día de su análisis. Las muestras fueron templadas a temperatura ambiente para su análisis. En cada muestra se registró por duplicado la concentración de los siguientes compuestos: aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Al<sup>3+</sup>), cromo VI (Cr<sup>6+</sup>), cromato (CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), dicromato (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>), zinc (Zn),

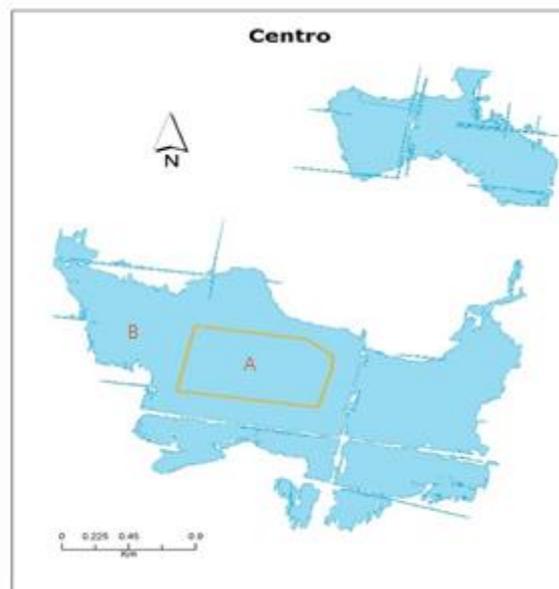
níquel (Ni), así como la demanda química de oxígeno (DQO), usando el fotómetro multiparamétrico modelo *HI 83099* de *Hanna Instruments*.

### Análisis estadístico

Para el análisis de la variación temporal de los parámetros fisicoquímicos del agua se consideraron los datos obtenidos por día de muestreo como los representativos de todo el mes (Anexo-Tabla 1), de los cuales se obtuvo el promedio, la desviación estándar y el rango.

Los parámetros fisicoquímicos se analizaron espacialmente para los meses de mayo, agosto y diciembre del 2015 y mayo del 2016 ya que para estos meses las distribuciones aleatorias de los puntos de muestreo tuvieron mayor representación superficial de la zona IV que los demás meses, para lo cual se generaron gráficas de distribución superficial del oxígeno disuelto, temperatura, pH, conductividad, ORP y SDT. Para ello se utilizó el software Surfer® versión 13.6.618 y se empleó el método de interpolación *Kriging*, el cual presupone que la distancia o dirección entre los puntos de muestreo reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie calculando una predicción de una ubicación sin mediciones (ArcGis, 2017).

Tras un análisis preliminar del comportamiento de los parámetros ambientales en los puntos de muestreo, se seleccionó un polígono en la zona IV (Fig. 11). Este polígono permitió crear dos grupos de datos: los que coincidían dentro de él (grupo A) y los que quedaban fuera de él (grupo B). Lo anterior con el objetivo de determinar si existía una distribución normal de los datos de cada grupo mediante la prueba Shapiro-Wilk (Marques de Sá, 2003). Se promedió cada grupo por día de muestreo y se compararon las medias de ambos grupos aplicando la prueba de Rango con Signo de Wilcoxon (Marques de Sá, 2003). Finalmente se volvió a analizar la variación temporal de los parámetros fisicoquímicos pero solo para los datos que pertenecían a la zona centro del lago, es decir, dentro del polígono (zona A).



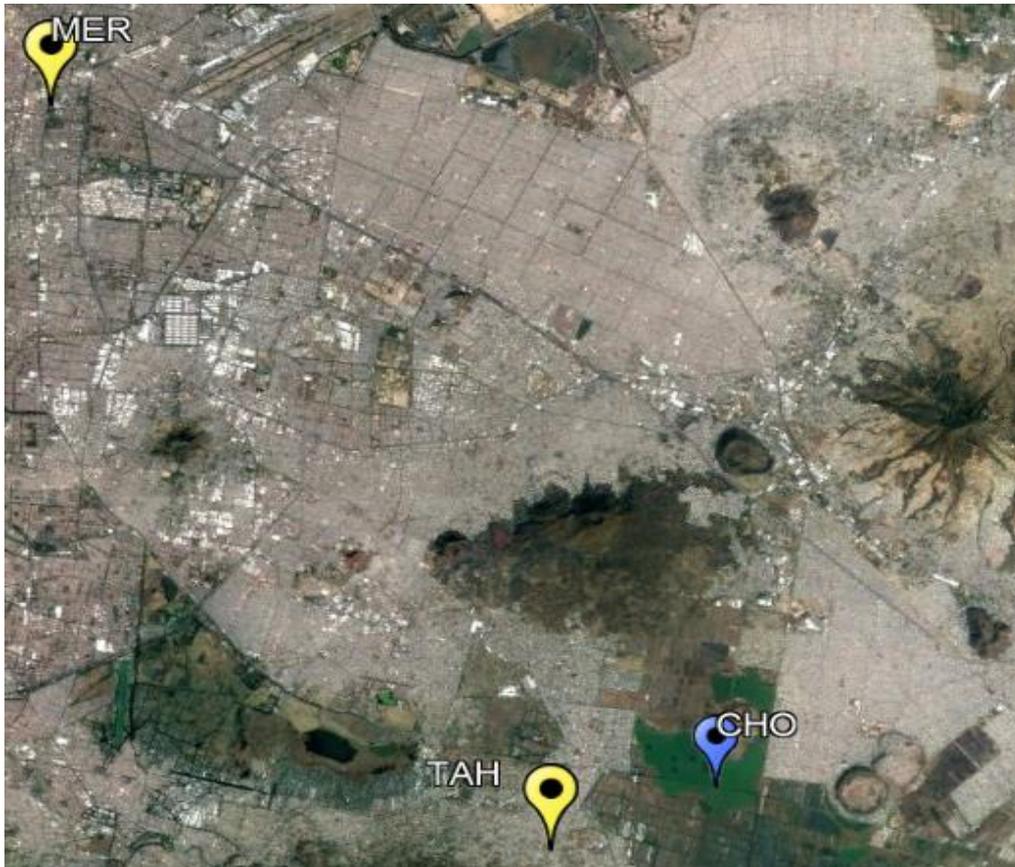
**Figura 11.** Representación del centro de la zona IV la cual pertenece a la zona A de acuerdo al Anexo-Tabla1; la Zona B es aquella que queda por afuera del polígono.

En el caso de los metales pesados se consideraron todos los datos, ya que, pese a ser estaciones fijas las condiciones meteorológicas dificultaron la toma de las muestras en los puntos exactos, quedando algunos puntos dentro y otros fuera del polígono.

Los datos de los parámetros meteorológicos se obtuvieron de la base de datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), de la cual se utilizó la estación de Tláhuac (TAH), ubicada a una distancia aproximada de 3.86 km al centro de la zona A del lago obteniendo la velocidad del viento (WS), la temperatura (T) y la humedad relativa (HR); mientras que la radiación solar se obtuvo de la estación de la Merced (MER) ubicada a una distancia aproximada de 22.60 km al centro de la zona A (Fig.12). Ambas estaciones son las más cercanas a la zona de muestreo respectivamente de acuerdo a su disponibilidad en la REDMET. Los datos meteorológicos analizados fueron los que comprendían su registro para el día de muestreo de los parámetros fisicoquímicos en un horario de las 9 a las 13 hrs

Debido a la distancia de las estaciones empleadas, se tomaron los datos de la radiación solar, la HR, la temperatura y la WS para los únicos meses que coincidían y que se encontraban disponibles para el periodo analizado en el presente trabajo ( diciembre del 2015, enero, febrero, marzo y abril del 2016 para radiación solar, HR y T y, Marzo y Abril del 2016 para la WS) de la estación meteorológica instalada en el lago de Chalco

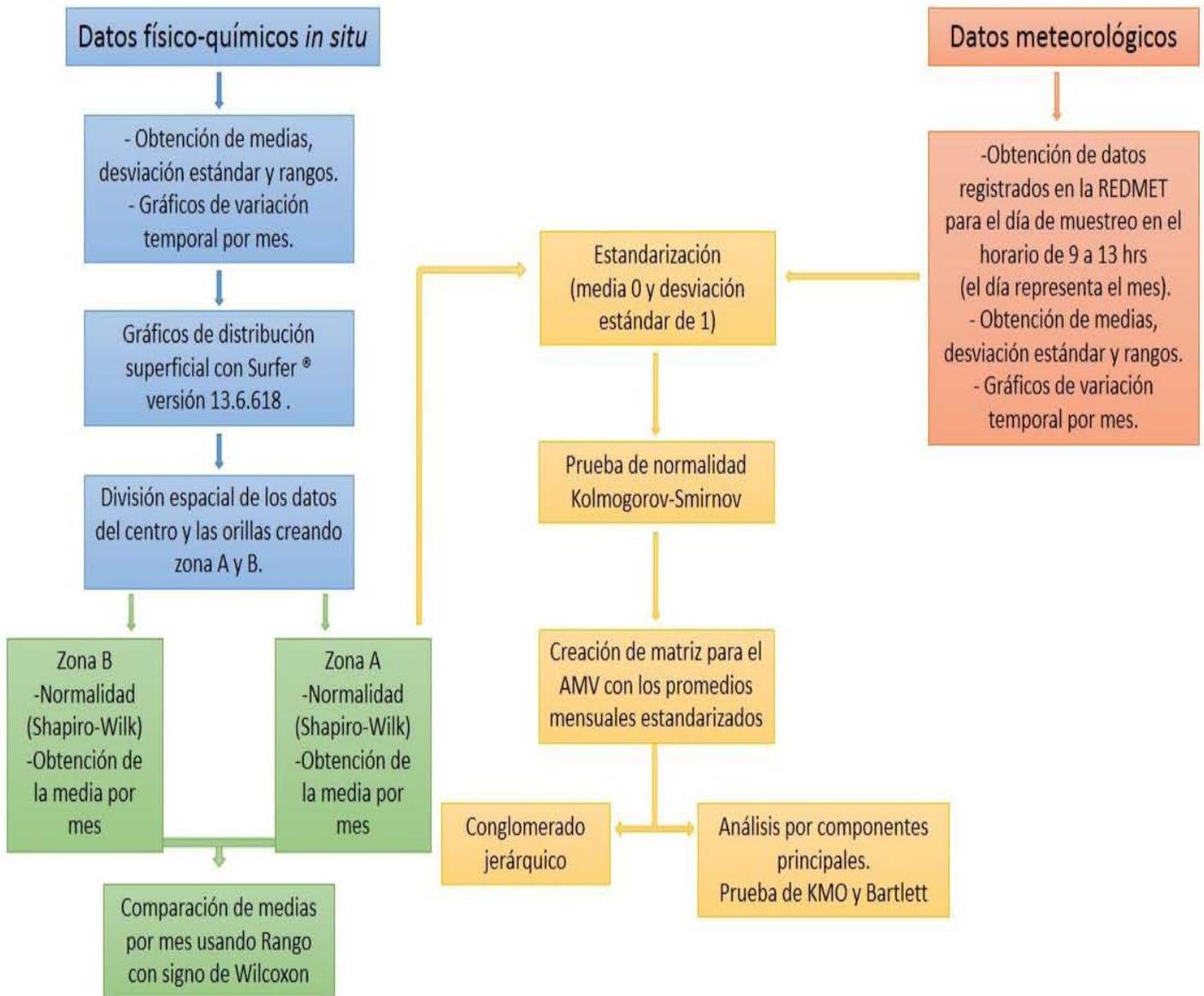
(CHO) en el segundo semestre del 2015 por el proyecto PAPIIT-IV00215 “Cambio Climático y Medio Ambiente en la historia del lago de Chalco” con coordenadas 19° 15' 40.4'' N; 98° 58' 27.6'' W. Correlacionando las 3 estaciones con sus respectivas variables empleadas con el fin de comprobar que pese a la distancia el comportamiento atmosférico es similar a la zona de estudio.



**Figura 12.** Ubicación de las estaciones meteorológicas de la Merced (Mer), Tlahuac (TAH) y Chalco (CHO)

La relación entre los factores climáticos y la calidad del agua superficial del lago de Chalco se realizó a través de las siguientes pruebas multivariantes: Análisis por Componentes Principales (PCA, *por sus siglas en inglés*) aplicando el método de rotación Varimax; y por conglomerados jerárquicos (CA, *por sus siglas en inglés*), utilizando el enlace de similitud de Ward. Para ambos casos se empleó el software IBM® SPSS® Statistics versión 20 (Marques de Sá, 2003). Previo al análisis, todos los datos tanto los de calidad del agua como los climáticos fueron estandarizados (media 0 y desviación estándar de 1) y la prueba de normalidad y homocedasticidad empleada fue Kolmogorov-Smirnov (K-S). El análisis multivariado es una herramienta que permite la

identificación de posibles factores que influyen en los sistemas acuáticos por lo que es ampliamente utilizada para el análisis de calidad del agua (Kazi et al., 2009; Iscen et al., 2008; Parinet et al., 2004). El análisis estadístico se puede observar en la fig. 13, donde se resumen los pasos realizados.



**Figura 13.** Diagrama de tratamiento de los datos fisicoquímicos registrados in situ y meteorológicos

### III. Resultados

---

#### *Análisis temporal y superficial de los parámetros fisicoquímicos evaluados in situ*

El análisis de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ* consistió en el registro de diez puntos aleatorios (excepto para abril 2015) y tres fijos por día de muestreo, no obstante, no se lograron obtener los tres puntos fijos en las mismas coordenadas seleccionadas debido a las condiciones meteorológicas que impedían que la balsa se mantuviera fija o llegara hasta las coordenadas marcadas. Los resultados obtenidos se presentan en el Anexo-Tabla 1.

Durante el periodo 2015-2016, la temperatura media mensual osciló entre los 19 y 23.2 °C; el pH entre 9 y 10; la CE entre 1328 y 1908  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ; los SDT entre 703 y 988 ppm; el ORP entre -201 y -110 mV; y la concentración de OD entre 0.0 y 35.6 mg/l (Fig. 14). Los niveles de OD por arriba de los 19 mg/l se registraron en puntos aleatorios que coincidían con las orillas del lago o cercanos a zonas donde antes había un camino, esas zonas se caracterizan por tener poca profundidad, por lo que la interacción entre la balsa y el sedimento pudo ser mayor, perturbando el fondo, causando que la membrana de la sonda multiparamétrica se ensuciara y tuviera un registro erróneo.

De abril a agosto del 2015 la temperatura, pH y el OD tuvieron tendencias casi constantes, pero con la presencia de valores atípicos mayores a la media, no obstante, entre noviembre y diciembre aumentan los rangos, pero disminuye la presencia de valores atípicos (Fig. 14).

La CE y los SDT tuvieron la misma tendencia, comenzando con niveles altos que posteriormente disminuyeron gradualmente conforme avanzó el año alcanzando los mínimos a finales del 2015 para después aumentar y alcanzar su máximo en mayo del 2016. El ORP tuvo una tendencia opuesta a los SDT y la CE e igual con un cambio gradual. Estos últimos tres parámetros tuvieron una presencia considerable de valores atípicos mayores y menores a las medias resaltando una mayor presencia para la CE durante 2015 (Fig. 14).

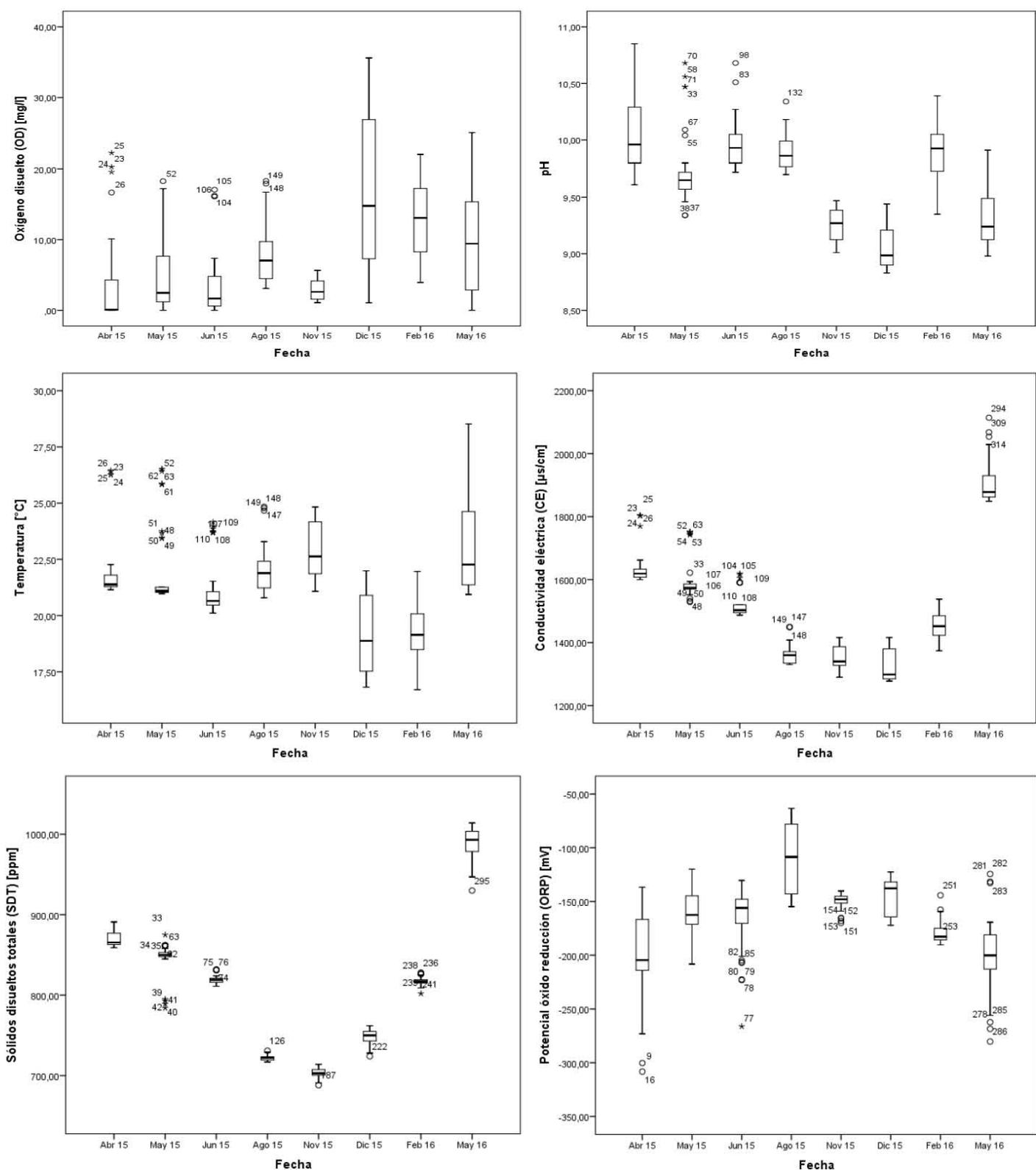


Figura 14. Variación temporal de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el agua superficial del lago de Chalco

La presencia de los valores atípicos y su mayor frecuencia durante el 2015 indican que pudo haber existido diferencias en la distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos muestreados; así como diferencias durante el horario de muestreo por día. Ambas diferencias influyeron en que los datos no siguieran una distribución normal limitando de esta manera el análisis multivariado.

En el análisis de la distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ*, se obtuvieron gráficas de superficie para los meses de mayo, agosto y diciembre del 2015 y mayo del 2016 mediante el software Surfer® versión 13.6.618. Las gráficas se muestran en las figuras de la 15 a la 18 junto con el polígono que representa cada área sobre el lago.

Para mayo del 2015 (Fig. 15), el OD, la temperatura y la CE tuvieron valores mínimos en los extremos Este y Oeste y los máximos en los extremos Norte y Sur. El pH tuvo valores de hasta 10.6 en la orilla de la sección Este, disminuyendo hacia el Oeste, mientras que en el centro no se observan grandes diferencias. El ORP tiene los valores mínimos en las orillas Este y Oeste y los máximos en el extremo Norte. Los SDT tienen una variación visible de la orilla Este al centro del lago de forma descendente alcanzando los mínimos en la orilla Noroeste; esto último, marca un patrón distinto en la distribución comparado con los demás parámetros.

En agosto del 2015 (Fig. 16), la temperatura, los SDT, la CE y el OD tuvieron una visible diferencia entre la orilla Este al resto del lago con una tendencia a disminuir hacia el Oeste. El pH tuvo sus máximos en las orillas Este y Oeste con mínimos en la orilla Norte y Sur. Debido a que el cambio más notable se da en la transición de la orilla Este al Oeste, el centro mantiene los valores medios. El ORP fue el parámetro que marco una diferencia en el patrón de distribución comparado con los demás parámetros ya que sus valores cambian de forma ascendente de Sur a Norte.

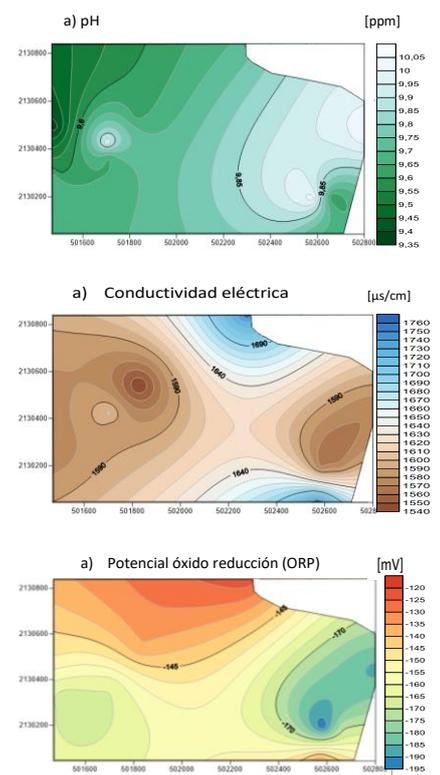
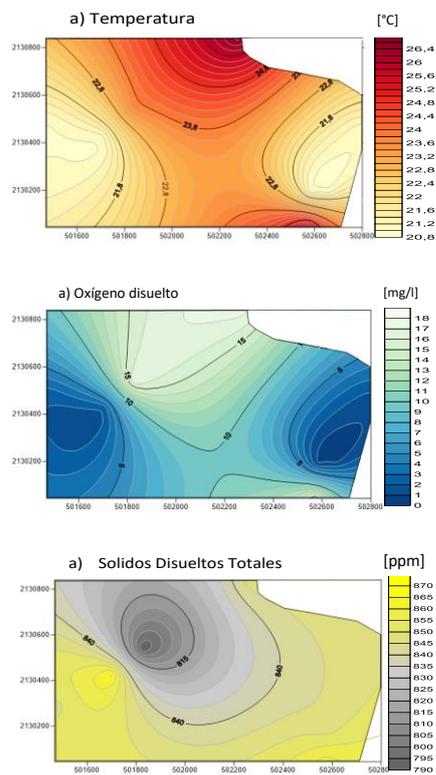
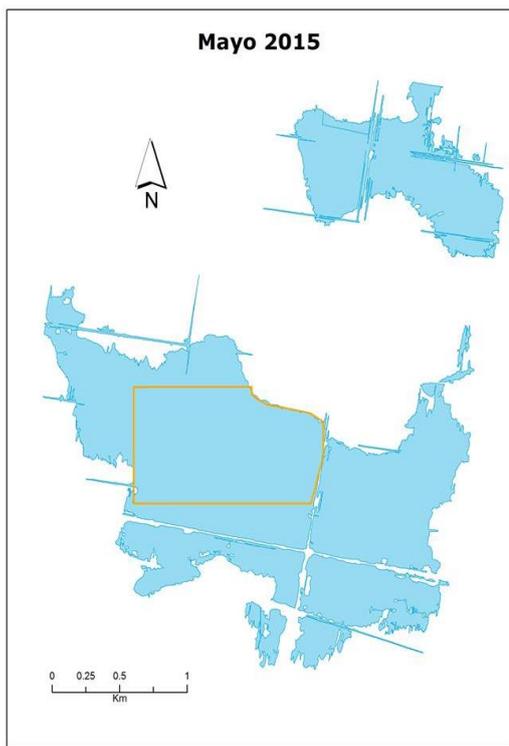


Figura 15. A la izquierda se presenta el polígono que marca el área abarcada por los graficas de distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos (a) que corresponden al mes de mayo del 2015.

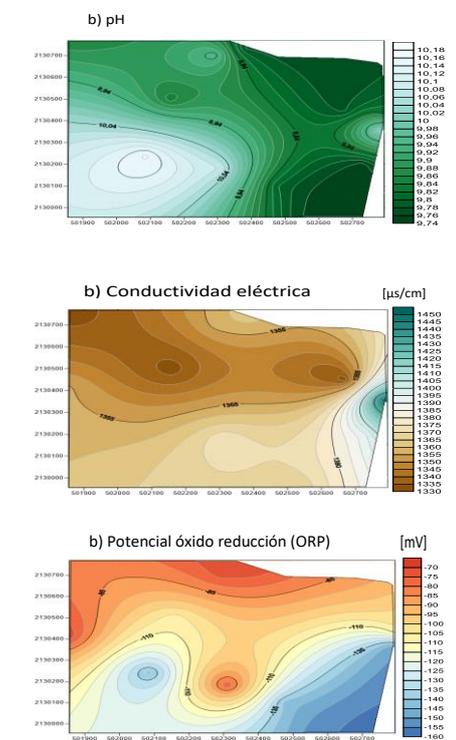
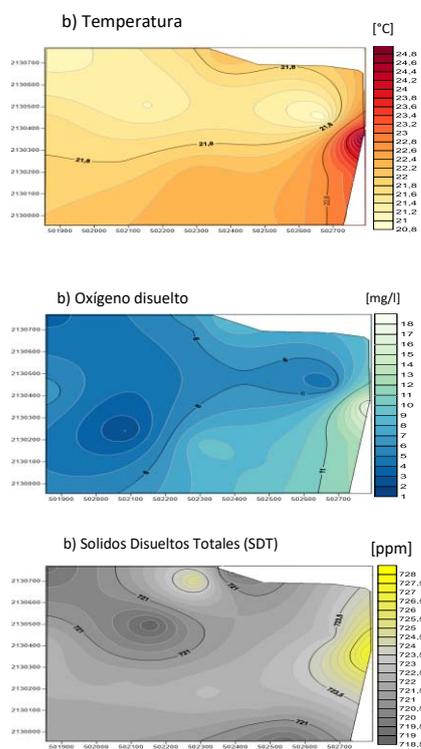
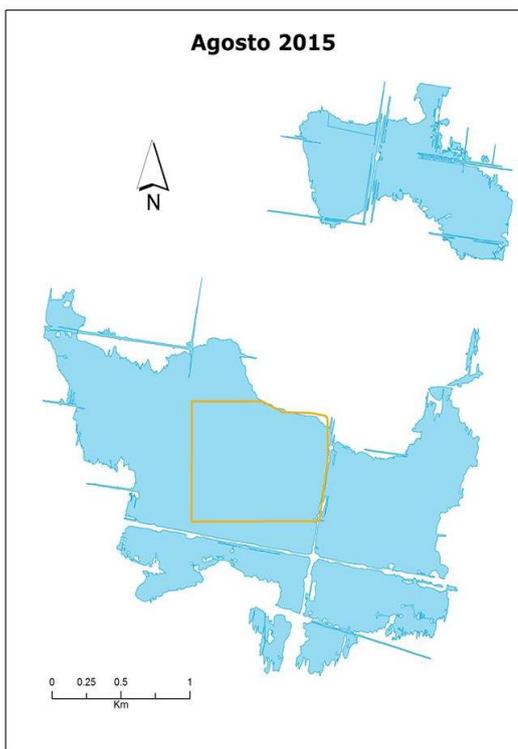


Figura 16. A la izquierda se presenta el polígono que marca el área abarcada por los graficas de la distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos (b) que corresponden al mes de agosto del 2015.

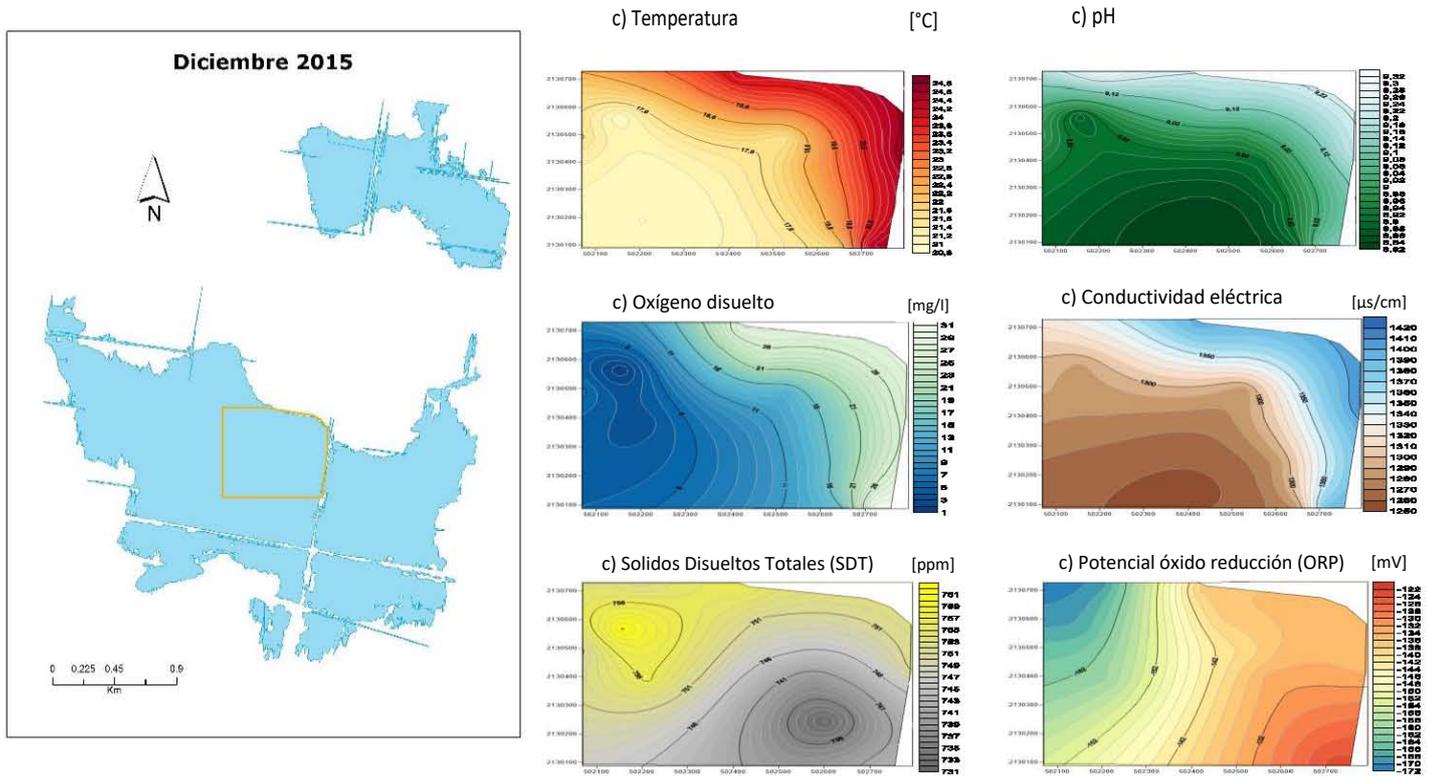
En el mes de diciembre (Fig. 17), todos los parámetros excepto los SDT mostraron una diferencia entre el contorno Noreste del lago donde se registraron los valores máximos, disminuyendo hacia el Suroeste hasta alcanzar los mínimos. Los SDT descendieron de Norte a Sur. Este mes fue el que mostró mayor heterogeneidad superficial entre los extremos y el centro del lago.

En mayo del 2016 (Fig. 18), los extremos Este y Suroeste registraron los valores máximos para la temperatura, pH, OD y CE, mientras que los mínimos se dieron en la zona Noroeste del polígono. En cuanto a los SDT y el ORP, la distribución fue más homogénea, aunque para los SDT sí existió un cambio gradual de Sur a Norte de forma ascendente.

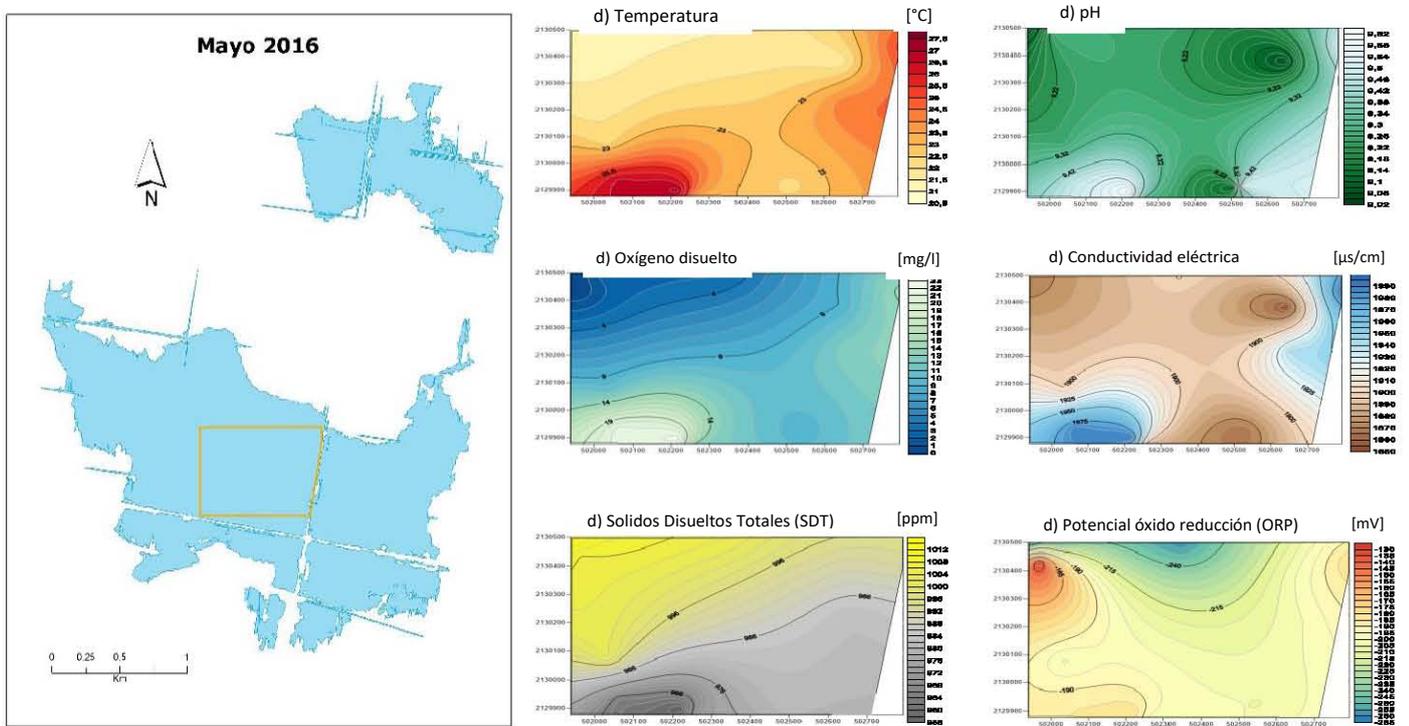
Con lo anterior se observó que durante los meses existió una diferencia en la distribución superficial entre el centro y los extremos del lago, registrando los valores medios en el centro de los polígonos, y los máximos y mínimos en los extremos que representan las orillas del lago.

Otro patrón que se pudo observar fue la relación de cambio entre los parámetros fisicoquímicos en la distribución superficial por la interacción que existe entre ellos, como es el caso del OD y la temperatura, los cuales cambiaron en el mismo sentido espacialmente, es decir, que donde el OD aumenta la temperatura también lo hace y viceversa. En cuanto a la relación de OD y pH en mayo y agosto del 2015 el cambio es inverso, mientras que para diciembre del 2015 y mayo del 2016 es en el mismo sentido. Para el OD y el ORP, el cambio fue directamente proporcional en mayo y diciembre del 2015 y mayo del 2016. En la relación de la CE y los SDT se encontró que agosto del 2015 es el único mes que mantuvo un patrón de distribución similar y en el mismo sentido de cambio, sin embargo, en los demás meses la distribución no muestra semejanzas.

Debido a que los valores extremos se dan principalmente en las orillas del lago y los medios en el centro, se creó un polígono que agrupa las mediciones que se encontraron en el centro (Fig. 11) con el fin de comparar los valores registrados entre el centro y las orillas. Esto para analizar que estadísticamente existen diferencias significativas entre estas áreas y que gran parte de los valores atípicos y los causantes de los grandes rangos se dieron por los datos de las mediciones de las orillas. Los resultados se presentan en el Anexo-Tabla 2.



**Figura 17.** A la izquierda se presenta el polígono que marca el área abarcada por los graficas de la distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos (c) que corresponden al mes de diciembre del 2015.



**Figura 18.** A la izquierda se presenta el polígono que marca el área abarcada por los graficas de la distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos (d) que corresponden al mes de mayo del 2016.

El parámetro con mayor recurrencia en diferencias significativas entre la media del centro y la de los extremos fue la temperatura, presentándose para abril, junio, agosto, diciembre del 2015 y mayo 2016; posteriormente, con 4 meses, el OD, la CE, los SDT y la salinidad; con 3 meses el pH y finalmente el ORP fue el de mayor homogeneidad, siendo solo diciembre el que presentó diferencia significativa. Por lo tanto, diciembre es el único mes que tuvo en todos sus parámetros una diferencia significativa entre el centro y la orilla.

Finalmente, se observó que el centro presentó más casos en los que se cumplía una distribución normal, tuvo menos casos de valores atípicos y los rangos eran menos amplios que en los extremos del lago.

A continuación, se presenta el análisis del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos pertenecientes a la zona centro del lago (Fig. 19).

De acuerdo a esta figura el OD tuvo sus valores mínimos en el mes de abril del 2015 con concentraciones menores a 1 mg/l, fue el mes que tuvo más casos de anoxia, mientras que mayo 2015 tuvo la dispersión más grande en la concentración con una alta asimetría, teniendo valores desde 0.72 a 17.21 mg/l, consecutivamente diciembre del 2015 fue el mes con el segundo rango más amplio, el cual osciló entre 1.05-16.65 mg/l. En los meses de junio, noviembre del 2015 y mayo del 2016 se presentaron casos de anoxia y se mantuvieron con valores hipóxicos; fueron agosto 2015 y febrero 2016, los meses con una oxigenación más homogénea y sin llegar a condiciones de hipoxia.

La temperatura tuvo sus medias mayores y cercanas a los 20 °C durante el año 2015 hasta noviembre, dando una marcada disminución para el mes de diciembre, alcanzando una media de 17.4 °C, recuperándose gradualmente de febrero a mayo del 2016, hasta alcanzar una media de 21.4 °C.

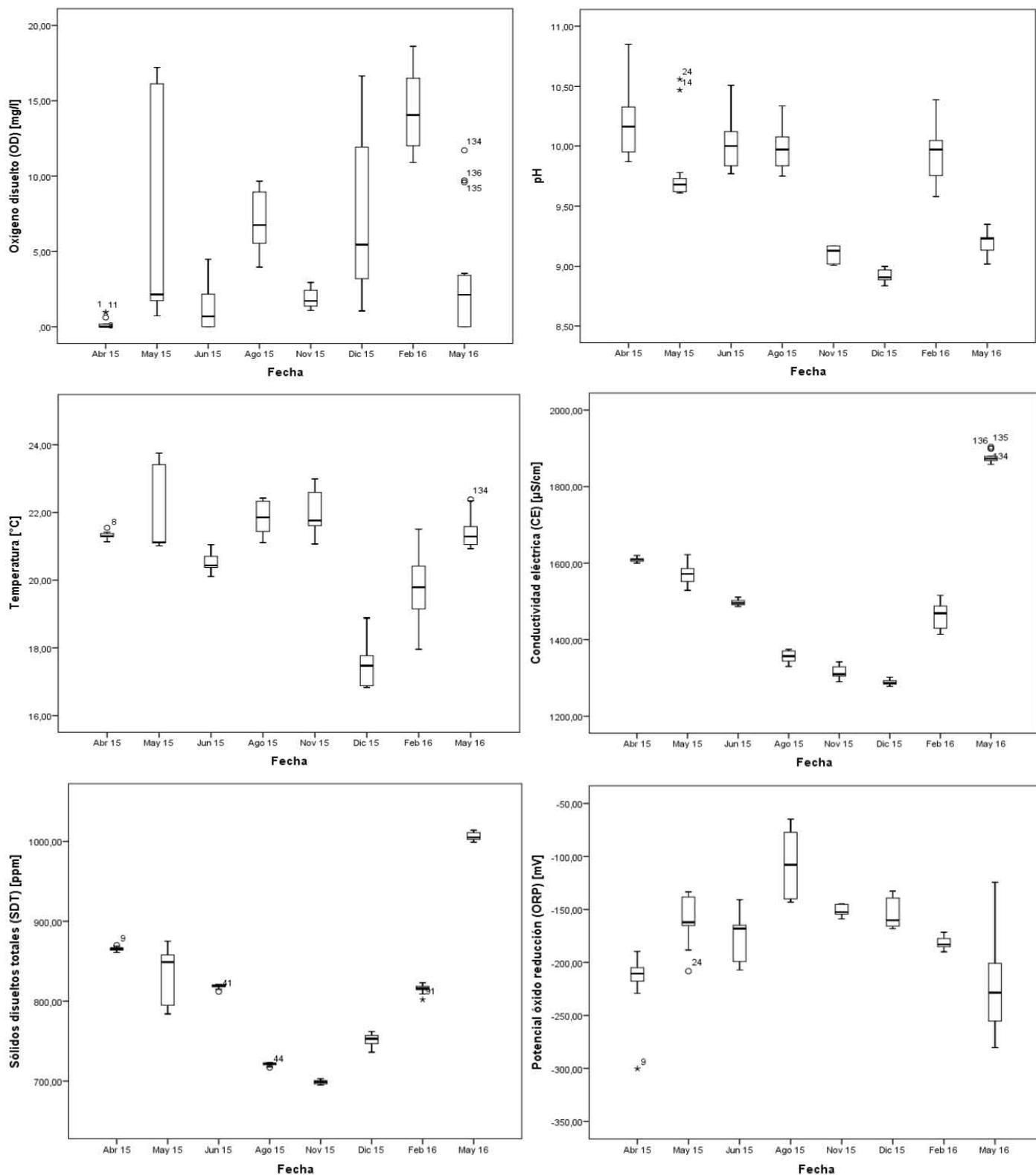


Figura 19. Variación temporal de los parámetros fisicoquímicos registrados en el centro de la zona IV del lago de Chalco.

El pH siempre se mantuvo entre 8.8 y 10.8 es decir, básico. Para abril del 2015, el pH presentó su nivel más alto y en noviembre y diciembre se registraron los niveles más bajos (9.0 y 8.8 respectivamente), posteriormente, aumenta en febrero hasta alcanzar los valores de los primeros meses del 2015. En mayo del 2016 volvió a disminuir.

En cuanto a la CE y los SDT, se observaron cambios graduales durante todo el año, disminuyendo de abril a diciembre y volviendo a aumentar de febrero a mayo del 2016. Mayo del 2016 fue el mes que presentó la media mayor siendo más alta que la media de mayo del 2015 alcanzando los 1877  $\mu\text{s}/\text{cm}$  de CE y 1006 ppm de SDT; las medias mínimas se registraron para diciembre y noviembre con 1287  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y 698 ppm, respectivamente. El ORP registró la media máxima en agosto con -107 mV para después disminuir hasta alcanzar la media mínima en mayo del 2016 con -215 mV.

Asimismo, estos parámetros se encuentran relacionados entre sí de forma directa o indirecta, por lo que a continuación se presenta un análisis comparativo de la variación anual entre los parámetros fisicoquímicos.

Como se observa en las Fig. 20 a, de abril a agosto del 2015 la relación entre el OD y la temperatura mantuvieron el cambio en la misma dirección mientras que el cambio del OD con el pH (Fig. 20 b) fue de forma opuesta, sin embargo, a partir de noviembre la relación de cambio se pierde para ambas.

En cuanto al OD y el ORP (Fig. 20 c), el cambio se dio en el mismo sentido excepto para el mes de febrero, donde el OD aumenta y el ORP disminuye; el pH cambió opuestamente al ORP durante 6 meses de 8 y la CE y los SDT cambiaron en el mismo sentido (Fig. 20 d).

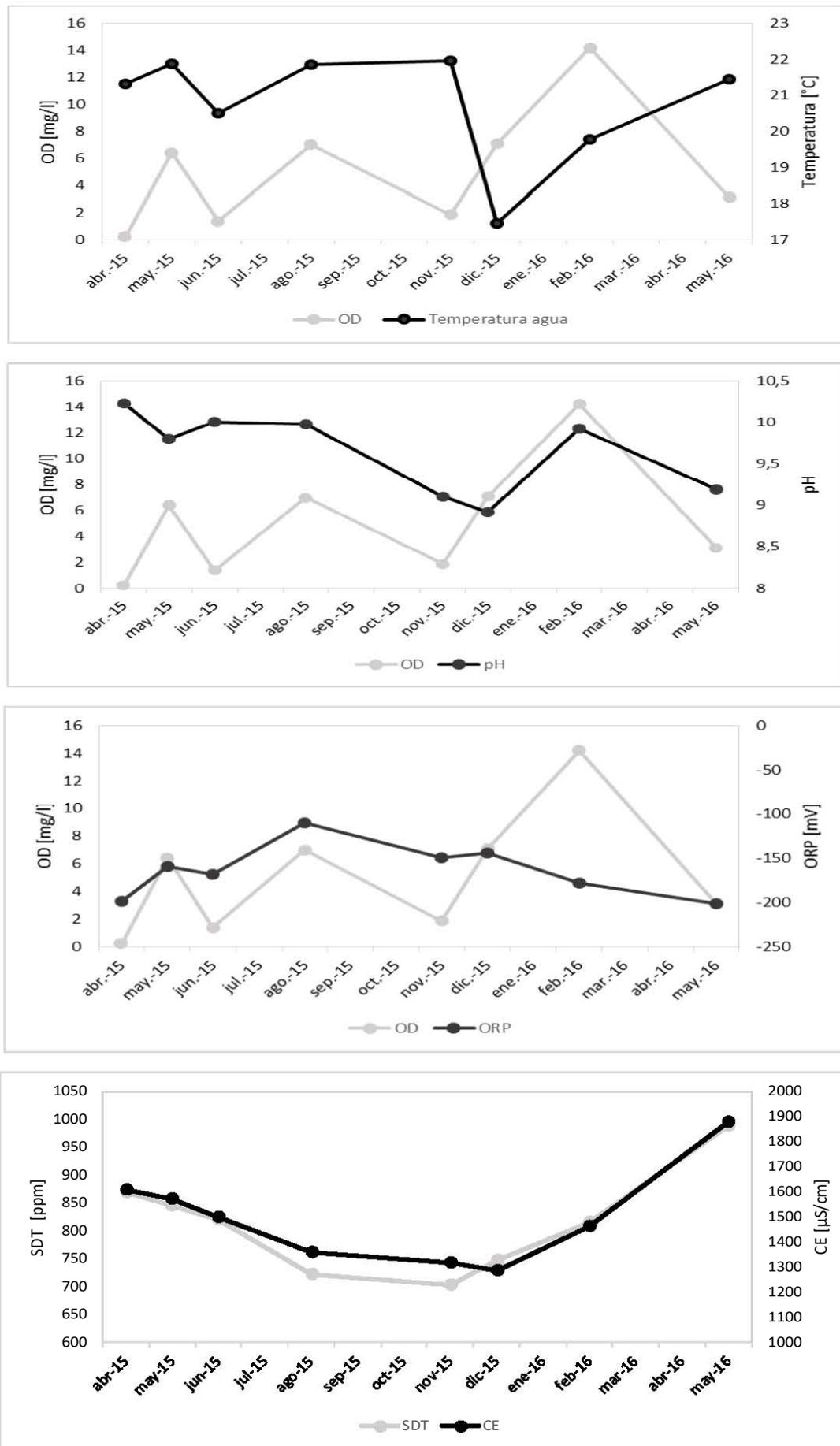


Figura 20. Comparación temporal entre los parámetros fisicoquímicos registrados en el centro de la zona IV del lago de Chalco. a) OD vs Temperatura del agua; b) OD vs pH; c) OD vs ORP; d) SDT vs CE

## *Determinación de metales pesados*

El registro de la presencia de metales pesados en el lago se obtuvo a partir de la toma de muestras de agua superficial en tres puntos del lago por duplicado, por lo tanto, se obtuvieron 6 muestras de agua por día de muestreo, excepto para abril del 2015 del cual solo se obtuvo una muestra por estación. Los resultados se muestran en el Anexo-tabla 3. De acuerdo a la Fig. 21, los compuestos de aluminio tuvieron cambios graduales a lo largo del año, con dos fluctuaciones marcadas, una de abril a noviembre del 2015, y la segunda de diciembre del 2015 hasta mayo del 2016. La fluctuación más marcada se dio durante el 2016, ya que alcanzaron la media máxima con 0.05 y 0.1 mg/l de  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , respectivamente.

El níquel tuvo fluctuaciones poco marcadas, sin embargo, se observan cambios graduales, donde por momentos sube y luego vuelve a disminuir su concentración. Este comportamiento se presentó en tres ocasiones, la primera de abril a agosto del 2015, la segunda de noviembre del 2015 a febrero del 2016 y finalmente de febrero a mayo del 2016. La media máxima anual se registró en agosto 2015 con 0.3 mg/l.

Para el zinc, solo hubo presencia durante el 2015 y con un cambio gradual, comenzando con un aumento hasta el mes de junio del 2015 con una media de 0.11 mg/l que posteriormente disminuyó hasta registrar una concentración media de cero a partir de enero del 2016. En noviembre se presentó en una de las muestras valores atípicos por arriba de los 0.8 mg/l.

Los compuestos cromados y el cromo hexavalente tuvieron presencia sólo durante el 2015, mostrando una alta asimetría y grandes rangos. El mes con concentraciones más altas se dio para agosto del 2015 con 39, 81 y 87  $\mu\text{g/l}$  de  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , respectivamente.

Finalmente, la demanda química de oxígeno tuvo una tendencia a aumentar durante todo el periodo de muestreo. Comenzando con niveles bajos cercanos a cero en mayo y junio del 2015, aumentando gradualmente hasta alcanzar la media máxima de 411 mg/l en marzo del 2016. Posteriormente volvió a disminuir, pero conservó sus valores medios por arriba de los 170 mg/l.

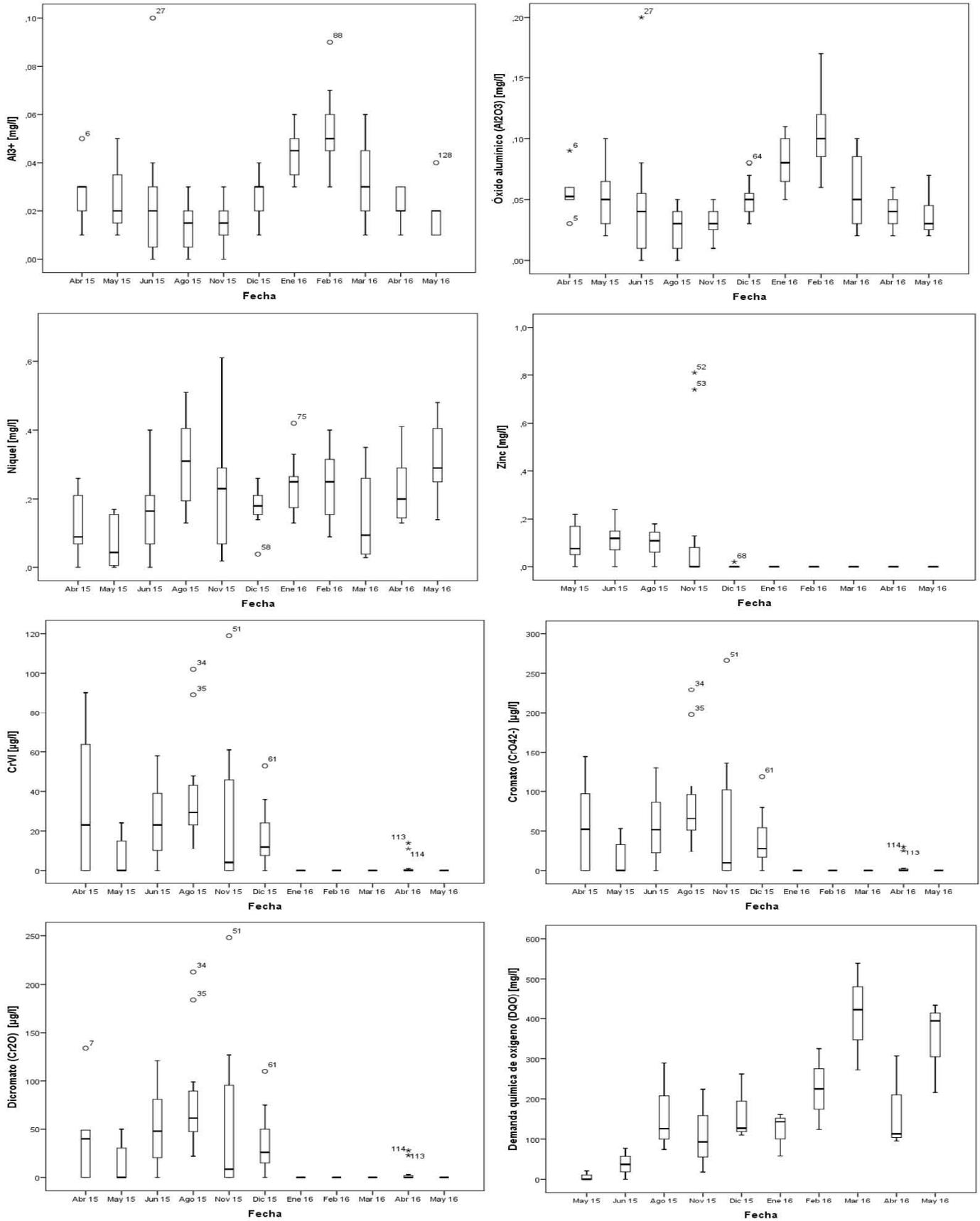


Figura 21. Variación temporal de la concentración de metales pesados

## *Análisis anual de los parámetros atmosféricos*

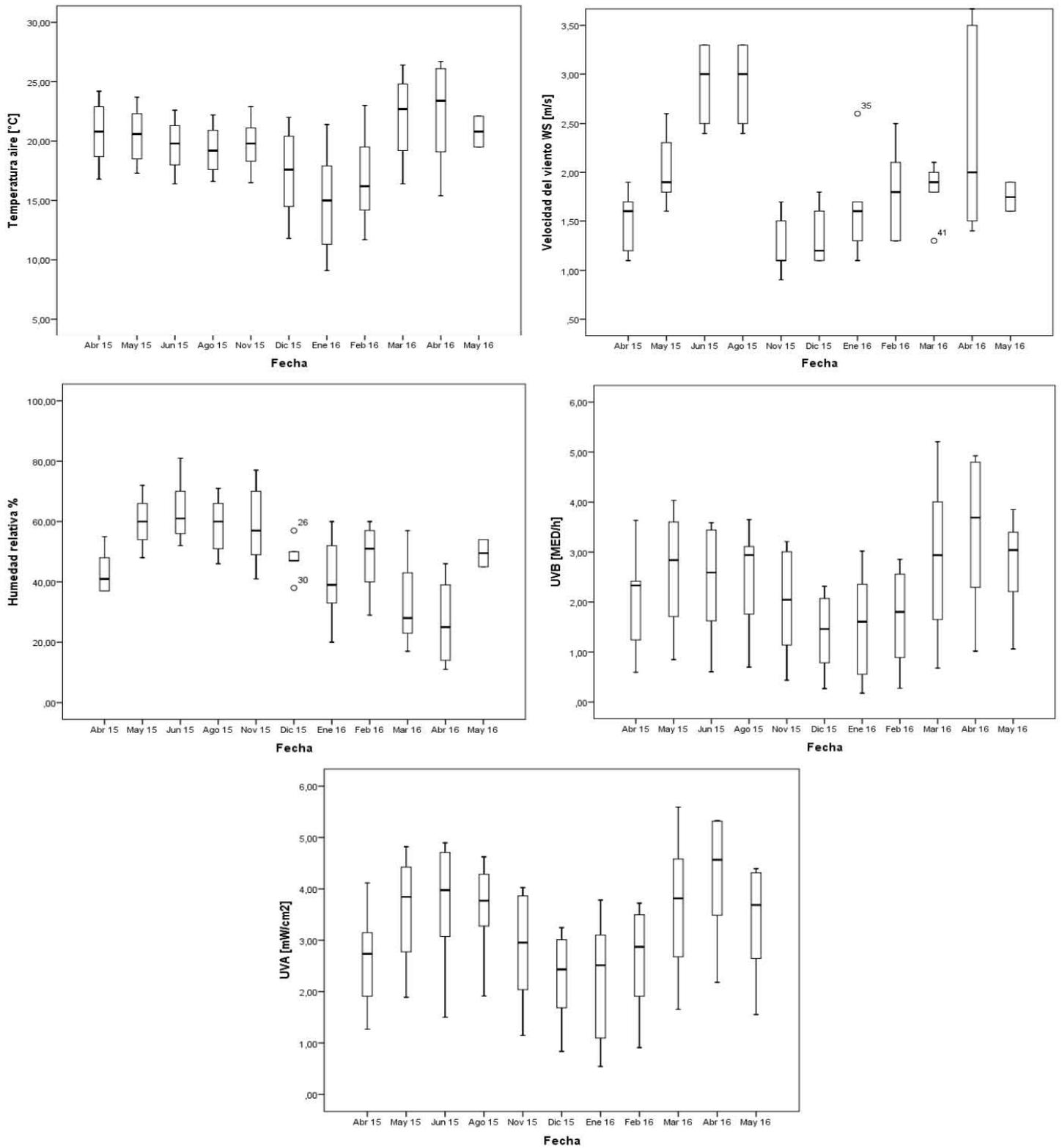
El horario en que se realizó el muestreo de los parámetros fisicoquímicos fue aproximadamente entre las 10 y 14 hrs, por lo que los datos meteorológicos se colectaron en el intervalo de las 9 a 13 hrs. Los resultados estadísticos de los datos meteorológicos se presentan en el Anexo-Tabla 4.

Mientras tanto, las correlaciones entre estaciones mostraron un comportamiento similar entre la temperatura con una correlación de 0.97, la HR con 0.76 y la radiación solar con 0.77, sin embargo, la WS dio una correlación de 0.38, no obstante, podemos considerar la tendencia analizando los resultados de manera conservadora (Anexo-Tabla 5)

De acuerdo a la Fig. 22, la temperatura fue constante hasta el mes de noviembre, en diciembre comenzó a disminuir y alcanzó la media mínima en enero con 14.9 °C para después aumentar gradualmente, registrando la media máxima de 28.8 °C en mayo del 2016. La humedad relativa registró sus medias más altas durante la temporada de lluvias (junio-octubre) y disminuyó gradualmente en la temporada de estiaje; la media máxima se dio en junio con 64% y la mínima en abril del 2016 con 27%.

La velocidad del viento tiende a aumentar de abril a agosto del 2015 de 1.5 a 2.9 m/s<sup>2</sup>, siendo esta última la media máxima registrada, posteriormente disminuyó drásticamente en el mes de noviembre, el cual tuvo la media mínima de 1.2 m/s<sup>2</sup>, para después volver a aumentar gradualmente. En abril del 2016 se tuvo el valor máximo registrado y el rango más amplio de 1.4 a 3.7 m/s<sup>2</sup>. En cuanto a la radiación solar tanto la UVB como UVA registraron la media mínima en diciembre con 1.3 MED/hr y 2.2 mW/cm<sup>2</sup> y la máxima en abril del 2016 con 3.3 MED/hr y 4.1 mW/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

De forma general, abril y mayo del 2016 fueron más calientes, menos húmedos y más soleados comparados con abril y mayo del 2015, asimismo en 2016 se registraron valores más extremos que el 2015, excepto en la velocidad del viento.



**Figura 22.** Variación temporal de los parámetros atmosféricos

## *Modelo de correlación entre factores climáticos y la calidad del agua superficial del lago*

Para determinar cuáles fueron los parámetros con mayor varianza a lo largo del año se aplicó el Análisis por Componentes Principales para los parámetros fisicoquímicos evaluados *in situ* pertenecientes al centro del lago con los parámetros atmosféricos, por lo que sólo se consideraron ocho meses (abril, mayo, junio, agosto, noviembre y diciembre del 2015 y febrero y mayo del 2016).

Primero se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, la cual asumió una distribución normal, posteriormente se realizaron las pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y Bartlett, de los cuales no se logró obtener el supuesto de ser un análisis meritorio. Sin embargo, podemos considerar la tendencia analizando los resultados de manera conservadora. Para este análisis se consideró que para una mejor interpretación de la solución factorial e interpretación gráfica se aplicó el método de rotación Varimax (Anexo-Tabla 6).

Los eigenvalores de los tres primeros componentes principales representaron el 85.5% del total de la varianza de las observaciones. La figura 23 y la Tabla 3 muestran que los parámetros representados por el CP<sub>1</sub> fueron el pH, WS, UVB, UVA marcados de color naranja, los cuales conformaron el 39.88% de la varianza, al CP<sub>1</sub> se le puede agregar la HR pero considerando una correlación débil (0.537); el segundo CP<sub>2</sub> lo conformó la CE y los SDT con el 32.89% marcados de color azul, los cuales mantienen una correlación negativa fuerte con el ORP; y el CP<sub>3</sub> asoció la temperatura del agua y la temperatura del aire con el 12.76% marcados de color morado, el cual tuvo una correlación negativa fuerte con el OD.

El análisis por conglomerados jerárquicos fue aplicado para determinar las agrupaciones por similitud entre el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del agua y entre los atmosféricos. Por lo tanto, se generaron dos CA: Conglomerado 1 conformado por los parámetros fisicoquímicos evaluados *in situ*: temperatura del agua, OD, SDT, ORP, pH, CE. Conglomerado 2 conformado por los parámetros atmosféricos: temperatura del aire, HR, WS, radiación solar.

Tabla 3. Matriz de componentes rotados <sup>a</sup>			
	Componente		
	1	2	3
Temp_agua	0.442	0.129	0.708
pH	0.836	0.288	-0.103
OD	0.113	-0.095	-0.854
CE	0.004	0.889	0.363
SDT	-0.008	0.942	0.160
ORP	0.217	-0.904	-0.083
Temp_aire	0.201	0.363	0.896
WS	0.864	-0.148	0.013
HR	0.537	-0.549	0.444
UVB	0.841	-0.191	0.450
UVA	0.864	-0.410	0.238

Método de extracción: Análisis de componentes principales.  
Método de rotación: Normalización Varimax con Kaiser.

a. La rotación ha convergido en 5 iteraciones.

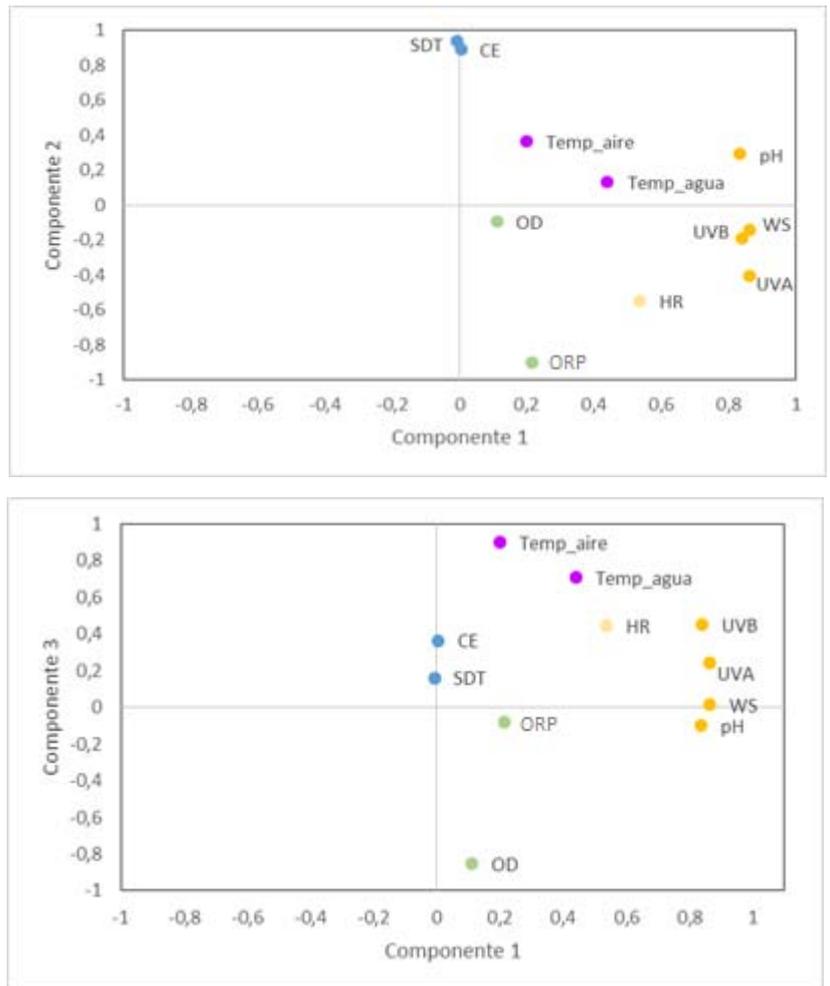


Figura 23. Gráfico de componentes en 2D

De ambos conglomerados se considera que el valor de re-escala que da mejor aproximación e interpretación a los grupos creados es en la escala aproximada a 4 (Figs. 24 y 25). Con dicha consideración para los parámetros fisicoquímicos se crean dos grupos, el primero lo compuso abril, mayo, junio del 2015; el segundo por agosto y noviembre del 2015 y quedan aislados diciembre del 2015 y febrero y mayo del 2016, por lo que no existe similitud entre los aislados y los agrupados. Los meses del 2015 presentaron mayor homogeneidad al agruparse de forma consecutiva.

Para los parámetros atmosféricos se crearon dos grupos; el primero conformado por mayo, junio y agosto del 2015 el cual podría ser temporada de lluvias y el segundo por abril, noviembre y diciembre del 2015 y febrero y mayo del 2016 que podría representar la temporada de secas; revelando que el 2015 también tuvo más casos de

homogeneidad al ser consecutivos los meses del primer grupo representado. Comparando la distribución de ambos conglomerados se encontró que existe una similitud en la agrupación de mayo y junio del 2015 con una distancia de 1.3 en el CA1 y de 1.5 en el CA2, mientras que para noviembre del 2015 y mayo del 2016 en el CA1 se agruparon a una distancia de 20.4 y el CA2 a 1.2, lo cual indicó que la calidad del agua fue muy distinta entre dichos meses, mientras que los parámetros atmosféricos se comportaron de forma similar, este fenómeno también se presentó para abril del 2016 con una distancia de 11.3 con noviembre del 2015 y 6.9 con mayo del 2016 en el CA1, mientras que para el CA2 fue de 1.09 y 0.52, respectivamente (Tabla 4 y 5).

**Tabla 4. Matriz de distancias parámetros fisicoquímicos**

Caso	Distancia euclídea al cuadrado							
	1:Abr 15	2:May 15	3:Jun 15	4:Ago 15	5:Nov 15	6:Dic 15	7:Feb 16	8:May 16
1:Abr 15	,000	2,509	1,725	11,390	11,305	16,209	5,851	6,980
2:May 15	2,509	,000	1,345	5,206	6,046	10,599	3,143	7,627
3:Jun 15	1,725	1,345	,000	5,207	5,642	8,406	3,203	10,572
4:Ago 15	11,390	5,206	5,207	,000	3,821	9,222	6,671	24,721
5:Nov 15	11,305	6,046	5,642	3,821	,000	6,159	8,390	20,472
6:Dic 15	16,209	10,599	8,406	9,222	6,159	,000	7,032	23,006
7:Feb 16	5,851	3,143	3,203	6,671	8,390	7,032	,000	13,904
8:May 16	6,980	7,627	10,572	24,721	20,472	23,006	13,904	,000

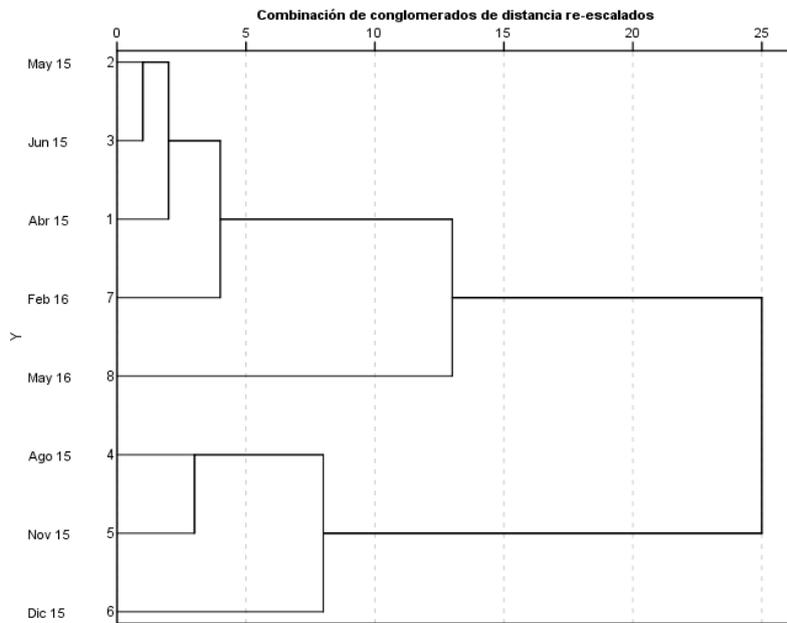
Matriz de disimilitudes

**Tabla 5. Matriz de distancias parámetros atmosféricos**

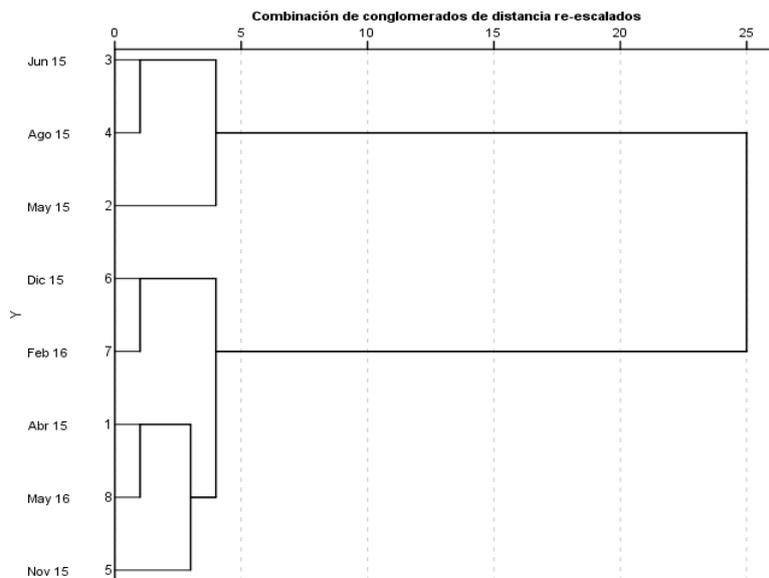
Caso	Distancia euclídea al cuadrado							
	1:Abr 15	2:May 15	3:Jun 15	4:Ago 15	5:Nov 15	6:Dic 15	7:Feb 16	8:May 16
1:Abr 15	,000	2,290	6,037	5,324	1,090	1,219	1,226	,525
2:May 15	2,290	,000	1,537	1,504	1,762	4,042	2,628	2,417
3:Jun 15	6,037	1,537	,000	,116	5,664	7,579	4,767	5,121
4:Ago 15	5,324	1,504	,116	,000	5,546	6,916	4,076	4,646
5:Nov 15	1,090	1,762	5,664	5,546	,000	1,279	1,645	1,228
6:Dic 15	1,219	4,042	7,579	6,916	1,279	,000	,493	1,162
7:Feb 16	1,226	2,628	4,767	4,076	1,645	,493	,000	1,141
8:May 16	,525	2,417	5,121	4,646	1,228	1,162	1,141	,000

Matriz de disimilitudes

Este comportamiento desigual se puede observar en los dendogramas CA<sub>1</sub> (Fig. 24) y CA<sub>2</sub> (Fig. 25), donde los meses se agrupan o aíslan diferente y las distancias entre los grupos formados de los meses del CA<sub>1</sub> son mayores que en el CA<sub>2</sub>, es decir, que existió menor similitud entre los meses de los parámetros fisicoquímicos que entre los atmosféricos.



**Figura 24.** Conglomerado jerárquico (CA<sub>1</sub>) en relación con los parámetros fisicoquímicos evaluados in situ y el mes.



**Figura 25.** Conglomerado jerárquico (CA<sub>2</sub>) en relación a los parámetros atmosféricos y el mes.

Las disimilitudes se dan debido a que se emplearon todas las variables atmosféricas, así como fisicoquímicas, lo cual de acuerdo al ACP las únicas variables de enlace entre compartimentos son la temperatura del agua y el pH. Al haber empleado las demás variables y al no existir correlación entre ellas dieron como resultado que el comportamiento de las variables atmosféricas como acuáticas a través del tiempo fueran distintos.

Al analizar el cambio del pH en el tiempo comparándolo con sus parámetros atmosféricos de enlace, obtenidos del ACP, se observó que cuando las variables atmosféricas aumentan el pH también, excepto para abril 2015 y mayo 2016 (Figs. 26, 27 y 28). Mientras tanto, la temperatura del agua siempre se mantuvo por arriba de la del aire y con la misma relación de cambio excepto para febrero del 2016 (Fig. 29).

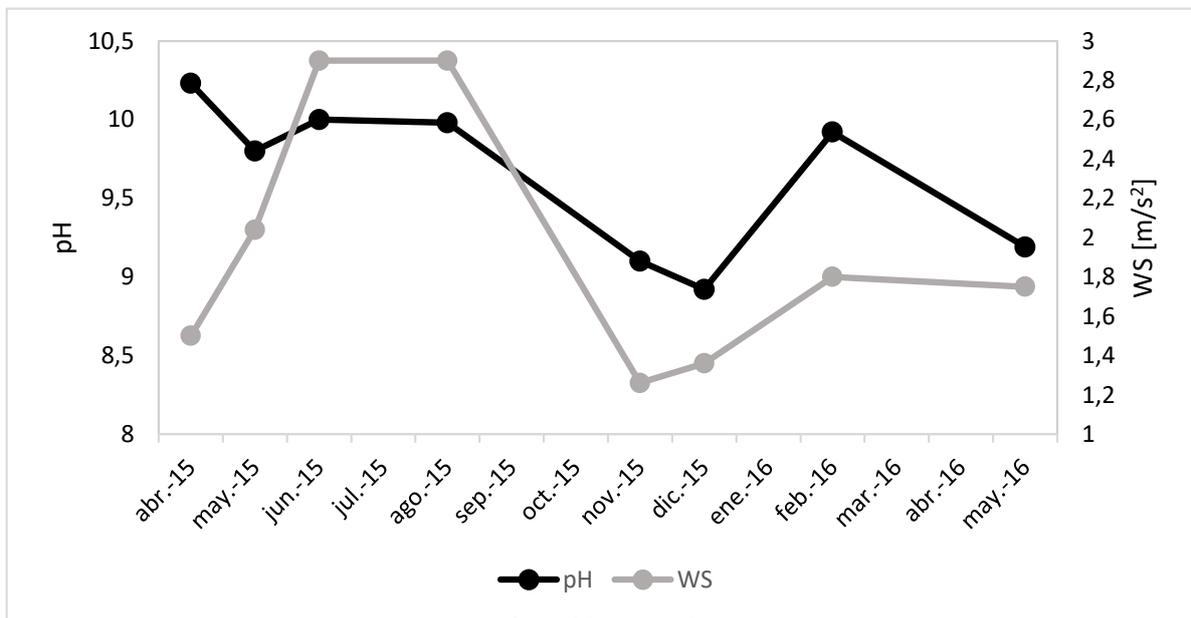
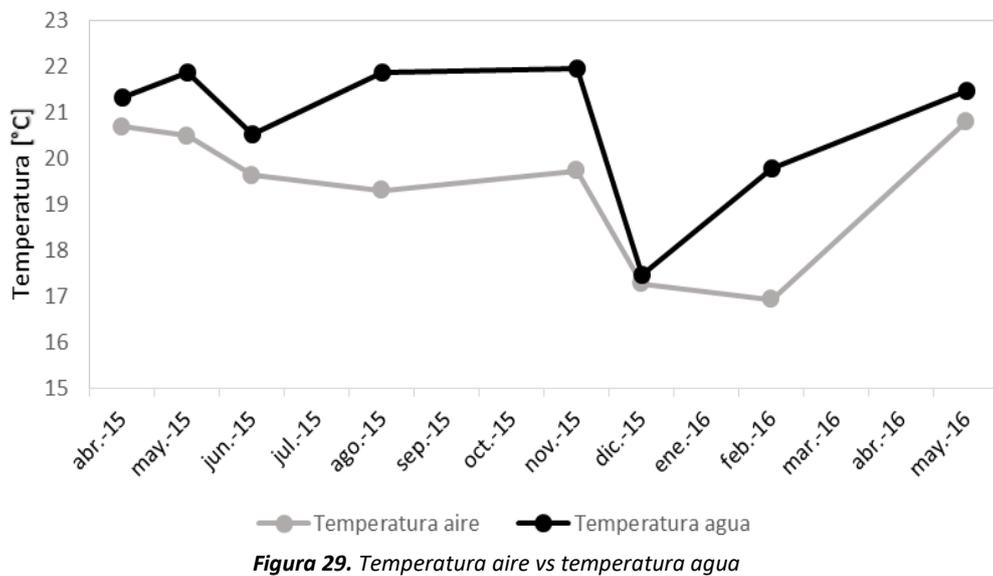
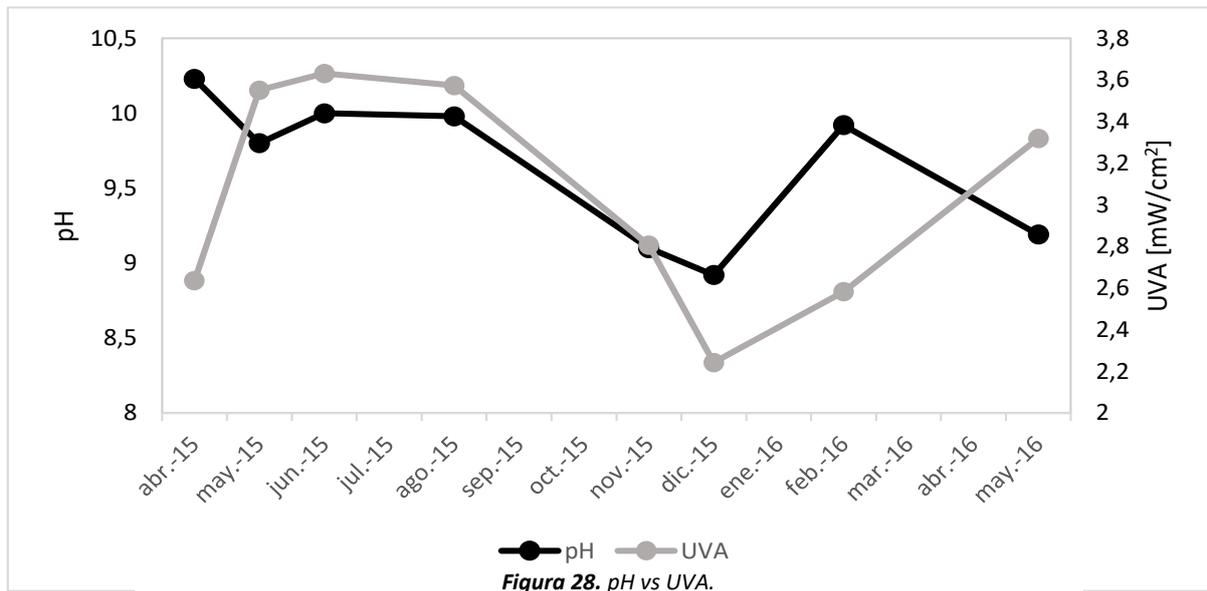
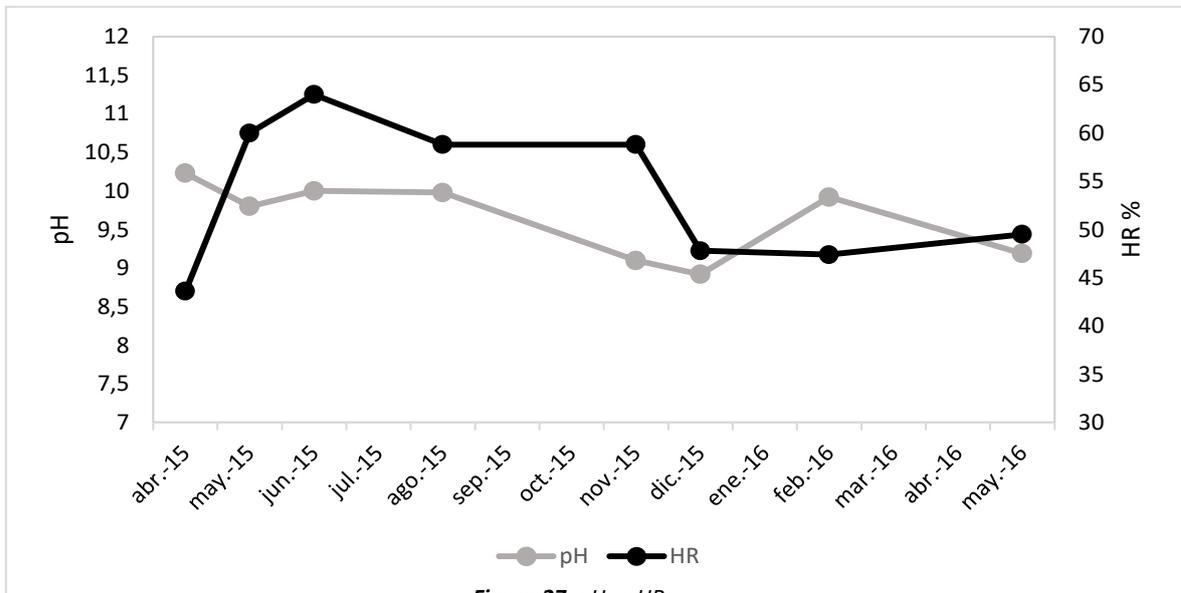


Figura 26. pH vs WS.



## IV. Discusión

---

### *Parámetros fisicoquímicos*

Como se mencionó anteriormente, los parámetros fisicoquímicos indicadores de la calidad del agua de un lago dependen de factores tanto geológicos como climáticos. Además, dichos parámetros se encuentran relacionados entre sí, por lo que la variación de un solo parámetro puede influir en otros; dichas relaciones se analizaron en el presente trabajo, tanto en la distribución superficial como en la variación temporal.

De acuerdo con Mortimer (1981), cuando la temperatura del agua aumenta la concentración de oxígeno disuelto disminuye debido a que la capacidad de solubilidad de los gases en un cuerpo de agua depende en parte de la temperatura del agua. Sin embargo, en este estudio se encontró que, a mayor temperatura, la concentración de OD aumentaba, por lo que la temperatura no fue uno de los principales factores que influyeron en la solubilidad del OD en este lago.

La salinidad también afecta inversamente la solubilidad del oxígeno. Sin embargo, para que exista una reducción considerable de OD, el cuerpo de agua debe ser considerado como salino (Green & Carritt., 1967; Wetzel., 2001), lo que se descarta ya que el nuevo lago de Chalco es un cuerpo de agua dulce (media máxima 1 ‰ en mayo 2016). Anteriormente, Barreiro et al. (1997) reportaron que para el periodo de 1993-1994, la salinidad del lago de Chalco osciló entre los 1.4 y 5.8 ‰, en cambio los resultados de este trabajo muestran una salinidad entre 0.7 y 1 ‰, es decir que disminuyó.

La productividad primaria es otro factor que influye en la concentración de OD en un cuerpo de agua debido a la liberación de O<sub>2</sub> como desecho aumentando su concentración. Sin embargo, en este estudio no se tomaron mediciones de parámetros que indiquen directamente la cantidad de productividad primaria por lo que se interpretó indirectamente a través de los cambios en los niveles de pH, esto se debe a que el proceso de fotosíntesis remueve CO<sub>2</sub> del medio acuático, disminuyendo el pH ya que se evita la formación de ácido carbónico, mientras que su presencia acidifica el medio, es así como el pH puede funcionar como un indicador de la productividad

primaria, por lo tanto, la relación que se esperaría entre el OD y el pH sería directamente proporcional (Wetzel, 2001).

Los datos obtenidos mostraron una relación directamente proporcional entre el OD-pH a partir de agosto del 2015 intensificándose para febrero y mayo del 2016. Esta misma relación se obtuvo en la distribución superficial en mayo del 2016, por lo que se puede considerar que la productividad primaria podría ser uno de los principales factores que influyeron en la concentración de OD en la superficie, especialmente para el 2016.

El OD superficial no solo tiene influencia por factores dentro del compartimento agua, como es el caso de las entradas y salidas de  $O_2$  entre la atmósfera y el agua, fenómeno que se relaciona con el efecto del viento al mezclar y airear el agua.

Según Wetzel (2001), el OD modifica los valores del ORP, ya que cuando aumenta la presencia de  $O_2$  se presentan más reacciones oxidativas, por lo que el ORP aumenta, mientras que su ausencia crea un ambiente reductor, disminuyéndolo; relación que se observó para casi todo el año excepto para febrero del 2016. Asimismo, las alteraciones de  $H^+$  en el medio acuático alteran los niveles del ORP, por lo tanto, es reflejado en el pH con una relación inversamente proporcional, relación que se encontró en el Lago para todo el año.

De acuerdo con Barreiro et al. (1997), el pH durante el periodo de 1993-1994 osciló entre 8.9 y 9.1, en cambio durante el periodo del 2015-2016 que abarcó el presente trabajo, la media osciló entre 9-10, es decir, aumentó (Tabla 6). De acuerdo a la Ley Federal de Derechos: Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016 (LFD) (Anexo-Tabla 7), los niveles de pH durante 1993-1994 estuvieron en el límite para que el agua pudiera tener usos como fuente de abastecimiento para uso público urbano o como riego agrícola. Sin embargo, desde entonces ya no se consideraba como óptimo para la protección de la vida acuática en un cuerpo de agua dulce, no obstante, para el 2015-2016, el pH se mantuvo por arriba de 9 por lo que sobrepasa todos los límites establecidos por la LFD, en este aspecto la calidad del agua fue mala y va en deterioro.

En lo que concierne la temperatura, comparándola con el trabajo de Barreiro et al. (1997), se puede decir que el cuerpo de agua fue más caliente durante el 2015-2016 ya que fluctuó entre los 19 y 23 °C, mientras que durante 1993-1994 osciló entre los 13.3 y 22 °C (Tabla 6).

En cuanto al oxígeno disuelto Barreiro et al. (1997) reportó fluctuaciones entre los 1.4 y 17.5 mg/l que comparados con los promedios mensuales del 2015-2016 (2.9 y 16.4 mg/l) indican que las condiciones hipóxicas ya existían y que no ha habido gran diferencia entre ambos periodos (Tabla 6). Al mantenerse valores por debajo de 5 mg/l de OD y de acuerdo a la LFD el agua no es óptima para la vida acuática por lo que se encontraría en un nivel de estrés.

Tabla 6. Diferencias entre los valores reportados por Barreiro et al. 1997 en el periodo 1993-1994 y los reportados en el presente trabajo en el periodo 2015-2016			
Parámetro fisicoquímico	Rango	1993-1994	2015-2016
OD [mg/l]	Mínimo	1.4	2.9
	Máximo	17.5	16.4
Temperatura [°C]	Mínimo	13.3	19
	Máximo	22	23
pH [H <sup>+</sup> ]	Mínimo	8.9	9
	Máximo	9.1	10
Salinidad [‰]	Mínimo	1.4	0.7
	Máximo	5.8	1.0

En cuanto a los sólidos disueltos totales, presentaron la media mínima de 703 ppm para el periodo 2015-2016, lo que sobrepasa los límites de la LFD que marca 500 ppm para que el agua pueda tener un uso público urbano o como riego agrícola. Es importante señalar que la concentración de los SDT guarda una correlación positiva con la productividad de los lagos (Rawson, 1951), siendo una de las razones por la que se considera un ambiente con alta productividad. Sin embargo, el exceso puede causar dificultad de penetración de la luz en la columna del agua, limitando la productividad primaria a la superficie.

La CE no hace referencia a ninguna especie química en particular por lo que no tiene un efecto ecológico directo, pero es un útil indicador de la carga total química (Cole & Weihe, 2016). No obstante, el estudio realizado por Kimmel y Argent (2010) revela un umbral entre los 3000 y 3500  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en el que las comunidades de peces son significativamente afectadas, comparándolo con este estudio, la CE se mantuvo muy por debajo del umbral propuesto por dichos autores (media mínima 1328  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y máxima 1908  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ).

Respecto a la distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos evaluados *in situ*, el hecho de que los valores máximos y mínimos se hayan encontrado principalmente en las orillas del lago de forma heterogénea y en el centro los valores cercanos al promedio con una distribución homogénea y cercanos o dentro de los límites establecidos anteriormente, le da al centro del lago la propiedad de ser la zona con una mejor calidad del agua y por lo tanto podría ser la zona más apta para el desarrollo de la vida acuática. Esto se puede deber a que en los extremos del lago el agua interacciona con las orillas y no sólo con en el fondo, al igual que al disminuir la profundidad la interacción del sedimento con la columna del agua es más fácil, así como su calentamiento.

El hecho de que los SDT y el pH siempre se mantuvieron por arriba de los límites establecidos por la LFD se puede clasificar la calidad del agua de la zona IV como mala durante el periodo 2015-2016. En cuanto a los meses, abril del 2015 y mayo del 2016 fueron los que presentaron el peor estado en la calidad del agua. Abril del 2015 tuvo la media máxima de pH de 10 y la media mínima de OD de 3.5 mg/l, así mismo hubo zonas anóxicas y mostró el punto más reductor de todos los meses. En cuanto a mayo del 2016 se registraron los valores máximos de CE, SDT, y de acuerdo a la media del ORP fue el mes más reductor y también registró zonas con anoxia.

Respecto a los metales pesados, de acuerdo a la LFD y considerando la categoría III (protección de la vida acuática en cuerpos de agua dulce), las medias del zinc sobrepasaron el límite en los meses de mayo, junio, agosto y noviembre del 2015; el aluminio en febrero del 2016; el níquel en agosto y noviembre del 2015 y enero y febrero del 2016; mientras que el cromo IV se mantuvo por debajo de los límites en todo momento y el DQO sobrepasó los límites en los meses de febrero, marzo y mayo del 2016 (tabla 7).

Tabla 7. Media de los parámetros fisicoquímicos del centro del lago que sobrepasaron los límites recomendados por la LFD y la NOM-067-ECOL-1994 (NE, No existente).												
	Límite [mg/L]	Abr 15	May 15	Jun 15	Ago 15	Nov 15	Dic 15	Ene 16	Feb 16	Mar 16	Abr 16	May 16
Niquel [mg/L]	<sup>1</sup> 0.6											
	<sup>2</sup> 0.2	0.12	0.07	0.15	0.3	0.22	0.17	0.23	0.25	0.14	0.0	0.0
Aluminio [mg/L]	<sup>1</sup> 5.0											
	<sup>2</sup> 0.05	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.03	0.02	0.01
Cromo IV [mg/L]	<sup>1</sup> 0.1											
	<sup>2</sup> 0.05	0.03	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zinc [mg/L]	<sup>1</sup> 2.0											
	<sup>2</sup> 0.02	NE										
pH [ H <sup>+</sup> ]	<sup>1</sup> 6-9											
	<sup>2</sup> 6.5-8.5	10	9.72	9.9	9.8	9.25	9.0	NE	9.8	NE	NE	9.3
OD [mg/L]	<sup>2</sup> 5 (mínimo)											
		3.58	5.58	3.59	8.01	2.92	16.34	NE	12.8	NE	NE	9.97
SDT [ppm]	<sup>1</sup> 500											
	<sup>2</sup> 125-200	869	846	819	722	703	748	NE	816	NE	NE	988
DQO [mg/L]	<sup>3</sup> 200											
		NE	7	38	163	111	166	120	224	411	171	347
<sup>1</sup> Uso de riego agrícola		<sup>2</sup> Protección a la vida acuática de agua dulce			<sup>3</sup> NOM-067-ECOL-1994							

## *Interacción entre compartimentos agua/aire*

La importancia de la interacción entre los compartimentos agua-aire radica en el intercambio de energía y especies químicas que se da entre su interface. Este intercambio genera cambios en las características fisicoquímicas del agua por lo que influye en su calidad (Manahan, 2005; Wetzel, 2001). En este análisis se buscó la relación entre la calidad del agua superficial del lago con las características meteorológicas, por lo que se comparó el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos indicadores de la calidad del agua con los parámetros atmosféricos locales y se explica a través del diagrama de la Fig. 30.

De acuerdo a los resultados del ACP, el CP<sub>1</sub> explica que el pH es fuertemente correlacionado con la WS, UV y mantiene una correlación débil con la HR, este componente es el que explica mejor el comportamiento del total de las variables. Asimismo, es importante recordar que los parámetros atmosféricos también se relacionan dentro del compartimento aire previo a la interacción con el cuerpo acuático, es decir, que uno o más factores atmosféricos pueden afectar a los otros previo a la interacción con el agua.

Posteriormente en el CP<sub>2</sub>, la CE y los SDT tienen una correlación fuerte, lo cual era de esperarse por la estrecha relación que tienen, así mismo se puede visualizar en la Fig. 20, d, donde se observa la misma tendencia. En la distribución superficial de ésta relación se encontró sólo para el mes de agosto, y los patrones de distribución de los SDT fueron muy distintos a todos los demás parámetros, esto se puede deber a la dirección del viento el cual concentraría los SDT en solo ciertas áreas del lago. Aunado a ello, el ORP tuvo una correlación negativa. Es decir, que estas tres variables solo conforman una interconexión dentro del compartimento agua.

En cuanto al CP<sub>3</sub> correlacionó fuertemente la temperatura del agua y la del aire, de los tres componentes generados es el que proporciona menos información sustancial de la varianza y por lo tanto el que menos explica el comportamiento de las variables.

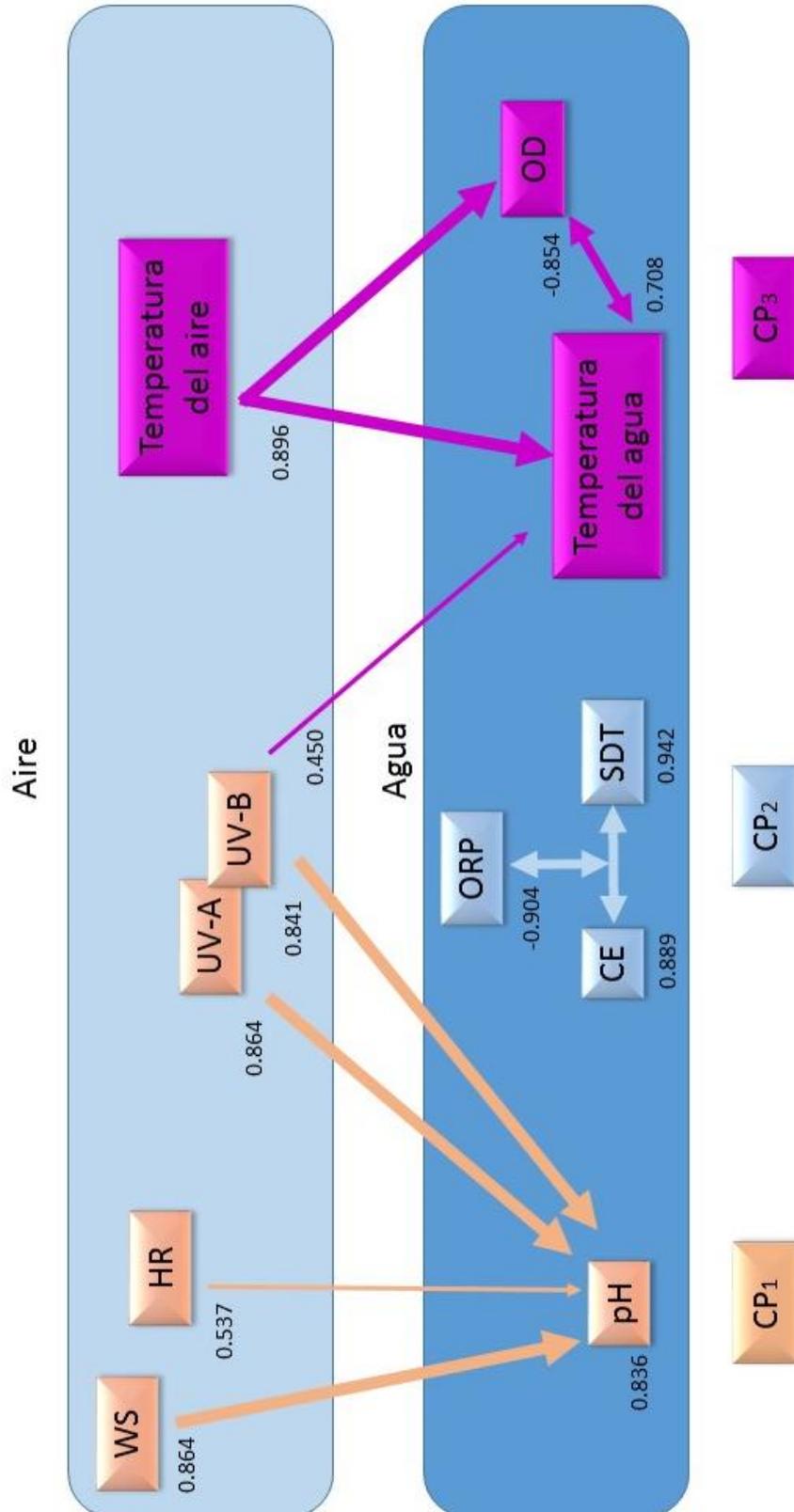
De acuerdo a Edinger & Duttweiler (1968) existen tres procesos que dan la tasa neta de intercambio de calor en la superficie del agua, las cuales son la suma de la transferencia por procesos radiativos, por evaporación y por conducción entre el agua y su límite con el aire, por lo tanto en este análisis resultó ser más importante la transferencia de calor por conducción entre el aire y el agua que por procesos radiativos, ya que la radiación solar no se agrupó dentro del mismo componente que la temperatura del agua. Sin embargo, sigue siendo un proceso importante ya que la radiación UVB tuvo una correlación de 0.450 en el CP<sub>3</sub> por lo que existe una correlación débil (Tabla 3).

El CP<sub>3</sub> también registró una correlación negativa fuerte con el OD, es decir, que cuando la temperatura del aire y del agua aumentaba la concentración de OD disminuía, lo cual, como se mencionó anteriormente es la relación que se esperaría por la capacidad de solubilidad de los gases del agua al cambiar la temperatura, no obstante, en el análisis superficial se mencionó que dicha ley no se cumplía, por lo que se puede decir que temporalmente, la temperatura es uno de los principales factores que determinan la concentración de OD en el medio aunque no la única. Por lo tanto, se observó que los tres parámetros fisicoquímicos del agua se vinculan con los parámetros atmosféricos, el pH en el CP<sub>1</sub> y el OD y la temperatura del agua en el CP<sub>3</sub> y se observan tres parámetros que se correlacionan dentro del compartimento agua: la CE, los SDT y el ORP.

Debido a que no todos los parámetros fisicoquímicos se correlacionaron con los atmosféricos, el análisis por CJ del compartimento agua no tuvo grandes similitudes con el CJ del compartimento aire. Si el análisis por CJ solo se hiciera con los parámetros correlacionados en el ACP se esperarían similitudes entre ambos CJ.

Finalmente, de acuerdo al estudio de Qiong et al., (2013), menciona que la precipitación, temperatura del aire, velocidad del viento y la radiación solar influyen sobre la calidad del agua de lagos urbanos en relación a sus niveles tróficos, siendo más fuerte entre mayor nivel trófico se tenga, por lo que su estudio sugiere que los lagos eutróficos podrían enfrentar grandes retos de deterioro de la calidad del agua y floración de las algas en respuesta al cambio climático global. Por estas razones y de acuerdo a las correlaciones encontradas entre los parámetros atmosféricos con los fisicoquímicos en el presente estudio, es de suma importancia mantener el monitoreo de la evolución del lago y buscar métodos que prevengan o solucionen la presencia de condiciones

extremas de la mala calidad del agua del lago y así la adaptación de la vida acuática sea más fácil para que en un futuro pueda tener la posibilidad de ser un ambiente de recreación o se le pueda dar un uso esencial al agua del lago.



**Figura 30.** Diagrama de interconexión entre compartimentos, empleando los valores de correlación obtenidos del ACP. Donde la velocidad del viento (WS), humedad relativa (HR), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), potencial óxido reducción (ORP), sólidos disueltos totales (SDT), radiación ultravioleta (UV), componente principal (CP).

## V. Conclusiones

---

Con respecto a los niveles registrados de los parámetros fisicoquímicos asociados a la calidad del agua, su cambio temporal indicó que dependiendo del parámetro analizado el lago tuvo condiciones de mala calidad ya sea en el 2015 y/o en el 2016. Esto debido a que durante todo el periodo existieron parámetros que sobrepasaban los límites establecidos por la LFD, pero no todos coincidieron en los mismos meses. De forma general las condiciones del medio acuático siempre se mantuvieron de una mala calidad.

No obstante, comparando los resultados reportados en el trabajo de Barreiro et al., 1997 con los del presente trabajo, la calidad del agua empeoró por lo que se podría decir que el lago se encuentra en un estado crítico en cuanto a su calidad y podría seguir en deterioro por lo que podría convertirse en un riesgo para la población si no se toman medidas para impedir que su deterioro continúe.

En relación con la distribución superficial de los parámetros fisicoquímicos, existieron diferencias significativas entre las orillas y el centro del lago. Es decir que la calidad del agua fue heterogénea de extremo a extremo. Asimismo, el centro del lago fue la zona que registró los valores medios y una distribución superficial más homogénea y como conclusión la zona donde la vida acuática se puede desarrollar mejor.

En cuanto a los parámetros meteorológicos, el cambio temporal fue principalmente gradual, que comparado con los fisicoquímicos estos tuvieron cambios abruptos, por lo que hubo una estacionalidad más marcada en los meteorológicos que en los acuáticos.

En la interacción entre el cuerpo de agua y el aire, se demostró que los factores atmosféricos como fueron la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar tuvieron una correlación positiva sobre el pH del agua, por lo tanto, cuando los factores atmosféricos aumenten, el pH también lo hará basificando aún más el medio, degradando la calidad del agua y por lo tanto deteriorando el sistema acuático.

Asimismo, se demostró que la temperatura del agua estuvo fuertemente influenciada por la temperatura del aire al mostrar una correlación positiva entre ellas, por lo tanto,

la conducción de calor del aire al agua fue la principal fuente de calor al agua superficial y la radiación solar fue el segundo factor al mantener una correlación positiva débil. También se encontró que el OD mantuvo una correlación negativa con las temperaturas por lo que si la temperatura del agua sigue aumentando la concentración de OD disminuirá. Sin embargo, esta correlación negativa solo se observó a través del tiempo, pero no para la distribución superficial por lo que pueden existir factores dentro del compartimento agua que modifican la calidad del agua principalmente de forma espacial y no temporal.

También se demostró que dentro del compartimento agua la CE y los SDT mantienen una estrecha relación como era de esperarse y que estos a su vez tienen una correlación negativa con el ORP.

El hecho de que exista una influencia significativa entre los parámetros atmosféricos con la calidad del agua nos indica que, a variaciones temporales significativas de los factores atmosféricos, las condiciones del lago también serán modificadas, en este caso al aumentar la temperatura del aire y por consecuencia la temperatura del lago causaría un aumento en de zonas de hipoxia. Mientras que, a mayor radiación solar, humedad relativa (la cual sería un indicador de la temporada de lluvias y secas) y la velocidad del viento el agua superficial del lago se basificaría cada vez más.

## VI. Recomendaciones

---

- Evaluar si el aumento y homogenización de la profundidad del lago podría generar reacciones dentro del compartimento agua que permitan mejorar la calidad de la misma.
- Mantener el monitoreo de la calidad del agua del lago con el fin de conocer si evoluciona de forma positiva o negativa de acuerdo al crecimiento del mismo.
- Para un análisis integral del sistema natural acuático se recomienda analizar los factores de la base del lago que influyen en la columna del agua con relación a su calidad.

## VII. Referencias

---

- Alcocer J., Lugo A., Escobar E., Sanchez M.R., Vilaclara G., 2000, Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 27, 3166-3169.
- ArcGis. (2017). Como funciona Kriging. Abril 20, 2017, de ArcGis Pro Sitio web: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- Ayala V., Arce N. & Carmona R. (2013). Distribución espacio-temporal de aves acuáticas invernantes en la ciénega de Tláhuac, planicie lacustre de Chalco, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84, 327-337.
- Barreiro M. T., Sánchez R., Aguirre A. & Ayala. (1997). Ecología del humedal de San Pedro Tláhuac. México, DF: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Bradbury J. P., 1971. Paleolimnology of lake Texcoco. México. Evidence from diatoms. *Limnol. Oceanogr.* 16(2):180-200.
- Camarillo R., Maurer F., Ulacia R., 2013. Lago Tláhuac-Xico: regeneración de un ecosistema hídrico urbano (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Cole A. & Weihe. (2016). *Textbook of Limnology*. United States of America: Waveland Press, Inc.
- Dalia Ortiz-Zamora<sup>1</sup> & Adrian Ortega-Guerrero. (2010). Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, 46, pp.1-15.
- De la Lanza-Espino, G. & J.L. García Calderón (comp.), 2002. *Lagos y Presas de México*. (Eds) Segunda Edición, AGT Editor, México 680pp.
- Edinger J. & Duttweiler D. (1968). The Response of Water Temperatures to Meteorological Conditions. *Water Resources Research*, 4, pp.1137–1143.
- Foran A. J. & Ferenc A. S., 1997. Multiple stressors in ecological risk and impact assessment. Ed. SECTA. Pellston, Michigan.
- Green, E. J. and D. E. Carrit. 1967. New tables for oxygen saturation of seawater. *J. Mar. Res.* 25:140-174.
- Hutchinson, G. E. 1957. *A Treatise on Limnology*. I. Geography, Physics, and Chemistry. John Wiley & Sons, New York. 1015 pp.
- Isçen F, C., Emiroglu, Ö., İlhan, S. *Environ Monit Assess* (2008) Application of multivariate statistical techniques in the assessment of surface water quality in Uluabat Lake, Turkey. 144: 269. doi:10.1007/s10661-007-9989-3

Izazola H. (2001). Water and sustainability in Mexico City. Demographic and urban studies, 16, pp. 285-320.

Jeppesen, E., Jensen, J.P., Sondergaard, M., Lauridsen, T., Pedersen, L.J. y Jensen, L. 1997b. Top-down control in freshwater lakes: role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. *Hydrobiologia* 342/343: 151-164.

Kazi, T.G., Arain, M. B., Jamali, M. K., Jalbani, N., Afridi, H. I. Sarfraz, R. a., ... Shah, A. Q. (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(2), 301-309.

Kimmel W. & Argent D. (2010). Stream Fish Community Responses to a Gradient of Specific Conductance. *Water Air and Soil Pollution*, 206(1), 49-56.

Manahan S. (2005). Introducción a la química ambiental. Ciudad de México: UNAM Posgrado. p. 71.

J. P. Marques de Sá (2003). Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA and MATLAB: Using Spss, Statistica and Matlab. Spring Science & Business Media. Volumen 1, pp 153,180,302

Mazzeo, N.; Clemente, J.; García-Rodríguez, F.; Gorga, J.; Kruk, C.; Larrea, D.; Meerhoff, M.; Quintans, F.; Rodríguez-Gallego, L. & Scasso, F. 2002. Eutrofización: causas, consecuencias y manejo. En: Domínguez, A. & R.G. Prieto (eds.). Perfil Ambiental, Nordan-Comunidad, Montevideo. pp: 39-55.

Meerhoff M & Jeppensen E., 2009. Shallow Lakes and Ponds. In: Gene E. Likens, (Editor) Encyclopedia of Inland Waters. Volumen 2, pp. 645-655 Oxford: Elsevier.

Mortimer, C. H. 1981. The oxygen content of air-saturated fresh waters over ranges of temperature and atmospheric pressure of limnological interest. *Mitt. Internat. Verein Limnol.* 22:23 pp.

Olem H. & G. Flock, 1990. Lake and reservoirs restoration guidance manual 2<sup>nd</sup> edition. EPA 440/4-90-006. North America Lake Management Society for U.S. EPA. Washington.

Ortiz ZCD., Ortega GA. 2007. Origin and evolution of a new lake in the Chalco plain: Implications for land subsidence and flooding hazards to the urban áreas of Valle de Chalco (State of Mexico) and Tláhuac (Federal District). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 64:26-42

Parinet B., Lhote A & Legube B., (2004). Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management—application to a tropical lake system. *Ecological Modelling*, 178, 295-311.

Qiong Wu, Xinghui Xia, Xiaohan Li & Xinli Mou, 2014. Impacts of meteorological variation on urban lake water quality: a sensitivity analysis for 12 urban lakes with different trophic states. *Aquat Sci*, 76, 339-351.

Rawson, D. S. 1951. The total mineral content of lake waters. *Ecology* 32:669-972

Rivera, P., Medina, R. y Rosas, N. 2005. Conservación de agua y suelo en Zumpango, Estado de México. Anuario IMTA. 134-140.

Saldaña M., S. 2002. Estudio avifaunístico en la Laguna de Zumpango, Estado de México. Tesis Profesional FES-Iztacala, UNAM. 54 p.

SEDESOL, 2011. Atlas de riesgo Municipio de Valle de Chalco, Solidaridad: 65-66 pp

Singh, K.P., Malik, A., Mohan, D., Sinha, S., 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti river (India): a case study. *Water Res.* 38, 3980–3992.

Totolero A., 2000. El agua y su historia. Siglo Veintiuno. México. 167 p.

Watts W. A. y J.P. Bradbury, 1982. Paleoeological studies at lake Patzcuaro on the west-central mexican plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quat. Res.* 17: 56-70.

Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*, 2<sup>nd</sup> Edition. Saunders College Publishing, Philadelphia, PA

Wetzel, R. G. 1992. Clean water: A fanding resource. *Hydrobiologia* 243/244:21-30

Wetzel, R.G. 2001. *Limnology. Lake and river ecosystems*. Academic Press, San Diego, USA. 23 pp

# Anexo

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos									
Parámetro		Abr-15	May-15	Jun-15	Ago-15	Nov-15	Dic-15	Feb-16	May-16
Temperatura [°C]	Media	22	22	21.2	22	22.9	19	19.3	23.2
	Rango	21.1	20.9	20.1	20.7	21	16.8	16.7	20.9
		26.4	26.5	21.16	24.8	24.8	21.9	21.9	28.5
SD	1.66	1.8	1.31	1.02	1.18	1.8	1.32	2.4	
pH [H <sup>+</sup> ]	Media	10	9.72	9.9	9.8	9.25	9.0	9.8	9.3
	Rango	9.6	9.3	9.72	9.7	9.0	8.8	9.3	8.9
		10.8	10.6	10.68	10.3	9.4	9.4	10.3	9.9
SD	0.37	0.3	0.21	0.15	0.14	0.16	0.25	0.24	
OD [mg/l]	Media	3.58	5.58	3.59	8.01	2.92	16.34	12.8	9.97
	Rango	0.0	0.0	0.0	3.09	1.08	1.05	3.94	0.0
		22.17	18.27	17.06	18.29	5.65	35.6	21.96	25.05
SDS	6.64	6.52	4.57	3.87	1.4	10.6	4.71	7.61	
CE [μs/cm]	Media	1641	1598	1520	1363	1352	1328	1454	1908
	Rango	1600	1529	1487	1330	1290	1278	1374	1849
		1804	1752	1619	1450	1416	1416	1538	2114
SD	61.2	64.54	40.5	31.9	37.4	51.1	40	71	
SDT [ppm]	Media	869	846	819	722	703	748	816	988
	Rango	859	784	811	717	688	724	802	930
		891	875	832	731	714	762	828	1014
SD	9.1	19.6	4.7	3.1	6	8.5	4.8	19	
Salinidad [‰]	Media	0.88	0.85	0.82	0.72	0.7	0.75	0.82	1.0
	Rango	0.87	0.79	0.82	0.72	0.69	0.73	0.81	0.94
		0.9	0.89	0.84	0.74	0.72	0.77	0.84	1.04
SD	0.009	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	
ORP [mV]	Media	-199	-159	-168	-110	-149	-144	-178	-201
	Rango	-308	-208	-266	-154	-170	-172	-190	-280
		-136	-119	-130	-63	-140	-122	-144	-124
SD	42.4	21.9	29.5	32	7.1	16.4	10.6	34.3	

Tabla 2.0. Parámetros fisicoquímicos evaluados en el agua superficial del lago de Chalco																	
		abr-15		may-15		jun-15		ago-15		nov-15		dic-15		feb-16		may-16	
Parámetro		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Temperatura	Media	21.3	22.5	21.8	22.1	20.5	21.7	21.8	22.2	21.9	23.3	17.4	20.0	19.7	18.7	21.4	24.2
	Rango	21.1	21.2	21.0	20.9	20.1	20.2	21.1	20.7	21.0	21.6	16.8	17.5	17.9	16.7	20.9	21.3
		21.5	26.4	23.7	26.5	21.0	24.1	22.4	24.8	23	24.8	18.8	21.9	21.5	21.9	22.3	28.5
	Des.Est.	0.09	2.01	1.19	2.13	0.28	1.50	0.48	1.26	0.66	1.12	0.69	1.54	0.97	1.5	0.48	2.56
	Norm. sig	0,577	0	0	0	0,382	0	0,05	0,01	0,219	0,002	0,007	0,011	0,516	0,007	0,016	0,001
Dif. Sig	0,023		0,994		0,005		0,01		0,656		0,003		0,064		0,001		
pH	Media	10.2	9.9	9.7	9.6	10.0	9.9	9.9	9.8	9.1	9.3	8.9	9.1	9.9	9.8	9.1	9.3
	Rango	9.8	9.6	9.6	9.3	9.7	9.7	9.7	9.7	9.0	9.0	8.8	8.8	9.5	9.3	9.0	8.98
		10.8	10.7	10.5	10.6	10.5	10.6	10.3	10.1	9.17	9.4	9.0	9.4	10.3	10.3	9.3	9.91
	Des.Est.	0.34	0.37	0.32	0.030	0.20	0.22	0.16	0.12	0.07	0.12	0.04	0.16	0.21	0.30	0.09	0.27
	Norm. sig	0,039	0,002	0	0	0,161	0,001	0,658	0,028	0,005	0,002	0,196	0,053	0,658	0,592	0,033	0,086
Dif.	0,069		0,182		0,47		0,003		0,285		0,025		0,587		0,015		
OD	Media	0.2	5.89	6.41	5.19	1.38	5.10	7.01	8.67	1.87	3.28	7.09	22.21	14.20	11.30	3.12	14.02
	Rango	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	3.9	3.0	1.0	1.2	1.0	10.0	10.9	3.9	0.0	7.8
		0.9	22.1	17.2	18.2	4.4	17.0	9.6	18.2	2.9	5.6	16.6	35.6	18.6	21.9	11.7	25.0
	Des.Est.	0.37	7.87	7.19	6.29	1.75	5.28	1.97	4.66	0.67	1.41	5.51	8.52	2.45	6.19	3.95	6.04
	Norm. sig	0	0	0	0	0,001	0	0,105	0,025	0,125	0,013	0,029	0,013	0,112	0,004	0,001	0,001
Dif.	0,05		0,972		0,173		0,127		0,657		0,001		0,049		0,002		
CE	Media	1609	1662	1571	1610	1497	1536	1356	1368	1315	1365	1287	1353	1463	1442	1877	1926
	Rango	1600	1604	1529	1567	1487	1493	1330	1330	1290	1309	1278	1279	1414	1374	1858	1849
		1620	1804	1622	1752	1511	1619	1375	1450	1342	1416	1302	1416	1516	1538	1904	2114
	Des.Est.	6.34	72.42	27.28	73.11	7.86	45.97	16.27	38.65	17.76	33.81	7.45	50.41	33.34	45.22	13.79	83.49
	Norm. sig	0,307	0	0,612	0	0,374	0	0,034	0,002	0,396	0,001	0,155	0,001	0,13	0,188	0,6	0,001
Dif.	0,006		0,239		0,061		0,026		0,016		0,015		0,295		0,256		
Temperatura [°C]; OD (Oxígeno disuelto [mg/l]); CE (Conductividad eléctrica [μs/cm]); SDT (Sólidos disueltos totales [ppm]); Salinidad [°/∞]; ORP (Potencial óxido reducción) [mV]; pH [H <sup>+</sup> ]																	
Norm. Sig. (Significancia del comportamiento normal); Dif. Sig. (Significancia de la diferencia entre la zona A y B)																	
A y B son las zonas correspondientes a la figura 11																	

Tabla 2.1. Parámetros fisicoquímicos evaluados en el agua superficial del lago de Chalco

		abr-15		may-15		jun-15		ago-15		nov-15		dic-15		feb-16		may-16	
Parámetro		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
SDT	Media	865	871	836	851	818	819	721	722	698	705	751	746	815	818	1006	978
	Rango	861	859	784	846	812	811	717	717	695	688	736	724	802	811	999	930
		870	891	875	862	821	832	723	731	703	714	762	757	823	828	1014	998
	Des.Est.	2.46	11.13	32.82	4.32	2.52	5.84	1.85	3.71	2.73	6.05	8.26	8.19	4.65	4.75	4.94	16.53
	Norm. sig	0,828	0,005	0,007	0	0,009	0,022	0,003	0,216	0,688	0,003	0,204	0,006	0,059	0,015	0,264	0,019
	Dif.	0,013		0,834		0,615		0,977		0,003		0,017		0,052		0,001	
Salinidad	Media	0,87	0,88	0,84	0,86	0,82	0,82	0,72	0,72	0,7	0,7	0,76	0,75	0,82	0,83	1,027	0,99
	Rango	0,87	0,87	0,79	0,85	0,82	0,82	0,72	0,72	0,7	0,69	0,74	0,73	0,81	0,82	1,02	0,94
		0,88	0,9	0,89	0,87	0,83	0,84	0,73	0,74	0,71	0,72	0,77	0,76	0,83	0,84	1,04	1,02
	Des.Est.	0,002	0,011	0,03	0,004	0,002	0,006	0,005	0,005	0,003	0,007	0,009	0,008	0,005	0,006	0,007	0,019
	Norm. Sig	0	0,002	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0,006	0	0	0,001	0,003	0,007
	Dif.	0,031		0,81		0,715		0,593		0,015		0,011		0,059		0,001	
ORP	Media	-216	-188	-161	-159	-175	-163	-107	-111	-151	-148	-154	-138	-181	-175	-215	-193
	Rango	-300	-308	-208	-205	-207	-266	-143	-154	-159	-170	-168	-172	-190	-190	-280	-214
		-189	-136	-133	-119	-140	-130	-64	-63	-144	-140	-132	-122	-171	-144	-124	-169
	Des.Est.	27.9	47.46	22.86	21.84	23.73	32.46	30.19	33.74	5.11	7.72	13.97	14.56	5.59	14.15	50.76	13.12
	Norm. Sig.	0,001	0,039	0,229	0,159	0,63	0	0,016	0,003	0,66	0	0,002	0	0,12	0,006	0,055	0,24
	Dif.	0,311		0,65		0,112		0,82		0,182		0,002		0,376		0,078	
Temperatura [°C]; OD (Oxígeno disuelto [mg/l]); CE (Conductividad eléctrica [µs/cm]); SDT (Sólidos disueltos totales[ppm]); Salinidad [‰]; ORP (Potencial óxido reducción) [mV]																	
Norm. Sig. (Significancia del comportamiento normal); Dif. Sig. (Significancia de la diferencia entre la zona A y B)																	
A y B son las zonas correspondientes a la figura 11																	

Tabla 3. Metales pesados

		Abr-15	May-15	Jun-15	Ago-15	Nov-15	Dic-15	Ene-16	Feb-16	Mar-16	Abr-16	May-16
Aluminio (Al <sup>3+</sup> ) [mg/L]	Media	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.03	0.02	0.01
	Rango	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
		0.05	0.05	0.10	0.03	0.03	0.04	0.06	0.09	0.06	0.03	0.04
SD	0.013	0.013	0.027	0.009	0.007	0.009	0.009	0.009	0.01	0.015	0.006	0.008
Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) [mg/L]	Media	0.05	0.05	0.04	0.02	0.03	0.05	0.08	0.10	0.05	0.04	0.03
	Rango	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.06	0.02	0.02	0.02
		0.09	0.1	0.2	0.05	0.05	0.08	0.11	0.17	0.10	0.06	0.07
SD	0.019	0.023	0.054	0.017	0.012	0.016	0.02	0.028	0.02	0.012	0.02	
Cromo (Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> ) [µg/L]	Media	58.0	15.0	58.6	87.0	53.6	39.7	0.0	0.0	0.0	4.9	0.0
	Rango	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		144	53.0	130	229	266	119	0.0	0.0	0.0	30	0.0
SDS	54.79	20.23	40.66	59.42	77.56	32.58	0.0	0.0	0.0	9.8	0.0	
Cromo (CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [µg/L]	Media	44.6	14.0	54.6	81.0	50.0	36.9	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0
	Rango	0.0	0.0	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		134	50	121	213	248	110	0.0	0.0	0.0	28	0.0
SD	62.6	21.62	4.68	63.99	83.05	35.13	0.0	0.0	0.0	10.63	0.0	
Cromo VI [µg/L]	Media	35	6.8	26.3	39	24.0	17.7	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0
	Rango	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		90	24	58	102	119	53.0	0.0	0.0	0.0	14.0	0.0
		40.1	9.81	19.55	28.6	37.25	15.67	0.0	0.0	0.0	4.87	0.0
Zinc (Zn) [mg/L]	Media	--	0.09	0.11	0.10	0.14	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rango	--	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
				0.22	0.24	0.18	0.81	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0
SD	---	0.07	0.06	0.05	0.29	0.006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Niquel (Ni) [mg/L]	Media	0.12	0.07	0.15	0.30	0.22	0.17	0.23	0.25	0.14	0.00	0.00
	Rango	0.00	0.00	0.00	0.13	0.02	0.04	0.13	0.09	0.03	0.00	0.00
		0.26	0.17	0.40	0.51	0.61	0.26	0.42	0.40	0.35	0.00	0.00
SD	0.106	0.07	0.11	0.13	0.16	0.07	0.08	0.1	0.11	0.09	0.1	
DQO [mg/L]	Media	--	7	38	163	111	166	120	224	411	171	347
	Rango	--	0	0	74	18	110	58	124	272	95	216
				21	77	289	224	262	161	325	539	307
SD	---	12.12	38.5	112.1	104.2	83.28	55.01	100.5	133.8	117.5	115.6	

		Abr-15	May-15	Jun-15	Ago-15	Nov-15	Dic-15	Ene-16	Feb-16	Mar-16	Abr-16	May-16
Temperatura [°C]	Media	20.6	20.4	19.6	19.3	19.7	17.2	14.9	16.9	21.9	22.1	28.8
	Rango	16.8 24.2	17.3 23.7	16.4 22.6	16.6 22.2	16.5 22.9	11.8 22.0	9.1 21.4	11.7 23.0	16.4 26.4	15.4 26.7	19.5 22.1
	SD	3.01	2.63	2.4	2.3	2.4	4.1	4.9	4.4	4.0	4.8	1.8
WS [m/s²]	Media	1.5	2.0	2.9	2.9	1.2	1.3	1.6	1.8	1.8	2.4	1.7
	Rango	1.1 1.9	1.6 2.6	2.4 3.3	2.4 3.3	0.9 1.7	1.1 1.8	1.1 2.6	1.3 2.5	1.3 2.1	1.4 3.7	1.6 1.9
	SD	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.5	1.8	1.1	0.2
HR %	Media	43	60	64	58	58	47	40	47	33	27	49
	Rango	37 55	48 72	52 81	46 71	41 77	38 57	20 60	29 60	17 57	11 46	45 54
	SD	7.7	9.4	11.6	10.3	14	6.8	15.7	12.8	28	15	6.3
UVB [MED/hr]	Media	2.04	2.6	2.3	2.4	1.9	1.3	1.5	1.6	2.8	3.3	2.7
	Rango	0.59 3.63	0.85 4.04	0.61 3.59	0.7 3.65	0.44 3.21	0.27 2.31	0.18 3.02	0.27 2.85	0.68 5.21	1.02 4.92	1.06 3.85
	SD	1.1	1.3	1.2	1.1	1.1	0.8	1.1	1.0	1.8	1.6	1.1
UVA [mW/cm²]	Media	2.6	3.5	3.6	3.5	2.8	2.2	2.2	2.5	3.6	4.1	3.3
	Rango	1.2 4.1	1.89 4.82	1.5 4.9	1.9 4.6	1.15 4.0	0.8 3.2	0.5 3.7	0.9 3.7	1.6 5.5	2.1 5.3	1.5 4.4
	SD	1.1	1.2	1.3	1.0	1.2	0.9	1.3	1.1	1.5	1.3	1.2

	Temperatura CHO	Temperatura TAH
Temperatura CHO	1	
Temperatura TAH	0,979	1
	HR CHO	HR TAH
HR CHO	1	
HR TAH	0,769	1
	WS CHO	WS TAH
WS CHO	1	
WS TAH	0,383	1
	Radiación CHO	Radiación MER
Radiación CHO	1	
Radiación MER	0.770	1

Tabla 6. Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	4,388	39,887	39,887	4,388	39,887	39,887	3,482	31,656	31,656
2	3,618	32,893	72,780	3,618	32,893	72,780	3,263	29,661	61,317
3	1,404	12,761	85,542	1,404	12,761	85,542	2,665	24,225	85,542
4	,674	6,128	91,669						
5	,523	4,754	96,423						
6	,252	2,289	98,713						
7	,142	1,287	100,000						
8	2,261E-016	2,056E-015	100,000						
9	1,246E-016	1,133E-015	100,000						
10	3,514E-017	3,195E-016	100,000						
11	-3,320E-016	-3,018E-015	100,000						

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

Tabla 7. Lineamientos de la calidad del agua				
Parámetros	Usos			
Unidades en mg/l si no se indican otras	1	2	3	4
Parámetros físicos				
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	500.0	500.0*	-	-
Temperatura (°C)	CN+2.5	-	CN+1.5	CN+1.5
pH	6.0-9.0	6.0-9.0	6.5-8.5	6.0-9.0
Parámetros inorgánicos				
Aluminio	0.02	5.0	0.05	0.2
Cromo	0.05	0.1	0.05	0.01
Níquel	0.01	0.2	0.6	0.002
Zinc	5.0	2.0	0.02	0.02
Oxígeno disuelto	4.0	-	5.0	5.0
Demanda química de oxígeno	200 <sup>1</sup>			
<p>*Cultivos sensibles 500-1000 mg/l; cultivos con manejo especial 1000-2000 mg/l; cultivos tolerantes en suelos permeables 2000-5000 mg/l; para frutas sensibles relación de absorción de sodio <math>RAS \leq 4</math>, y para forrajes de 8-18, cuando la descarga sea directamente a suelo con uso en riesgo agrícola.</p> <p>-C.N. Condiciones Naturales del sitio donde sea vertida la descarga de aguas residuales</p> <p>USO 1: Fuente de abastecimiento para uso público urbano.</p> <p>USO 2: Riego Agrícola.</p> <p>USO 3: Protección a la vida acuática: Agua dulce, incluye humedales.</p> <p>USO 4: Protección a la vida acuática: Aguas costeras y estuarios.</p> <p><sup>1</sup> NOM-067-ECOL-1994 (límite máximo de descarga permisible, promedio diario)</p>				