



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE  
EL ÍNDICE DE SAPROBIEDAD, EN LA LAGUNA  
ZUMPANGO DE OCAMPO ESTADO DE MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

Jafet Reyes Cardoso

DIRECTOR

Biól. Raúl Arcos Ramos

Ciudad Universitaria, CDMX 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ZARAGOZA"  
DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
P R E S E N T E.**

Comunico a usted que el alumno **REYES CARDOSO JAFET**, con número de cuenta **411026581**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **23 de mayo de 2017** a las **13:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

**PRESIDENTE** M. en C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS

**VOCAL** Biól. RAÚL ARCOS RAMOS

**SECRETARIO** M. en C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

**SUPLENTE** M. en F. IDALIA LETICIA FLORES GÓMEZ

**SUPLENTE** M. en C. JORGE ANTONIO VALDIVIA ANISTRO

El título de la tesis que presenta es: **Evaluación de la calidad del agua mediante el índice de saprobiedad, en la Laguna de Zumpango de Ocampo, Estado de México.**

Opción de titulación: Tesis.

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Ciudad de México, a 25 de abril de 2017

**DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ**  
DIRECTOR



RECIBÍ  
OFICINA DE EXÁMENES  
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.  
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL  
JEFE DE CARRERA

*AGRADECIMIENTOS:*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de tener un futuro como profesionista.*

*A mi tutor: Biol. Raúl Arcos Ramos, por ser un gran maestro al compartir su conocimiento y recursos, para enriquecer mi trayectoria escolar y este trabajo de investigación. Agradezco su apoyo en todo momento y el de su esposa: la Dra. Magdalena Hernández; por ayudarme a superar momentos difíciles, gracias por convertirse en un gran amigo.*

*A los miembros del comité; M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas, M. en C. Germán Galva Vásquez, M. en F. Idalia Leticia Flores Gómez y M. en C. Jorge Antonio Valdivia Anistro, por compartir su tiempo y conocimiento durante este proyecto.*

*A mis amigos:*

*A Jessica Carolina, a quien agradezco conocer; por ser parte de los mejores momentos durante mi tiempo en la universidad, por siempre motivarme a ser mejor y creer en mí, por ser una gran compañera y amiga.*

*A Janet Flores, mi más entrañable amiga; con quien compartí mucho de esta bonita carrera y quien se convirtió en una hermana para todo, buenos y malos momentos.*

*A Ana Victoria, Anais, Brenda, Erik, Gramsci, Javier, Mario y Sepale, por haber sido excelentes compañeros y amigos durante toda la carrera, sin duda se volvieron una maravillosa experiencia.*

*A mis amigos del fut; Ricardo, Eduardo, Samuel, Raúl, Héctor, Manuel, Antonio, Jon, Cervantes y todos aquellos que falte por mencionar, por compartir su tiempo y amistad en este deporte; que nos agrada tanto y que nos unió como amigos.*

*Dedico mi trabajo y esfuerzo a:*

*Mi familia, con el más sincero agradecimiento a mis padres; Aristec Reyes Martínez y Lilia Cardoso Mejía, por todo el apoyo a lo largo de mi vida, por su excelente ejemplo como padres y por su esfuerzo para que todo esto fuera realidad, a mis hermanos; Narmo y Htetzel, por siempre ser parte de todo en mi vida y saber que siempre podre contar con ellos.*

**CONTENIDO**

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1. El agua en México	12
2.2. Elementos de calidad del agua	14
2.2.1. Morfometría de la cubeta lacustre	15
2.2.2. Parámetros físicos de calidad del agua	15
2.2.3. Parámetros químicos de calidad del agua	17
2.2.4. Nutrientes: Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	22
2.2.5. Nutrientes: Fósforo (P)	24
2.3. Bioindicadores	26
2.3.1. Fitoplancton como bioindicador	28
2.3.2. Muestreo de fitoplancton	29
2.3.3. Técnicas para el análisis de fitoplancton	30
2.4. Sistema del Saprobio	31
2.5. Estimación de la diversidad con el índice de Shannon y Weiver (H')	35
<b>3. ANTECEDENTES</b>	<b>37</b>
<b>4. MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>40</b>
<b>5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>46</b>
<b>6. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>48</b>
<b>7. HIPÓTESIS</b>	<b>49</b>
<b>8. OBJETIVO</b>	<b>49</b>
<b>9. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>50</b>
<b>10. RESULTADOS y DISCUSIÓN</b>	<b>54</b>
10.1. Variables físicas	54
10.2. Variables químicas	57
10.3. Nutrientes	68
10.4. Análisis de fitoplancton	74
10.5. Análisis del índice de saprobiedad	77
10.6. Análisis Multivariado	78
<b>11. CONCLUSIONES</b>	<b>82</b>
<b>12. RECOMENDACIONES</b>	<b>82</b>
<b>13. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>83</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Escala de pH y rango en el que fluctúa el agua	17
Figura 2. Comportamiento del CO <sub>2</sub> en relación con el pH	18
Figura 3. Relación entre temperatura y salinidad	19
Figura 4. Transformación del nitrógeno en el agua	23
Figura 5. Cuenca del Valle de México en el año 1519	36
Figura 6. Muerte de carpas por falta de oxígeno	39
Figura 7. Pérdida del 70% del volumen de agua en la laguna, en 2013	39
Figura 8. Laguna de Zumpango y ubicación de los puntos de muestreo	40
Figura 9. Punto de muestreo uno: El Embarcadero	41
Figura 10. Punto de muestreo dos: La Isla	41
Figura 11. Punto de muestreo tres: Carpas I	41
Figura 12. Punto de muestreo cuatro: Carpas II	42
Figura 13. Punto de muestreo cinco: El Jabón	42
Figura 14. Efluente principal de la laguna de Zumpango	42
Figura 15. Esquema de trabajo; campo, laboratorio y gabinete	45
Figura 16. El Embarcadero y su abundancia de fitoplancton	47
Figura 17. Sitio La Isla y su abundancia de fitoplancton	47
Figura 18. Localización de la laguna Zumpango de Ocampo	50
Figura 19. Parque ecoturístico laguna de Zumpango	53
Figura 20. Comportamiento de la profundidad durante los muestreos	54
Figura 21. Distribución de la temperatura de marzo a noviembre	55

---

Figura 22. Valores de transparencia de marzo a noviembre	56
Figura 23. Transparencia del agua de los sitios muestreados	56
Figura 24. Concentración de oxígeno disuelto en la laguna de Zumpango	57
Figura 25. Concentración de oxígeno disuelto en superficie	58
Figura 26. Concentración de oxígeno disuelto en muestras del fondo	58
Figura 27. Descripción del comportamiento del oxígeno en superficie y fondo	59
Figura 28. Comportamiento de los sólidos disueltos totales de la laguna	61
Figura 29. Variación mensual para la concentración de salinidad	62
Figura 30. Variación mensual de la conductividad de marzo a noviembre	63
Figura 31. Variación mensual del potencial óxido-reducción	64
Figura 32. Variación mensual de la demanda química de oxígeno	65
Figura 33. Variación mensual de la demanda bioquímica de oxígeno	66
Figura 34. Demanda bioquímica de oxígeno por sitio de muestreo	67
Figura 35. Variación mensual de la concentración de nitritos	68
Figura 36. Variación mensual de la concentración de nitratos	69
Figura 37. Variación mensual de la concentración de amoníaco	70
Figura 38. Variación mensual de la concentración de fósforo total	72
Figura 39. Variación mensual de la concentración de fosfatos	73
Figura 40. Representación de la diversidad de fitoplancton	74
Figura 41. Análisis de Componentes Principales	79
Figura 42. Análisis de Conglomerados	81
Figura 43. Género <i>Phormidium</i> ; fitoplancton más dominante	100

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Calidad del agua en México	13
Tabla 2. Nitrógeno y sus estados de oxidación	22
Tabla 3. Clasificación del nivel trófico	26
Tabla 4. Organismos indicadores de calidad del agua	27
Tabla 5. Valores del índice de saprobiedad	34
Tabla 6. Técnicas utilizadas en campo	43
Tabla 7. Técnicas utilizadas en laboratorio	43
Tabla 8. Análisis estadístico de la distribución de O <sub>2</sub>	59
Tabla 9. Relación de nutrientes con el nivel trófico	71
Tabla 10. Índice de Shannon y Weiver, por sitio de muestreo	75
Tabla 11. Índice de Shannon y Weiver por mes de muestreo	76
Tabla 12. Valor del índice de saprobiedad por mes de muestreo	77
Tabla 13. Valor del índice de saprobiedad por sitio de muestreo	77
Tabla 14. Clasificación del índice Saprobio de Pantle y Buck	78
Tabla 15. Análisis de componentes principales y porcentaje acumulado	78
Tabla 16. Efecto del pH en las proporciones iónicas del CO <sub>2</sub>	91
Tabla 17. Relación entre la conductividad y la dureza del agua	91
Tabla 18. Media mensual de precipitaciones y temperatura 2016 (INEGI)	91
Tabla 19. Resumen de los parámetros físicos, químicos y nutrientes	92
Tabla 20. Promedio de las variables físicas y químicas para cada sitio de muestreo	93
Tabla 21. Presencia, ausencia y abundancia relativa de fitoplancton	96
Tabla 22. Clasificación de fitoplancton, abundancia relativa e índice de saprobiedad	98
Tabla 23. Análisis de Correlación de Pearson	99

**ABREVIATURAS**

AC	Análisis de Conglomerados
ACP	Análisis de Componentes Principales
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
ADP	Adenosín Difosfato
APHA	American Public Health Association
ARN	Ácido Ribonucleico
ATP	Adenosín Trifosfato
AWWA	American Water Works Association
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
DBO5	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ECOL	Ecológica
Eh	Potencial redox
H'	Índice de Diversidad
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IS	Índice Sapróbico
ISPB	Índice de Saprobiidad de Pantle y Buck
KW	Kruskal-Wallis
MIA	Manifestación de Impacto Ambiental
mm	Milímetros
MO	Materia Orgánica
NOM	Norma Mexicana
OD	Oxígeno Disuelto
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
POR	Potencial de Óxido Reducción
ppm	Partes por millón
PSU	Unidades Prácticas de Salinidad
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SDT	Sólidos Disueltos Totales
ZM	Zona Metropolitana

## RESUMEN

La laguna de Zumpango presenta problemas importantes de contaminación causados por la entrada de aguas residuales, lo que propicia la disponibilidad de nutrimentos acelerando el proceso natural de eutrofización. Por lo tanto, este estudio se enfoca en determinar su estado trófico y calidad de sus aguas mediante los componentes físicos, químicos y biológicos, para lo cual se realizaron muestreos mensuales de marzo a noviembre de 2015 utilizando cinco puntos de monitoreo a dos niveles (superficie y fondo). Se evaluaron 18 parámetros físicos, químicos y biológicos, que incluye: un análisis sobre la productividad primaria (fitoplancton), identificación de los géneros y estudio de la diversidad mediante el índice de Shannon y Weiver. Como método de clasificación para la laguna se utilizó el índice de saprobiedad.

Las determinación de los parámetros físicos y químicos se realizó con la metodología de APHA 2001, las variables cuantitativas se analizaron mediante pruebas no Paramétrica Univariada de Comparación de Varias Muestras; prueba de Kruskal-Wallis, análisis multivariado; mediante Correlación de Pearson, Análisis de Componentes Principales y Análisis de Conglomerados.

Los resultados establecen que la laguna de Zumpango es somera y polimítica con una media de 1.99 m de profundidad, presenta una baja salinidad de 0.25 psu y una elevada alcalinidad causada por la presencia de carbonatos y bicarbonatos, tiene un pH promedio de 8.68 lo que la ubica por encima de lo que establece la NOM-001-ECOL-1996, la turbidez tiene una media de 0.20 m, lo que se relaciona directamente con una elevada densidad de fitoplancton pero con una baja diversidad ( $H' = 0.37$ ), su densidad determina la concentración ( $O_2$ ) por lo que la laguna de Zumpango es oxidativa en superficie ( $7.31 \text{ mg L}^{-1}$ ), mientras en el fondo predominan de los procesos de reducción debido al agotamiento del  $O_2$ .

El índice de saprobiedad (valor  $3.37 = \text{Alfa-mesosaprobia}$ ), establece que la laguna es un sistema mesotrófico, la  $DBO_5$  ( $86.52 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ) y  $DQO$  ( $160.42 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ), determinaron que la principal causa de contaminación es la materia orgánica. La evaluación de nutrimentos mostró que la concentración de nitratos ( $6.36 \text{ mg L}^{-1}$ ) y fósforo ( $0.53 \text{ mg L}^{-1}$ ) junto con la variable física de temperatura ( $23^\circ\text{C}$ ), producen las condiciones ideales para el crecimiento de fitoplancton. El análisis multivariado; indico, que este conjunto de nutrimentos es una de las variables más importantes, ya describe el comportamiento del sistema debido a su relación directa con la materia orgánica y el fitoplancton. Por tanto, la laguna de Zumpango es un sistema contaminado (*Alfa-mesosaprobio*), cuyo principal problema es la contaminación orgánica, que ocasiona exceso de nutrimentos y abundancia de fitoplancton (*Phormidium*, *Nitzschia*, *Microcystis*), un problema derivado de la influencia antropogénica: debido a los residuos orgánicos e inorgánicos, pero principalmente a la entrada de las aguas municipales que llegan a la laguna a través del canal Santo Tomas; sin tratamiento alguno.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aguas continentales son un recurso fundamental para el desarrollo y supervivencia de las poblaciones humanas, debido a las propiedades únicas presentes de este grupo (Ríos, Lagos, y Lagunas), características que permiten el consumo humano y el desarrollo de diversas actividades económicas (Rodier, 1990). La laguna de Zumpango ubicada al norte de la Cuenca del Valle de México es un recurso muy importante para las comunidades cercanas y este uso ha derivado en problemas de contaminación, principalmente por la adición de materia orgánica causada por la entrada de aguas residuales. Dicho problema genera la necesidad de un estudio donde se determine la calidad de sus aguas. Los parámetros físicos, químicos y biológicos son los que permiten medir el grado de contaminación o calidad del agua (Aznar, 2000). Mientras que los índices de calidad del agua son dos o más parámetros que indican la salubridad y reflejan el comportamiento del ecosistema, teniendo como propósito simplificar en expresión numérica las características positivas o negativas, dando como resultado una estimación entre cero y uno o entre cero y cien, lo que define el grado de calidad de un determinado cuerpo lotico (Martínez de Bascaran, 1976; Bellinger *et al.*, 2010).

Uno de estos índices medible a partir de la capacidad que desarrollan los organismos para tolerar determinados niveles de contaminación es el índice de saprobiedad sistema propuesto por Kolwitz y Marsson en 1902, este utiliza datos ecológicos y fisicoquímicos para evaluar organismos con la capacidad de sobrevivir bajo condiciones de contaminación, con ello se puede representar objetivamente al sistema; es decir nos indica de manera resumida el impacto que tiene la contaminación en cada sitio mediante el estudio de organismos vivos (Salusso, 2002). Los sistemas lénticos mantienen una gran diversidad de organismos incluso de igual o mayor magnitud a los ecosistemas terrestres y la contaminación produce cambios en la estructura de las comunidades, la función biológica de los sistemas acuáticos y al propio organismo, afectando su ciclo de vida, crecimiento y su condición reproductiva (Salusso, 2002). Debido a esto, “algunos organismos pueden proporcionar información de cambios físicos y químicos en el agua, ya que a lo largo del tiempo revelan modificaciones en la composición de la comunidad (Laws, 1981)” (Vázquez *et al.*, 2006).

El uso de bioindicadores es una herramienta para conocer la calidad del agua, esto no quiere decir que cambie el método tradicional de los análisis fisicoquímicos. Pero simplifica en gran medida las actividades de campo y laboratorio, ya que su aplicación sólo requiere de la identificación y cuantificación de los organismos basándose en índices de diversidad ajustados con lo que se obtiene; la detección, la intensidad y la extensión de la contaminación en el cuerpo de agua mediante los organismos afectados (Rodier, 1990).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. El agua en México

México ha logrado realizar avances en el sector del agua, incluyendo un sistema legislativo, una autoridad nacional del agua, un sistema de derechos del agua así como un mercado del recurso; sin embargo, todavía se enfrenta a desafíos significativos. Estos incluyen aspectos relacionados con la sustentabilidad, la eficiencia económica, la equidad, la creciente y continua sobreexplotación, los precios distorsionados, los subsidios y muchas otras intervenciones en el sector del agua, que alientan prácticas no sostenibles en el uso del recurso y desalientan la designación del agua a mejores usos (García *et al.*, 2012).

La disponibilidad del recurso hídrico en México depende de dos factores naturales propios de la ubicación geográfica; uno, su ubicación en la zona intertropical y dos, los accidentes geográficos, que caracterizan el relieve de nuestro país. Dos terceras partes del territorio se consideran zonas áridas o semiáridas con precipitaciones anuales menores a 500 mm, mientras que el sureste es húmedo con precipitaciones promedio de 2000 mm por año (CONAGUA, 2014). Mientras que la concentración y el crecimiento poblacional determinan en su mayoría la demanda lo que fija los puntos de presión sobre el medio ambiente, la CONAPO estimó que al 2013 en las doce zonas metropolitanas (ZM) cuya población es mayor a un millón de habitantes se encontraba concentrada el 37.7% de la población del país, es decir 44.6 millones de habitantes de los 123.3 millones estimados para ese año (INEGI, 2015).

En el ciclo hidrológico, una porción del agua regresa a la atmósfera por medio de la evapotranspiración; mientras, que el resto escurre para formar sistemas lóticos y lénticos los cuales delimitamos mediante el sistema de cuencas, es decir unidades naturales definidas por la existencia de una división de las aguas debida a la conformación del relieve (CONAGUA, 2014). México recibe aproximadamente 1, 489,000 millones de m<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación al año, de esta agua se estima que el 71.6% se pierde en con la evapotranspiración regresando a la atmósfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos y el 6.2% restante se infiltra al subsuelo de forma natural recargando los mantos acuíferos.

En México la disponibilidad del agua no coincide con la distribución poblacional, el volumen per cápita es de 4028 m<sup>3</sup> por habitante por año; sin embargo, las diferencias en la distribución son marcadas entre el norte y el sureste del territorio, por lo que se identifican regiones con gran escasez y otras con fuertes inundaciones. En la zona centro del país, se encuentra el 27% de la población y se cuenta con sólo el 32% del agua utilizable; en cambio la zona sur existe el 68% del agua del país y sólo un 23% de la población se asienta en dicha zona (SEMARNAT/CONAGUA, 2011).

Los mayores problemas de contaminación en México se localizan en el centro del país en la Cuenca del Valle de México, lo que incluye al sistema Cutzamala seguidos de la parte norte en la península de Baja California (Tabla 1).

Tabla 1. *Calidad del agua en México (CONAGUA, 2014).*

<b>Calidad del agua y su aprovechamiento</b>
1. - 22.7% del agua superficial se encuentra contaminada o fuertemente contaminada.
2.- 33.2% del agua superficial tiene calidad aceptable.
3.- 44.1% del agua superficial observa calidad buena y excelente.
4.- La eficiencia de conducción y distribución es de 86% y 76% respectivamente.
5.- El sector agropecuario genera 62% de las aguas residuales (cargas orgánicas, plaguicidas y fertilizantes entre otros contaminantes).

México posee un rico y variado patrimonio en sistemas acuáticos epicontinentales (ríos, arroyos, lagos, lagunas, manantiales y humedales naturales) quienes constituyen una parte fundamental en el suministro del recurso hídrico, por ser grandes masas de agua con una excelente disponibilidad para uso humano o para sustentan la vida dentro de los ecosistemas (Gutiérrez, 2000).

Estos sistemas pueden clasificarse de acuerdo distintas variables; por su origen, morfología o productividad, este último es el más usado ya que destaca por mantener una relación entre la morfología y el estado ecológico de la laguna asignando diferentes estados sucesivos por los que un sistema sucede de manera natural, los estados son los siguientes:

- **Sistemas oligotróficos:** son muy profundos de área muy pequeña y su perímetro tienden a la circunferencia, son lagos con una mayor diversidad de especies pero una baja biomasa, con características de aguas limpias con poca perturbación humana.
- **Sistemas eutróficos:** son poco profundos con áreas muy grandes, con profundidades máximas de 15 m, estos lagos tienen una baja diversidad de especies pero una elevada biomasa lo que les confiere la peculiaridad de ser sistemas contaminados y altamente productivos, esta debido a la intervención del hombre.

(Wetzel, 1981, 2001).

La productividad primaria se refiere a la capacidad que tienen los organismos de transformar productos elementales en energía y biomasa, basado en que a mayor interacción nutrimental con los productores primarios se dará un mayor metabolismo del sistema y como consecuencia una productividad más elevada. Las actividades humanas, como la industria, agricultura y ganadería aportan contaminantes, compuestos orgánicos e inorgánicos y diversos agentes extraños propiciando el desequilibrio del sistema, lo que deriva en una serie de consecuencias importantes; llevando los sistemas lénticos a una condición de eutrofización (Rodier, 1990).

La eutrofización es el término usado para describir los efectos biológicos de un incremento en la concentración de nutrientes (generalmente nitrógeno y fósforo, pero algunas veces otros como el sílice, potasio, calcio, hierro o manganeso) en ecosistemas acuáticos un exceso se convierte en contaminantes (Contreras, 2000; Abarca, 2007).

Por otro lado, se conoce como contaminante a la presencia de materia extraña e indeseable en una sustancia, a este agente extraño se le puede clasificar como; contaminante físico, químico o biológico. Los primeros son las alteraciones a la temperatura y el color, los químicos producen diversos efectos y pueden ser de origen natural o sintético algunos son desechados directamente y otros se forman por las reacciones químicas entre diferentes compuestos en el agua; entre los que podemos clasificar a los compuestos organoclorados y por último los contaminantes biológicos; que son microorganismos vivos que provocan enfermedades en el hombre (Turk *et al.*, 2004).

## 2.2. Elementos de calidad del agua

El término calidad del agua es relativo y sólo tiene importancia si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir, que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar (Turk *et al.*, 2004).

La Asociación Americana de Salud Pública (APHA) y la Asociación Americana de abastecimiento de agua (AWWA) ha establecido las normas internacionales para la caracterización de la calidad del agua (APHA-AWWA-WPCF, 1992), dentro de las cuales se encuentran incluidas los denominados: Métodos Estandarizados para el Examen de las Aguas Residuales (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater), donde se incluye a diversos países dentro de ellos México (Guevara, 1996).

### 2.2.1. Morfometría de la cubeta lacustre

La morfometría de un sistema lacustre nos describe la forma y las dimensiones de los cuerpos de agua, esto surge de las transformaciones geomorfológicas endógenas y exógenas, las primeras por los procesos de construcción que se llevan a cabo en la corteza terrestre; tectonismo y vulcanismo, la segunda son los factores niveladores de relieve; denudación y acumulación (García *et al.*, 1995). La profundidad es un parámetro de la morfometría importante debido a que este factor muestra una correlación inversa con respecto a la productividad en todos los niveles tróficos de los lagos grandes; ya que los sistemas eutróficos presentan profundidades máximas de entre los 10 y 15 m, mientras que en los sistemas oligotróficos sus profundidades superan los 30 m (Wetzel, 2001).

Existe una correlación inversa de la profundidad media con respecto a la densidad fitoplanctónica y el coeficiente de difusión vertical con la temperatura. Las variaciones en el volumen de agua dentro de una laguna es un comportamiento normal dentro de los límites del sistema, este fenómeno se traduce en un proceso que crea las condiciones que ayudan a diversificar el ecosistema y previenen la concentración excesiva de nutrientes, estas variaciones crean las condiciones temporales para que muchos de los ciclos biogeoquímicos funcionen correctamente (García *et al.* 1995; Wetzel, 2001).

### 2.2.2. Parámetros físicos de calidad del agua

Los parámetros físicos que afectan la calidad del agua están determinados por la luz, el calor, olas y corrientes que ocurren a lo largo del día, por lo que es de suma importancia considerarlos debido a que influyen en la diversidad biológica del ambiente acuático (Gama *et al.*, 2010).

#### Temperatura

Este parámetro es determinante en los procesos de circulación, renovación de masas de agua o de confinamiento, se utiliza mucho en la evaluación de calidad del agua aunque depende de diversos factores como: efluentes industriales, vegetación local y condiciones meteorológicas (nubosidad o viento y presión atmosférica) (De la Lanza, 1990). En muchos de los sistemas lacustres, dependiendo del gradiente térmico, pueden presentarse discontinuidades a lo largo de la columna de agua provocando periodos de estratificación a los que se les conoce como: Epilimnion, en la capa superior de agua con circulación y una mayor temperatura, el Metalimnion, es el estrato intermedio donde se ubica la Termoclina y el Hipolimnion, la capa más profunda de agua con temperaturas frías (Wetzel, 2001).

En los estudios hidrológicos es importante identificar los cambios en la temperatura, debido a que la solubilidad de los gases disueltos depende de ello; entre éstos el oxígeno, que participa en las reacciones químicas de óxido reducción, así como en las funciones de respiración de los organismos acuáticos (Reind y Wood, 1976; Wetzel, 2001). La temperatura influye de manera importante dentro de los ecosistemas acuáticos epicontinentales, porque además de establecer la estratificación térmica del agua, regula las tasas de reacción química y procesos biológicos (Lampert y Sommer, 1997).

### Transparencia

La turbidez del agua se define como el grado de opacidad producido por la materia orgánica e inorgánica: esto incluye, el plancton, partículas disueltas y partículas en suspensión, lo que hacen que el agua pierda su transparencia (Wetzel y Likens, 1991). De acuerdo a Wetzel es el grado de penetración de la luz y se puede dividir en dos zonas:

1. Eufótica: es la región donde penetra la luz y por lo tanto se pueden llevar a cabo los procesos anabólicos como la fotosíntesis y llega hasta la profundidad a la cual se extingue el 99% de la luz incidente.
2. Afótica: donde la luz no penetra y por lo tanto la respiración es mayor que la fotosíntesis con una zona intermedia donde los procesos se igualan. Por debajo de esta zona la productividad primaria es prácticamente nula.

La técnica más utilizada para determinar este parámetro, se realiza mediante el disco de Secchi; consiste en un disco con peso suficiente (hierro) dividido en cuatro cuartos, dos blancos y dos negros, el cual se sumerge en el agua atado a una cuerda. La profundidad a la que el disco se pierde de vista se usa como medida de la transparencia del cuerpo de agua, cuando la visibilidad es complicada se realizan varias observaciones y se obtiene un promedio (Garay *et al.*, 1993; Blancas, 2007).

### Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Todo material sólido contenido en el agua modifica sus propiedades y por tanto afecta diversos factores como: el grado de penetración de la luz o la distribución de calor (temperatura), estos pueden ser orgánicos e inorgánicos. Los SDT es la suma de todos los cationes, aniones, cristales de sílice y pequeñas cantidades de materia orgánica. Los principales iones que participan son carbonatos, bicarbonatos, cloruro, sulfato, nitrato, sodio, potasio, calcio y magnesio. Estos iones pueden deberse a la composición de la cubeta lacustre o por adición humana por medio de los residuos en la industria. Para aguas de uso potable se ha considerado mantener valores por debajo de las 500 ppm de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT, 1996.

### 2.2.3. Parámetros químicos de calidad del agua

El pH es la abreviación del potencial de hidrógeno, que significa la concentración de iones hidrógeno, este se debe a la naturaleza de los suelos en donde se ubica la cuenca, aguas calcáreas tienen un pH mayor a 8.5 y las aguas provenientes de un terreno pobre en calizas su pH es próximo a 7.0 (Haering, 1975). El pH de las aguas lénticas está influenciado por la vegetación y naturaleza química de los fondos (De la Lanza, 1990).

El intervalo para que se desarrolle la vida acuática varía entre el 6.5 a 9.0 unidades, ya que el agua que presenta un cuerpo acuático un valor de pH igual a 7.0 es neutra, entre 7.0 y 14.0 es alcalina y por debajo de 7.0 es ácida (Figura 1), los valores extremos resultan letales para la vida (Arredondo y Ponce, 1998).

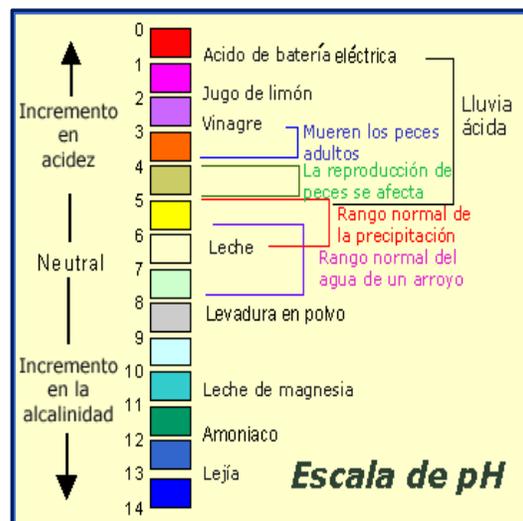


Figura 1. Escala de pH y rango en el que fluctúan diversos compuestos tomado de: <http://www.Rentauningenero.com/wp-content/2009/02/escala-de-ph.jpg>.

Este potencial de hidrógeno controla muchas reacciones en la actividad biológica por lo que la escala se restringe bastante. De acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996, el valor del pH debe mantenerse de 6.5 a 8.5 en sistemas naturales.

Entre el pH y el  $\text{CO}_2$  se establece una relación que determina la acción amortiguadora de las aguas, ya que esta muestra una tendencia a evitar modificaciones del pH siempre que dichos equilibrios sean operativos. La adición de iones hidrógeno neutraliza los iones hidroxilo formados mediante la disociación  $\text{HCO}_3^-$  y del  $(\text{CO}_3)^{2-}$ , pero se forman inmediatamente más al reaccionar el carbonato con el agua siempre que exista una reserva del ion carbono (Wetzel, 2001).

Debido a que la alcalinidad de las aguas superficiales está determinada generalmente por su contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos por lo que se toma como un indicador de dichas especies iónicas aunque también se incluyen algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos. Estos iones negativos están comúnmente asociados a iones positivos como calcio, magnesio, potasio o sodio (Gómez *et al.*, 2011).

El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad, dicha especie iónica y el hidróxido son importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas de aguas residuales.

La alcalinidad no solo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, si no también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis. Para propósitos prácticos el bióxido de carbono no se presenta por encima de un pH de 8.3 y por debajo de éste, no se detectan carbonatos. La distribución del  $\text{CO}_2$ , los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) y los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) a diferentes valores de pH se presentan en la figura 2 (Gómez *et al.*, 2011).

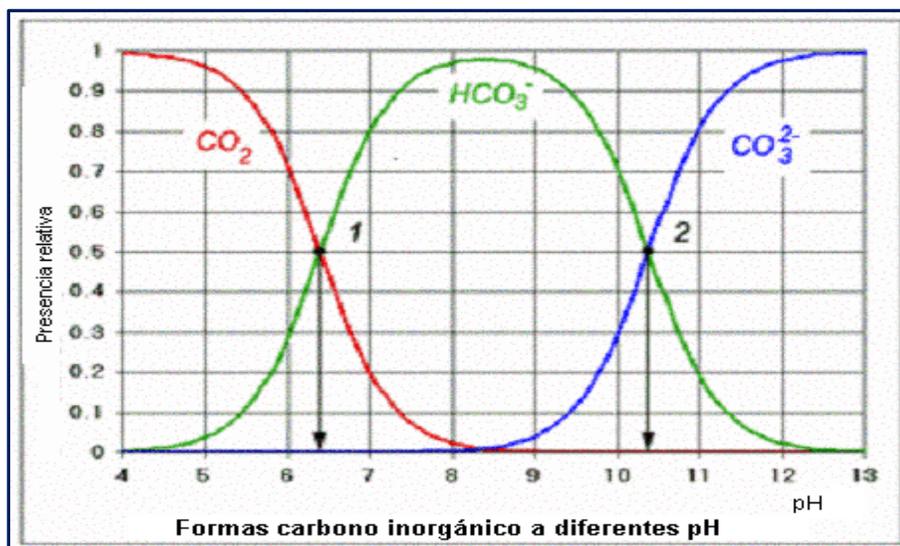


Figura 2. Comportamiento del  $\text{CO}_2$  y su relación con el pH, imagen tomada de <http://www.balnova.com/wp-content/uploads/2014/02/ph2.jpg>.

### Conductividad eléctrica

Muchas disoluciones acuosas tienen la capacidad para transmitir una corriente eléctrica y ésta es igual al recíproco de la resistividad de la solución, además es una medida indicativa e indirecta de la presencia de iones, de su concentración, movilidad y valencia. Las soluciones de la mayoría de los compuestos inorgánicos (ej. aniones de cloruro, nitrato, sulfato y fosfato) son relativamente buenos conductores. Por el contrario, moléculas de compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas (ej. aceites, fenoles, alcoholes y azúcares) son pobres conductores de una corriente eléctrica (Goyenola, 2007).

La conductividad del agua destilada está en el rango de los 0.5 a 3.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en los cuerpos de agua continental generalmente es baja entre los 50 y 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por lo que en este tipo de sistemas valor por encima de los mencionados pueden indicar que el agua no es indicada para la vida de ciertas especies de peces o invertebrados. Cada cuerpo tiene un intervalo constante de conductividad que puede ser utilizado como línea base para comparaciones con otras determinaciones ya que cambios significativos pueden ser indicadores de eventos puntuales de contaminación (Goyenola, 2007).

Al respecto, Romero (1999), menciona que, "la conductividad de las aguas epicontinentales de México, varían desde 45 hasta 10,000 micromhos/cm y en las zonas de elevada contaminación algunas veces la conductividad llega a exceder este valor. La forma más usual de medir la conductividad en aguas es mediante instrumentos comerciales de lectura directa en micromhos/cm a 25°C" (Citado en Gómez *et al.*, 2011, p. 35).

### Salinidad

En sistemas epicontinentales este término es utilizado para hacer referencia a la suma de la concentración de todos los constituyentes iónicos disueltos en el agua, dicha composición iónica del agua dulce está determinada por soluciones diluidas de álcalis y compuestos alcalinos: bicarbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), carbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^-$ ). Mientras que los principales aniones en lagos de agua dura son:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y que en conjunto constituyen la salinidad total iónica del agua (Wetzel, 2001).

Dicha cantidad de sales en solución afecta varios procesos físicos, químicos y biológicos tales como la densidad, viscosidad, tensión superficial, presión osmótica, punto de fusión, punto de ebullición y solubilidad de gases (APHA, 1995).

Según aumenta la concentración de sales disueltas, afecta propiedades como la temperatura la densidad máxima y el punto de congelación del agua (Figura 3). Dado que las sales no pueden acomodarse dentro de la estructura láctice del hielo, su presencia tiende a inhibir la congelación (Gross, 1971).

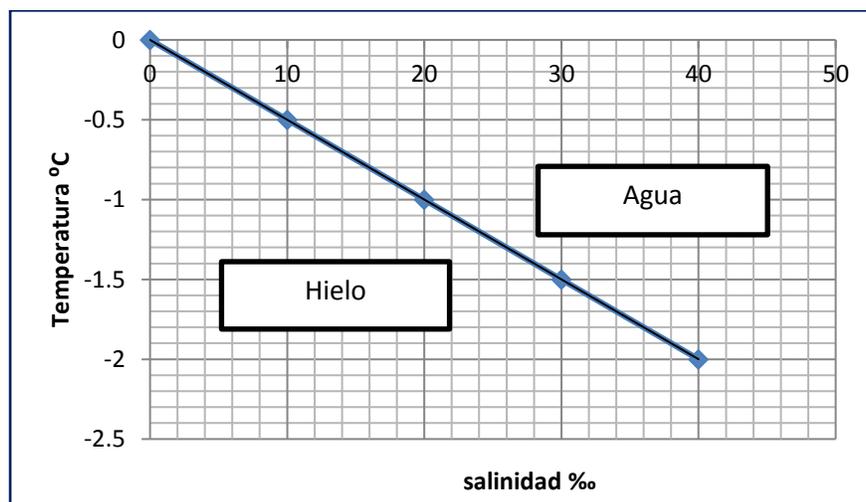


Figura 3. Relación entre temperatura y salinidad, tomado de: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/medios/cap3/g13.jpg](http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/medios/cap3/g13.jpg).

### Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es esencial para el desarrollo de la vida en los ecosistemas acuáticos. Por tal motivo, la disponibilidad de  $O_2$  puede ser un indicador de cuán contaminado se encuentra el agua y bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal (Gutiérrez, 2012). Este factor también responde a la cantidad de material fotosintético que esté presente en el sistema y de la de la ubicación geográfica del lugar debido a que el grado de dilución del  $O_2$  se ve modificado por la presión atmosférica (Wetzel, 2001).

Como la actividad fotosintética depende de la radiación solar, varía a lo largo del día, ya que durante las primeras horas de la mañana las concentraciones de OD son bajas y a medida que se incrementa el proceso de la fotosíntesis, se puede observar un incremento gradual y constante hasta alcanzar en el atardecer la sobresaturación. La producción y abundancia del oxígeno está limitada por factores como: temperatura, biomasa de productores primarios, transparencia, nutrientes, materia orgánica en descomposición y los organismos consumidores (Arredondo, 1986).

De acuerdo a Wetzel (2001), la incorporación del  $O_2$  al agua se presenta de dos maneras; uno a partir del intercambio con la atmósfera, debido a que una región de la laguna se mantiene en contacto con la atmósfera y dos, por la actividad fotosintética. La distribución del oxígeno en disolución, dependerá de una combinación de condiciones de solubilidad, hidrodinámica, entrada a partir de la fotosíntesis y pérdidas debidas a la oxidación química y actividades metabólicas.

En base a la distribución del oxígeno, en la columna de agua se pueden identificar dos zonas; trofogénica y trofolítica. Para el primer caso existe una mayor producción de oxígeno que su requerimiento, la segunda corresponde a la parte profunda del lago, donde predominan los procesos de degradación de materia orgánica. La relación entre respiración y producción es utilizado como un índice común para determinar el estado trófico de un cuerpo acuático (Contreras, 1994).

### Potencial de óxido reducción (POR)

Dichas reacciones de oxidación y reducción regulan el comportamiento de muchos compuestos químicos presentes en los cuerpos de agua natural. La reactividad, solubilidad y movilidad cíclica de elementos esenciales para los sistemas biológicos (Fe, S, N, C, P y varios elementos metálicos) al mismo tiempo también afecta la distribución y actividad metabólica de microorganismos (García, 2001).

En un ambiente o sistema, que acepte electrones de un electrodo normal de hidrógeno es una media celda con un potencial redox (Eh) positivo. En contraposición cualquier sistema que done electrones de hidrógeno se define como potencial redox negativo (APHA, 1995).

Un valor (Eh) positivo es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación mientras que un valor (Eh) negativo de baja magnitud es indicativo de un ambiente altamente reductor, esto es una referencia útil ya que los potenciales redox pueden dar una idea de su papel en los procesos energéticos biológicos (Aznar, 2000).

En los sistemas acuáticos siempre vamos a encontrar una zona oxidativa en superficie y a medida que aumenta la profundidad la concentración de O<sub>2</sub> se reduce hasta que aparece una zona reductora, la cual tiene actividad de bacterias anaerobias como las reductoras del sulfato y las del metano, esto incluye los protozoos anaerobios que se nutren algunas bacterias y nematodos (Contreras, 1985).

#### Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

El oxígeno es uno de los elementos principales que participa en la degradación de la materia orgánica, por lo que la DBO<sub>5</sub> es una prueba que mide el oxígeno requerido por los organismos biológicos aerobios, dichos organismos consumen oxígeno en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales (Contreras, 1994).

El procedimiento general más común es medir la DBO a los cinco días (DBO<sub>5</sub>), representando de esta manera el oxígeno consumido durante dicho tiempo. Su aplicación permite calcular los efectos de las descargas domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas en los cuerpos receptores (Romero, 1999).

Las aguas subterráneas suelen situarse en concentraciones menores a una ppm, mientras que aguas residuales domésticas se encuentran entre; los 20 a 100 mg/l para aguas superficiales, 100 a 500 mg/l para desechos domésticos y de 500 a 5,000 mg/l para aguas industriales (González, 2006; Gama *et al.*, 2010).

Los datos de la prueba de la DBO<sub>5</sub> se utilizan en ingeniería para diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales (Gómez *et al.*, 2011).

#### Demanda química de oxígeno (DQO)

La necesidad de oxígeno obedecen a procesos metabólicos de organismos vivos; sin embargo, existe otro requerimiento, el que necesita la materia orgánica para su oxidación y al que se le conoce como: demanda química de oxígeno (DQO). Es decir, el oxígeno requerido bajo condiciones específicas de temperatura y tiempo, como agente oxidante. La materia orgánica oxidable se calcula en términos de oxígeno equivalente (Contreras, 1994).

Para muestras de un origen específico, la DQO se puede relacionar empíricamente con la DBO, el carbono orgánico o la materia orgánica; la prueba se usa para controlar y monitorear después que se ha establecido una correlación (De la Lanza, 1990).

Existe una relación entre los valores DBO y DQO que indican la biodegradabilidad de la materia, ya que en aguas residuales la relación DBO/DQO menor a 0.2 indica materia inorgánica y un valor mayor a 0.6 compuestos orgánicos. Este método es aplicable en aguas continentales, aguas residuales o cualquier agua que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica, por consecuencia, no es recomendable para las aguas potables debido al valor tan bajo que se obtendría (González, 2006).

#### 2.2.4. Nutrientes: Nitrógeno (N<sub>2</sub>)

El nitrógeno circula en la atmósfera en los sistemas acuáticos y a través de los suelos por lo que se vuelve un elemento esencial en las reacciones biológicas, las principales formas del nitrógeno en el agua incluyen:

##### 1.-Forma molecular

- Nitrógeno (N<sub>2</sub>)

##### 2.- Especies oxidadas

- Nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)
- Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

##### 3.- Especies reducidas

- Amoníaco (NH<sub>3</sub><sup>+</sup>)
- Amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

##### 4.- Especies orgánicas

- Aminos
- Aminas (NH<sub>2</sub>-R1), (NH-R2) y (N-R3)
- Compuestos heterocíclicos

(Tebbutt, 2002; Lozada, 2014).

Desde el punto de vista de la química inorgánica (Tabla 2), el nitrógeno puede existir con siete estados de oxidación (Sawyer y McCarty, 1994).

Tabla 2. Nitrógeno y sus estados de oxidación de acuerdo a Sawyer y McCarty (1994).

3 <sup>-</sup>	0	1 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	3 <sup>+</sup>	4 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>
NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NO	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>

Todas estas formas del nitrógeno (oxidadas y reducidas), al igual que el nitrógeno molecular son intercambiables bioquímicamente y conforman el ciclo del nitrógeno, durante los procesos biológicos la mayor parte de los compuestos orgánicos se convierten en amoníaco (Amonificación), posteriormente el amoníaco pasa a convertirse en nitratos (nitrificación; por la acción de las bacterias nitrificantes: *Nitrosomas* y *Nitrobacter*). La eliminación de nitratos se lleva a cabo mediante bacterias anóxicas (Desnitrificación), estas hacen reaccionar el nitrato con parte del carbono con lo que se obtiene  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  que se desprende hacia la atmósfera (Campell, 1987; Romero *et al.*, 1982).

La incorporación de materia orgánica en el agua se encuentra relacionada con los nutrientes y de manera más adecuada nutrimentos debido a que participan en la síntesis de la materia orgánica por los productores (Figura 4); los cuales, básicamente son los iones de nitrógeno  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y fósforo  $\text{PO}_4^+$  (De la Lanza, 1990). Estos compuestos satisfacen los requerimientos nutrimentales del fitoplancton, afectando así, la productividad primaria del sistema acuático (Wetzel, 2001).

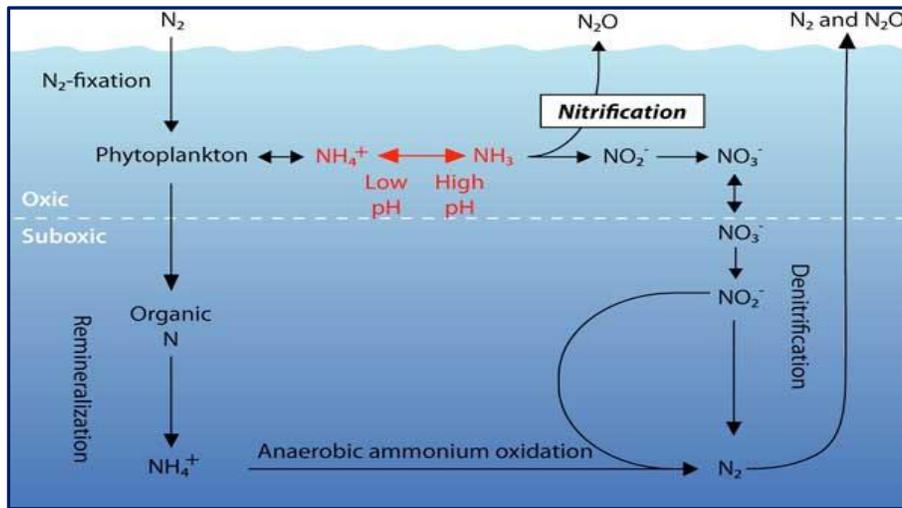


Figura 4. Transformaciones del nitrógeno en el agua, tomada de: <https://www.vistaalmar.es/images/stories/fotos-6/ciclo-nitrógeno-oceano.jpg>.

### Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )

Estos son iones que existen de manera natural y que forman parte del ciclo del nitrógeno, el nitrato es la forma asimilable que ocupan las plantas para crecer (compuestos que se usa como fertilizante). Las aguas naturales sólo presentan algunos pocos miligramos por litro, por lo que concentraciones mayores son indicativas de contaminación comúnmente debido a la práctica agrícola y ganadera. Los niveles de nitratos aumentan con la profundidad y son muy bajos en aguas superficiales, mucho más en verano cuando es absorbido por el fitoplancton (Lozada, 2014).

Un exceso de nitratos pueden causar que la productividad primaria se incremente, lo que contribuye al proceso de eutrofización; debido a que, cuando estos nutrientes se encuentran en exceso en el cuerpo de agua hacen que la vida vegetal y las algas florezcan, desplazando a otros organismos hasta eliminarlos, este crecimiento de algas puede cubrir toda la superficie del agua (Margalef, 1983).

La determinación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), es difícil debido a que se requieren procedimientos relativamente complejos por la posibilidad de la existencia de sustancias interferentes. Existen varias técnicas para la determinación y su elección depende de la concentración o de las interferencias presentes (Romero *et al.*, 1992).

El segundo ion de nitrógeno; nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), forma parte del ciclo del nitrógeno, su presencia es indicativa de contaminación fecal reciente ya que este se encuentra en un estado de oxidación intermedio entre el amoníaco y el nitrato, en elevadas concentraciones reacciona dentro del organismo con las aminas y amidas secundarias y terciarias formando nitrosaminas de alto poder cancerígeno y tóxico valores por encima de  $1\text{mg L}^{-1}$  son altamente tóxicas (Arredondo, 1986; Romero *et al.*, 1992).

Las concentraciones de nitratos es mayor que los nitritos, al ser este un compuesto intermedio, debido a que la nitro-bacteria requiere tres veces más de sustrato que las Nitrosomas para obtener la misma cantidad de energía. Al igual que las bacterias autotróficas las algas metabolizan el amoníaco y el nitrato, pero prefieren el amoníaco el cual debe haberse consumido antes de que comience a utilizar el nitrato para la síntesis celular (Gutiérrez, 2012).

La tercera forma en que se encuentra presente el nitrógeno; el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), usualmente presente en bajas cantidades menor a  $1.0\text{ mg L}^{-1}$ , en aguas no contaminadas y bien oxigenadas puede alcanzar de  $5.0$  a  $10.0\text{ mg L}^{-1}$ . Cuando en el hipolimnion de un lago eutrófico se tienen altas concentraciones de amonio; en forma de  $\text{NH}_4\text{OH}$ , se considera tóxico y se incrementa a medida que aumenta el pH (Lind, 1995).

#### 2.2.5. Nutrientes: Fósforo (P)

Es un nutriente que se consideran como la clave de los elementos acuáticos ya que su disponibilidad regula la productividad primaria; lo que significa que los orto-fosfatos son absorbidos por las bacterias, fitoplancton y las macrófitas acuáticas (Arredondo y Ponce, 1998). El fósforo total, es el más importante a la luz de las funciones metabólicas que se producen en un lago, el cual consiste en el fósforo en suspensión en materia particulada y el fósforo en forma disuelta, ambas fracciones se subdividen en varias fracciones:

## I- Fósforo particulado

### 1. Fósforo en organismos

- Ácidos nucleicos (ADN y ARN)
- Fosfoproteínas
- Nucleótidos fosfatados (ADP y ATP)

### 2. Fósforo mineral

- Rocas y suelo (Apatita-  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3^+$ )

### 3. Fósforo absorbido en materia orgánica particulada muerta o asociaciones macro-orgánicas

## II- Fósforo inorgánico

- Orto-fosfatos
- Poli-fosfatos-proveniente de los detergentes
- Fósforo combinado a coloides adsorbidos

(APHA, 1995)

Las especies iónicas presentes en el agua dependen del pH, con valores menores de 9.0 los iones de fosfatos deshidrogenados y mono-hidrogenados son prevaecientes, generalmente la concentración de fósforo total en aguas naturales no es mayor a  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$  (Romero *et al.*, 1992). El fósforo es generado por la excreta de organismos acuáticos así como de la descomposición de plantas y animales muertos, ya que liberan fósforo orgánico disuelto y fosfatos, este fósforo disuelto en el agua es fuente de alimento para el plancton (Chapa, 1987).

En un sistema eutrófico, la carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) es elevada, cuando se incrementa la productividad primaria aumentan las interacciones cíclicas de regeneración de nutrientes orgánicos e inorgánicos (Aznar, 2000).

Como consecuencia de la descomposición de materia orgánica, el oxígeno se agota en el Hipolimnion lo que favorece la liberación de nutrientes a partir del sedimento. El aporte excesivo de nutrientes estimula el crecimiento del fitoplancton, lo que disminuye la penetración de la luz que llega al sedimento limitando de este modo el crecimiento de macrófitas sumergidas (Tabla 3), y se inicia así un proceso; donde se produce la desaparición gradual de la vegetación sumergida y la comunidad de productores primarios queda dominada en su totalidad por el fitoplancton (Jeppesen, 1998).

La eutrofización se asocia con *blooms* fitoplanctónicos (frecuentemente tóxicos), lo que ocasiona: mortandades masivas de peces, generación de malos olores, disminución de diversidad biológica e interferencias significativas con diversos usos de los recursos acuáticos (Hallegraeff, 1992).

Tabla 3. Clasificación del nivel trófico, de acuerdo a la OECD (1982).

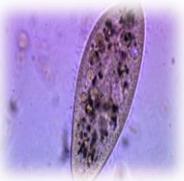
Eutrofización de los lagos		
Nivel trófico	Cantidad de clorofila (mg/m <sup>3</sup> )	Cantidad máxima de clorofila (mg/m <sup>3</sup> )
Ultra-oligotrófico	<1	<2.5
Oligotrófico	<2.5	<8
Mesotrófico	2.5 – 8	8 – 25
Eutrófico	8 – 25	25 – 75
Hipertrófico	>25	>75

### 2.3. Bioindicadores

Un ambiente acuático sostiene todo un ecosistema donde se desarrollan una gran variedad de organismos acorde a sus propiedades físicas y químicas; dichos organismos se pueden definir como indicadores biológicos del medio, ya que son seres vivos que refleja los cambios en la calidad de su ambiente o entorno, siendo un factor integrativo entre parámetros físicos, químicos y biológicos. Un bioindicador o biomonitor, proporciona el registro de nivel o estado de la contaminación en el medio ambiente, donde un organismo es el principal tóxico en la química ambiental (Goyenola, 2007).

Un gran número de estímulos actúan sobre este (bioindicador) por lo que tiene grandes posibilidades de variación al reaccionar sensitivamente bajo esos estímulos; por lo cual no presenta dificultad para desarrollarse como bioindicador y monitor (Environmental Protection Agency, 1983). El uso de bioindicadores en varios países se encuentra enfocado no solo a medir la salud del ecosistema también para determinar el impacto potencial, principalmente el económico con lo que se asocia al desarrollo sustentable (Tabla 4). La reacción del organismo puede ser estimado por observación o por cuantificación, lo que facilita de manera significativa el trabajo (Layana, 2013).

Tabla 4. *Organismos indicadores de la calidad del agua, con base en la tabla de Chapman (1994).*

Organismo	Ventajas
<p>Bacterias</p> 	<p>Existe una metodología rutinaria y bien desarrollada; respuesta rápida a cambios incluyendo contaminación. Son indicadores de contaminación fecal. Tienen fácil muestreo. Al basarse en una reproducción celular, los medios de cultivo son de fácil adquisición y manejo</p>
<p>Protozoarios</p> 	<p>Valores Sapróbicos bien conocidos. Rápida respuesta a cambios. Fácil muestreo. Se requiere buena habilidad y conocimiento para identificar taxones, sin embargo, las claves taxonómicas son de muy fácil manejo debido a sus ilustraciones y su disponibilidad es muy fácil mediante la red.</p>
<p>Algas (fitoplancton)</p> 	<p>Tolerantes a la contaminación bien documentadas. Indicadores usados para la eutrofización e incremento de turbiedad. Buena disponibilidad de información para determinar la taxonomía. Puede ser usado para contaminación severa orgánica o fecal. No representa problemas de muestreo</p>
<p>Macro-invertebrados (Insectos, moluscos, anélidos, poliquetos, crustáceos, nematodos)</p> 	<p>Diversidad de formas y hábitats. Muchas sedentarias que pueden indicar efectos en el sitio de muestreo. Todas las comunidades responden al cambio. Especies de larga vida, pueden indicar efectos de contaminación en el tiempo.</p>
<p>Macrófitas</p> 	<p>Especies fijas a un sustrato, usualmente con facilidad de verse e identificarse. Buenos indicadores de material suspendido y enriquecimiento de nutrientes. Respuesta a la contaminación bien documentada.</p>
<p>Peces</p> 	<p>Métodos bien desarrollados. Efecto fisiológico inmediato obvio. Pueden indicar el efecto en la cadena alimentaria. Fácil identificación.</p>

Un indicador, es un organismo selecto debido a su grado de sensibilidad y tolerancia a diversos tipos de contaminación. Por ello y para que pueda ser utilizado como un indicador, debe satisfacer algunos requerimientos tales como: presencia por un largo periodo de tiempo, una amplia distribución, poder analizarse de acuerdo a los métodos analíticos más actuales e identificarse y colectarse fácilmente (Boltovskoy, 1967; Layana, 2013).

Los ecosistemas son complejos, multivariados y simultáneamente expuestos a una gran variedad de estresores con efectos acumulativos, lo que hace difíciles reproducir pruebas de laboratorio, por lo que un indicador biológico correcto muestra las características de un medio; midiendo o cuantificando características del hábitat y el grado y respuesta a la exposición de manera eficiente y puntual (Salusso *et al.*, 2002).

### 2.3.1. Fitoplancton como bioindicador

Round (1981), dice que el plancton es una comunidad de organismos vegetales fotosintéticos (fitoplancton) acuáticos, representados principalmente por micro algas, las cuales, forman parte de varios grupos (algas verdes, rojas, diatomeas, fito-flagelados, cianobacterias). Como característica principal su capacidad fotosintética, estos viven dispersos en el agua con escaso o nulo poder de locomoción, presentan una gran diversidad morfológica, citológica, molecular y reproductiva, además de ser parte de la productividad primaria formando la base de la cadena alimenticia de los ecosistemas acuáticos. Según Berger (1989) este grupo puede producir hasta  $2.7 \times 10^{10}$  toneladas de carbono al año como materia orgánica, consumiente cantidades importantes de  $\text{CO}_2$ .

Dichos organismos fitoplanctónicos pueden ser usados en programas de monitoreo de ecosistemas acuáticos, es decir pueden encajar dentro de alguna categoría de indicador dentro de las siguientes: indicadores estructurales, indicadores auto-ecológicos, indicadores de la comunidad, indicadores funcionales e indicadores no taxonómicos (Peña *et al.*, 2005).

El fitoplancton se ha usado ampliamente como indicador del estado trófico de las masas de agua y existe abundante bibliografía que incluye métodos de muestreo y análisis, por lo que se puede establecer que el fitoplancton es adecuado para la detección y seguimiento de las presiones fisicoquímicas relacionadas con: contaminación térmica, cambios en la mineralización del agua, eutrofización y contaminación orgánica (De la Lanza *et al.*, 2000).

El fitoplancton es indicador de las presiones hidromorfológicas que determinan cambios en la tasa de renovación de lagos y embalses para lograr esto se requiere identificar su composición y abundancia relativa. No obstante el nivel de identificación taxonómica no está definido y este es un aspecto a determinar *a priori*, para el análisis del fitoplancton se recomienda los siguientes aspectos a determinar: identificación taxonómica, recuentos, cálculo de bio-volumen y para algunos casos análisis de clorofila (García, 2010).

El modo de identificar las asociaciones de especies consiste en obtener inventarios (especies y/o géneros) de los tipo de lago o embales y analizar los patrones de variación de la composición de las especies por medio de técnicas estadísticas (Análisis de Componentes Principales), posteriormente podrán elaborarse índices de comunidades para cada tipo de lago o embalse (índice de saprobiedad).

Para iniciar esta línea de trabajo se requiere un buen número de inventarios y recopilar información sobre la relación de las especies o asociaciones y la calidad del agua (Margalef, 1983).

El análisis de fitoplancton se enmarca dentro de una serie de interacciones entre los parámetros mencionados y las características fisiológicas de los organismos, por lo que es necesario el estudio obligado de los factores que interaccionan y que regulan el crecimiento y la sucesión en particular: la luz y la temperatura, los mecanismos que permiten a los organismos mantenerse dentro de la zona fótica ante alteraciones de las tasas de sedimentación, los nutrientes inorgánicos, los micronutrientes orgánicos y las interacciones entre compuestos orgánicos y nutrimentos inorgánicos disponibles (De la Lanza *et al.*, 2000).

Cada una de algas que componen las asociaciones fitoplanctónicas posee un intervalo de tolerancia entre los valores extremos de estos factores produciéndose un crecimiento máximo al presentarse la combinación óptima de los que factores interaccionan. Al presentar ciclos vitales cortos, el fitoplancton refleja las fluctuaciones ambientales ya que responde rápidamente a los cambios en las masas de agua por procesos naturales o interferencias humanas, además de cambiar la estructura de sus comunidades repercuten en el interés hidrológico en su papel destacado como productores primarios (Vicente *et al.*, 2005; Ortega *et al.*, 2011).

### 2.3.2. Muestreo de fitoplancton

Los muestreos deben realizarse lo más cerca posible o en los mismos puntos de donde se muestran los análisis físicos y químicos para asegurar al máximo la interpretación de resultados, se debe establecer un número representativo de muestreos. La frecuencia de este es determinada por los objetivos y alcances del estudio, así también por las fluctuaciones estacionales, condiciones meteorológicas y recursos económicos y humanos (Vicente *et al.*, 2005).

### Colecta de muestras cuantitativas

#### a) Muestras de superficie.

Son tomadas directamente con una botella de 150 ml, de preferencia de color ámbar a 20 o 30 cm de profundidad para evitar conglomerados.

#### b) Muestras estratificadas a diferentes profundidades.

Se emplea una botella hidrográfica (Van Dorn) de volumen conocido. Pueden integrarse varias muestras siempre y cuando tengan el mismo volumen.

#### c) Muestras concentradas.

Se realiza mediante el filtrado de un volumen de agua a través de la red de plancton (Branco, 1978), la cantidad de agua filtrada dependerá del estado trófico del ecosistema: oligotrófico (30 a 40 L) y meso a eutrófico (10 a 20 L).

Este método se utiliza también para métodos cualitativos y se puede estandarizar el método, de modo que los resultados sean semi-cuantitativos (porcentaje de abundancia).

Se realiza mediante arrastres en distancias horizontales o profundidades preestablecidas.

### Colecta de muestras cualitativas para estudios taxonómicos

Para este caso es importante fijar varias estaciones debido a que el muestreo es exhaustivo ya que trata de abarcar la mayor extensión posible del lago, en orillas y zonas abiertas.

- Por arrastre horizontal y vertical con el empleo de una red de plancton, realizado desde una embarcación hasta conseguir un filtrado eficiente.
- Filtrado de volúmenes conocidos a través de la red de plancton.

(Vicente *et al.*, 2005; Ortega *et al.*, 2011)

#### 2.3.3. Técnicas para el análisis de fitoplancton

##### a) Cualitativo

Se realiza una identificación de los taxos presentes en la muestra sin importar su cantidad. Se pueden hacer observaciones al microscopio con lamina-laminilla y realizar tratamientos específicos para cada grupo. Es recomendable hacer revisiones completas de cada lamina con un mínimo de 3 a 5 repeticiones por muestra (el número de repeticiones dependerá de la densidad de la muestra).

**b) Cuantitativo**

La cuantificación del fitoplancton es realizada estadísticamente ya que no es posible contar todos los individuos que se encuentran en la muestra.

Se recomienda realizar una visualización de la muestra antes de iniciar el recuento con la finalidad de confeccionar una lista de los taxas presentes en la muestra y tener una idea de la densidad de organismos.

**c) Semi-cuantitativo**

Se aplica cuando no se necesita conocer el número exacto de organismos. Se realiza una identificación de la especie y se puede utilizar escalas de abundancia relativa en porcentaje, frecuencia relativa (muy abundante, frecuente, escaso) o porcentual con base en un conteo aleatorio o estimado en el campo visual de por lo menos de 3 a 5 láminas.

(Vicente *et al.*, 2005)

Existen varios métodos para el recuento de organismos, entre ellos:

- Método de Utermöhl (1948), donde la muestra se pone a sedimentar en cubetas cilíndricas de diversos volúmenes dependiendo de la densidad de fitoplancton (2, 5, 10, 25 o 50 ml), este método se realiza mediante la observación directa en un microscopio invertido (Lara *et al.*, 1996).
- Método de Lackey (conteo entre laminilla y laminilla), la capacidad es de 120 ml de muestra. Este método ayuda a contar nano plancton (algas muy pequeñas) empleando aceite de inmersión para su visualización 100 x.
- Método de Palmer, empleando la lámina o placa de Palmer, con capacidad para 0.1 ml de muestra (Branco, 1978) el conteo se realiza empleando el objetivo 40 x.
- Método de Sedgwick Rafter, donde se emplea la placa o cámara del mismo nombre, cuyas dimensiones son 5 cm de largo, por 2 cm de ancho y 1 mm de altura con capacidad para 1ml de muestra.

**2.4. Sistema del Saprobio**

En los ecosistemas acuáticos continentales particularmente lagos de agua dulce presentan cambios lentos a través del tiempo esto debido a la interacción entre el ecosistema acuático y el terrestre fenómeno que al intensificarse por la acción del hombre se le conoce como eutrofización (Margalef, 1983).

Este proceso corresponde a un enriquecimiento de las aguas con nutrimentos a un ritmo acelerado y el cual no puede ser compensado sea por eliminación o mineralización (Guzmán, 1976). El índice de saprobiedad, es de carácter semi-cuantitativo ya que se toma en cuenta la abundancia o frecuencia de especies y su condición como especie bioindicadora (García, 2010).

Kolwitz y Marsson establecieron este sistema entre 1902 y 1935, que posteriormente fue revisado y ampliado por Liebmann en 1950. De acuerdo a Margalef (1983), el sistema del Saprobio se basa en la adaptación de organismos, a las distintas fases de descomposición de la materia orgánica; con ello, ordena los ambientes en una sucesión lineal desde una situación inicial con un exceso de materia orgánica oxidable y presencia exclusiva de heterótrofos, seguida de la etapa de los autótrofos, que aceleran la oxidación hasta la recuperación total, dando un estado de la calidad del agua con respecto al contenido de material orgánico putrescible que se refleja en la composición específica de la comunidad, es la expresión biológica de la DBO<sub>5</sub>. Una comunidad indica el nivel Saprobio según su composición y densidad (García, 2010).

Los organismos tienen diferentes respuestas frente al deterioro prolongado del ambiente a causa de la introducción de materia orgánica. Pueden adaptarse, sobrevivir, tratar de escapar, formar estados de resistencia o morir (Margalef, 1983). De acuerdo a Kolkwitz & Marsson (1902), los organismos acuáticos pueden clasificarse según su respuesta en:

- Saprófobos no tolerantes, son eliminados de la zona contaminada con materia orgánica.
- Sapróxenos tolerantes, se benefician por el aumento de la cantidad de alimento y la reducción de la competencia que produce un incremento en la densidad de estas poblaciones; si el grado de enriquecimiento en materia orgánica sigue aumentando se reduce su número y pueden ser eliminadas.
- Saprófilos tolerantes, invaden el ambiente modificado y reemplazan a las especies comunes en el limnótomo; si el ambiente sigue recibiendo una elevada carga orgánica estas especies también pueden ser eliminadas.
- Sapróbiontes, resisten aguas muy polutas.

Debido a estas distintas respuestas los organismos pueden ser de gran valor como indicadores de contaminación orgánica y como respuesta a ésta se puede producir:

- Aparición o desaparición de especies (tolerantes, facultativas, no tolerantes) dentro cada comunidad (plancton, bentos, etc).

- Reducción en el número de especies de la comunidad (reducción de la diversidad). Cambios de la densidad de las especies que provocan cambios en su abundancia relativa en la comunidad.

(Pinilla, 1998)

A pesar de lo expuesto es aplicado en líneas generales a nivel mundial para los ambientes lénticos que reciben contaminación orgánica. Los niveles de saprobiedad están relacionados con el régimen de oxígeno y la cantidad de descomponedores.

Los niveles de saprobiedad se pueden definir de la siguiente manera:

1.-Polisapróbico (p), el oxígeno se agota, el ambiente es reductor, DQO: 50-150 mg L<sup>-1</sup>, elevada concentración de materia orgánica putrescible. 1-10 millones de bacterias/ml, presencia de CO<sub>2</sub> y SH<sub>2</sub> (Fangos negros y predominan los procesos de reducción).

Especies indicadoras:

I- Bacterias:

- *Bacillus subtilis*, *B. Mesentericus*, *Proteus spp.*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas*:  
*Beggiatoa alba*, *Sphaerotilus natans*, etc.

II- Flagelados incoloros:

- *Bodo caudatus*, *Pleuromonas jaculans*, etc.

III- Ciliados:

- *Colpoda cucullus* y *Vorticella microstoma*.

2.- Mesosapróbico, predominan los procesos oxidativos y este nivel se divide en dos  $\alpha$  y  $\beta$ , la mineralización se acelera y hay gran desarrollo de organismos foto-sintetizadores. Durante el día se produce gran cantidad de oxígeno y un déficit nocturno. Presenta DQO: 20-50 mg L<sup>-1</sup> y 100,000 a 1, 000,000 de bacterias/ml (Fangos verdes).

$\alpha$ -especie indicadora:

- Bacterias: *Sphaerotilus dichotomus*.
- Algas: *Oscillatoria tenuis*, *Euglena próxima*, *Nitzschia palea*, *Navicula cryptocephala*.

β- Especies indicadoras:

- Algas: *Merismopedia punctata*, *Scenedesmus spp.*, *Pediastrum spp.*, *Achnanthes sp.*

3.- Oligosapróbico (o), oxidación completa, gran concentración de oxígeno, incluso durante la noche. DQO: 10-20 mg L<sup>-1</sup>, prácticamente ha terminado la mineralización de la materia orgánica. Agua enriquecida con nitratos y fosfatos. Menos de 10.000 *bacterias/ml*.

Especies indicadoras:

- Algas: *Chamaesiphon spp*, *Mallomonas spp.*, *Dinobryon spp.* *Sphaerocystis schroeteri*.
- Protozoos: *Euglypha acanthophora*.

4.-Xeosapróbico (x), no cataróbico (agua absolutamente pura) y un nivel coprozoico (ausencia total de oxígeno y presencia de bacterias anaerobias).

(Elster *et al.*, 1964; García, 2010).

En el sistema del Saprobio cada especie utilizada tendrá un valor (1 a 10) en los distintos niveles (xeno, oligo, α-β meso y polisapróbico) de acuerdo a su presencia en ellos (Tabla 5). También se presenta un peso indicativo (G) con valores de uno a cinco, esto de acuerdo a la utilidad como bioindicador (muy bueno: cinco, medio: tres, malo: uno) y un valor Saprobio para la especie (S). Se calcula el índice sapróbico (IS) para cada sitio muestreado utilizando, G – que se encuentra en la tabla y la abundancia (h) de cada especie registrada en la muestra (Seoáñez, 2003).

Ecuación 1. Índice de saprobiedad

$$(IS) = \frac{\sum S.h.G}{\sum h.G}$$

Donde:

- **Is** –Índice de saprobiedad
- **h**-Abundancia de cada especie
- **S**-Valor Saprobio
- **G**-Peso indicativo

Tabla 5. Valor ISPB.

IS=	0-4
x	0
o	1
β	2
α	3
p	4

## 2.5. Estimación de la diversidad con el índice de Shannon y Weiver ( $H'$ )

Los índices de diversidad incorporan en un solo valor a la riqueza específica y a la equitabilidad y en algunos casos un valor dado de un índice de diversidad puede provenir de distintas combinaciones de riqueza específica y equitabilidad.

Es decir, que el mismo índice de diversidad puede obtenerse de una comunidad con baja riqueza y alta equitabilidad y viceversa. Esto significa que el valor del índice aislado no permite conocer la importancia relativa de sus componentes (riqueza y equitabilidad) (Roldan, 1992).

El índice de Shannon-Weaver  $H'$  (1949), se basa en la teoría de la información: mide el contenido de información por símbolo de un mensaje compuesto por  $S$  clases de símbolos discretos cuyas probabilidades de ocurrencia son:  $(p_1...p_s)$  y es probablemente el más frecuente en ecología de comunidades.

También puede considerarse a la diversidad como la medida de la incertidumbre para predecir a que especie pertenecerá un individuo que es elegido al azar de una muestra de  $S$  especies y  $N$  individuos. Por lo tanto  $H'=0$  cuando la muestra contenga una sola especie y  $H'$  será máxima cuando todas las especies  $S$  estén representadas por el mismo número de individuos  $n_i$  esto ocurre cuando la distribución de abundancias es perfectamente equitativa ( $H'$ max). En la ecuación original se utilizan logaritmos en base 2 y sus unidades son *bits/ind*, pero pueden emplearse otras bases como *nits/ind* o *10 decits/ind* (Layana, 2013).

Ecuación 2.

$SDH'$ =desviación estándar del índice Shannon- Weaver

$$SDH' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s \log_2 ni - (\sum_{i=1}^s ni \log_2 ni)^2}{n^2}}$$

La ecuación  $H'$  se aplica para comunidades extensas donde se conocen todas las especies  $S$  y las abundancias proporcionales  $p_i$  de todas ellas. En la práctica se calcula mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 3.

Diversidad de especies

$$H' = \sum_{i=1}^s \left[ \left( \frac{ni}{n} \right) \times \log_2 \left( \frac{ni}{n} \right) \right]$$

Ecuación 4.

Diversidad de especies

$$H' = \sum_{i=1}^s Pi \log_2 Pi$$

Donde:

- **S** – número de especie (la riqueza de especie)
- **Pi**- proporción de individuos de la especie *i* respecto al total de individuos (abundancia relativa de la especie *i*):  $ni/N$
- **ni** – número de individuos de la especie *i*
- **N** – número de todos los individuos de todas las especies

La ventaja de un índice de este tipo es que no es necesario identificar las especies presentes; basta con poder distinguir unas de otras para realizar el recuento de individuos de cada una de ellas y el recuento total. De esta manera, el índice contempla la cantidad de especies presentes en el área de estudio (riqueza de especies), y la cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies: abundancia (Layana, 2013).

### 3. ANTECEDENTES

La Laguna Zumpango de Ocampo, formó parte de un sistema lacustre integrado por cinco grandes lagos: Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco (Figura 5), su formación obedece a la era Cenozoica superior calculado en 1.8 millones años, inicialmente era una cuenca exorreica con salida hacia el pacífico pero debido a procesos geológicos volcánicos se convierte en una cuenca endorreica. Está durante época de lluvias era capaz de formaba un solo lago con más de 2,000 Km<sup>2</sup>, desde entonces hasta ahora la cuenca ha tenido grandes cambios hasta el punto de la desecación, resultado del constante crecimiento en la población y con ello la urbanización del Valle de México (IMTA, 2012).



*Figura 5.* Recreación de los lagos: Chalco, Xochimilco, Texcoco, San Cristóbal, Xaltocan y Zumpango. Estos rodeaban a la gran Tenochtitlán en 1519, tomado de la revista Construcción Mexicana (1976).

En 1450 se ordena construir un dique de unos 22 km desde el Cerro de la Estrella en Iztapalapa hasta el pie de la Sierra de Guadalupe, esto con el fin de evitar que las aguas saladas se mezclaran con las aguas dulces. En 1553, con la llegada y fundación de la Nueva España, se cambia la estructura: modificando los diques y estableciendo calzadas que vuelven a propiciar las inundaciones (CONAGUA, 2014).

En 1607, el Virrey Luis de Velasco ordena la construcción de un canal en Huehuetoca con el fin de drenar la laguna de Zumpango para prevenir inundaciones. Entre 1607 y 1798 se realizó el tajo de Nochistongo (canal de desagüe), el cual aún inconcluso para 1629 no pudo reducir una de las más grandes inundaciones del valle de México.

Para 1900 se inaugura el gran canal de desagüe pasando por la parte sureste de la laguna de Zumpango el cual permitía la salida de las aguas de manera natural con una pendiente de 19 cm por cada kilómetro. En 1975 se inaugura el túnel emisor central con una longitud de 50 Km (IMTA, 2012).

En 1976, se da inicio al proyecto de los Insurgentes el cual consistía en transferir el agua residual a la zona noreste utilizando la laguna como centro receptor y estacionario. En 1978, derivado de las obras hidráulicas la laguna es desecada, para el año de 1982 se elevó la altura del borde de la laguna en un promedio de 7.5 metros a lo largo de su periferia aumentando su superficie y volumen originales (borde que se mantiene en la actualidad). En el año 1987, la laguna es llenada con una mezcla de agua de lluvia y aguas residuales (Domínguez, 2006).

Para 1989 se continúa con la elevación de los bordos concluyendo en 1991, mientras la introducción de agua residual trajo consecuencias provocando la proliferación del lirio acuático, por lo que en 1997 fue desecada nuevamente (Domínguez, 2006).

Durante 2010, se registró la mortandad de miles de carpas pequeñas a las orillas de la laguna, efecto que tuvo una duración por más de un mes, por lo que las autoridades del Ayuntamiento de Zumpango ordenan un análisis, realizado por el Comité de Sanidad Acuícola del Estado de México A.C., quienes reportaron niveles cero en oxígeno disuelto factor al que se atribuyó la muerte de los peces (Figura 6).

Para 2013, dos fisuras en la laguna provocan la pérdida de 12 millones de metros cúbicos en 20 días (Figura 7); una del lado de Teoloyucan; de 70 m de largo y 70 cm de ancho, y otra por la zona de embarcaderos de San Pedro de la Laguna, en Zumpango; de 3 m de largo por 30 cm de ancho, con lo que se perdió el 70% del volumen de la laguna; el ecologista (Bolaños Hernández) mencionó: “que el agua se ha ido por las fisuras con peces y basura, lo que contamina el subsuelo y probablemente los mantos freáticos de la zona” (CONAGUA, 2013).

La laguna de Zumpango funciona como receptor y centro estacionario de las aguas que inundaban la Ciudad de México, así que durante mucho tiempo funciona como un vaso regulador y de almacenamiento en los excedentes provenientes del río Cuautitlán y del emisor poniente mediante el canal de Santo Tomas (CONAGUA, 2014).



*Figura 6.* Miles de carpas muertas se observan a las orillas de la laguna debido a la falta de oxígeno en el agua por la contaminación. (Foto: Juan Manuel Barrera / EL UNIVERSAL, 2010).



*Figura 7.* Perdida del 70% del volumen del agua en la laguna durante el año 2013.  
Imagen tomada de:  
[http://www.zumpango.net/wpcontent/uploads/2013/06/8713\\_54858918\\_995537910\\_n.jpg](http://www.zumpango.net/wpcontent/uploads/2013/06/8713_54858918_995537910_n.jpg).

Los trabajos y publicaciones en la laguna son pocos; por lo que, muchos de los datos sobre el sistema no se encuentran actualizados y las investigaciones sobre la calidad del sistema de las aguas es necesaria.

Los trabajos realizados en la laguna de Zumpango son los siguientes:

(1998) Tesis: Determinación de metales pesados en tejidos de carpa (*Cyprinus carpio*) de la laguna de Zumpango, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM.

(2006) Tesis: Estudio de la diversidad de zooplancton y fitoplancton de la laguna de Zumpango Estado de México, para su uso en la Biomanipulación, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM.

(2012) Tesis: Evaluación Vegetativa de la Zona Ecológica Zumpango de Ocampo, Estado de México. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

(2012) Análisis Óptico Hiperespectral del Lago de Zumpango, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.

(2012) Plan Estratégico para la Recuperación Ambiental de la Laguna de Zumpango. Diagnostico e Identificación de Retos, Problemas, Estrategias, objetivos, Acciones y Proyectos Prioritarios. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Fundación Gonzalo Rio Arronte.

#### 4. MARCO METODOLÓGICO

Se realizó un muestreo mensual durante ocho meses en el año 2015 con un total de cinco estaciones de muestreo tomadas en superficie y fondo (Figura 8). Determinados por las actividades del lugar, así como entradas y salidas de corriente, los parámetros que no puedan ser determinados *in-situ* se realizan en laboratorio para lo cual se debe obtener muestras y dar el tratamiento requerido.

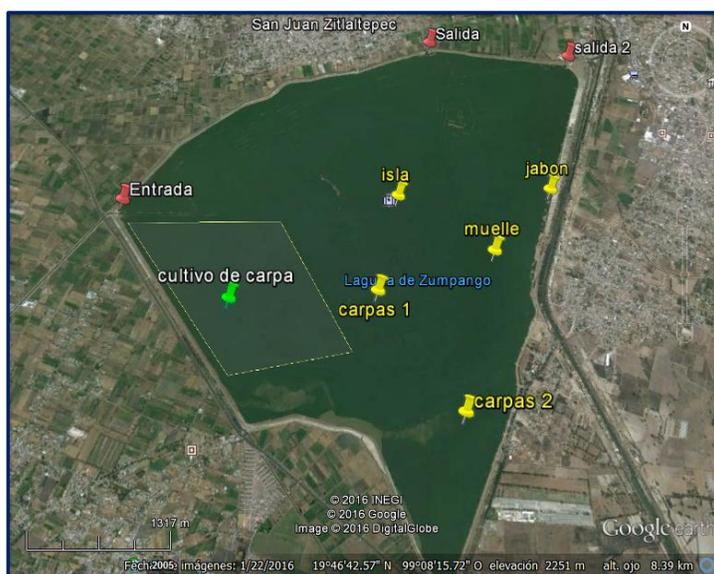


Figura 8. Laguna de Zumpango, puntos de muestreo, entrada y salida de agua, tomado de Google Earth.

Puntos de monitoreo en la laguna de Zumpango de Ocampo, figura 9 a 14:



*Figura 9.* Sitio de muestreo número uno: El Embarcadero. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.



*Figura 10.* Sitio de muestreo número dos: La Isla. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.



*Figura 11.* Sitio de muestreo número tres: Carpas I. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.



*Figura 12.* Sitio de muestreo número cuatro: Carpas II, con algunos indicios de lirio acuático. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.



*Figura 13.* Sitio de muestreo número cinco: El Jabón. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.



*Figura 14.* Efluente principal de la laguna de Zumpango, controlada por CONAGUA. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.

En la tabla 6, se muestra los parámetros fisicoquímicos evaluados y los procedimientos utilizados en campo (mediciones que se pueden obtener *in situ*) y la tabla 7; muestra los parámetros y técnicas utilizadas, los cuales se realizaron en laboratorio y que complementan la evaluación fisicoquímica de calidad del agua.

Tabla 6. *Técnicas utilizadas en campo.*

Parámetro	Método	Descripción
Toma de muestras	Botella Van Dorn	Capacidad 2.2 L
Transparencia	Disco de Secchi	(Rodier, 1990)
Profundidad	Disco de Secchi	(Rodier, 1990)
Temperatura	Termómetro	(APHA, 1995)
Oxígeno disuelto	Oxímetro	Instruments Hanna Hi-9146 (APHA, 1995)
pH	Multiparámetro	Instruments Hanna Hi-83209 (APHA, 1995)
Conductividad eléctrica	Multiparámetro	Instruments Hanna Hi-83209 (APHA, 1995)

Tabla 7. *Técnicas utilizadas en laboratorio.*

Parámetro	Técnica
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Prueba de la DBO <sub>5</sub> (APHA, 1995)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado, método colorimétrico (APHA, 1995)
Nitrógeno amoniacal(NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> )	Método de la sal de fenol (APHA, 1995) Instruments Hanna Hi-83200
Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Método del ácido-sulfanílico (MTBPAAA, 1984 ) Instruments Hanna Hi-83200
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Método del ácido fenol-disulfónico Instruments Hanna Hi-83200
Orto-fosfatos	Método del fosfo-molibdato (MTBPAAA, 1984) Instruments Hanna Hi-83200
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Método volumétrico (APHA,1995)
Determinación de géneros fitoplanctónicos	Microscopio Invertido Olympus Lx70

### Determinación de géneros fitoplanctónicos

La identificación y el recuento de los grupos fitoplanctónicos se llevo a cabo con un microscopio invertido (Olimpus Lx 70; mediante el objetivo 40x), utilizando el método de acuerdo a la norma: CENTC230/WG2/TG3/N83 (documento de 11-05-2004); que a su vez, está basado en la técnica descrita por Utermöhl (1958). Se utiliza una cámara o cubeta de sedimentación: que consiste en una columna vertical de volumen variable que permite un mejor análisis, se utilizan guías de identificación, con las claves y descripciones existentes en las obras de Prescott, (1962); Ortega (1984; 1995); (Moreno *et al.*, 1996).

El conteo de fitoplancton con el método de Utermöhl (1958) consiste en poner a sedimentar la muestra en cubetas cilíndricas de diversos volúmenes, dependiendo de la densidad de fitoplancton (2, 5 10, 25 o 50 ml), este método se realiza mediante la observación directa en un microscopio invertido, el conteo es bajo un criterio flexible en función de la densidad de organismos, el tamaño de las células y sus formas de crecimiento. Se recomienda contar células completas y únicamente aquellas que se encuentran completamente dentro del campo visual (Lara *et al.*, 1996; Varona, 2006).

La cubeta de sedimentación se ajusta a una distribución descrita por Poisson; dada la escasa probabilidad del evento de encontrar un organismo  $x$  sobre un área que se considera grande. Como en este tipo de distribución la media y la varianza son iguales, el error normal de la media teórica es  $E_x = s/\sqrt{n}$ ; en consecuencia, si en una muestra se cuentan 100 individuos, el error es del 10%, y para 400 es del 5% (Lara *et al.*, 1996).

### Trabajo de gabinete

- Recopilación bibliográfica.
- Cálculo de la diversidad ( $H'$ ) utilizando el índice de Shannon-Weiver (utilizado en Ecología para medir la biodiversidad específica).
- Determinación del índice de saprobiedad, propuesto por Kolwitz y Marsson (1955).

### Análisis estadístico

Los datos cuantitativos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico mediante el programa Statgraphics Centurión XVI.II, dentro del cual se aplica una Prueba no Paramétrica Univariada de Comparación de Varias Muestras, prueba de Kruskall-Wallis y Análisis Multivariado mediante Correlación de Pearson, Análisis de Componentes Principales y Análisis de Conglomerados (Cervantes, 1984; Cervantes *et al.*, 2006).

En la figura 15, se muestra el diagrama de trabajo utilizado, en forma resumida; en él se incluyen las tres fases de la metodología (trabajo de campo, trabajo de laboratorio y el trabajo de gabinete) y las actividades que se realizaron en cada una de ellas.

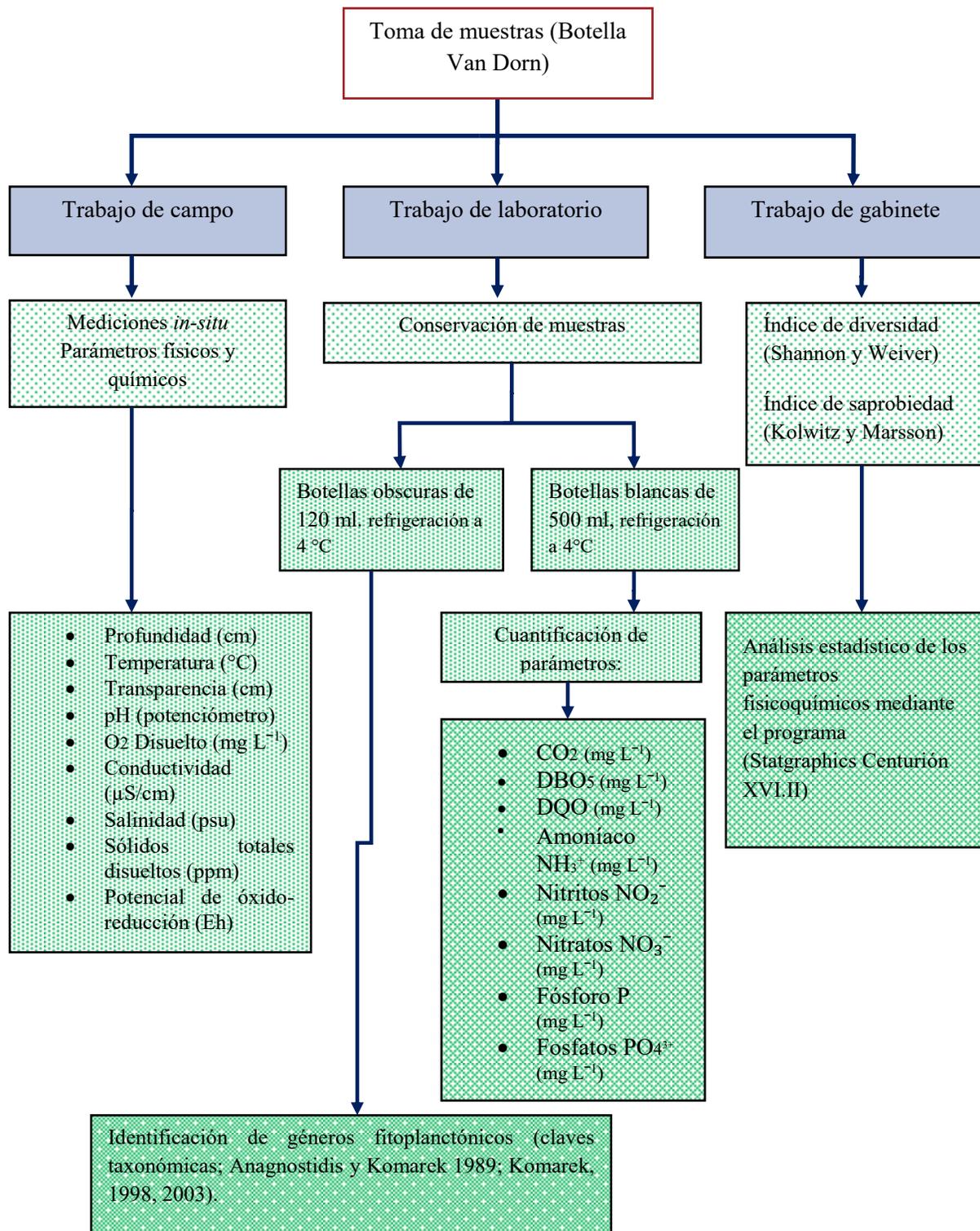


Figura 15. Diagrama de trabajo: campo, laboratorio y gabinete

## 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La laguna de Zumpango tiene problemas de contaminación, causados inicialmente por los trabajos de desagüe de la Ciudad de México, iniciados en 1976 y por los cuales se incorporó a la laguna un canal de aguas residuales (Santo Tomas), estas descargas aportaron materia orgánica, residuos sólidos y compuestos industriales, marcando el inicio de la contaminación de la laguna (CONAGUA, 2012).

A partir de ello, la contaminación se ha incrementado debido a las poblaciones cercanas a la laguna que incorporan sus desechos orgánicos e inorgánicos, dañando con compuestos químicos y cambiando la estética del sistema mediante los desechos sólidos, mientras que la materia orgánica ha creado un exceso de nutrimentos (nitrógeno y fósforo); propiciado un incremento en la productividad primaria, la cual afecta las propiedades fisicoquímicas del agua (Figura 16), la materia orgánica es un problema debido a la cantidad, ya que esta supera la capacidad de degradación propia de la laguna, lo que afecta directamente las propiedades fisicoquímicas interfiriendo así en los ciclos biogeoquímicos. Sin embargo, el que la contaminación de la laguna se encuentre relacionada en mayor grado con la materia orgánica, nos ayudará a determinar la calidad del agua mediante organismos biológicos con un mayor grado de aproximación, debido a que se pueden utilizar diferentes métodos con eficiencia; presencia o ausencia de especies sensitivas, poblaciones como marco de referencia u organismos tolerantes (De la Lanza *et al.*, 2000).

Los problemas ambientales también incluyen los efectos sobre las especies poniendo en riesgo la existencia de organismos acuáticos y de aves migratorias. En el aspecto económico la laguna es una fuente importante de ingresos, debido al turismo pero a consecuencia de sus malas condiciones físicas perceptibles a perdido importancia (Figura 17). El cultivo de carpa también presenta problemas, ya que existe preocupación por parte de los productores y consumidores; a causa de la falta de información sobre la calidad del agua en la cual son cultivadas las carpas, por lo cual su consumo puede representar un riesgo para la salud.

El agua aún sigue siendo utilizada para irrigar campos de cultivo en la periferia además de ser una fuente en la recarga en los mantos freáticos de los cuales dependen el municipio de Zumpango para abastecer de agua potable a la población. La calidad del agua no ha sido evaluada por lo que es un problema, ya que desconocer las características físicas y químicas no permite establecer usos adecuados de acuerdo a su calidad, principalmente para evitar posibles riesgos; de salud y daños ecológicos.



*Figura 16.* Sitio de muestreo uno: Embarcadero y su incremento en la productividad primaria, crecimiento de fitoplancton en la superficie de la laguna. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.



*Figura 17.* Sitio de muestreo número dos; ubicado en el centro de la laguna el cual ha perdido importancia turística debido a las malas condiciones del agua de la laguna; aquí se observa la abundancia de fitoplancton en color verde, característico de sistemas con exceso de nutrimentos. Laboratorio de Contaminación Acuática FES Zaragoza, UNAM.

## 6. JUSTIFICACIÓN

La laguna Zumpango de Ocampo es un ecosistema de riqueza biológica e importancia histórica ya que cuenta con una de las últimas lagunas que pertenecieron al gran Lago de la Cuenca del Valle de México. Ahora tiene problemas importantes de contaminación, que llevan a la laguna a un proceso acelerado de eutrofización. Los estudios realizados en la laguna de Zumpango para conocer la calidad del cuerpo acuático son pocos y sobre los organismos que sustentan su productividad primaria aún no existe registro; es decir, no se tiene información actualizada que respalde que actividades antropogénicas como el riego y la acuacultura se puedan realizar sin riesgo para la salud.

Para identificar los problemas de contaminación es necesario realizar estudios sobre los organismos (productividad primaria) que se desarrollan en dicho lugar y las condiciones que prevalecen sobre éste, no limitando el estudio sólo a la parte fisicoquímica sino a las interacciones que esto conlleva con la composición biológica.

El índice de saprobiedad planteado por Pantle y Buck (1955) establece una evaluación en la calidad del agua basados en la productividad primaria, debido a que representa un papel fundamental en la cadena trófica. El componente biológico es un reflejo directo de las condiciones adversas o favorables que otorga la composición o estado de las aguas al desarrollo de las especies, dichos organismos presenta susceptibilidad a las condiciones del lugar, por lo que pueden ser considerados como bioindicadores adecuados (Layana, 2013). Razón, por lo que es importante que el estudio utilice características biológicas; ya que pocas veces es utilizado como elemento determinante de las condiciones: debido a la falta de información. Sin embargo, un uso y manejo correcto simplifica mucho la metodología y el trabajo, por lo que puede ser utilizado con mayor eficiencia y practicidad.

Por otra parte, este estudio contribuye a describir el estado y calidad de la laguna; el cual da sustento a las actividades que se realizan en el lugar. Además de sumar información sobre los sistemas acuáticos de México y promover el uso de métodos mediante componentes biológicos, para futuros planes de manejo sostenible.

## 7. HIPÓTESIS

La calidad del agua de la laguna Zumpango de Ocampo ha sido afectada por la incorporación de aguas municipales (Canal Santo Tomas) con gran cantidad de materia orgánica e inorgánica, esta primera propicia la disponibilidad de los nutrientes principalmente: amoníaco, nitratos y fosfatos; estos nutrientes en conjunto con las variables de; batimetría (profundidad), físicas (temperatura y transparencia) y Químicas (pH) crean las condiciones ideales para el florecimiento fitoplanctónico. Por lo que, al establecer una evaluación de calidad del agua mediante el índice de saprobiedad se encontrara una clasificación *mesosaprobia*; lo que indica que la calidad del agua es contaminada.

Ya que en aguas contaminadas por materia orgánica se pueden identificar especies indicadoras (*Oscillatoria tenuis*, *Euglena próxima*, *Nitzschia palea*, *Navicula cryptocephala*, *Microcystis* y *Aphanizomenon*), al encontrar estos organismos podremos clasificar la laguna como *un sistema eutrófico*.

## 8. OBJETIVO

Evaluar la calidad del agua en la laguna Zumpango de Ocampo mediante la relación entre los componentes físicos, químicos y la parte biológica (fitoplancton), utilizando el índice de saprobiedad como escala de medición.

Objetivos particulares

- Evaluar los parámetros físicos y químicos determinantes en la calidad del agua, en superficie y fondo mediante un análisis estadístico Univariado y Multivariado a fin de conocer el comportamiento del sistema.
- Evaluar el índice de saprobiedad mediante el método de Pantle y Buck (1955), utilizando el fitoplancton como organismo bioindicador.
- Determinar el índice Shannon y Weiver de manera complementaria al índice de saprobiedad, para la identificación de los géneros de fitoplancton así como la diversidad de especies.
- Comparar las variables físicas y químicas con las normas (NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127-SSA1-1994 y CE-CCA-001/89) que establecen los criterios limitantes (mínimos y máximos) de calidad del agua y protección al ambiente.

## 9. ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Zumpango se ubica en la parte noreste del Estado de México, entre las coordenadas 19°43'10" y 19°54'52" latitud norte y los 98°58'12" y 99°11'36" de longitud oeste (Figura 18). Forma parte de los 125 municipios del Estado de México y uno de los siete municipios que integran la región Zumpango, limita al norte con Tequixquiac y Hueyoxtla, al oeste con Teoloyucan, al sur con Jaltenco, Nextlalpan y Tecámac, al este con Tizayuca, Estado de Hidalgo, Huehuetoca y Melchor Ocampo (Ramírez, 2012).

La laguna Zumpango de Ocampo se localiza al norte de la Cuenca del Valle de México en las coordenadas 19°47'25' latitud norte y 99°07'51' longitud oeste, tiene una altitud de 2,240 msnm. Se encuentra dividida políticamente entre dos municipios, Teoloyucan y Zumpango; de este último abarca el 5.67% del territorio municipal y el 9.51% del municipio de Teoloyucan en el Estado de México.

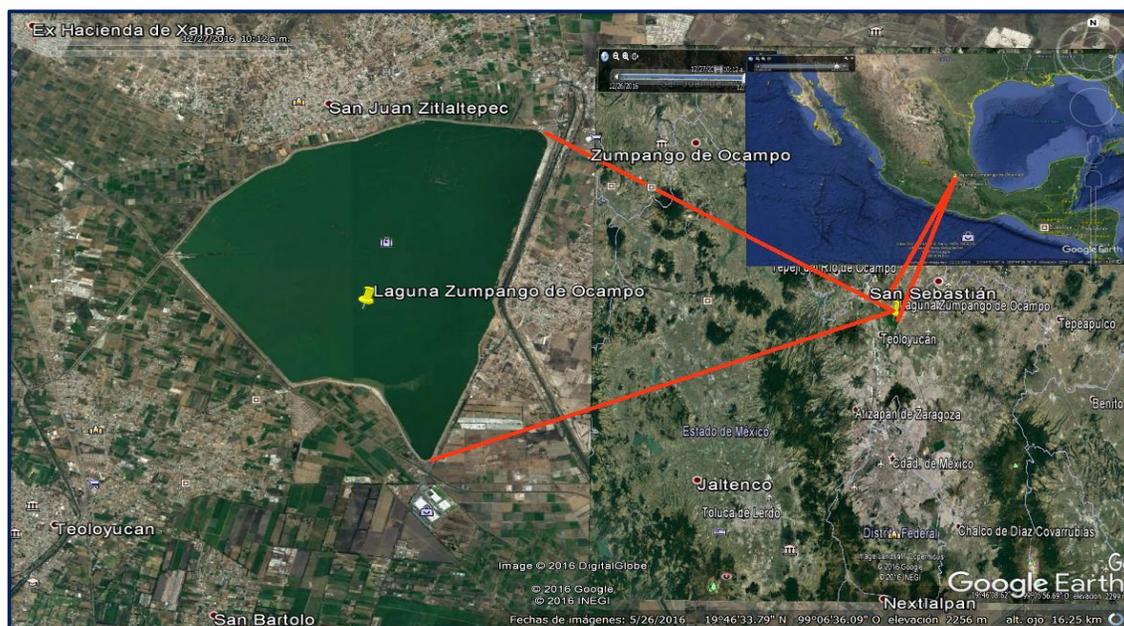


Figura 18. Localización de la laguna Zumpango de Ocampo, imagen tomada de Google Earth.

### Descripción del sitio

La laguna tiene una superficie de 1,865 hectáreas (ha), un perímetro aproximado de 18 Km y una capacidad máxima de almacenamiento de 100 millones de m<sup>3</sup>, topográficamente la laguna es caracterizada por llanuras al sur aunque el extremo norte-oriental es bastante montañoso con altitudes que varía entre 1,245 y 1,650 msnm (INEGI, 2009).

La laguna de Zumpango es alimentada por la escorrentía de las laderas de las montañas cercanas, tiene una extensión máxima de 24 km<sup>2</sup> y una profundidad de entre uno a tres metros, aunque ambos varían estacionalmente y anualmente en función de la precipitación. Dichas precipitaciones, mantienen promedios anuales totales de 700 mm, alcanzando su máximo en el mes de junio. El clima es frío de noviembre a marzo, con temperaturas de dos o tres grados centígrados, y cálida de abril a octubre con temperaturas de hasta 31.0 °C; la media anual es de 15.0 °C (INEGI, 2015).

La laguna funciona como un control y almacenamiento ya que más de 60 millones de m<sup>3</sup> de agua entran con regularidad, recientemente ha sido objeto de una operación de rescate permanente (MIA. Laguna de Zumpango, 2003). En enero de 2003, la laguna fue ascendida a "Agua Santuario" y con el fin de mantener este estado se realizan trabajos de limpieza de forma frecuente; los cuales consisten, principalmente rompiendo esteras de lirio acuático (*Eichhornia sp.*) una especie muy prolífica y abundante, con una temporada patrón de crecimiento (De la Lanza *et al.*, 2000).

Presenta dos tipos de clima: seco estepario y el templado sub-húmedo, la temperatura media anual oscila entre los 14 y 16 °C, la precipitación anual promedio en el rango de 600 a 800 mm anuales, las lluvias más abundantes se presentan de junio a septiembre. (Clasificación climática de Köppen modificada por E. García, 2004).

La estructura geológica del municipio está formada por dos tipos de roca y dos tipos de suelo: lacustres, son altamente inundables y fangosos se localizan principalmente en toda la margen de la laguna y no se consideran aptos para el desarrollo urbano. Los tipos de rocas que presenta: son areniscas rocas constituidas por granos de arenas unidos por un cementante que puede ser sílice, arcilla, carbonato de calcio, óxido de hierro y otros. Basalto, este tipo de roca presenta problemas a los asentamientos humanos, el uso de este tipo de roca es para fabricar cimientos y se presenta en capas masivas con permeabilidad media localizándose en toda la parte noreste del municipio (Informe Sobre Recursos Mundiales del Suelo, 2007).

En el Estado de México se localizan 13 grupos edáficos de los 38 establecidos en el mapa mundial de suelos de la FAO-UNESCO de 1988. En Zumpango, se presentan seis grupos de suelo siendo los de mayor cobertura los siguientes:

Feozem: Suelos de color oscuro debido a su horizonte superficial rico en materia orgánica, se constituye a partir de un amplio rango de material no consolidado, se asocia a regiones con un clima suficientemente húmedo para que exista lavado pero con una estación de seca, el relieve suele ser llano o levemente ondulado y la vegetación de matorral tipo estepa.

Leptosol: el material original puede ser cualquiera tanto rocas como material no consolidado con menos del 10% de tierra fina, aparecen en zonas altas o medias con una topografía escarpada y elevada pendiente. Se encuentran en todas las zonas climáticas y particularmente en las zonas erosionadas.

Cambisol: el término hace alusión al principio de diferenciación de horizontes que se manifiesta por los cambios de color la estructura o el lavado de carbonatos, se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial. Aparecen sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación.

Vertisol: los materiales originales de este tipo de suelo lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas, se encuentran en depresiones de áreas llanas o suavemente onduladas. El clima donde se presentan suele ser tropical, semiárido a sub-húmedo o mediterráneo con estaciones contrastadas en cuanto a humedad. La vegetación suele ser de sabana, o de praderas naturales o con vegetación leñosa (Informe Sobre Recursos Mundiales del Suelo, 2007).

El uso de suelo más común es de comunidades rurales, en su mayoría el uso de suelo es agrícola y pecuario, y en mucho menor grado, forestal y urbano. Mientras su tendencia general es la disminución de las zonas agrícolas y el incremento de las áreas urbanas. El uso de suelo destinado para la agricultura corresponde al 61.7% unos 445.81 km<sup>2</sup>, le sigue en importancia el suelo pecuario con 24.9% que representa 180.25 Km<sup>2</sup>, el forestal con el 7.7% es decir 55.58 Km<sup>2</sup>, el urbano con 5.3% que son 38.21 Km<sup>2</sup> y por último el área considerada con problemas de erosión el 0.4%, unos 2.8 Km<sup>2</sup> (Ramírez, 2012).

Debido a los tipos de clima, suelos y relieve existentes en los municipios que conforman Zumpango, el tipo de vegetación es el característico de zonas semiáridas como el matorral xerófilo, pastizal y pastizal halófilo. También existen, aunque de manera aislada, manchones de bosque de encino, así como especies introducidas utilizadas en la reforestación tales como casuarina, eucalipto, jacaranda, palmera y trueno (MIA. Laguna de Zumpango, 2003).

En el Estado de México están presentes dos zonas biogeográficas: Neo-tropical y Neártica. La primera abarca la depresión del río Balsas hacia el sur, mientras que la segunda las sierras montañosas y lomeríos de la porción centro y norte de la entidad. Por tanto, las especies de fauna silvestre de Zumpango son características de la zona Neártica. La fauna silvestre está representada por distintas especies de mamíferos, aves, reptiles, anfibios y peces. La mayoría de los mamíferos son de talla pequeña y mediana, entre los más frecuentes se pueden observar: ardilla, cacomiztle, conejos de distintas especies, coyote, gato montés, liebres de varias especies, rata canguro, ratones de campo de múltiples especies, tlacuache, tuza, zorrillo bandado entre otras (MIA. Laguna de Zumpango, 2003).

Respecto a los anfibios cabe resaltar el ajolote: *Ambystoma lacustris*, especie endémica de la laguna de Zumpango. Referente a las especies de peces, destaca la carpa común como producto de pesca local. De estas especies mencionadas anteriormente, algunas de ellas se encuentran enlistadas en las categorías de riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2013 por ejemplo: *Ardea herodias* (garza azulada o garza ceniza), *Accipiter cooperi* (el gavilán de cooper o azor de cooper), *Anas discors* (la cerceta aliazul, pato de media luna o pato de alas azules), *Circus cyaneus* (aguilucho pálido o gavilán rastrero), *Barisia imbricata* (lagarto alicante de las montañas), *Phrynosoma orbiculare* (lagartija mexicana) *Nerodia erythrogaster* (serpiente de agua), *Thamnophis eques* (culebra de agua nómada mexicana) y *Pituophis deppei* (culebra sorda mexicana), especies de las que no se tiene registro actualizado (MIA. Laguna de Zumpango, 2003; Domínguez, 2006).

Se realizan tres actividades económicas importantes gracias a la laguna:

- Es la encargada de suministrar el agua utilizada para los cultivos cercanos, esto mediante pequeños canales que suministran el agua a las parcelas, con lo que se realizan cosechas fuera de temporal y prácticamente durante la mayor parte del año.
- La segunda actividad económica importante es la cría y pesca de peces introducidos como la carpa plateada, la carpa Israel y carpa espejo, las cuales se comercializa a orillas de la laguna, así como en los mercados de Zumpango.
- La tercera actividad es el turismo y el uso recreativo de las aguas: por lo que en el año 2003 el H. Ayuntamiento de Zumpango y el Gobierno del Estado de México, pretendieron impulsar esta actividad mediante un Proyecto Ecoturístico (Figura 19), con un tiempo de vida útil de al menos 40 años y que se realizaría en dos etapas: la primera con la evaluación de contaminación y mitigación de esta y la segunda con el mejoramiento de la zona contigua a la laguna, esto para impulsar el turismo y regularizar el comercio.



Figura 19. Parque Ecoturístico Laguna de Zumpango, tomada de: <http://www.Zumpango.et/wp-content/uploads/2012/04/9311674.jpg>.

## 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 10.1. Variables físicas

La profundidad media de marzo a noviembre del 2015, para la laguna de Zumpango fue de 1.99 m. El mayor nivel de agua se registro en el mes de octubre con 2.50m, mientras que la menor profundidad se registro en septiembre con 1.19 m. En la figura 20: las barras en color azul muestran la profundidad normal de la laguna, en amarillo el periodo de lluvias así como el descenso en la profundidad del sistema y en rojo el registro más bajo durante el seguimiento a la laguna (anexo B; tabla 18).

De los cinco sitios evaluados en orden descendiente acorde a su profundidad se registro: Carpas II (2.52 m), Muelle (2.27 m), Carpas I (2.11 m), La Isla (1.98m) y El Jabón (1.05 m).

El comportamiento de la laguna fue heterogéneo de acuerdo a las pruebas de análisis de varianza (valor-P=0.0180;  $P \geq 0.05KW$ ), lo que demostró que hubo variaciones a partir del mes de mayo a noviembre, este descenso se debe a la apertura de las compuertas de salida, con el fin de evitar desbordamientos en la laguna durante el periodo de lluvias. Por lo que, durante marzo y abril el volumen es estable, de mayo a octubre la profundidad disminuye y el volumen se restituye para octubre y noviembre.



Figura 20. Comportamiento de la profundidad durante el periodo de muestreo 2015.

Al revisar los sitios de muestreo mediante el análisis espacial se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Valor-P= 0.000428678;  $p \geq 0.05KW$ ) entre los que se ubicó al sitio de Carpas II; que es el sitio de mayor profundidad, por el contrario y el sitio de muestreo; Jabón, es el de menor profundidad, al acumular los sedimentos de la laguna arrastrados por la dirección del movimiento del agua, esto ocasionado por la dirección de las corrientes de viento, la ubicación de efluentes y salidas de agua en la laguna.

De acuerdo a lo reportado (Domínguez, 2006); la laguna tenía una profundidad de 3.0 m, por lo que de acuerdo a los valores obtenidos en 2015, la laguna ha perdido 1.0 m de su profundidad, lo que puede atribuirse a la cantidad de sedimentos y materia orgánica que entran a la laguna. Con esto se conoce que Zumpango tiene una laguna somera polimíctica ya que la columna de agua se mezcla constantemente debido a su baja profundidad y a las condiciones de viento.

Temperatura

El sistema mostró una media mensual de 22.10 °C, El máximo se registró en el mes de junio con 25.10 °C. De acuerdo a INEGI los meses más calurosos de la primavera son de marzo a junio, lo que concuerda con el comportamiento heterogéneo de la laguna (Figura 21), con un (valor  $-P=1.143767-E$ ;  $P \geq 0.05$  KW) se demostró que existen diferencias significativas entre las medias para los diferentes meses de muestreo; el cambio más importante de temperatura, se dio durante el mes de marzo; que registro la temperatura mínima de 16.91 °C, este cambio extraordinario se debe a que durante el periodo de muestreo la laguna estuvo bajo la influencia del frente frio número 41, que se mantuvo del 11 al 14 de marzo, fecha en la cual se realizó el muestreo, la temperatura media ambiental para ese periodo descendió a los 13.20 °C de acuerdo a INEGI, 2016 (Figura 21).

El comportamiento por sitio de muestreo fue el siguiente: El jabón (24.26 °C), Carpas II (22.39 °C), Carpas I (22.10 °C), La Isla (21.87 °C) y el Muelle (21.28 °C). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre superficie y fondo (valor  $-P=0.208688$ ;  $P \geq 0.05$  KW), de acuerdo a Wetzel (2001) es un comportamiento típico de un lago poco profundo ubicado en una zona tropical. El análisis estacional (valor  $-P=0.233647$ ;  $P \geq 0.05$  KW), mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los puntos de muestreo, las mayores diferencias no significativas las encontramos en el punto de muestreo Jabón, que es el sitio que muestra una mayor temperatura, esto a causa de su baja profundidad.

De acuerdo a lo reportado por Domínguez (2006), la temperatura media para ese año fue de 18°C, con lo que se denota una diferencia de cuatro grados, que puede relacionarse con el menor volumen de agua que presenta; unos 18 millones de m<sup>3</sup> menos que en 2006. Por último, los valores de temperatura registrados, se ubicaron dentro de los límites máximos permisibles para uso en riego agrícola y uso público urbano (40.0 °C) de acuerdo a la NOM-001 SEMARNAT-1996, al igual que los CE-CCA-001/89 que establece el límite para protección de la vida acuática en agua dulce (32.0 °C).

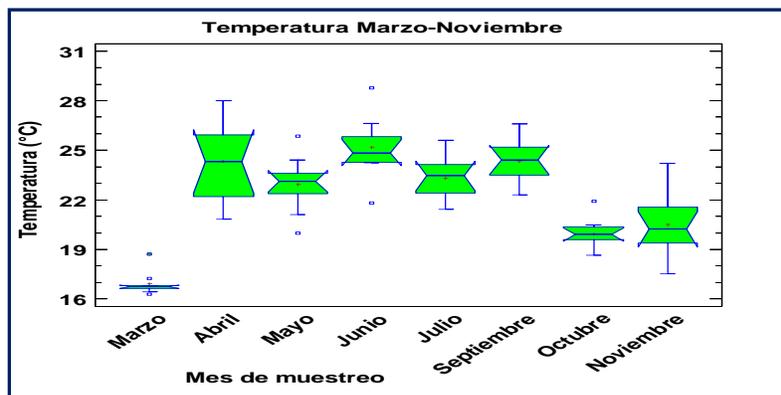


Figura 21. Distribución de la temperatura de marzo a noviembre de 2015.

Transparencia

La media anual es de 15.4 cm. Marzo es el mes con mayor transparencia 26.0 cm, mientras que julio y noviembre los de menor valor con 11.0 cm. La laguna tiene un comportamiento heterogéneo, lo que se encontraron diferencias estadísticamente significativas (valor  $-P= 0.000236869$ ;  $P \geq 0$  KW) entre los diferentes meses de muestreo (Figura 22), la principal causa de los cambios en esta variable es ocasionada por el crecimiento o disminución de la densidad fitoplanctónica.

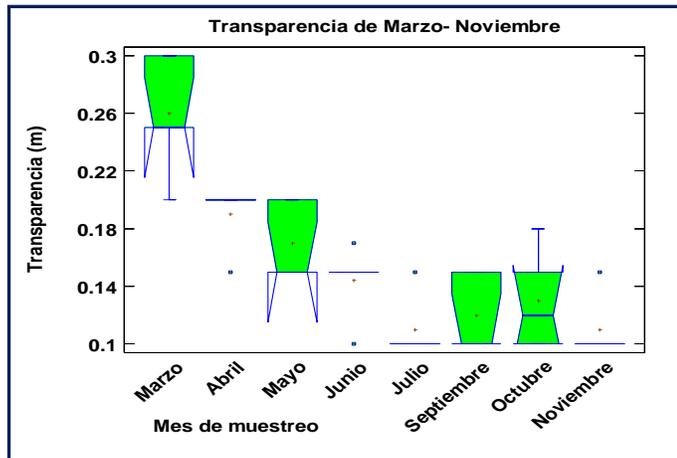


Figura 22. Valores de transparencia de marzo a noviembre de 2015.

Como dice, González (1998), el fitoplancton está compuesto de organismos libres que se distribuyen a lo largo y ancho de la columna de agua, pero la mayoría flota en la capa superficial, afectando a si la

El análisis espacial no muestra diferencias significativas ( $P=0.618718$ ;  $P \geq 0.05$  KW), habla de una distribución homogénea en la cantidad de sólidos disueltos y fitoplancton de la laguna. Sin embargo, el orden de menor a mayor transparencia por sitio de muestreo es el siguiente: Muelle (17.0 cm), Carpas II (15.5 cm), Isla (15.0 cm), Muelle (14.0 cm) (Figura 23).

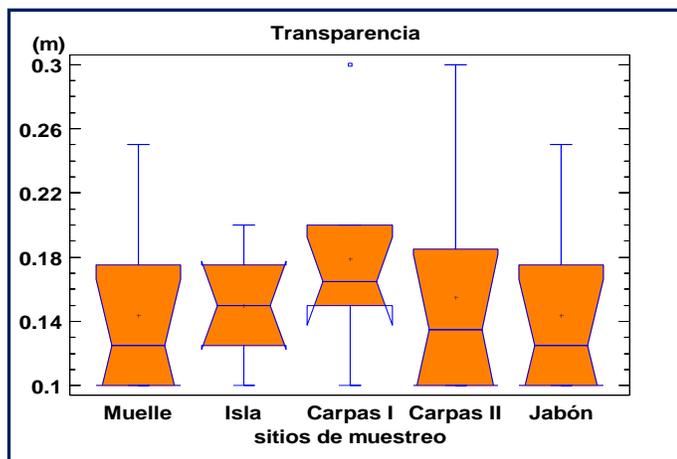


Figura 23. Transparencia del agua de los sitios muestreados

Las características de transparencia de acuerdo a los valores obtenidos, se ubica fuera de rango, de acuerdo a los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89), para la protección de la vida acuática que establece una media mayor a los 2.0 m.

## 10.2. Variables químicas

### 10.2.1. Oxígeno disuelto (O.D)

La laguna tiene un promedio mensual de  $7.31 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 24), se registraron variaciones significativas entre los meses de muestreo (valor  $-P=000308$ ;  $P \geq 0.05 \text{ KW}$ ), El mes fuera del criterio de protección a la vida acuática es; marzo, que dio un promedio  $4.51 \text{ mg L}^{-1}$ , mientras que la máxima concentración se dio en septiembre con  $9.42 \text{ mg L}^{-1}$ , estos valores son resultado de la productividad primaria debido a que la concentración de  $\text{O}_2$  en la laguna está determinada por la cantidad de fitoplanctónico.

Domínguez, (2006); reporto variaciones drásticas entre sus muestreos en la laguna de Zumpango, que van desde;  $1.2 \text{ mg L}^{-1}$  en el mes de diciembre y  $9.0 \text{ mg L}^{-1}$  para el mes de marzo, esto debido a que la concentración de  $\text{O}_2$  depende de la cantidad de organismos fotosintéticos.

De acuerdo a los criterios ecológicos para protección de la vida acuática (CE-CCA-001/89), la laguna se ubica dentro de los límites establecidos, el cual es de  $5.0 \text{ mg L}^{-1}$ , dichas condiciones son idóneas para la vida acuática y favorecen las reacciones encargadas de degradar la materia orgánica mediante la oxidación, la excepción fue el mes de marzo, que debido a las condiciones de tiempo el fitoplancton disminuyo la producción de oxígeno.

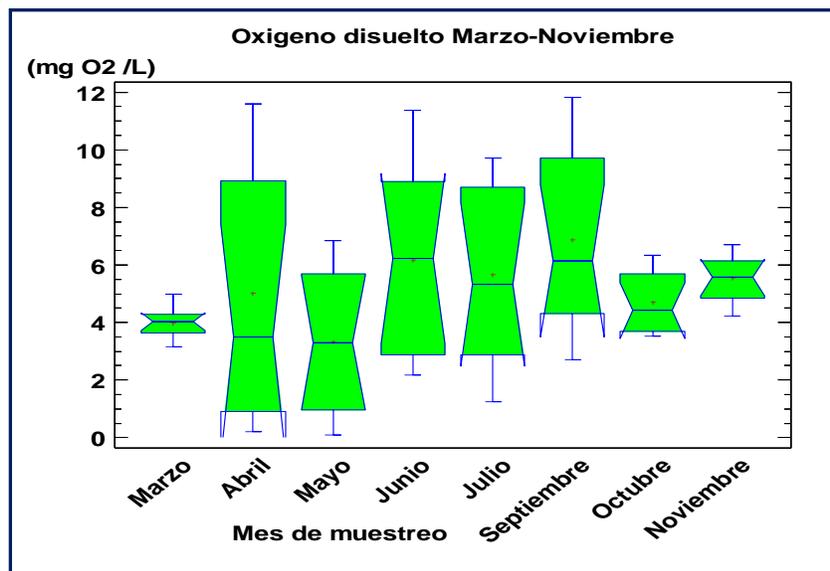


Figura 24. Diagrama de caja y bigote para oxígeno disuelto de 2015.

En el análisis espacial, los resultados muestran (valor  $-P= 0.865549$ ;  $P \geq 0.05 \text{ KW}$ ), que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes puntos de monitoreo; El sitio con mayor  $\text{O}_2$ , es Jabón ( $6.04 \text{ mg L}^{-1}$ ) y el de menor  $\text{O}_2$  es El Muelle ( $4.91 \text{ mg L}^{-1}$ ). Esto concuerda con Domínguez (2006), quien encontró un comportamiento homogéneo en todos sus puntos de muestreo.

Oxígeno disuelto en superficie y fondo

El análisis de oxígeno disuelto en superficie mostró diferencias significativas entre las medias de cada mes (valor  $-P= 0.000305$ ;  $P \geq 0.05$  KW), la media mensual es de ( $7.31 \text{ mg L}^{-1}$ ), la mayor concentración se obtuvo durante el mes de septiembre con ( $9.42 \text{ mg L}^{-1}$ ) y la menor en marzo ( $4.51 \text{ mg L}^{-1}$ ), como se muestra en la figura 25; el oxígeno en superficie cumple con (CE-CCA-001/89), para la protección acuática, a excepción del mes de marzo que se encuentra por debajo del mínimo permisible ( $5.01 \text{ mg L}^{-1}$ ).

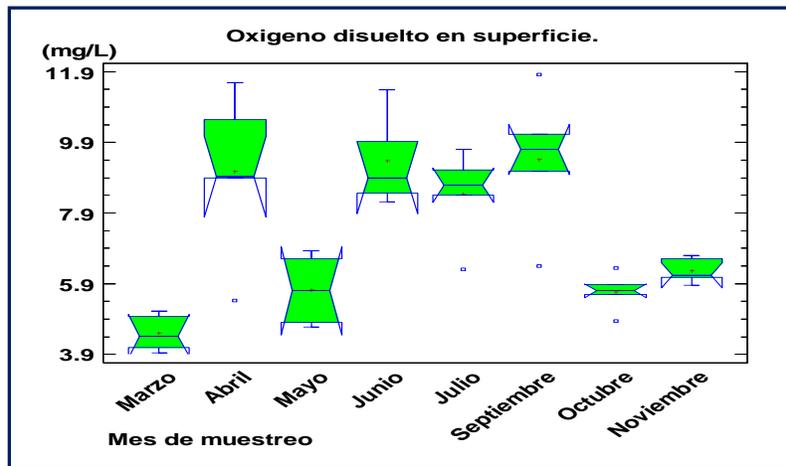


Figura 25. Diagrama de caja y bigote para oxígeno en superficie

Se encontraron diferencias significativas entre las medias (valor  $-P=0.000180$ ;  $P \geq 0.05$  KW); se obtuvo una media mensual de  $3.02 \text{ mg L}^{-1}$ , el valor más bajo se obtuvo en los meses de abril y mayo  $0.90 \text{ mg L}^{-1}$  y el más alto en noviembre  $4.85 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 26). Ninguno de los valores registrados se ubican dentro de los límites de la (CE-CCA-001/89), para protección de la vida acuática.

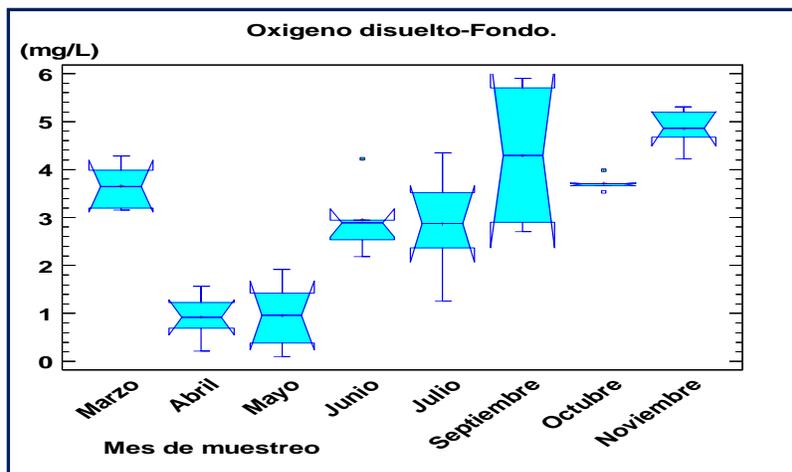


Figura 26. Diagrama de caja y bigote para oxígeno en fondo.

El análisis del oxígeno disuelto entre superficie y fondo, para cada mes de muestran el comportamiento de una laguna oxidativa en superficie con una zona anóxica en el fondo, claramente marcada por una diferencia importante (Figura 27).

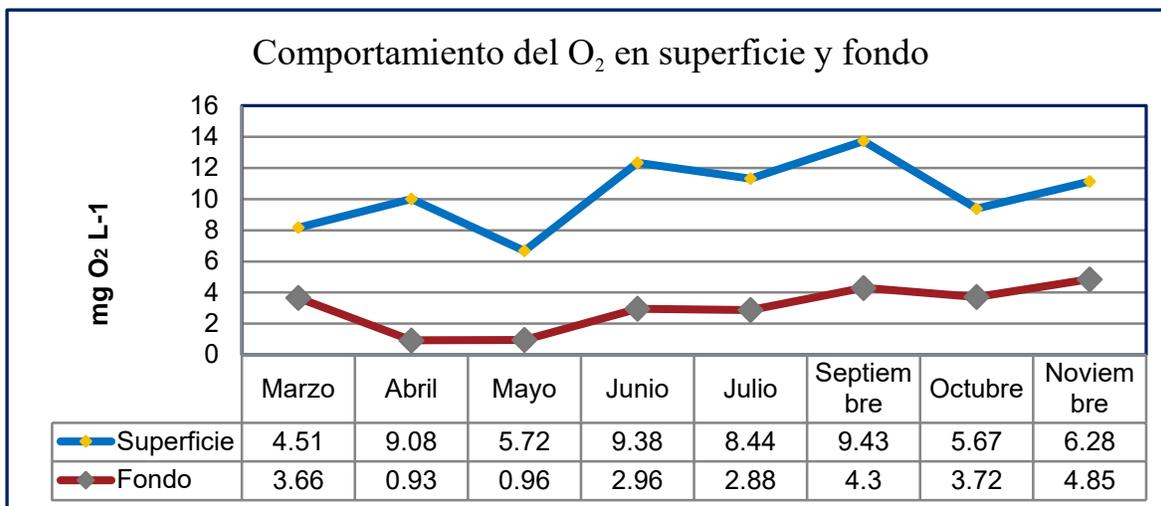


Figura 27. Descripción del comportamiento del oxígeno en superficie y fondo.

En la tabla 8, se muestra si existe diferencia significativa entre la concentración de O<sub>2</sub> en superficie y fondo, de abril a noviembre la concentración del O<sub>2</sub> del fondo se incremento pasando de concentraciones de 0.0 a 2.0 mg L<sup>-1</sup> a concentraciones de 4.7 a 5.2 mg L<sup>-1</sup>, esto se debe a dos razones principalmente; una que aumenta la productividad del fitoplancton en superficie y dos que disminuye los procesos de descomposición de materia orgánica.

Tabla 8. Análisis estadístico de la distribución de O<sub>2</sub> entre superficie y fondo en la laguna de Zumpango.

Distribución de O <sub>2</sub> en la laguna				
Mes	Valor -P (KW)	Diferencia significativa	Valor de la media en superficie	Valor de la media en el fondo
Marzo	-P=0.0471983; P≥0.05	si	4.51	3.66
Abril	-P=0.00902154; P≥0.05	si	9.08	0.93
Mayo	-P=0.0902154; P≥0.05	si	5.72	0.96
Junio	-P=0.0090220; P≥0.05	si	9.38	2.96
Julio	-P=0.0090215; P≥0.05	si	8.44	2.88
Septiembre	-P=0.0090201; P≥0.05	si	9.43	4.30
Octubre	-P=0.0090215; P≥0.05	si	5.67	3.72
Noviembre	P=0.0090215; P≥0.05	si	6.28	4.85

### 10.2.2. Potencial de iones hidrógeno (pH)

Se tiene una media mensual de un  $\text{pH}=8.68$ , el cual se encuentra fuera del intervalo que se establece como permisible, de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996, que da un valor límite entre 6.50 a 8.50 en sistemas naturales. El valor más elevado se registro durante el mes de junio ( $\text{pH}=8.99$ ); con valores de 9.0 se considera tóxico para plantas vasculares y peces, así también interviene en la precipitación de metales pesados (González, 2006), el valor mínimo se registra durante noviembre ( $\text{pH}=7.78$ ) con esto se identifica un sistema básico, cuya alcalinidad está determinada por la presencia de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{2-}$ ) y carbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), que generalmente está determinado por los tipos de suelo en que se ubica la laguna. Por otra parte, respecto a lo encontrado en 2015 y lo registrado por Domínguez (2006); un pH en el rango de 7.4 a 9.6 al que cataloga como ligeramente básico, no se encuentran grandes diferencias.

Hubo variaciones estadísticamente significativas en el valor mensual del pH (valor  $-P=5.4782\text{E}-10$ ;  $P \geq 0.05$  KW), de marzo a septiembre el comportamiento fue homogéneo con una media mayor a 8.5 y hubo una disminución por debajo de 8.0 para los meses de octubre y noviembre, esto sucede al incrementarse el volumen de agua en estos dos meses.

### 10.2.3. Bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )

Bajo el sistema de amortiguamiento del  $\text{CO}_2$ , la laguna funciona con un pH básico lo que provoca que las disoluciones del  $\text{CO}_2$  sea cero, por ello la laguna interactúa con el  $\text{CO}_2$  en su forma disociada como carbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) y bicarbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), ver (anexo A; tabla 16).

Se ha demostrado que existe un efecto negativo sobre los suelos de cultivo que son irrigados con aguas que contienen elevadas concentraciones de carbonatos ( $\text{CO}_3^-$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), ya que los iones de estos compuestos se combinan con Calcio y Magnesio lo que los precipita en forma de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) o carbonato magnésico ( $\text{MgCO}_3$ ), la solución del suelo se concentra bajo condiciones de secas.

Al utilizar las aguas de la laguna de Zumpango para el riego las concentración de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  decrece en relación al sodio, esto provoca la alcalinización y el aumento del pH en el suelo. En los suelos existe 13 elementos esenciales entre los que se encuentra el  $\text{Ca}^+$  y el  $\text{Mg}^+$  como macronutrientes, además de esto las aguas con pH superiores a 8.50 limitan la disponibilidad en el suelo de algunos otros elementos como el hierro.

10.2.4. Sólidos disueltos totales (SDT)

Se obtuvo una media mensual de 262.70 ppm, los valores más bajos se obtuvieron en los meses de marzo (235.33 ppm) y octubre (235.80 ppm), el incremento en los (SDT) se presentó de mayo a septiembre, precisamente los meses donde el nivel del agua disminuye a lo que se le atribuye a dicho incremento en los sólidos disueltos.

Los valores más altos no rebasan los límites máximos (500 a 1000 mg L<sup>-1</sup>) establecidos en la CE-CCA-001/89. El análisis temporal con (valor  $-P=4.25659E-8$ ;  $P \geq 0.05$  KW) demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas entre los meses de muestreo, esto se debe a que el volumen de agua aumenta a causa: de la entrada de agua del canal Santo Tomas y las precipitaciones anuales; de junio a septiembre. Mientras que disminuye: por evaporación, durante la primavera y el verano; del 21 de marzo al 23 septiembre y la más importante, las salidas de agua por la apertura de compuertas controladas por la Comisión Nacional del Agua.

El análisis espacial (sitio de muestreo) con (valor  $-P= 0.17351$ ;  $P \geq 0.05$  KW) indica que no hay diferencias estadísticamente significativas, es decir el comportamiento en los distintos puntos es muy similar a excepción de un sitio (Jabón), que al ser el lugar con menor profundidad en cinco de los ocho meses de muestreo tuvo datos mayores, lo que se registra en la figura 28: como valores atípicos.

Se debe considerar de gran importancia mantener monitoreada esta característica (SDT) ya que al sobrepasar las 500 ppm, la vida de los peces se pone en riesgo: afectando directamente el cultivo de la carpa.

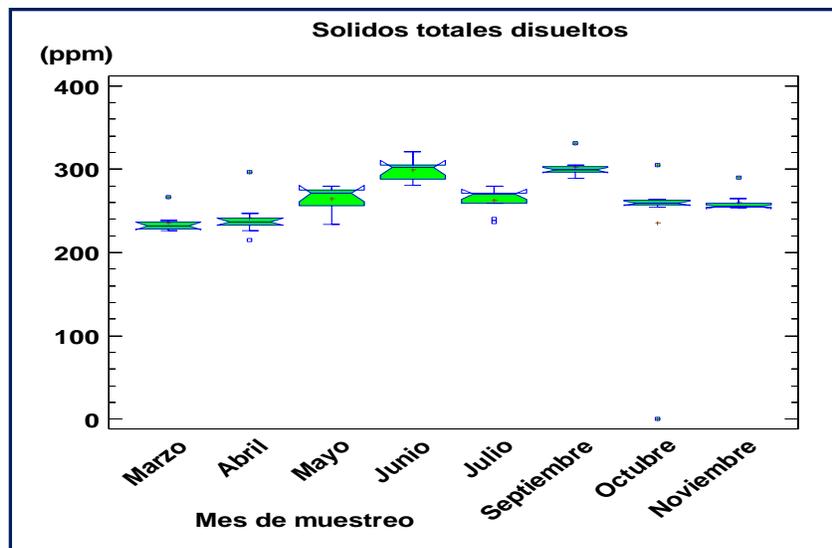


Figura 28. Comportamiento de los sólidos disueltos totales

## 10.2.5. Salinidad

Los resultados muestran una media mensual de salinidad de 0.25 psu (Figura 29), el mes con una media más alta es septiembre (0.29 psu) mientras el de menor concentración es marzo y abril (0.21 psu) esto puede deberse a las lluvias atípicas que ocurrieron durante estos meses. Todas las concentraciones registradas durante la evaluación son menores a 0.50 psu por lo tanto, la laguna de Zumpango es un sistemas de agua dulce.

Originalmente el sistema acuático formado por Texcoco, Xaltocan y Zumpango eran aguas con salinidad mayor a 0.50 psu debido al tipo de suelo donde se ubicaban, sin embargo la laguna de Zumpango a cambiado esta propiedad, lo cual se debe a las desecaciones a las que se ha expuesto; la primera en 1987 y la segunda para el año de 1997, después de realizar estas acciones el volumen de la laguna no pudo ser restituido naturalmente mediante las precipitaciones anuales, por lo que se opto por restituir el volumen mediante las aguas municipales. Estas aguas si bien contienen una elevada carga orgánica y diversos contaminantes inorgánicos, provienen del uso de aguas potables en los que las concentraciones de salinidad suelen ser mínimas.

El análisis temporal mostró diferencias significativas entre los meses de muestreo (valor- $P=3.8355E-9$ ;  $P \geq 0.05$  KW). El aumento a partir de marzo concuerda con la disminución en el volumen de la laguna, al igual que al aumentar el volumen durante octubre noviembre la cantidad de sales disminuye. El análisis espacial (valor - $P=0.288121$ ;  $P \geq 0.05$  KW) indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los distintos puntos de muestreo. Por último, la salinidad de la laguna de Zumpango está determinada por los iones de bicarbonato y carbonato y no por los iones de cloruro y sodio por lo que a ecosistemas bajo estas características se le considera como: *sistema de aguas duras*.

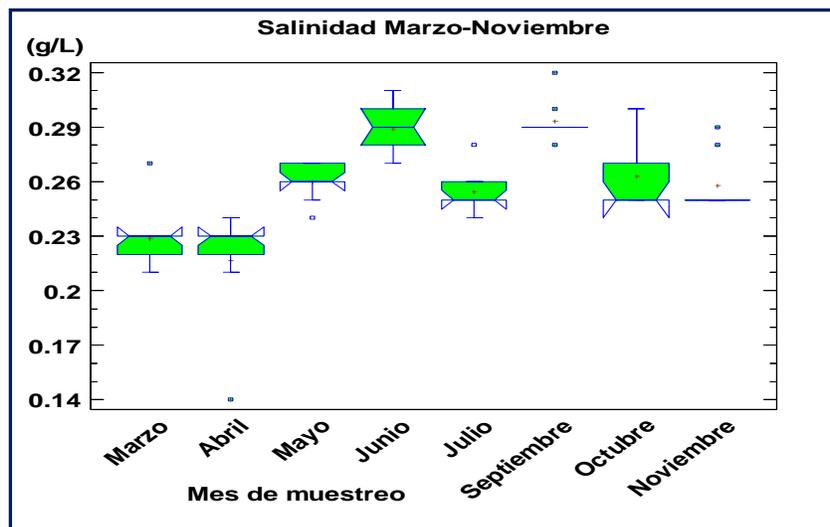


Figura 29. Variación mensual para la concentración de salinidad.

10.2.6. Conductividad

Se obtuvo una media mensual de 505.75 mS/cm<sup>2</sup>, El mes con el menor registro de conductividad se establecio en marzo con 399.44 mS/cm<sup>2</sup> y el de mayor conductividad en junio con un promedio de 602.11 mS/cm<sup>2</sup>, esta conductividad permiten su uso en diversas actividades humanas; para uso domestico, mientras mantenga lecturas entre 500 y 800 mS/cm<sup>2</sup>, sin ser adecuado para el consumo humano ya que en promedio y para poder ser considerada como agua potable se requiere de lecturas de 50 a 150 mS/cm<sup>2</sup>.

Al analizar los valores de conductividad, mediante el análisis estadístico univariado (valor -P=5.98388E-10 ;P≥0.05 KW), se identificaron diferencias entre los distintos meses de trabajo (Figura 30), de marzo a junio se registra un incremento; lo que concuerda con otros parametros, como el aumento en la concentracion en la salinidad, el aumento en los solidos disueltos y la disminucion del volumen de agua.

Durante los ocho meses muestreados, el comportamiento entre los sitios monitoreados mostró un comportamiento homogéneo (valor -P=0.772984 ;P≥0.05 KW).

De acuerdo a la conductividad y a los SDT, se puede dar una aproximación bastante buena de la dureza de sus aguas, por lo que la clasificación designada de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud es: *Agua moderadamente dura* (anexo A; tabla 17).

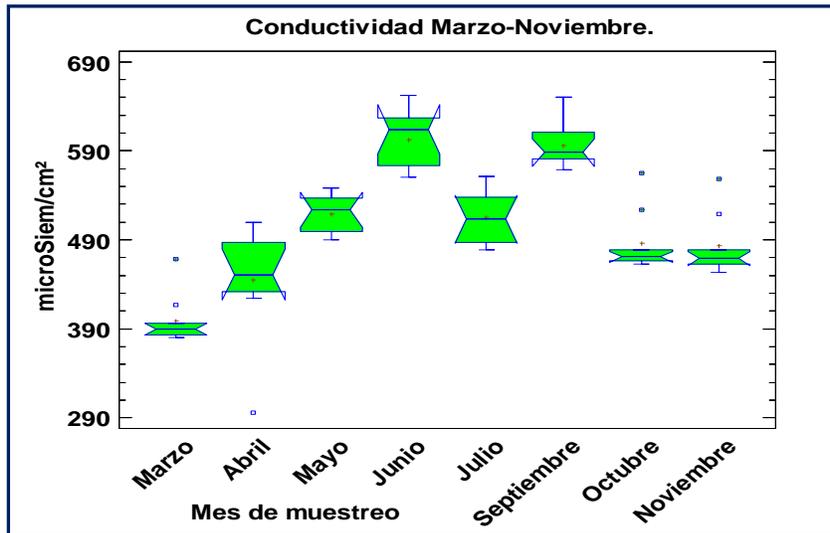


Figura 30. Variación mensual de la conductividad de marzo a noviembre de 2015.

10.2.7. Potencial de Óxido Reducción (POR)

La media mensual de (POR) es de 629.25 mV, el mes con el promedio más elevado fue durante noviembre con 685.28 mV y el menor promedio se registro en 552.23 mV, el análisis estadístico (valor  $-P=1.58639E-10$ ;  $P \geq 0.05$  KW) muestra diferencias significativas con lo que se conoce un comportamiento heterogéneo entre los meses de muestreo en la laguna (Figura 31), esto se debe a que el POR cambia en función a otras variables; como la profundidad, la temperatura y la más importante, la concentración de  $O_2$ , que se encuentran asociadas directamente a la productividad primaria (Aznar, 2000).

Cuando el potencial redox es positivo, como en este caso; es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación, esta oxidación acidifica el medio (se producen iones  $H^+$ ); sin embargo, este proceso de oxidación no es suficiente para lograr un equilibrio en una laguna que funciona con aguas duras a  $pH \geq 8.5$  donde predominan los iones hidronio ( $OH^-$ ).

Los sistemas mesotróficos; suele tener este comportamiento oxidativo en superficie y reductor en el fondo (Contreras, 1985), como es el caso para la laguna de Zumpango. Al realizar los muestreos durante el medio día, el fitoplancton se encontraba en el punto máximo de producción de oxígeno, por lo que predominaron los (POR) positivo en la superficie, mientras que durante las horas sin radiación solar, principalmente durante las primeras horas de la madrugada, el oxígeno se agota y predominan los procesos de reducción.

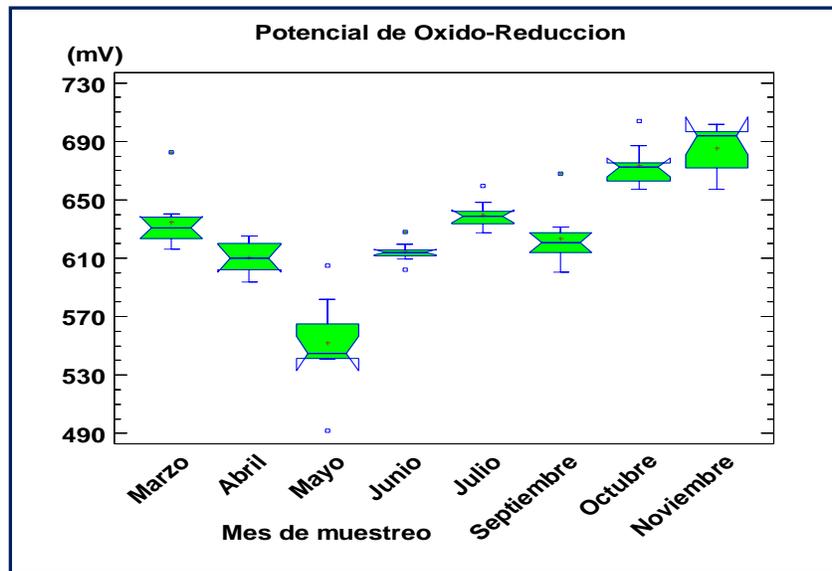


Figura 31. Variación mensual del potencial óxido reducción

### 10.2.8. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El valor de la media mensual es de  $160.42 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ , el valor máximo se registro en julio ( $238.12 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ) y el valor mínimo se registro durante el mes de marzo ( $104.77 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ), en la normatividad mexicana no existe valores determinados respecto a este parámetro; sin embargo, de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 existen valores propuestos entre los  $100$  y  $120 \text{ mg L}^{-1}$  y de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua, valores mayores a  $40 \text{ mg L}^{-1}$  se catalogan como aguas contaminadas. En los análisis realizados por CONAGUA en 2003, reportaron para la laguna de Zumpango una DQO de  $205.7 \text{ mg L}^{-1}$ ; por lo que lo reportan como; una laguna fuertemente contaminada,

De acuerdo al análisis mensual, la laguna presento un comportamiento heterogéneo (valor  $-P=0.000757225$ ;  $P \geq 0.05$  KW), con valores entre los  $100$  y  $200 \text{ mg L}^{-1}$ . Sin embargo, julio es el único mes que supero los  $200 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 32), esto se debe a dos causas: la entrada de agua residual con mayor carga orgánica y al aumento de la densidad fitoplanctónica, ya que este al morir se sedimenta en el fondo incrementado la cantidad de materia orgánica para degradar.

El análisis espacial, la laguna tuvo un comportamiento homogéneos (valor  $-P=0.0667972$ ;  $P \geq 0.05$  KW), a pesar de ello, los valores más elevados se encontraron en el sitio de muestreo del Muelle, sitio con la mayor influencia antropogénicas en el perímetro de la laguna.

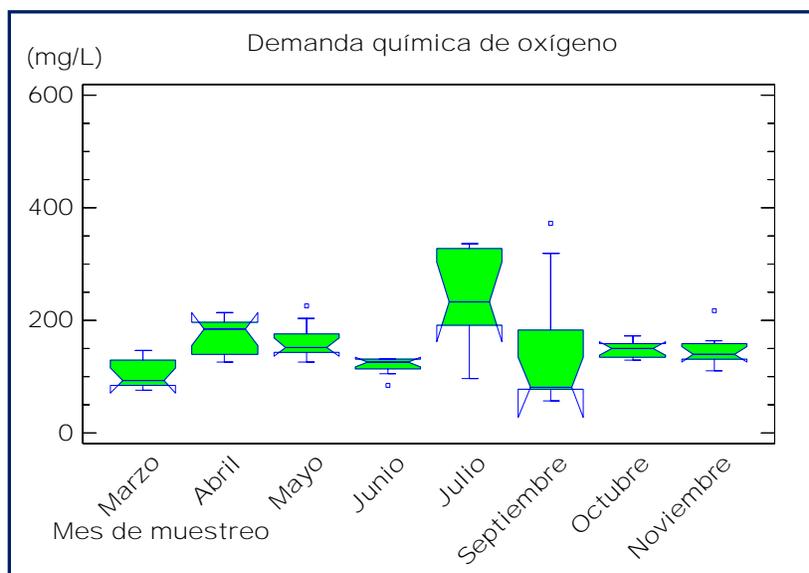


Figura 32. Variación mensual de la demanda química de oxígeno.

10.2.9. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

La media mensual registrada fue de 86.52 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, el análisis temporal muestra que la laguna tiene un comportamiento heterogéneo (valor -P= 9.89667E-7; P=0.05 KW), es decir existen diferencias entre cada mes de muestreo (Figura 33); con esto se identifico los meses de abril y julio, con la mayor DBO<sub>5</sub> (140 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>), lo que se entiende como un reflejo de la cantidad de materia orgánica, así como de la demanda de oxígeno requerido por los procesos metabólicos de los organismos acuáticos. El mes con la menor demanda bioquímica de oxígeno se obtuvo en el mes de septiembre con un valor de 50 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>.

La CONAGUA en 2003 reporto para la laguna de Zumpango, un valor de 104.20 mg L<sup>-1</sup> y valores similares encontrados en el lago de Xochimilco con 78.4 mg L<sup>-1</sup>; por lo que para ambos sitios, da la clasificación de *aguas contaminadas*, estos requerimientos de O<sub>2</sub> concuerda con los valores encontrados durante este trabajo. Por lo que, se puede establecer mediante este parámetro que la laguna de Zumpango es; un sistema contaminado.

El comportamiento de la DBO<sub>5</sub> durante los meses de muestreo es heterogéneo, esto puede deberse a los diversos cambios en las entradas y salidas de agua, los cuales no son constantes, además concordar el periodo de muestreo con la época de lluvias (junio a septiembre del 2015).

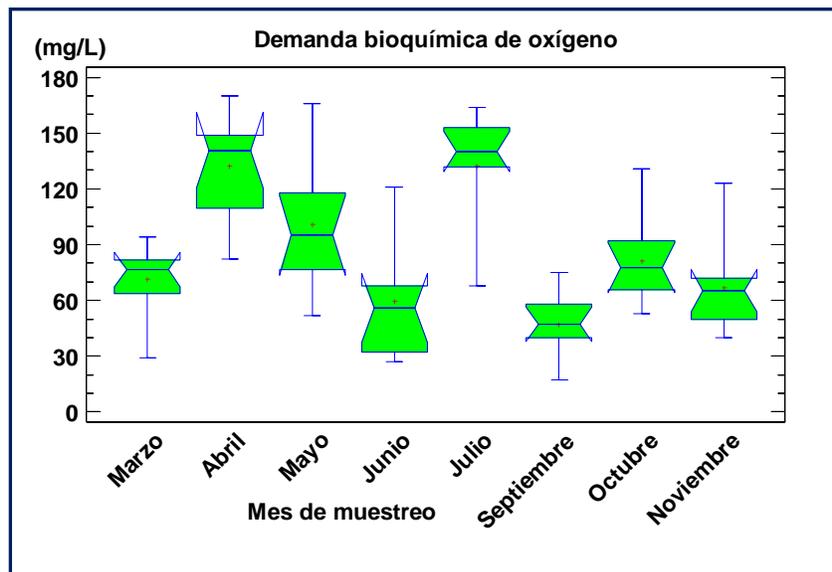


Figura 33. Variación mensual de la demanda bioquímica de oxígeno.

El análisis univariado espacial (valor  $-P=0.0303227$ ;  $P \geq 0.05$  KW), muestra que existen diferencias estadísticamente significativas (Figura 34); por lo que, la laguna tiene un comportamiento espacial heterogéneo, donde el sitio del Muelle se identificó como el punto que tiene una mayor  $DBO_5$  (abril, mayo, junio, septiembre y noviembre), este es el punto de mayor influencia antropogénica.

En marzo la mayor  $DBO_5$ , fue en el punto de Carpas I; este es el lugar de muestreo más cercano a la entrada del canal Santo Tomas y en octubre el punto de muestreo con la  $DBO_5$  más alta es el Jabón: que es el sitio de menor profundidad debido a la acumulación de sedimentos causado por los movimientos del agua hacia esta dirección.

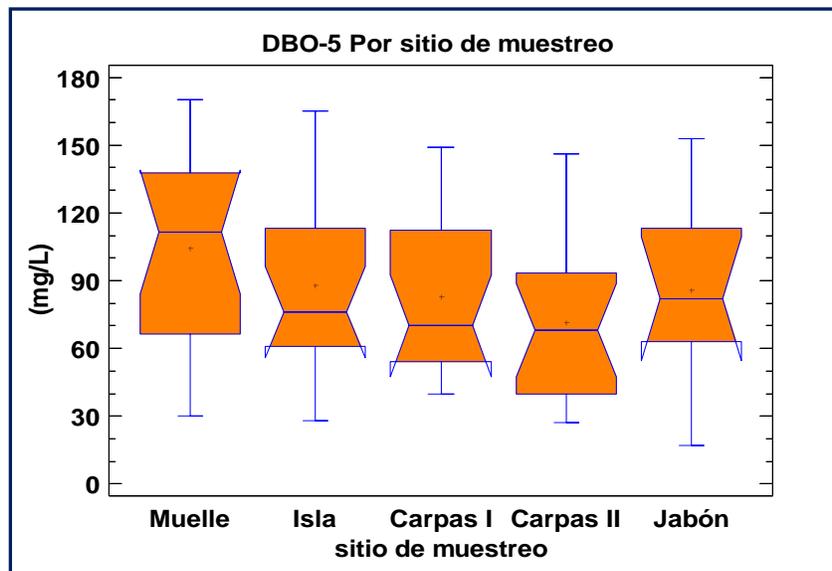


Figura 34. Demanda bioquímica de oxígeno, por sitio de muestreo.

De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establecen los criterios de calidad del agua para protección de la vida acuática y uso público urbano de  $30$  a  $60 \text{ mg L}^{-1}$  y para uso en riego agrícola de  $75$  a  $150 \text{ mg L}^{-1}$ . Con esto se puede concluir; que las concentraciones registradas se encuentran fuera de rango para la protección de la vida acuática y para uso público, de acuerdo a esto las aguas de laguna solo son aptas para *uso agrícola*.

10.3. Nutrientos

Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )

Se obtuvo una media mensual de  $0.15 \text{ mg L}^{-1}$ , el promedio más bajo se obtuvo durante el mes de septiembre con  $0.10 \text{ mg L}^{-1}$  y el mes de mayor concentración octubre con  $0.32 \text{ mg L}^{-1}$ . En general los nitritos mostraron un comportamiento heterogéneo (valor  $-P=1.5881\text{E}-10$ ;  $P \geq 0.05$  KW) con concentraciones bajas, esto quiere decir que el ciclo del nitrógeno: amonificación y nitrificación ocurren rápidamente debido al potencial óxido reducción positivo que tiene la laguna; esto transforma rápidamente los compuestos nitrogenados en nitratos, forma asimilable para bacterias y organismos fitoplanctónicos.

Se encontraron diferencias significativas, formado tres grupos homogéneos: uno; marzo, abril y mayo, dos; octubre y tres; junio, julio, septiembre y noviembre (Figura 35). Domínguez en 2006, encontró que la concentración de nitritos en la laguna de Zumpango fue muy alta a lo largo del año, con un incremento de julio a septiembre alcanzando un valor máximo de  $0.61 \text{ mg L}^{-1}$ , esto concuerda con lo encontrado durante los primeros tres meses de muestreo, ya que; marzo, abril y mayo obtuvieron valores fuera de escala mayores a  $0.61 \text{ mg L}^{-1}$  (Tabla 9).

El análisis espacial (valor  $-P=0.959928$ ;  $P \geq 0.05$  KW) no se encontraron diferencias significativas, esto habla de una distribución uniforme de los nutrientes.

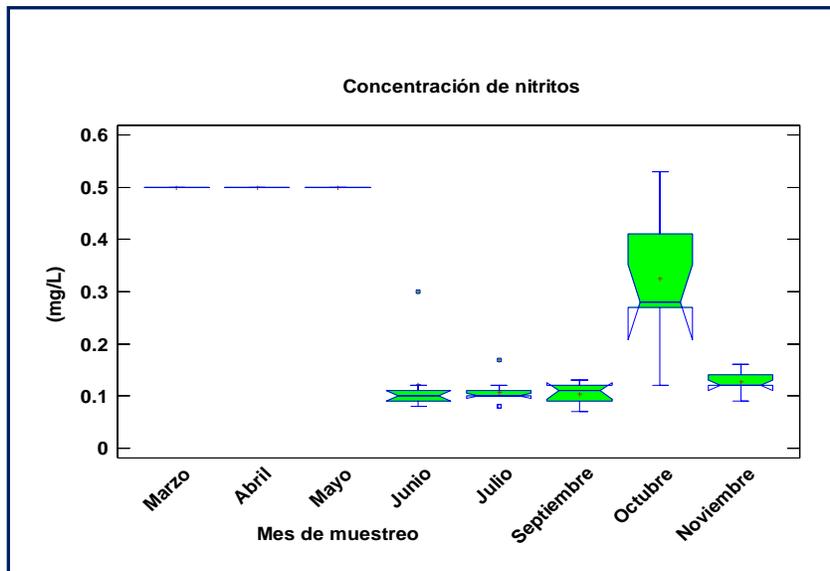


Figura 35. Variación mensual de los nitritos.

Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )

La media mensual es de  $6.36 \text{ mg L}^{-1}$ , el promedio más bajo se obtuvo durante el mes de octubre con  $1.11 \text{ mg L}^{-1}$  y el periodo de mayor concentración fue marzo con  $10.08 \text{ mg L}^{-1}$ , estas concentraciones son elevadas ubicadas en el rango de los  $5.0$  a los  $50.0 \text{ mg L}^{-1}$  se consideran en la clasificación de un sistema *Eutrófico* (Tabla 9).

En general los nitratos mostraron un comportamiento heterogéneo (valor  $-P=0.000086678$ ;  $P \geq 0.05$  KW) con lo que se puede establecer que se identificaron diferencias estadísticamente significativas, formado tres grupos homogéneos: uno; septiembre y octubre; con concentraciones bajas menores a  $6.0 \text{ mg L}^{-1}$ , dos; abril, junio y noviembre con concentraciones medias de  $10.0 \text{ mg L}^{-1}$ ; y tres; marzo, mayo y julio con concentraciones máximas de hasta  $20.0 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 36). Estas concentraciones son el reflejo de la contaminación de la laguna, causada principalmente por materia orgánica. Lo reportado por Domínguez en 2006 fueron concentraciones muy bajas, con un valor promedio durante el estudio de  $0.28 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que estableció como nutriente limitante al nitrógeno y de ahí la explicación al aumento de las cianobacterias.

El análisis espacial (valor  $-P=0.306598$ ;  $P \geq 0.05$  KW), realizado para identificar diferencias entre los puntos muestreados; no encontró cambios importante de un sitio a otro, pero si se ubicaron los puntos de mayor concentración los cuales son: Muelle e Isla con valores  $\geq 10.0 \text{ mg L}^{-1}$ . Según Gutiérrez (2006); los nitratos es una de las formas asimilables del nitrógeno utilizado por bacterias y fitoplancton, por lo que concentraciones elevadas como estas propician el crecimiento del fitoplancton.

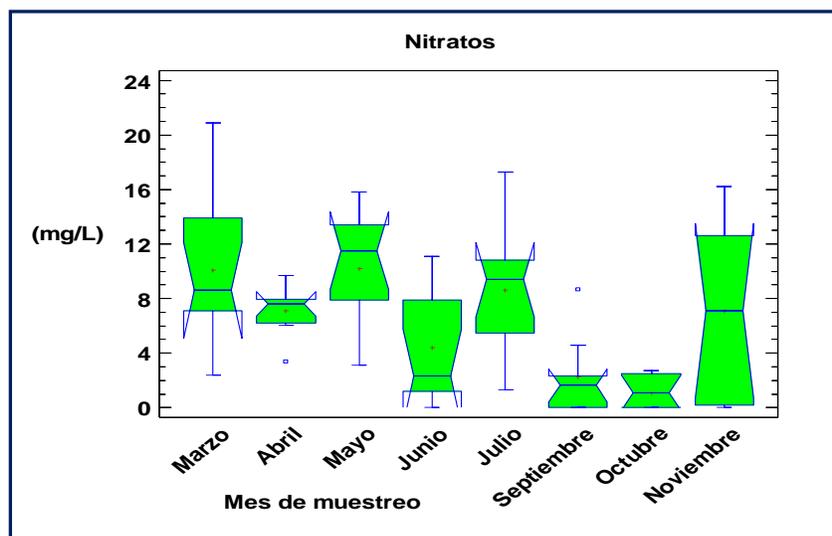


Figura 36. Variación mensual de la concentración de nitratos

Amoníaco ( $\text{NH}_3^-$ )

La media mensual es de  $0.66 \text{ mg L}^{-1}$ , la mayor concentración se presentó durante el mes de octubre con  $2.17 \text{ mg L}^{-1}$  y el de menor concentración en el mes de junio con  $0.21 \text{ mg L}^{-1}$ , dichos valores reflejan un estado *Eutrófico* (Tabla 9). Trabajos realizados en Coyuca de Benítez, Guerrero reportaron valores de  $0.44 \text{ mg L}^{-1}$ , por lo que De Dios, (2015) la reporto como un sistema mesotrófico; valores semejantes a lo encontrado para la laguna de Zumpango.

El comportamiento del amoníaco fue heterogéneo (valor  $-P=4.21343\text{E}-8$ ;  $P \geq 0.05$  KW), por lo que muestra diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de cada uno de los meses muestreados (Figura 37), se formaron cuatro grupos homogéneos uno; octubre, dos; noviembre, tres; julio, septiembre y marzo y cuatro; junio, abril y mayo. El análisis espacial no muestra diferencias estadísticamente significativas (valor  $-P=0.120874$ ;  $P \geq 0.05$  KW).

Los puntos identificados por contaminación reciente mediante este parámetro son; Jabón con  $0.98 \text{ mg L}^{-1}$  y el Muelle con  $0.64 \text{ mg L}^{-1}$ , estos sitios de monitoreo son los que presentan mayor influencia antropogénica, dichos valores de amoníaco reflejan el proceso de degradación de la materia orgánica, así como la existencia de compuestos nitrogenados. Por lo que, dichos resultados muestran que la laguna ha sido expuesta a contaminación reciente.

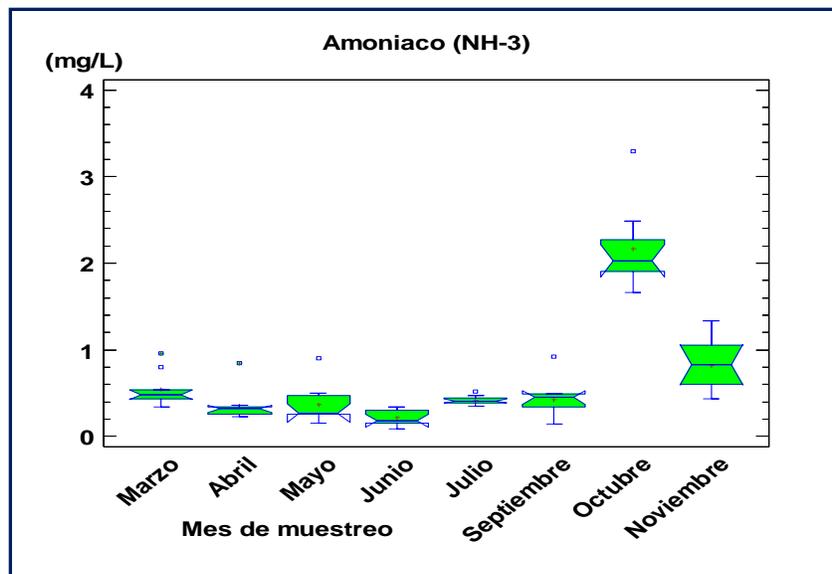


Figura 37. Variación mensual del amoníaco de marzo a noviembre.

En la tabla 9, se muestran marcado en color, la clasificación que tiene la laguna de Zumpango de acuerdo a las concentraciones encontradas. Por lo que de acuerdo a la concentración del amoníaco la laguna tiene un estado: *Mesotrófico*, de acuerdo a los nitritos la clasificación es *Mesotrófico* y por último acorde a la concentración de nitratos es un sistema *Eutrófico*.

Tabla 9. *Relación de nutrimentos con el nivel trófico, tomada de Esteves (1998)*

Estado trófico	Amoníaco (mg L <sup>-1</sup> )	Nitritos (mg L <sup>-1</sup> )	Nitratos (mg L <sup>-1</sup> )
Oligotrófico	0.0-0.3	0.0-0.5	0.0-1.0
Mesotrófico	0.3-2.0	0.5-5.0	1.0-5.0
Eutrófico	2.0-15.0	5.0-15.0	5.0-50.0

El nitrógeno (N<sub>2</sub>) entra a la laguna de tres distintas formas: uno la materia orgánica, esto en forma de nitrógeno orgánico el cual se encuentra en las proteínas como ejemplo: tenemos el grupo amino (NH<sub>2</sub><sup>-</sup>), estos compuestos mediante el proceso de asimilación se transforman en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Dos por medio de la fijación mediante cianobacterias, las cuales transforman el nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), esto mediante el fitoplancton que utiliza células especializadas llamadas heterocistos para dicho proceso. Tres; por medio de los desechos de animales y humanos que entran a la laguna en forma de amoníaco (NH<sub>3</sub>) el cual si no es aprovechado en esta forma asimilable rápidamente se transforma en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Una vez que el amonio se encuentra en dilución se transforma de manera muy rápida en nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>); estado temporal, ya que este solo es una interface antes de transformarse en nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), a este proceso se le conoce como nitrificación y ocurre debido al potencial positivo de óxido-reducción de la laguna.

Debido a las transformaciones rápidas del nitrógeno durante el análisis de nutrimentos se registraron niveles bajos de amoníaco, amonio y nitritos, mientras que los nitratos obtuvieron las concentraciones más altas. Los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) son una forma asimilable del nitrógeno, el cual es utilizado por el fitoplancton como uno de los nutrimentos principales para su metabolismo y reproducción.

Fósforo total (P)

Se obtuvo una media mensual de 0.53 mg L<sup>-1</sup>, el valor de mayor concentración se obtuvo durante el mes de abril con 0.92 mg L<sup>-1</sup> y el menor durante el mes de septiembre con 0.23 mg L<sup>-1</sup>, dichas concentraciones se consideran como mínimas y coinciden con lo reportado (Domínguez, 2006), ya que los valores encontrados variaron de 0.5 a 2.0 mg L<sup>-1</sup>. De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT/1996 no se rebasa los valores establecidos como máximos, que para el uso en riego agrícola es de 30.0 mg L<sup>-1</sup> y en el caso de uso urbano 5.0 mg L<sup>-1</sup>.

El análisis estadístico muestra un comportamiento heterogéneo (valor -P=0.000102576; P≥0.05 KW), por lo que se identificaron diferencias significativas entre los meses de muestreo variaciones que se mantienen entre los intervalos de 0 a 1.50 mg L<sup>-1</sup> (Figura 38). La prueba múltiple para fósforo muestra tres grupos homogéneos con diferencias entre ellos: uno; marzo y abril, dos; octubre, junio y noviembre y tres; mayo, julio y septiembre.

El análisis espacial muestra un comportamiento homogéneo (valor -P=0.959928; P≥0.05 KW), los sitios con mayor y menor concentración respectivamente son: Carpas I (0.57 mg L<sup>-1</sup>) y Muelle (0.51 mg L<sup>-1</sup>), que son las zonas con mayor influencia humana debido a que es lugar de mayor afluencia turística y comercial de la laguna.

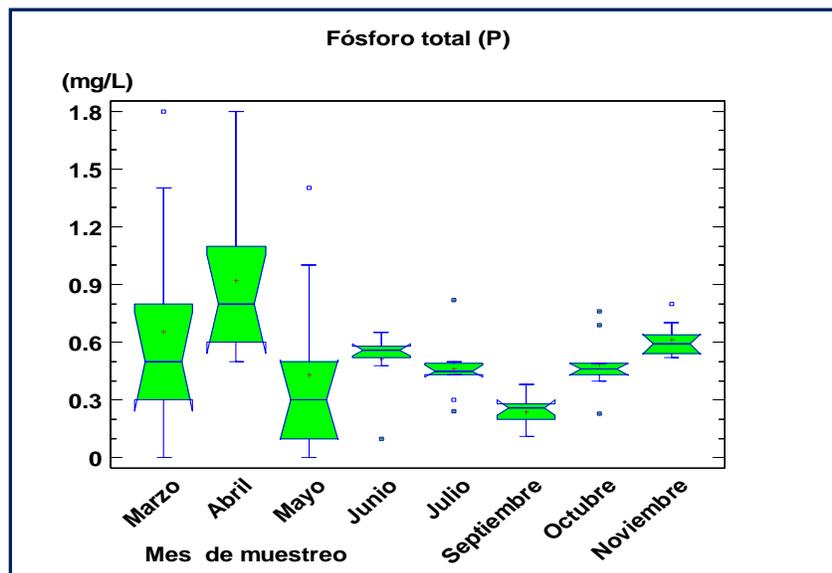


Figura 38. Variación mensual del fósforo total.

Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Se obtuvo una media mensual de  $1.65 \text{ mg L}^{-1}$ , el valor más elevado se obtuvo durante el mes de abril con  $2.82 \text{ mg L}^{-1}$  y el menor durante el mes de septiembre con  $0.73 \text{ mg L}^{-1}$ . El análisis estadístico muestra un comportamiento heterogéneo (valor  $-P=0.000115$ ;  $P \geq 0.05$  KW) por lo que se identificaron diferencias significativas entre los meses de muestreo (Figura 39), Dichos valores son mínimos de acuerdo a lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece para la protección de la vida acuática y uso público concentraciones de  $5.0$  a  $10.0 \text{ mg L}^{-1}$ .

La prueba múltiple para fosfatos muestra tres grupos homogéneos con diferencias entre ellos: uno; marzo y abril), dos; octubre, junio y noviembre y tres; mayo, julio y septiembre. El análisis estacional muestra un comportamiento homogéneo (valor  $-P=0.987431$ ;  $P \geq 0.05$  KW), los sitios con mayor y menor concentración de fosfatos respectivamente son: Isla ( $1.71 \text{ mg L}^{-1}$ ) y Muelle ( $1.55 \text{ mg L}^{-1}$ ).

El fósforo en la laguna se incorpora de manera semejante al nitrógeno, esto mediante la materia orgánica y mediante el uso de pesticida o fertilizantes en áreas de cultivo cercanas a la laguna. Los resultados muestran que la laguna de Zumpango tiene las concentraciones necesarias de fósforo y fosfatos; para el crecimiento de organismos fitoplanctónicos.

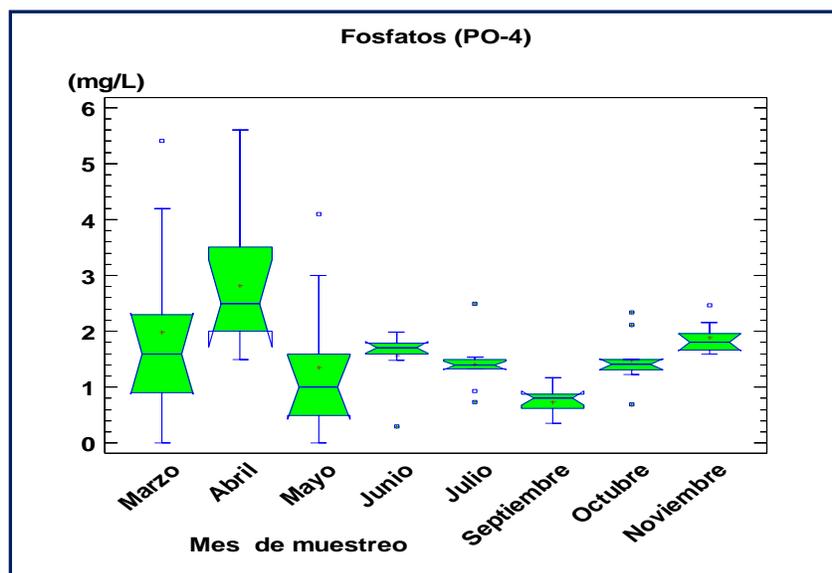


Figura 39. Variación mensual de fosfatos.

#### 10.4. Análisis de fitoplancton

Se revisaron 72 muestras, en las cuales se encontraron 33 géneros clasificados en la siguiente forma: cuatro Divisiones, seis Clases, catorce Órdenes, dieciocho Familias. Las divisiones se encuentran representadas de la siguiente manera: Cyanophyta 34.28%, Chlorophyta 34.28%, Chrysophyta 28.57 y Euglenophyta 2.85% (Figura 40). Los géneros más representativos de la laguna de Zumpango (Anexo D), de acuerdo a su abundancia relativa, son los siguientes: *Phormidium* (0.9317), *Pseudanabaena* (0.0183), *Microcystis* (0.0107), *Rhabdoderma* (0.00561) y *Aphanocapsa* (0.0045).

Se registro una mayor abundancia de fitoplancton durante los meses de: junio y julio, de estos el de mayor concentración fue julio, que coincide con los mes de menor profundidad del sistema con 1.65 m (Tabla 10), una temperatura mayor a los 23 °C y los valores de mayor DQO con 208.23 y 238.12 mg L<sup>-1</sup> correspondientemente (anexo C; tabla 19). Los meses con la menor densidad de fitoplancton se registro durante marzo y noviembre, periodos durante el cual, las temperaturas presentan los niveles más bajos; marzo con 17 °C, octubre y noviembre con 20 °C promedio.

Domínguez, (2006); encontró que la diversidad de especies de fitoplancton en la laguna de Zumpango, estaba representada principalmente por clorofitas unicelulares y coloniales, y cianobacterias. Sin embargo no registra una abundancia total de estas últimas, aunque si especifica que las características de pH alcalino y las altas temperaturas, representan condiciones óptimas para el crecimiento de cianobacterias.

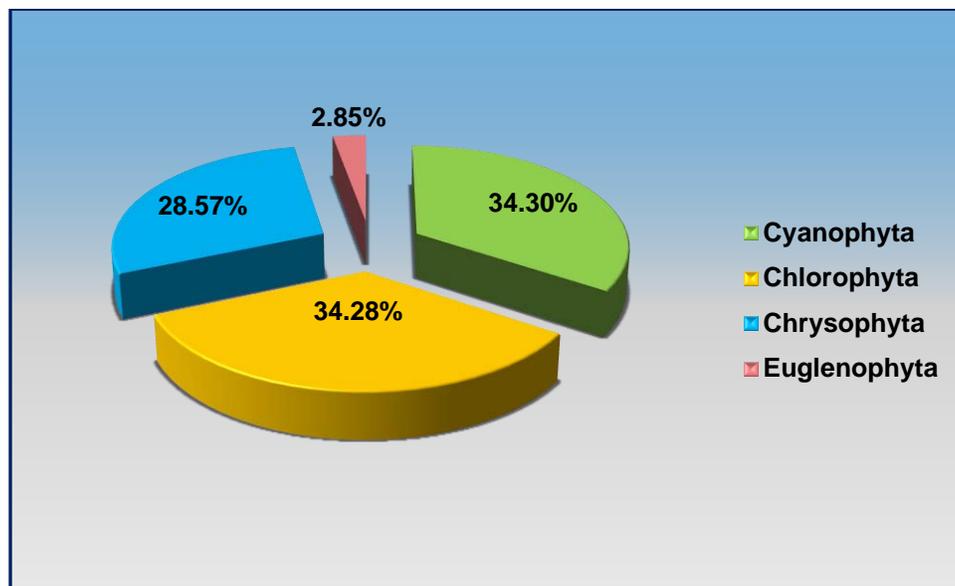


Figura 40. Representación gráfica de las divisiones de fitoplancton.

Análisis de la diversidad de fitoplancton

El índice de Shannon y Weiver maneja un rango de 0.0 hasta 4.5 donde los valores cercanos a cero representan una baja diversidad y valores próximos a 4.5 una elevada diversidad, para este caso todos los sitios muestreados presentaron una baja diversidad con valores inferiores al 0.5 (Tabla 10), esto indica que existen pocas especies que dominan el sistema.

El género dominante es *Phormidium*, cianobacterias con una dominancia de más del 85%, este es un dominio homogéneo ya que dicho género destaca tanto en la evaluación; por sitio de monitoreo como en cada mes de muestreo.

El índice de diversidad de Shannon-Weiver y la concentración de (307,274 Cél/ml) ubican a la laguna de acuerdo a la clasificación de Roldan (1992), como aguas contaminadas (Tabla 10 y 11). Cruz, (2012); encontró para la laguna de Coyuca de Benítez conteos de 118,195 Cél/ml, en su especie más representativa de fitoplancton (*Pseudoanabaena limnética*), esto en un sistema considerado mesotrófico.

Tabla 10. Índice de Shannon-Weiver, por sitio de muestre.

Sitio de muestreo	Índice Shannon-Weiver H'	Género dominante (Cél/ml)	Clasificación del agua según Roldan (1992)
<b>Muelle</b>	0.4357*	<i>Phormidium</i> (348,574) Dominancia 0.86	Aguas contaminadas
<b>Isla</b>	0.4119*	<i>Phormidium</i> (343,701) Dominancia del 0.87	Aguas contaminadas
<b>Carpas 1</b>	0.4186*	<i>Phormidium</i> (340,813) Dominancia 0.87	Aguas contaminadas
<b>Carpas 2</b>	0.4190*	<i>Phormidium</i> (349,657) Dominancia 0.87	Aguas contaminadas
<b>Jabón</b>	0.4682*	<i>Phormidium</i> (344,874) Dominancia 0.85	Aguas contaminadas

\*Valor índice Shannon-Weiver por Sitio de muestreo. Dónde: H': 0 < 1.5: Aguas contaminadas, de 1.5 a 3.0: Aguas moderadamente contaminadas, de 3 a 5: Aguas muy limpias, según Roldán, (1992).

El género más representativo del sistema es *Phormidium* (anexo G; figura 43), está es un alga perteneciente al grupo de las cianobacterias, que reciben este nombre por tener como características principales la capacidad de fijar nitrógeno, esto mediante células especializadas en realizar dicha función (Heterocistos) además de fijar el nitrógeno también producen Geosmina: que es uno de los productos metabólicos que exudan las algas y que se conoce por su aroma característico a “tierra mojada” y por último generan diversas toxinas (Round, 1981). Estas cianobacterias realizan fotosíntesis oxigénica y se dividen por fisión binaria, gemación o fisión múltiple, por lo que una vez teniendo los nutrientes esenciales para su crecimiento, su propagación se produce muy rápidamente convirtiéndolo en un problema para los sistemas acuáticos.

El crecimiento de cianobacterias (*Blooms*) suele asociarse a los excesos de nutrientes principalmente los nitratos y fosfatos (Wetzel, 2001).

Tabla 11. Índice de Shannon-Weiver, por mes de muestreo.

Mes de muestreo	Índice de Shannon-Weiver	Género dominante (Cél/ml)	Clasificación del agua según Roldan (1992)
Marzo	0.2536*	<i>Phormidium</i> (317,349)	Aguas contaminadas
Abril	0.5455*	<i>Phormidium</i> (289,735)	Aguas contaminadas
Mayo	0.2724*	<i>Phormidium</i> (327,276)	Aguas contaminadas
Junio	0.4018*	<i>Phormidium</i> (323,395)	Aguas contaminadas
Julio	0.5287*	<i>Phormidium</i> (300,551)	Aguas contaminadas
Septiembre	0.4400*	<i>Phormidium</i> (362,650)	Aguas contaminadas
Octubre	0.3621*	<i>Phormidium</i> (300,113)	Aguas contaminadas
Noviembre	0.1904*	<i>Phormidium</i> (237,125)	Aguas contaminadas

\*Valor índice Shannon-Weiver por mes de muestreo. Dónde:  $H'$ : 0 < 1.5: Aguas contaminadas, de 1.5 a 3.0: Aguas moderadamente contaminadas, de 3.0 a 5.0: Aguas muy limpias, de acuerdo a Roldán, (1992).

## 10.5. Análisis del índice de saprobiedad

El valor del índice de saprobiedad para la laguna de Zumpango es de 3.37, el cual se ubica en el intervalo de 2.60 a 3.50 el cual establece una clasificación de acuerdo a Sládecek (1972) como *alfa-mesosaprobia*, los meses con mayor valor se registraron durante abril y noviembre con valores de 3.42 y 3.44 (Tabla 12). Esto es el reflejo de la situación biológica del agua en relación con la cantidad e intensidad de descomposición de la materia orgánica.

Tabla 12. *Valor del índice de saprobiedad por mes de muestreo y clasificación de acuerdo a Sládecek (1972).*

Mes de muestreo	Índice de saprobiedad	Clasificación otorgada de acuerdo a Sládecek (1972)
Marzo	3.31	Aguas contaminadas
Abril	3.42	Aguas contaminadas
Mayo	3.41	Aguas contaminadas
Junio	3.34	Aguas contaminadas
Julio	3.32	Aguas contaminadas
Septiembre	3.35	Aguas contaminadas
Octubre	3.38	Aguas contaminadas
Noviembre	3.44	Aguas contaminadas

La laguna tuvo un comportamiento homogéneo en el estudio espacial respecto al índice de saprobiedad, cuyos valores se ubicaron dentro del rango de 2.60 a 3.50; lo que ubica a la laguna como: contaminada (Tabla 13), alfa-mesosaprobia, calidad del agua clase III (Tabla 14), su comportamiento homogéneo se debe en primer lugar al reducido tamaño de la laguna con 1.8 Km<sup>2</sup> y también a la mezcla constante de las aguas de la misma, que distribuyen de manera uniforme la materia orgánica y así también los nutrientes (nitrógeno y fósforo), de los cuales depende la productividad primaria.

Tabla 13. *Valor del índice de saprobiedad por sitio de muestreo y clasificación de acuerdo a Sládecek (1972).*

Sitio de muestreo	Índice de saprobiedad	Clasificación otorgada de acuerdo a Sládecek (1972)
Muelle	3.369	Aguas contaminadas
La Isla	3.376	Aguas contaminadas
Carpas 1	3.375	Aguas contaminadas
Carpas 2	3.374	Aguas contaminadas
Jabón	3.356	Aguas contaminadas

Tabla 14. *Clasificación del índice Saprobio de Pantle y Buck.*

ISPB	Clasificación
1.0-1.5	Limpia, oligosaprobio, calidad del agua clase I
1.6-2.5	Moderadamente contaminada, beta-mesosaprobio, calidad del agua clase II
2.6-3.5	Contaminada, alfa-mesosaprobio, calidad del agua clase III
3.6≥4.0	Muy contaminada, poli-saprobio, calidad del agua clase IV

### 10.6. Análisis Multivariado

#### Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales se utilizó para determinar cuáles son los parámetros que más influyen sobre el comportamiento del sistema; se realizó utilizando 17 variables, dentro de las cuales el componente uno obtuvo 38.59% y el componente dos 59.07% en porcentaje acumulado, como se observa en la tabla 15. El análisis indica que con los componentes uno y dos, pueden explicar el comportamiento de más de la mitad de las variables evaluadas.

Tabla 15. *Componentes principales y porcentaje acumulado.*

Número de Componente	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	6.9471	38.59	38.595
2	3.6862	20.47	59.074
3	2.7532	15.29	74.370
4	1.5481	8.60	82.971
5	1.3177	7.32	90.291
6	1.0872	6.04	96.332
7	0.6603	3.66	100.000

Las variables y las cargas de contribución por las que se encuentra representado el componente uno son los siguientes: profundidad (-0.3400); debido a que de ella depende la disponibilidad y redistribución de los nutrientes ya que al ser un sistema somero este tiene mezclas constantes propiciadas por corrientes de viento y su temperatura cálida, además la concentración de los gases disueltos, principalmente el oxígeno que se ve afectado. El segundo son los sólidos totales disueltos (0.3590) que tiene influencia directa sobre la transparencia, conductividad, la salinidad y la distribución de calor, estas son características importantes que favorecen o no el crecimiento de los organismos fitoplanctónicos (productividad primaria).

Para el segundo componente las variables con mayor carga de contribución son: pH (-0.3980) ya que la laguna funciona con valores de basicidad, esto es determinante en las transformaciones de los nutrientes, principalmente la del nitrógeno por lo que resulta importante en el proceso de nitrificación. Otra variable importante para el componente dos es el amoníaco (0.3810) este parámetro es representativo de la contaminación que existe en la laguna, principalmente por materia orgánica e indica una contaminación reciente. Por último aparece la variable de la DBO (0.3530), que explica el requerimiento significativo de oxígeno que se utiliza para degradar la materia orgánica, esta es una de las principales causas de contaminación y la cual contribuye de manera importante al proceso de eutrofización en la laguna de Zumpango.

En la figura 41, se muestra gráficamente el comportamiento de las variables, el gráfico consta de cuatro cuadrantes numerados en contra de la manecilla del reloj (cuadrante I a cuadrante IV). Las variables se ordenan conforme a la relación que guardan entre sí y su magnitud determina el grado de importancia para ambos componentes. En este análisis de componentes principales se forman dos grupos importantes que explican el comportamiento de la laguna. Del lado derecho en el cuadrante IV del gráfico, tenemos un grupo de variables formado por los nutrientes; fosfatos, fósforo total, nitritos, amoníaco y amonio, esto representa a la elevada carga orgánica y a su disponibilidad de nutrientes que es uno de los principales problemas de la laguna. En el cuadrante tres tenemos otro grupo importante de variables, que destacan por representar el comportamiento fisicoquímico del sistema, en este grupo tenemos; la temperatura, conductividad, salinidad, SDT y O<sub>2</sub>.

De acuerdo a este análisis el comportamiento general de la laguna se puede explicar gracias a estos dos grupos; el de los nutrientes y el de las variables fisicoquímicas del sistema. Por otra parte, se identifica que algunas otras variables como el pH y el POR funcionan con una menor relación con las demás variables.

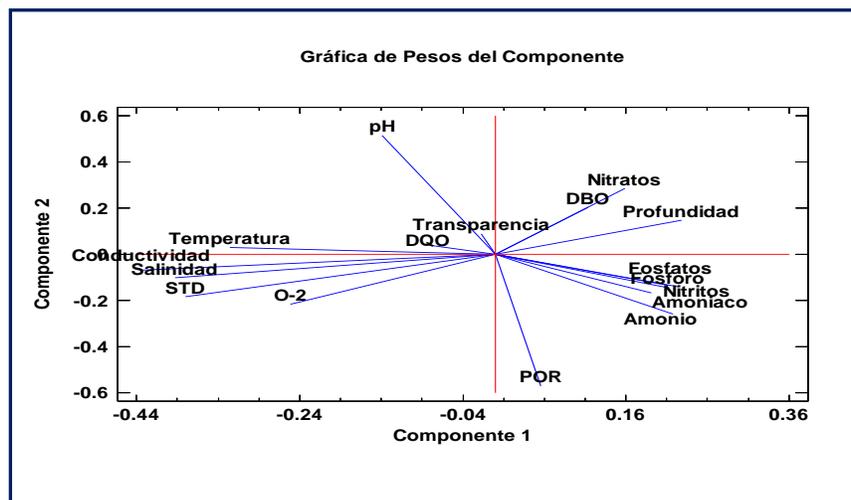


Figura 41. Análisis de Componentes Principales.

## Análisis de Correlación de Pearson

Con este análisis se muestra la relación lineal entre los 18 parámetros utilizados para la evaluar el grado de contaminación de la laguna, muestra las variables con un mayor grado de correlación ( $r \approx 1$ ) de las cuales se puede destacar las siguientes (anexo F; tabla 23).

Conductividad eléctrica y temperatura ( $r=0.6868$ ): ya que la conductividad del agua también depende de la temperatura, mientras más alta la temperatura mayor será la conductividad eléctrica esta aumenta en un 2-3% para un grado centígrado de temperatura del agua, por lo que muchos medidores de conductividad eléctrica se estandarizan a 25 °C.

Conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos ( $r=0.5059$ ), conductividad eléctrica y salinidad ( $r=0.8967$ ): esto es explicable ya que la conductividad depende directamente del material disuelto en el agua, de ello forman parte los compuestos iónicos como carbonatos y bicarbonatos, que son los principales compuestos que están determinando la basicidad y la salinidad de la laguna.

Amonio y amoníaco ( $r=0.9891$ ): el amoníaco de la laguna proviene de la descomposición de la materia orgánica este compuesto rápidamente es transformado a amonio esto debido a la elevada basicidad que tiene la laguna ( $\text{pH} \geq 8.5$ ), estos compuestos forman parte fundamental del ciclo del nitrógeno y el proceso inicial de asimilación por la laguna a pesar de que estos se transforman rápidamente.

Fósforo total y fosfatos ( $r=0.9983$ ): el elemento que con mayor frecuencia limita el desarrollo de la vegetación acuática es el fósforo que por otra parte en cantidades superiores a determinados umbrales puede causar eutrofización.

Índice de saprobiedad y fosfatos ( $r=0.7015$ ) e índice de saprobiedad y fósforo total ( $r=0.6894$ ): estas relaciones establece que el fósforo es determinante en el crecimiento biológico, si bien las concentraciones obtenidas en el análisis físico-químico no indican concentraciones mayores a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ , estas son condiciones óptimas para el crecimiento del fitoplancton.

## Análisis de conglomerados

Para este análisis se utilizaron 18 variables, que son los parámetros de evaluación: físicos químicos y biológicos. Todos evaluados en los nueve puntos de monitoreo de la laguna, con los valores de estos parámetros se formaron conglomerados entre los sitios de muestreo, esto a partir de la mayor cantidad de semejanzas entre el comportamiento de los parámetros.

La relación entre ellos se muestra en la figura 42, donde se establece cuales son los sitios monitoreados que tienen un comportamiento semejante, otorgando un valor de relación el cual siendo más cercano a cero significa más variables con un comportamiento similar. El primer conglomerado está formado por: la isla-superficie y carpas I-superficie, ya que la distancia que marca su relación es menor a cinco, lo que indica que estos dos sitios tienen el comportamiento más similar; esto puede explicarse debido a que ambos sitios se ubican en la zona centro de la laguna. El segundo conglomerado es; Isla fondo, Carpas I fondo y Carpas II fondo, lo que indica que el fondo de la laguna, en la zona centro tiene un comportamiento semejante a causa de la cercanía con el efluente principal de la laguna.

Los sitios analizados a la proximidad del perímetro de la laguna (Muelle y Jabón) tienen la menor relación con el comportamiento central de la laguna acción que puede atribuirse al factor físico de la profundidad, ya que esta influye de manera directa sobre las variables evaluadas de; temperatura, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto y el índice de saprobiedad, y como factor externo la influencia antropogénicas por lo que difiere con la zona centro de la laguna.

Los sitios monitoreados con mayor contaminación por materia orgánica se identificaron en el siguiente orden: Carpas I; sitio más cercano a la entrada de agua del canal Santo Tomas, Muelle; zona de mayor influencia antropogénicas y Jabón; lugar de menor profundidad, hacia donde son arrastrados la mayor parte de los sedimentos debido a la dirección de los movimientos del agua (dirección; este a noroeste).

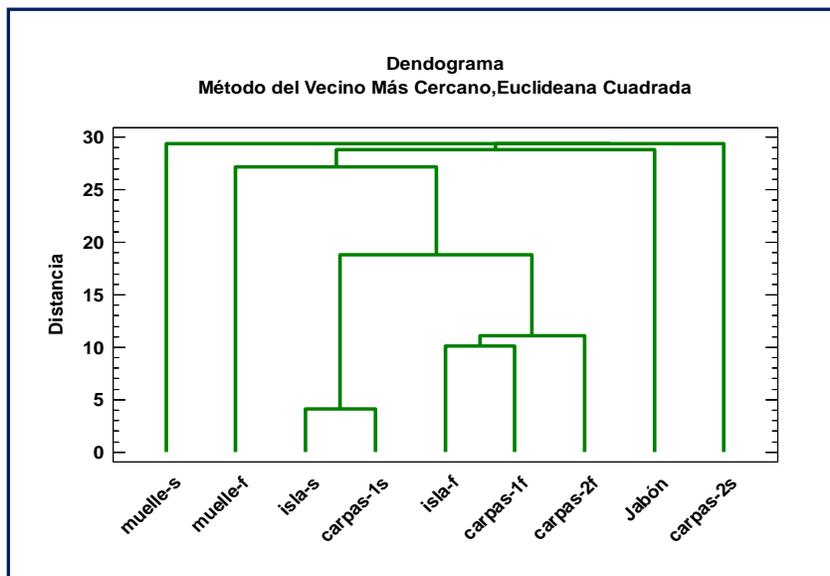


Figura 42. Análisis de Conglomerados.

## 11. CONCLUSIONES

La laguna Zumpango de Ocampo es un sistema somero polimíctico, compuesta de agua dulce, tiene una elevada alcalinidad por la presencia de carbonatos y bicarbonatos, oxidativa en superficie y reductora en el fondo.

Las variables físicas y químicas que se encuentran fuera de los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 son: DBO<sub>5</sub>, DQO, pH y el O<sub>2</sub> y de acuerdo a los Criterios Ecológicos para la Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) son: Transparencia, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>3</sub>.

Se encontró una elevada carga orgánica, lo que aumenta a disponibilidad de nutrientes; amonio, nitritos y fósforo que son la base de la *elevada densidad fitoplanctónica*, aunque con una baja diversidad ya que la dominancia del género *Phormidium* es  $\geq 0.85$ .

El análisis fitoplanctónico de diversidad y abundancia así como los géneros identificados (*Phormidium*, *Euglena*, *Nitzschia*, *Microcystis*, *Navicula*, *Scenedesmus*) ubican a la Laguna de Zumpango como un *Sistema Mesotrófico*.

De acuerdo a los resultados del índice de saprobiedad, con un intervalo de 2.6 a 3.5 ubica a la laguna de Zumpango como *Alfa-mesosaprobia*, *calidad del agua III*. Mientras que el índice de diversidad de Shannon y Weiver (H') con valores de 0 a 1.5 clasifica al sistema como: *aguas contaminadas*.

## 12. RECOMENDACIONES

Es necesario complementar este análisis con una evaluaciones de bacterias patógenas (coliformes totales, fecales y *Escherichia coli*) debido a que estos son organismos que causan enfermedades infecciosas en el ser humano.

Es recomendable realizar una evaluación de contaminantes inorgánicos (metales pesados), principalmente en tejidos de carpa (*Cyprinus carpio*) debido a que es la especie que se comercializa, ya que el último estudio realizado fue en 1998 por la FES Iztacala y en este se encontraron niveles peligrosos de níquel y plomo.

Por último, se recomienda considerar las técnicas de tratamiento de aguas residuales, (mediante organismos biológicos) principalmente en los efluentes que abastecen a la laguna de Zumpango ya que es la causa principal de la elevada carga orgánica.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- Abarca F., 2007, Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: Sánchez A., Herzig M., Peters e., Márquez., Zambrano L. (Eds.) *Perspectiva sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. United States Fish & Wild life Service. Unidos para la conservación A.C. Escuela de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp 147-165 .
- APHA, AWWA, WPCF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.U.S.A. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residual. 19ª. Edición. E.U.A).
- Arredondo, F. J. L. 1986. Breve descripción de los criterios y las técnicas para el manejo y la calidad del agua en estanques de piscicultura intensiva. Dirección General de Acuacultura, Secretaria de Pesca, México, p. 182.
- Arredondo, F. J. L. y Ponce, P. J. T. 1998. Calidad del agua en acuicultura. Conceptos y aplicaciones. AGT. Editores, México, p. 222.
- Aznar Jiménez A. 2000 Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. Revista interdisciplinaria de Gestión Ambiental, vol. 2(23). 12-20 pp.
- Bellinger. E., Sigeo D. 2010. *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators*. Ed. Wiley. University of Manchester U.K, p. 284.
- Berger, W.H. 1989. Global maps of ocean productivity. *In: Figueroa, T. M.G. Santos, Z. D. & Velasco-Gonzales, A. A. 2008. Ficoflora de Xochimilco, parte I: Diatomeas y Clorofitas*. UAM-Xochimilco. México, D.F, p. 116.
- Blancas, A. G. A. 2007. Criterios para establecer estaciones de monitoreo y análisis de parámetros fisicoquímicos. *En: Arredondo-Figueroa, J. L., Díaz-Zavaleta, G. y Ponce-Palafox, J. T. Compiladores. Limnología de presas mexicanas. Aspectos teóricos y prácticos*. AGT S. A. y UAM Editores. México, Capítulo 2: 87-122.
- Boltovskoy, E., 1976. Indicadores biológicos en la oceanografía. *Cienc. Inv. (Bs. As.)* 23 (2): 60-78.
- CE-CCA-001/89. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (*D.O.F. 2 Diciembre de 1989*).

- Cervantes S. A, Marques D. S. M. J, Rivera G. P. (2006). Análisis Estadístico un Enfoque Practico con Statgraphics. Editor UNAM- FES Z, México D. F, p. 1213.
- Cervantes, S. A. (1984). Manual de Técnicas Básicas para el análisis de Ambientes Acuáticos. Material Didáctico. LIB-4, Biología. ENEP-Zaragoza. UNAM, México, p. 106.
- Chapa, S. (1987). *San Gregorio Atlapulco Xochimilco*. México Distrito Federal.: Quetzalcóatl.
- Chapman D., 1994.A. Biological Approach to water Quality Management. Water Pollution Control 69: 415-421.
- CONAGUA. 2012. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Consultado el 19 octubre 2015: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=60>
- CONAGUA. 2013. Calidad del agua de los sistemas más importantes de la república mexicana. Consultado el 15 de abril de 2015 en: [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/.../CALIDAD\\_AGUA\\_2013.xlsx](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/.../CALIDAD_AGUA_2013.xlsx).
- CONAGUA. 2014. Atlas digital del Agua México 2014. Consultado el 20 de diciembre de 2015:<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-17-14.pdf>.
- Contreras E. F. (1994) Manual de técnicas Hidrobiológicas. Editorial Trillas. México, p. 180.
- Contreras, E. 2000. Las lagunas costeras mexicanas y su importancia para la biodiversidad. México 2: (1): 5-20
- Contreras, F. 1985. *Las Lagunas Costeras Mexicanas*. Centro de Eco-desarrollo. SEPESCA. D.F, p. 253.
- Cruz, P. (2013). *Calidad del agua en la Laguna de Coyuca, Guerrero y Geovisualización de los Paisajes Asociados*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- De la lanza Espino G., Hernández Pulido S., Carbajal Pérez J., 2000, Organismos Indicadores de la Calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores), Plaza y Valdés, S.A. DE C.V., México D.F, p. 113.
- De la Lanza, E. G. 1990. Algunos conceptos sobre hidrología y calidad del agua. En: Arredondo F. J. L. y compiladores. La acuicultura en México: de los conceptos a la producción. Instituto de Biología y Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F, pp 181-199.

- Domínguez, P.I. (2006). *Estudio de la diversidad de zooplancton y fitoplancton de la laguna de Zumpango “Estado de México” para su uso en la biomanipulación*. (Tesis de Maestría). UNAM, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, México.
- Elster, H., Ohle, W. 1964. Resultados Limnológicos: Sistema de Calidad del Agua desde el punto de vista Biológico. Instituto de Limnología de la Universidad Freiburg Konstanz/Bodensee. Alemania, p. 217.
- Gama, J. L., Pavón, E., Ramírez, T., & Ángeles, O. (2010). *Análisis de calidad del agua*. Estado de México, México: FES Iztacala, UNAM, p. 119.
- Garay, J., Panizzo, L., Lesmes, L., Ramírez, G., Sánchez, J. Manual de Técnicas Analíticas de Parámetros Físico-químicos y Contaminantes Marinos. Tercera edición. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena, 1993.
- García, D. Y. (2010). *Sistema de Saprobios para la Evaluación Biológica de la Calidad del agua*. Universidad Nacional Autónoma de México. (Tesina de licenciatura), Los Reyes Iztacala Edo. Mex.
- García, G. Rojas, H. R. (2012). *El agua en México*. Fondo de Cultura Económica.
- García, J. L., Roberto, E., & Torres, B. (1995). *Introducción al manejo de datos Limnológicos*. México: Serrano, México, pp 15-35.
- García, L., & Camacho, A.. (2001, febrero 15). Anaerolimnología: pequeña guía para el muestreo en aguas microaeróbicas y anóxicas en lagos y embalses estratificados. *Limnética* (20). pp 179-186.
- Gómez, J. L., Blancas, G., Constanzo, E., Cervantes, A. (2011) Manual de Análisis de aguas naturales y su aplicación a micro escala. Material Didáctico. Laboratorio de Biología. FES- Zaragoza. UNAM, México, p. 86.
- Gonzales, I. 2006. Establecimiento y Determinación de los Índices de Calidad del Agua. Enfoque Basado en Lógica difusa. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería de Sistemas. Departamento de Investigación de Operaciones, p. 133.
- Goyenola, G. (2007) Guía para la utilización de las valijas viajeras. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos.
- Guevara V., 1996. Control de Calidad del Agua: Métodos de Análisis para la Evaluación de la Calidad del agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y ciencias del Ambiente. Lima, Perú, pp. 3-5.

- Gutiérrez, C. D. (2012). *Evaluación de la calidad del agua en el lago del parque alameda oriente*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Guzmán M. y Rojas G. (1976), —Ecología de las lagunas costeras (Coyuca de Benítez) I. Cursos de Biología de Campo. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Haering. 1975 Citado: de Chemical Reaction in Organic and Inorganic Constrained Systems.
- Hallegraeff. G. (1992). A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia* 79-99.
- HANNA Instruments, 2008. Manual de Instrucciones MAN83200. Chicago, IL. USA. 131 pp.
- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. Consultado el 1 marzo de 2016: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/15/15120.pdf>.
- INEGI. 2015. Cartas Topográficas y Conjunto de datos Espaciales. Consultado 03 marzo 2016: [inegi.org.mx/search?tx= 86 ethodic&q= 86 ethodic&site=sitio INEGI \\_collection&client=INEGI\\_Default&proxystylesheet=INEGI\\_Default&getfields=\\* &entsp=a \\_\\_inegi\\_politica&lr=lang\\_es%257Clang\\_en&lr=lang\\_es%257Clang\\_en&filter=](http://inegi.org.mx/search?tx=86ethodic&q=86ethodic&site=sitio_INEGI_collection&client=INEGI_Default&proxystylesheet=INEGI_Default&getfields=* &entsp=a__inegi_politica&lr=lang_es%257Clang_en&lr=lang_es%257Clang_en&filter=)
- Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. (2003) Agua para Todos; Agua para la vida. Recuperado de [http:// www. un. Org / esa /sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf).
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2012. Plan Estratégico para la Recuperación Ambiental de la Laguna de Zumpango, Diagnostico e Identificación de Retos, Problemas, Estrategias, Objetivos, Acciones y Proyectos Prioritarios. Consultado el 1 abril 2016:file:///C:/Users/EBENEZER3/Downloads/ Plan %20laguna % 20 de % 20Zumpango%20.pdf
- Jeppesen. E. (1998). The ecology of shallow lakes. Trophic interactions in the pelagial. Doctor `s dissertation (Dsc) Silkeborg.
- Kolwitz, R., and M. Marson. (1902) Principios de la Evaluación Biológica de Agua después de su Flora y Fauna. Pp. 33- 72.
- Lampert, W., Sommer, U. (1997). *Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams*. Oxford University Press. N. York, p.382.

- Lara V., Moreno R., Amaro M., 1996, Conceptos básicos y técnicas de laboratorio, Libros de texto, manuales de prácticas y antologías, Universidad Nacional autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México D.F, p. 224.
- Layana, B. (2013). *Estudio de la calidad del agua del río Babahoyo y sus afluentes: Índice de Saprobio*. (Tesis de Maestría) Guayaquil. Ecuador.
- Lind, N. C., 1995, Policy goals for health and Safety, Risk Analysis, Vol. 15, No. 6,639-644.
- Lozada, M. M. (2014). *Evaluación del nitrógeno en sus diferentes formas y su relación con las bacterias nitrificantes en el lago de Xochimilco*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Manifestación de Impacto Ambiental modalidad particular del sector hidráulico. Ayuntamiento del Estado de México (2003). Proyecto Ecoturístico: Laguna de Zumpango.
- Margalef, R. 1983. Limnología. Ed. Omega Barcelona, p. 1010.
- Martínez de Bascaran, G., 1976. “El índice de calidad del agua”, Ingeniería Química, pp. 45 – 49.
- Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, 1983.H.
- Moreno, J.L., S. Licea, y H. Santoyo, 1996. Diatomeas del Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California Sur, SEP-FOMES/PROMARCO. 273 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-059-2013. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre, categoría de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-028/1-SCFI-2008. Análisis de agua. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas.
- Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

- Norma Oficial Mexicana. NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
- Norma Oficial Mexicana. NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Ortega M., 1984. Catálogo de algas continentales recientes en México. Universidad Nacional Autónoma de México, México, p. 566.
- Ortega M., Alvarado V., Sánchez J., Hernández r., Arredondo M., Martínez I. Abundancia y distribución del fitoplancton en un lago hiposalino, Michoacán, México. 2011. *Biológicas*. 13(2):15-20
- Ortega M.1995. Ficología de México algas Continentales. AGT Editor. México, D.F, p. 221.
- Pantle. R. y Buck. H. 1955. Die Biologis Uberwachung der Gewasser und die Darstellung der Ergebnisse. Gas und Wasserfach. 96: 604.
- Peña, M. E., Korfiantis, G. P., Patel, M., Lippincott, L., and Meng, X. 2005. Adsorption of as (V) and as by nanocrystalline titanium dioxide. *Water Res.*, 39, 2327- 2337
- Pinilla, G. 1998 Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Centro de investigaciones científicas. Fundación Universitaria de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, p. 67.
- Prescott, G. W. (1962). *Algae of the Western Great Lakes Area*. Revised Edition. Dubuque, Iowa. W.M.C. Brown Co. Pub. 977 pp.
- Ramírez, M. J. (2012). *Evaluación vegetativa de la Zona Ecológica, Zumpango de Ocampo Estado de México*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Reid, G. K., and R.D. Wood. 1976. Ecology of inland waters and estuaries.
- Rodier, J. 1990. Análisis de aguas. Aguas naturales, aguas residuales y aguas de mar. Omega, Barcelona, p. 1025.
- Rodier, J. Análisis de Aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Omega, Barcelona, 1981. 990 p.
- Roldán P. 1992. Fundamentos de Limnología neotropical. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín- Colombia, p. 529 .

- Romero, J., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Mateo, M-A.&Regnier, C. 1992. The Detritic Compartment in a Posidoniaoceanic Meadow: Litter features, decomposition rates and mineral stocks. P.S.Z.N.I: Mar. Ecol., 13(1):69-83.
- Romero, R. R. (1999). *Calidad del agua*. México Distrito Federal.: Alfa Omega, S.A.
- Romero, R. R., I. L. S. González, F. A. Moreno y E. A. Ontiveros. 1982. Manual de técnicas de análisis fisicoquímicos para aguas. SARH. Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. 5ª Edición. México, p. 319.
- Round, F. E. 1981. *The ecology of the algae*. Syndicate of the University of Cambridge. Gran Bretaña, p. 653.
- Salazar, M. E. (1981). *Contribución al conocimiento de la biología de Girardinichthy sinnominatus (Pisces, Goodeidae) del embalse Requena, Edo. De Hidalgo*. (Tesis Profesional) ENEP-Iztacala, UNAM. México.
- Saldaña, M. S. (2002). *Estudio avi-faunístico en la Laguna de Zumpango, Estado de México*. (Tesis Profesional) FES-Iztacala, UNAM. México.
- Salusso, M. M. & Moraña, L. B., 2002, 'Comparación de índices bióticos utilizados en el monitoreo de dos sistemas lóticos del noreste argentino', *Revista de Biología Tropical*, vol. 50, pp. 327-336.
- Sawyer CN, McCarty PI (1994). *Chemistry for Sanitary Engineers*, 4<sup>th</sup> Ed. Mc Graw- Hill Book Company.
- SEMARNAT/CONAGUA. (2011). Diagnóstico del agua perspectiva a futuro para 2030. Recuperado de <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/diagnosticos-del-agua>.
- Seoánez Calvo.M., 2003, *Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias*, Mundi-prensa libros, España, p. 465.
- Tebutt. (2002). *Fundamentos del control de la calidad del agua*. México. : Limusa S.A de C.V.
- Turk, A., Turk, J., Wittes, J. 2004. *Ecología Contaminación Medioambiente*. McGraw Hill, p. 227.
- Utermöhl, H., 1948. Zur Vervollkomnung der quantitativen Phytoplankton methodik. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.*, 9: 1-38

- Varona C., Gutiérrez M., 2006, Composición del fitoplancton de dos lagunas costeras del Pacífico tropical. En: *Hidrobiología*. 16 (2): 159-174
- Vázquez, S. G., Castro, M. G., Gonzáles, M. I., Pérez, R. R., Castro, B.T. (2006). Bioindicadores como herramienta para determinar la calidad del agua. *ContactoS*, 60(4) 41-48
- Vicente, E., Hoyos, C., Sánchez, P., (2005). *Cambra, J. Protocolos de Muestreo y Análisis de Fitoplancton*. Barcelona: URS.
- Wetzel, R. G., (1981). *Limnología*. Editorial Omega. Barcelona, p. 440.
- Wetzel, R.G, Likens G.E, 1991, *Limnological analysis*. 2 Ed. New York, W. B. Saunders Company, p. 391.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology. Lakes and rivers Ecosystem*. Third Edition. Academic Press. Philadelphia, p. 1006.

**ANEXOS**

Anexo A.

Tabla 16. *Efecto del pH en las proporciones de especies iónicas de bióxido de carbono en agua (Datos tomados de Hutchinson, 1957).*

pH	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
4	0.996	0.004	1.25 x 10 <sup>-9</sup>
5	0.962	0.038	1.20 x 10 <sup>-7</sup>
6	0.725	0.275	9.1 x 10 <sup>-5</sup>
7	0.208	0.792	2.6 x 10 <sup>-4</sup>
8	0.025	0.972	3.2 x 10 <sup>-3</sup>
9	0.003	0.966	0.031
10	0.000	0.757	0.243

Tabla 17. *Relación entre la conductividad y la dureza del agua de acuerdo a la OMS.*

ppm	mS/cm <sup>2</sup>	°f	Dureza
0-70	0-140	0-7	Muy blanda
70-150	140-300	7-15	Blanda
150-250	300-500	15-25	Ligeramente dura
250-320	500-640	25-32	Moderadamente dura
320-420	640-840	32-42	Dura
Superior a 420	≥420	≥42	Muy dura

Anexo B.

Tabla 18. *Media mensual en precipitación y temperatura (INEGI, 2015).*

Mes	Precipitación media mensual (mm)	Temperatura media mensual. (°C)
Marzo	61.4	13.8
Abril	15.9	18.0
Mayo	128.0	15.9
*Junio	128.1	16.1
*Julio	141.0	15.2
*Agosto	117.0	15.9
*Septiembre	168.2	15.7
Octubre	57.3	14.9
Noviembre	17.5	14.5
Diciembre	10.2	13.2

\*Las celdas en color azul muestran los meses que abarca el periodo de lluvias para la zona del Valle de México donde se encuentra ubicada la Laguna de Zumpango.

## Anexo C.

Tabla 19. Resumen de parámetros físico, químicos y nutrientes.

Parámetro	Promedio para cada mes de muestreo							
	marzo	abril	mayo	junio	julio	septiembre	octubre	noviembre
Profundidad (m)	2.28	2.26	1.98	1.75	1.65	1.19	2.51	2.32
Temperatura (°C)	16.93	24.34	22.94	25.18	23.32	24.35	19.95	20.39
Transparencia (cm)	26.0	19.0	17.0	14.0	11.0	12.0	13.0	11.0
Oxígeno disuelto (mg L <sup>-1</sup> )	4.13	5.46	3.61	6.52	5.97	7.14	4.80	5.64
pH	8.58	8.92	9.85	8.99	8.54	8.87	7.94	7.78
POR (mV)	634.88	610.50	552.24	614.43	639.62	623.44	673.60	685.28
Salinidad (‰)	0.23	0.22	0.26	0.29	0.25	0.29	0.25	0.26
Sólidos totales disueltos (mg L <sup>-1</sup> )	235.33	241.44	265.0	299.67	262.89	302.0	239.81	260.22
Conductividad eléctrica (mS/cm)	399.4	445.0	518.78	602.11	514.89	596.33	486.22	483.22
Demanda bioquímica de oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )	71.25	132.40	101.04	59.56	132.44	47.23	81.37	66.89
Demanda química de oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )	104.77	170.79	164.55	208.23	238.12	147.79	148.45	148.23
Amoníaco NH <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.54	0.35	0.37	0.21	0.42	0.42	2.16	0.81
Amonio NH <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.57	0.38	0.29	0.22	0.43	0.44	2.30	0.86
Nitrato NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	10.09	7.12	10.21	4.43	8.62	2.27	1.11	7.08
Nitrito NO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	24.78	11.23	7,78	0.42	0.10	0.10	0.32	0.12
Fósforo P (mg L <sup>-1</sup> )	0.65	0.92	0.43	0.51	0.46	0.23	0.48	0.61
Fosfato PO <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	1.98	2.82	1.35	1.56	1.41	0.73	1.48	1.88

Tabla 20. Promedio de las variables fisico-químicas para cada sitio de muestreo.

Parámetro	Promedio para cada sitio de monitoreo				
	Muelle	Isla	Carpas I	Carpas II	Jabón
Profundidad (m)	2.27	1.98	2.11	2.52	1.05
Temperatura (°C)	21.31	19.37	22.10	22.33	24.26
Transparencia (cm)	14.0	15.0	18.0	16.0	13.0
Oxígeno disuelto (mg L <sup>-1</sup> )	4.91	5.4	5.36	5.46	6.42
pH	8.51	8.69	8.77	8.76	8.67
POR (mV)	636.10	630.23	624.87	623.01	634.65
Salinidad (‰)	0.27	0.25	0.25	0.25	0.25
Sólidos totales disueltos (mg L <sup>-1</sup> )	276.75	262.75	260.65	261.25	242.2
Conductividad eléctrica (mS/cm)	524.9	496.05	498.9	500.6	511.1
Demanda bioquímica de oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )	104.5	87.75	82.85	71.4	85.8
Demanda química de oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )	233.85	137.6	150.5	132.6	188.2
Amoníaco NH <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.65	0.55	0.70	0.65	1.0
Amonio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.61	0.58	0.70	0.67	1.03
Nitrato NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	4.74	5.69	7.42	7.81	5.99
Nitrito NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.43	0.20	0.15	0.13	0.11
Fósforo P (mg L <sup>-1</sup> )	0.50	0.56	0.56	0.52	0.55
Fosfato PO <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	1.56	1.71	1.72	1.62	1.68

## Anexo D.

Listado taxonómico de fitoplancton encontrado en la laguna de Zumpango (Prescott, 1982).

**División Cyanophyta****Clase Cyanophyceae****Orden Chroococcales****Familia Chroococcaceae****Género** *Merismopedia* Meyen**Género** *Aphanocapsa* Nägeli**Género** *Chroococcus* Nägeli**Género** *Dactylococcopsis* Hansgirg**Género** *Rhabdoderma* Schmidle & Lauterborn  
*Rhabdoderma* ef lineare**Género** *Gleocapsa* Kuetzing**Género** *Microcystis* Kuetzing  
*Microcystis aeruginosa***Orden Pseudanabaenales****Familia Pseudanabaenaceae****Género** *Pseudanabaena***Orden Ocillatoriales****Familia Oscillatorineae****Género** *Oscillatoria* Gomont**Género** *Phormidium* Kuetzing**Orden Nostocales****Familia Nostoceae****Género** *Cylindrospermopsis* Seenayya & Raju**Género** *Aphanizomenon* Morren*Aphanizomenon flos equa* var *Klebanni***División Chlorophyta****Clase Chlorophyceae****Orden Oedogoniales****Familia Hydrodictyaceae****Género** *Pediastrum* Smitt  
*Pediastrum* sp.**Orden Volvocales****Familia Volvocaceae****Género** *Volvox* Linnaeus  
*Volvox* sp.**Género** *Gonium* Prescott  
*Gonium* sp.**Familia Chlamydomonadaceae****Género** *Chlamydomonas* Ehrenberg**Orden Chlorococcales****Familia Oocystaceae****Género** *Chlorella* Bayerinck**Género** *Oocystis* Nägeli  
*Oocystis* sp.**Género** *Ankistrodesmus* Corda  
*Ankistrodesmus* sp.**Familia Scenedesmaceae**

**Género** *Scenedesmus* Meyen  
*Scenedesmus* sp.

**Género** *Crucigenia* Morren

**Género** *Actinastrum* Lagerheim

**Género** *Micractinium* Fresenius  
*Micractinium* sp.

**Orden** Desmidiáles

**Familia** Closteriaceae

**Género** *Closterium* Nitzsch ex Ralfs  
*Closterium* sp.

**División** Chrysophyta

**Clase** Bacillariophyceae

**Orden** Bacillariales

**Familia** Bacillariaceae

**Género** *Bacillaria* Gmelin

**Género** *Nitzschia* Hassall

**Orden** Naviculales

**Familia** Naviculaceae

**Género** *Navicula*o. Muller

**Género** *Caloneis* Cleve

**Género** *Pinnularia* Ehrenberg

**Familia** Diploneidaceae

**Género** *Diploneis* Ehrenberg ex Cleve

**Familia** Pleurosigmataceae

**Género** *Gyrosigma* Ehrenberg

**Orden** Cymbellales

**Familia** Cymbellaceae

**Género** *Cymbella* Agardh

**Clase** Coscinodiscophyceae

**Orden** Thalassiosirales

**Familia** Stephanodiscaceae

**Género** *Cyclotella* Kützing  
*Cyclotella* sp.

**Clase** Fragilariaceae

**Orden** Fragilariales

**Familia** Fragilariaceae

**Género** *Diatoma* Bory de St-Vincent

**División** Euglenophyta

**Clase** Euglenophyceae

**Orden** Euglenales

**Familia** Euglenaceae

**Género** *Euglena* Ehr

Anexo E. Tabla 21. *Presencia, ausencia y abundancia relativa de los géneros fitoplanctónicos durante todos los meses de muestreo.*

Género		Número de células promedio	Mrz.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Sep.	Oct.	Nov
<i>Merismopedia</i>	1	4	0.00208043	0.00178456	0.00195631	0.00106948	0.00126636			
<i>Aphanocapsa</i>	2	8-10	0.01170242	0.00612639	0.00668406	0.00497308	0.00651269			
<i>Chroococcus</i>	3	4	0.00163462	0.00191335	0.00239104	0.00135468			0.00298691	0.00204159
<i>Dactylococcopsis</i>	4	6-12		0.00309079	0.00405753			0.00275586		
<i>Rhabdoderma</i>	5	8-12				0.02335033	0.01794006			
<i>Gleocapsa</i>	6	4		0.00485696	0.00333297	0.00356494	0.00428149	0.00255901		
<i>Microcystis</i>	7	Coloniales 30-40	0.00780162	0.01159047	0.00950984	0.00935796	0.01055298	0.01205689	0.0104542	0.01553381
<i>Pseudanabaena</i>	8	16-18		0.04034587			0.03152325	0.03234855	0.03582429	
<i>Phormidium</i>	9	40-45	0.95848426	0.89868457	0.95754085	0.93048376	0.90301815	0.92050655	0.93117031	0.96757872
<i>Cylindrospermopsis</i>	10	15		0.00551927				0.00565936		
<i>Pediastrum</i>	11	16		0.00735903	0.004927	0.00941143	0.00361816			
<i>Volvox</i>	12	Colonial 30- 40	0.00715148	0.00643915						
<i>Gonium</i>	13	16		0.00382669			0.00410058	0.00498679		
<i>Chlamydomonas</i>	14	1			0.00117741	0.00092688	0.00107037	0.00131231		
<i>Chlorella</i>	15	Coloniales 30-40	0.00466239				0.00292468		0.00560046	0.00685707
<i>Oocystis</i>	16	4	0.00401226	0.00345874	0.00318806	0.00306584		0.00314955		
<i>Ankistrodesmus</i>	17	6-8							0.00143745	
<i>Scenedesmus</i>	18	4				0.00078429	0.00072363			
<i>Crucigenia</i>	19	4					0.00651269	0.00498679		

Continuación de la tabla 21. *Presencia/ausencia y abundancia relativa de los géneros fitoplanctónicos durante todos los meses de muestreo*

<i>Actinastrum</i>	20	7-8						0.00118108	0.00224019	
<i>Micractinium</i>	21	6-7					0.00135681		0.00168014	0.00346182
<i>Closterium</i>	22	1							0.00042937	
<i>Bacillaria</i>	23	8-16				0.00573955	0.00316589	0.00505241		
<i>Nitzschia</i>	24	1	0.00137457	0.00115905	0.0009057	0.00101601	0.0010553	0.00096783	0.00653387	0.00372811
<i>Navicula</i>	25	1		0.00292521	0.00338731	0.00379666		0.00160759	0.00093341	
<i>Caloneis</i>	26	1				0.00017825		0.00018044		
<i>Pinnularia</i>	27	1				0.00019607			0.00026135	0.00028849
<i>Diploneis</i>	28	1				0.0002139				0.0002441
<i>Gyrosigma</i>	29	1						0.00031167		
<i>Cymbella</i>	30	1							0.00028002	0.00026629
<i>Cyclotella</i>	31	1			0.00063399	7.1299E-05	0.00018091	8.202E-05	0.00016801	
Diatoma	32	1	0.00072444	0.00062552						
Euglena	33	1	0.00037151	0.00029436	0.00030794	0.00044562	0.00019598	0.00029527		

Tabla 22. Clasificación de fitoplancton, abundancia relativa y valor del índice de saprobiedad.

División	Género	Abundancia absoluta	Abundancia relativa	Valor indicativo ubicado en las tablas de (G)	Valor indicativo propuesto para la laguna de Zumpango	
Cyanophyta	<i>Merismopedia</i>	461	0.001034976	0	1.0	
	<i>Aphanocapsa</i>	2043	0.004586672	0	2.0	
	<i>Chroococcus</i>	652	0.001463784	0	1.0	
	<i>Dactylococcopsis</i>	560	0.001257238	0	1.0	
	<i>Rhabdoderma</i>	2500	0.005612668	0	1.0	
	<i>Gleocapsa</i>	1088	0.002442633	0	1.0	
	<i>Microcystis</i>	4795	0.010765096	0	2.0	
	<i>Pseudanabaena</i>	8175	0.018353423	0	2.0	
	<i>Phormidium</i>	415008	0.931720777	0	3.5	
	<i>Cylindrospermopsis</i>	645	0.001448068	0	2.0	
	Chlorophyta	<i>Pediastrum</i>	735	0.001650124	0	1.0
		<i>Volvox</i>	784	0.001760133	3.0	2.0
<i>Gonium</i>		268	0.000601678	3.0	1.0	
<i>Chlamydomonas</i>		1054	0.002366301	2.0	2.0	
<i>Chlorella</i>		944	0.002119343	0	2.0	
<i>Oocystis</i>		77	0.00017287	0	1.0	
<i>Ankistrodesmus</i>		92	0.000206546	0	1.0	
<i>Scenedesmus</i>		736	0.001652369	2.0	1.0	
<i>Crucigenia</i>		192	0.000431053	0	1.0	
<i>Actinastrum</i>		336	0.000754343	0	1.0	
<i>Micractinium</i>		23	5.16365E-05	0	1.0	
<i>Closterium</i>		1358	0.003048801	3.5	1.0	
Chrysophyta		<i>Bacillaria</i>	423	0.000949663	3.5	1.0
		<i>Nitzschia</i>	657	0.001475009	4.0	2.0
		<i>Navicula</i>	60	0.000134704	3.5	2.0
		<i>Caloneis</i>	22	4.93915E-05	0	1.0
	<i>Pinnularia</i>	25	5.61267E-05	3.05	1.0	
	<i>Diploneis</i>	46	0.000103273	0	1.0	
	<i>Gyrosigma</i>	9	2.02056E-05	2.0	1.0	
	<i>Cymbella</i>	9	2.02056E-05	2.0	1.0	
	<i>Cyclotella</i>	108	0.000242467	2.0	1.0	
	<i>Diatoma</i>	96	0.000215526	3.5	1.0	
	Euglenophyta	<i>Euglena</i>	461	0.001034976	3.0	2.0

G= peso indicador de las especies Limno-saprobias de 5 a 1 (5; prácticamente una masa de solo una especie, 4 muy abundante, 3 abundante, 2 rara, 1 prácticamente una especie).

Anexo F.

Tabla 23. *Análisis de Correlación de Pearson.*

r	Prof.	T°C	Transp.	O2	pH	STD	Sal	C_E	POR	DBO5	DQO	NH3	NH4	NO2	NO3	P	PO4	ISPB
Prof.																		
T°C	-0.3445																	
Transp.	-0.1481	0.2301																
O2	-0.7236	0.4627	0.1651															
pH	-0.1786	0.4393	0.1182	0.0606														
STD	-0.2710	0.3355	-0.0615	0.2536	0.2318													
Sal	-0.3184	0.3396	-0.1109	0.3304	0.0428	0.4546												
C_E	-0.3681	0.6868	0.0084	0.4580	0.2321	0.5059	0.8967											
POR	0.0014	-0.3458	-0.0781	0.1650	-0.9668	-0.1629	0.0333	-0.1326										
DBO5	-0.0511	0.1276	0.1623	-0.0345	0.1387	-0.2881	-0.2576	-0.1496	-0.1741									
DQO	0.0237	0.1247	0.0320	-0.0179	0.0147	0.1064	0.1846	0.1811	-0.0321	0.4063								
NH3	0.1760	-0.3448	-0.0740	-0.0853	-0.5498	-0.4186	-0.0746	-0.1961	0.5243	-0.0840	-0.0973							
NH4	0.1942	-0.3460	-0.0648	-0.0844	-0.5858	-0.4248	-0.0837	-0.2037	0.5560	-0.1004	-0.0968	0.9891						
NO2	-0.0735	0.2740	-0.0858	0.1782	-0.0740	0.5361	0.4823	0.4942	0.1395	-0.4034	-0.0368	-0.3953	-0.3804					
NO3	-0.0934	-0.0874	0.0840	0.0006	0.3534	-0.1230	-0.3081	-0.2959	-0.3466	0.1653	-0.0407	-0.3054	-0.3253	-0.2545				
P	0.0918	-0.0474	0.0154	-0.0593	-0.1495	-0.1613	-0.3638	-0.2976	0.1421	0.1904	-0.0703	-0.0245	-0.0096	-0.0865	-0.0347			
PO4	0.0894	-0.0461	-0.0170	-0.0655	-0.1418	-0.1583	-0.3725	-0.3034	0.1317	0.1943	-0.0722	-0.0257	-0.0118	-0.0909	-0.02070	0.9983		
ISPB	-0.1409	0.4792	0.1472	-0.2337	-0.3123	0.2083	0.1486	0.3302	0.2972	-0.1982	-0.1687	0.3864	0.3971	0.5528	0.0647	0.6894	0.7015	

Anexo G

Figura 43. Género *Phormidium*; fitoplancton más dominante y representativo de la laguna de Zumpango de Ocampo.

