



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Análisis y determinación de la calidad del agua mediante  
el uso de bacterias indicadoras en el Lago de Pátzcuaro,  
Michoacán.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGA**

**P R E S E N T A:**

**BEATRIZ CHÁVEZ MARTÍNEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M. en C. GUSTAVO PÉREZ ORTIZ**

**2014**





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.

## Hoja de datos del jurado

### 1. Datos del alumno

Beatriz  
Chávez  
Martínez  
5539608952  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Biología  
406009278

### 2. Datos del tutor

M. en C.  
Gustavo  
Pérez  
Ortiz

### 3. Datos del sinodal 1

Dr.  
Javier  
Carmona  
Jiménez

### 4. Datos del sinodal 2

Dra.  
Marisa  
Mazari  
Hiriart

### 5. Datos del sinodal 3

Dr.  
Luis  
Zambrano  
González

### 6. Datos del sinodal 4

Dra.  
Julieta  
Jujnovsky  
Orlandini

### 7. Datos del trabajo escrito.

Análisis y determinación de la calidad del agua mediante el uso de bacterias  
indicadoras en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán.

64 p.  
2014

*A mi familia que siempre ha estado presente y me alienta a seguir adelante. A mi madre Margarita que me ha brindado la fortaleza para enfrentar la vida; a mi padre Nicolás que me ha inculcado el valor de la educación. A mi hermana Gabriela que me ha acompañado en todas mis aventuras y mi hermano Felipe que siempre ha apoyado cada una de mis decisiones.*

*A la Q.F.B. María Luisa Quijada que ha sido mi tutora y amiga y que sin sus enseñanzas, ejemplo, sabiduría y apoyo no estaría terminando esta etapa de mi vida.*

*A mis compañeras y cómplices de la vida Marlene Medellín, Jazmín Terán, Etel Sánchez y Nancy Plata. Su amistad, hermandad y motivaciones hacen que la vida sea más bella de lo que es.*

*A todas aquellas personas que me alentaron a no claudicar bajo ninguna circunstancia.*

*Gracias.*

## AGRADECIMIENTOS

A nuestra máxima casa de estudios, Universidad Nacional Autónoma de México, que me permitió crecer a nivel intelectual, espiritual y humano.

Al Instituto de Ecología por brindarme la oportunidad de desarrollarme a nivel profesional en sus instalaciones y permitirme realizar la presente investigación.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la Fundación Gonzalo Río Arronte, que como parte del *Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro*, facilitaron el financiamiento para realizar la presente investigación.

Al Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO), UNAM, por las facilidades prestadas para realizar el procesamiento de las muestras. En particular al Dr. Víctor Jaramillo Luque y a la Bioquímica Maribel Nava Mendoza.

Al señor Rubén Quirino y familia; que gracias a su sabiduría y conocimiento del lago, nos facilitó la exploración y el conocimiento del sitio de estudio.

Agradezco de manera especial a mi tutor Gustavo Pérez Ortiz, que sin su apoyo, paciencia y correcciones este trabajo no hubiera sido posible.

A la Dra. Marisa Mazari Hiriart por permitirme trabajar en su equipo de investigación y por todo el apoyo que me ha brindado.

A mis sinodales Dra. Marisa Mazari Hiriart, M. en C. Gustavo Pérez Ortiz, Dr. Luis Zambrano González, Dr. Javier Carmona Jiménez y Dra. Julieta Jujnovsky Orlandini; que sin sus atinadas observaciones este trabajo no sería el mismo.

## ÍNDICE

|  | Página |
|--|--------|
| 1. Introducción  | 6      |
| 1.1. Organismo indicador   | 8      |
| 1.2. Parámetros bacteriológicos de calidad de agua                   | 9      |
| 1.3. Parámetros fisicoquímicos del agua                              | 10     |
| 1.4. Leyes y normas  | 12     |
| 2. Antecedentes  | 14     |
| 3. Justificación   | 15     |
| 4. Objetivos   | 16     |
| 5. Área de estudio   | 17     |
| 5.1. Métodos de campo  | 18     |
| 5.2. Métodos analíticos  | 20     |
| 5.3. Análisis estadísticos   | 21     |
| 6. Discusión de resultados   | 22     |
| 6.1. Resultados de parámetros fisicoquímicos                         | 22     |
| 6.2. Resultados de nutrientes  | 27     |
| 6.3. Resultados bacteriológicos                                      | 34     |
| 7. Resultado de análisis estadísticos                                | 40     |
| 7.1. Análisis estadísticos de parámetros fisicoquímicos y nutrientes | 40     |
| 7.3. Análisis estadísticos para bacterias CF y EF                    | 44     |
| 8. Discusión general   | 45     |
| 9. Conclusiones  | 47     |
| Referecias   | 48     |
| Anexos   | 55     |

## 1. Introducción

Los ecosistemas de agua dulce son fundamentales en distintas áreas, desde el punto de vista biológico, porque intervienen en diversos procesos a diferentes escalas. Así mismo, estos ecosistemas son esenciales para las actividades humanas, ya que brindan servicios ecosistémicos básicos para el bienestar humano y biológico. Estos servicios son los de provisión (alimento, agua y fibras), regulación (condiciones ambientales) y culturales (espirituales, recreativos y educacionales). La ausencia o decremento de alguno de ellos, puede llegar a ocasionar conflictos económicos, sociales o políticos (Balvera y Cotler, 2009).

Históricamente las civilizaciones más importantes se han asentado a los márgenes de los cuerpos de agua. Sin embargo, a lo largo del tiempo el uso inadecuado y la sobre explotación, han provocado el deterioro y la disminución de la calidad del agua y con esto la pérdida de los servicios ambientales (WWF, 2011, 2013).

De forma natural, los lagos a lo largo del tiempo sufren un proceso de envejecimiento o colmatación. Este proceso radica en la reducción gradual del espejo de agua y su volumen. Inicia cuando los sistemas reciben material proveniente de su cuenca de drenaje, aumentando el material de azolve y la carga de nutrientes. Finalmente, el sistema se ve invadido por comunidades vegetales y se transforma en un ecosistema terrestre (Mazzeo *et al.*, 2001).

El tiempo en que se lleva a cabo este proceso oscila en cientos o incluso miles de años, dependiendo de la naturaleza y origen del sistema acuático. No obstante esto ha cambiado, actualmente los lagos se modifican de forma acelerada, debido a que han sido convertidos en receptores de aguas residuales de origen urbano, agrícola e industrial (Whish-Wilson, 2002; Sánchez-Chávez *et al.*, 2007; WWF, 2011).

Bajo este escenario se han favorecido procesos como la eutrofización, el cual es causado principalmente; por el aumento de fósforo y nitrógeno, los cuales a su vez provocan un aumento en la productividad primaria (Ryding y Rast, 1992; Holdren y Taggart, 2001).

Para establecer el estado que guardan los sistemas acuáticos, así como su uso potencial, es preciso realizar estudios para determinar la calidad de agua. La evaluación de los sistemas acuáticos se puede realizar con base en las características físicas, químicas y biológicas que incluyen los microbiológicos. Así mismo, estos estudios pueden ser utilizados como una herramienta en la toma de decisiones para el control de residuos, tratamiento de agua y por lo tanto; para la conservación de ecosistemas acuáticos (Martínez, 1996; Seoáñez, 1999; Sánchez-Chávez *et al.*, 2011).

Es importante mencionar que los ecosistemas acuáticos pueden funcionar como reservorios de microorganismos potencialmente patógenos, como bacterias, virus, protozoarios y helmintos (Ford y Hamner, 2010). En este sentido, la evaluación microbiológica es de vital importancia; ya que estos microorganismos pueden ser los responsables de las principales enfermedades gastrointestinales, que son causa de mortalidad en el mundo (WHO, 2003; UNICEF, 2008; Hernández *et al.*, 2011).

Por lo anteriormente descrito, el presente estudio contempla una investigación de la calidad microbiológica del agua del Lago de Pátzcuaro, con bacterias indicadoras de contaminación fecal, complementado con parámetros fisicoquímicos; con la finalidad contribuir con información útil para la toma de decisiones y mejoramiento de la cuenca.

## 1.1. Organismo indicador

De acuerdo con Gerba (2009) un indicador microbiológico de contaminación ambiental; es aquel que es sensible o tolerante a ciertas condiciones ambientales y que puede indicar la posible presencia de un microorganismo patógeno. Así la presencia o ausencia del mismo, brinda información sobre las condiciones del medio.

Para que un organismo sea considerado un indicador, debe cumplir las siguientes características (Ashbolt *et al.*, 2000; Campos, 2001; WHO, 2003; Cortes-Lara, 2003; Younis, 2008):

- Debe encontrarse en cantidades suficientes para ser cuantificable.
- Debe mostrar resistencia al estrés ambiental.
- El método de detección debe ser de bajo costo. Además de ser exacto, preciso y específico en un corto periodo de tiempo.

Uno de los indicadores que resultan de gran utilidad para determinar la calidad microbiológica de los cuerpos de agua, son los indicadores de contaminación fecal. Para considerar estos microorganismos debe partirse del hecho de que ciertas bacterias no patógenas se encuentran presentes en las heces fecales de todos los organismos homotermos. Estas bacterias pueden ser aisladas y cuantificadas con facilidad con métodos sencillos de laboratorio. La presencia de los mismos puede sugerir que es probable que existan patógenos entéricos en el medio (Ashbolt *et al.*, 2000).

Los indicadores de contaminación fecal, deben cubrir además los siguientes requerimientos:

- Deben ser efectivos para todos los tipos de agua.
- Estar presentes siempre que se encuentre el organismo patógeno entérico.
- Deben tener un tiempo de vida más largo que el organismo patógeno.
- No deben reproducirse en cuerpos de agua.

Las bacterias, virus y parásitos, funcionan como indicadores de contaminación fecal (Tabla 1). Ya que permiten establecer el nivel de perturbación de los ecosistemas acuáticos y determinar la calidad del agua en función de su uso,

además de que pueden ser utilizados para entender su efecto en la salud pública (Campos, 1999; Arcos *et al.*, 2005).

Tabla 1. Microorganismos indicadores de contaminación fecal de agua (Ashbolt *et al.*, 2000; Campos, 2001; WHO, 2003; Cortés-Lara, 2003; Younis, 2008).

| Microorganismo indicador                 | Características   | Grupos u especies   |
|--|---|---|
| <b>Bacterias</b>                         | Bacterias entéricas que colonizan el tracto digestivo de organismos homeotermos y se encuentran normalmente en las heces. | Coliformes, Enterococos<br><i>Clostridium</i> , <i>Pseudomonas</i> y <i>Aeromonas</i> |
| <b>Virus</b>                             | Presentes únicamente en el tracto digestivo de individuos enfermos.   | Poliovirus, rotavirus, y bacteriofagos (colifagos)                                    |
| <b>Parásitos (protozoos y helmintos)</b> | Patógenos entéricos causantes de enfermedades gastrointestinales.   | <i>Ascaris lumbricoides</i> , <i>Giardia lamblia</i> y <i>Cryptosporidium parvum</i>  |

## 1.2. Parámetros bacteriológicos de calidad de agua

A nivel internacional los indicadores microbiológicos más utilizados para determinar la calidad del agua para uso y consumo humano, recreación y de contacto primario es el grupo de coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF) y enterococos fecales (EF). Mismos que pertenecen a la flora intestinal de los organismos homeotermos (USEPA, 2011; WHO, 2001).

El grupo de coliformes fecales se compone de un grupo de bacterias bacilos gram negativos, no esporulados que pertenecen a la familia enterobacteriaceae. Tienen como característica principal la fermentación de lactosa y producción de gas en menos de 24 horas a una temperatura de 37°C (Tabla 2).

El grupo de enterococos fecales se caracteriza por presentar microorganismos anaerobios facultativos, que crecen en presencia de NaCl al 6.5 %, a una temperatura entre 20 a 45°C, en un rango de tiempo entre 24 a 72 horas; además de que pueden crecer en condiciones extremas de pH ( 9.6 ) (Tabla 2) (Folabella *et al.*, 2006; Fisher y Phillips, 2009).

Comparado con el grupo de CF, los EF presentan una mayor tolerancia a las condiciones ambientales y se presentan con mayor frecuencia en heces de

animales y humanos (WHO, 2011; Méndez, 2004; APHA, 2005; Fisher y Phillips 2009).

Tabla 2. Bacterias indicadoras de contaminación fecal, consideradas en las normas internacionales para calidad de agua (Shufang, 2002; Suárez, 2002; APHA, 2005; OMS, 2006).

| Bacteria indicadora         | Grupo  | Genero   |
|-----------------------------|--|--|
| <b>Coliformes fecales</b>   | Bacilos gram negativos, aerobios o anaerobios facultativos que fermentan la lactosa a 44.5°C.                                  | <i>Escherichia</i> , <i>Enterobacter</i> , <i>Klebsiella</i> y <i>Citrobacter</i>  |
| <b><i>Streptococcus</i></b> | Cocos gram positivos, anaerobios y anaerobios facultativos. Crecen en medios enriquecidos con sangre o suero.                  | <i>Streptococcus pneumoniae</i> , <i>S. mutans</i> , <i>S. viridans</i> , <i>S. thermophilus</i> , <i>S. constellatus</i> , <i>S. pyogenes</i> , <i>S. agalactiae</i> , <i>S. agalactiae</i> , <i>S. zooepidemicus</i> . |
| <b><i>Enterococcus</i></b>  | Cocos gram positivos, anaerobios, con crecimiento a 35°C, a pH 9.6; en medios de caldo de cultivo (6.5 % de cloruro de sodio). | <i>Enterococcus faecalis</i> *, <i>E. faecium</i> *, <i>E. durans</i> y <i>E. mundii</i> .   |

\* Forman parte del tracto digestivo de organismos homeotermos.

### 1.3 Parámetros fisicoquímicos del agua

Para evaluar la condición de los ecosistemas acuáticos, se consideran diversos aspectos físicos, químicos y microbiológicos (Martínez, 1996). Dentro de los elementos físicos se considera los sólidos totales disueltos, conductividad específica, turbidez, transparencia y temperatura. En tanto que las características químicas son determinadas por elementos como nitrógeno, fósforo, oxígeno disuelto y pH (Barrenechea, 2009).

Los sólidos disueltos pueden ser de carácter orgánico e inorgánico. En el primer caso la materia se combina con hidrógeno, carbono, nitrógeno y fósforo. Mismos que forman material susceptible a la degradación por bacterias (carbohidratos, proteínas y grasas). Los sólidos inorgánicos son sustancias inertes como arenas, limos, arcillas, aceites y sales minerales (DOF, 2000; Barrenechea, 2009).

La conductividad específica hace referencia a la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Este fenómeno se debe a la presencia de sólidos inorgánicos como cloro, nitratos, sulfatos y aniones de fósforo, Na, Mg, Ca, Fe<sup>3+</sup> y Al<sup>3+</sup>. La expresión numérica se reporta en micromhos por

centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) o microsiemens por centímetro  $\text{mS}/\text{cm}$  (Martínez, 1996; DOF, 2010).

Los nutrimentos se originan como producto del metabolismo de diversos organismos que posteriormente son liberados durante la descomposición bacteriana o bien, son el resultado de productos químicos. Estos se dividen en compuestos derivados del nitrógeno y fósforo. En el primer caso, hace referencia a amonio, nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ). De forma natural, las fluctuaciones de estos compuestos se ven influenciados principalmente por la descomposición de vegetales acuáticos; sin embargo, si los valores se registran por encima de las requeridas por el ecosistema; se comienza a estimular el crecimiento de algas e indica posibles condiciones tróficas (Martínez, 1996).

En el segundo caso, el fósforo está presente en todos los cuerpos de agua. Se encuentra disuelto en forma de polifosfatos u ortofosfatos. En condiciones normales su valor fluctúa entre 0.0005 a 0.020 mg/L y en aguas residuales su valor puede incrementarse hasta 200 mg/L. Una concentración que se encuentre por encima de los valores permitidos, genera condiciones de anoxia y crecimiento masivo de algas (Carpenter, 1998; DOF, 2009).

La cantidad de oxígeno disuelto es esencial y repercute en el crecimiento y abundancia de la vida acuática. Proviene de la atmósfera y la fotosíntesis que se genera dentro de los ecosistemas acuáticos. La concentración del mismo dependerá de varios factores. El producto generado es consumido por organismos y reacciones químicas orgánicas e inorgánicas (DQO, DQO) (APHA, 2005).

El pH es la concentración del ión hidrógeno y participa en diversos procesos químicos y biológicos. Su valor oscila entre 0 y 14 y es regulado por el balance de  $\text{CO}_2$ , iones  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

#### **1.4 Leyes y normas**

En México las leyes vigentes (1982-2004) que constituyen la base para el control de la contaminación de los cuerpos de agua de acuerdo a su uso, son las siguientes:

- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (1988).
- Ley de Aguas Nacionales (1992).
- Ley Federal sobre Metrología y Normalización (1992).
- Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (1997).

En cada una de estas leyes se consideran los límites permisibles de contaminantes así como el valor de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para cada uso.

Además se cuenta con las normas oficiales mexicanas. La NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) establece los límites máximos permisibles (LMP) para agua de uso y consumo humano, la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) considera el límite permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales. Así mismo, la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998); establece los límites para las descargas de aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Respecto a los límites permisibles de descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) establece que el límite de coliformes fecales (CF) (promedio diario y mensual) no deberá exceder de 1000 y 2000 NMP/100 mL (Número Más Probable) o UFC/100 mL (Unidades Formadoras de Colonia), dependiendo del tipo de muestreo. En el caso de la Ley Federal de Derechos en Materia del Agua, se plantea como límite 1000 NMP por cada 100 mL; para uso en fuente de abastecimiento para uso público urbano, riego agrícola y protección a la vida acuática (agua dulce y humedales) (LFDMA, 2007).

A nivel internacional existen varias regulaciones en relación con los parámetros microbiológicos. Los estándares de calidad de la US Environmental Protection Agency, plantean que la media geométrica de 5 muestras, no debe exceder de 126 UFC/100 mL de CF para contacto primario y 1000 UFC/ 100 mL para contacto secundario. Para EF se plantea un límite de 33 UFC/100 mL (USEPA, 2012).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda como valor mínimo 100 CF/ 100 mL para contacto primario; mientras que para uso en riego agrícola se recomienda un valor menor a 1000 CF /100 mL en el 80% de las muestras. En tanto, para enterococos (EF) se contempla como límite máximo permisible 33 UFC/100 mL. Mientras que La Comunidad Europea (Directiva 2000/60/CE) establece que promedio logarítmico no deberá ser mayor a 200 NMP/100mL (OMS, 2006; DOUE, 2008).

## 2. Antecedentes

El Lago de Pátzcuaro ha sido uno de los sistemas acuáticos más estudiados en el país. Históricamente se pueden establecer tres etapas de investigación a partir de 1936 hasta el 2014. Las investigaciones rebasan más de 80 estudios y 32 programas. La mayor parte de los programas se enfocan al sector pesquero, mientras que solo seis de estos están relacionadas a la recuperación ambiental (Bernal-Brooks, 2008; Huerto *et al.*, 2009) (Anexo I y II).

En los programas han participado diferentes instituciones académicas y gubernamentales; Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Comisión de Pesca (COMPESCA), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), Presidencias municipales, Subcomités de Planeación para el Desarrollo Regional (SUPLANDER), Centro Regional de Investigación Pesquera (CRIP), Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA), Secretaría de Política Social del Estado de Michoacán (SEPSOL), Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA) como parte de la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo (UMSNH); Instituto Nacional de Tecnología del agua (IMTA) y Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI) (IMTA-FGRA, 2004; Huerto *et al.*, 2008, 2009).

Entre los programas enfocados a la calidad de agua, se cita el Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro, al que se suscribieron esfuerzos de coordinación inter-institucional e intersectorial, coordinados por SEMARNAT, CONAGUA, IMTA y la Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA). Mismo que comenzó a operar a partir del 2003 hasta la actualidad.

### 3. Justificación

El Lago de Pátzcuaro, es considerado uno de los siete lagos más extensos e importantes del país (SEMARNAT, 2008; CONAGUA, 2011), sin embargo actualmente enfrenta serios problemas de deterioro ambiental, provocados principalmente por las actividades antropogénicas, así como un manejo inadecuado de su cuenca de drenaje (Sánchez-Chávez *et al.*, 2011; Amador y Huerto, 2011). Como consecuencia, el espejo de agua, la profundidad y calidad han disminuido considerablemente en las últimas décadas (Téllez y Mott, 1976; Mazari-Hiriart, 1981; Chacón-Torres, 2000; Camarena 2003).

Bajo esta condición, el Lago de Pátzcuaro ha sufrido un proceso de cambio transitando de una condición de oligotrófia a eutrófia, donde los principales factores que han favorecido esta condición son: la deforestación de la cuenca, intensificación de actividades agropecuarias, erosión hídrica y descarga de aguas residuales (Téllez y Mott, 1976; Mazari-Hiriart, 1981; Chacón-Torres, 2000; Camarena 2003; Sánchez-Chávez *et al.*, 2011; Amador y Huerto, 2011).

A pesar de que son diversos los estudios que se han realizado, la mayor parte están enfocados a aspectos limnológicos, flora, fauna y de tipo pesquero; sin embargo, la condición negativa del lago requiere estudios que permitan evaluar el grado de perturbación así como el impacto de las actividades humanas y su posible repercusión a nivel ambiental y humano. Por lo que se requiere un estudio a nivel microbiológico con bacterias indicadoras de calidad de agua; ya que a partir de un método sencillo y relativamente rápido es posible conocer la condición actual. Además de que un estudio de esta naturaleza permitirá tomar decisiones enfocadas a la conservación y recuperación del Lago de Pátzcuaro y su cuenca de drenaje, especialmente en el control de vertidos, tratamiento de aguas y conservación del ecosistema.

## 4. Objetivos

### 4.1 Objetivo general

- Determinar la calidad del agua mediante indicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos en un ciclo anual, con el fin de identificar el nivel de deterioro antropogénico en el Lago de Pátzcuaro.

### 4.2 Objetivos particulares

- Cuantificar las bacterias coliformes fecales y enterococos fecales como indicadores microbiológicos de calidad de agua.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad específica y nutriente con el fin de caracterizar el sistema.
- Realizar un análisis cualitativo con estudios previos para determinar la tendencia de los indicadores microbiológicos en las últimas tres décadas.

## 5. Área de estudio

El Lago de Pátzcuaro se ubica en las coordenadas 19° 27' N, 19° 44' N, 101° 26' N, y 101° 53' N a una altitud de 1,265 m.s.n.m. (Orbe-Mendoza *et al.*, 2002).

Se clasifica como un lago tropical por su ubicación, con un clima tipo C (w1) (w) b (i') g; templado subhúmedo, temperatura media anual de 16.3°C, temperatura máxima de 37°C y un mínima 5°C, de acuerdo al sistema Köppen, modificado por García (1988). La temporada de evaporación abarca los meses junio a enero y los meses de anegamiento de febrero a mayo (De Buen, 1941, 1944; Fisher *et al.*, 2003; Guerrero *et al.*, 2008).

El Lago de Pátzcuaro tiene forma de letra "C" y de acuerdo a su morfología, se identifican tres regiones; la parte norte denominada Seno de Quiróga, la región central conocida como Cuello y la zona sur constituidas por los Senos Ihuatzio y Erongarícuaro (De Buen, 1944; IMTA-FGRA, 2004). En el lago se encuentran siete islas habitadas (en dirección norte a sur): Pacanda (860 m<sup>2</sup>), Yunuén (500 m<sup>2</sup>), Tecuena (320 m<sup>2</sup>), un islote "La Tecuenita", Janitzio (560m<sup>2</sup>), Jarácuaro (1,850 m<sup>2</sup>), isla que como tal ha desaparecido y es posible llegar por carretera, Urandén Morelos y Urandén Morales (230 m<sup>2</sup>) (Oseguera, 2011).

Actualmente la cuenca del Lago de Pátzcuaro presenta una mezcla de relictos de bosque, tierras utilizadas para la agricultura y pastizales secundarios (Orbe-Mendoza *et al.*, 2002). Se estima que solo el 31% del total de la cuenca está cubierta por bosque (2,900 y 2,100 m.s.n.m.).

La vegetación acuática, está representada por 57 especies incluidas en 24 familias. En la zona norte se registran hidrófitas emergentes en la orilla y en las zonas pantanosas; mientras que en la zona limnética se observa un color verdoso más intenso respecto a las demás zonas. La zona sur se caracteriza

por presentar hidrófitas emergentes, sumergidas y en mayor grado flotantes (IMTA-FGRA, 2004).

En cuanto al tipo de suelo que rodea el lago predominan Andosoles, Luvisoles, Acrisol Órtico y Gleysol. Debido a las características de los tres primeros son muy susceptibles a la erosión; en cambio los suelos Gleysoles se encuentran en zonas donde se acumula y se estanca el agua, siendo poco susceptibles a la erosión. La mayor extensión se encuentra cubierta por rocas basálticas, seguido de andesitas, riolitas, aluviones y escorias volcánicas (Bardbury, 2000).

### **5.1. Métodos de campo**

Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron tres muestreos durante un ciclo anual, abarcando la temporada de lluvias, secas y secas cálidas. El primer muestreo se realizó durante los meses de agosto y septiembre de 2011 (lluvias), el segundo en diciembre del 2011 (secas frías) y el tercero en abril de 2012 (secas cálidas). Se establecieron diez puntos de muestreo (Tabla 4; Figura 1), tomando como base el estudio microbiológico realizado por Mazari-Hiriart (1981).

Las muestras se colectaron por triplicado, a un metro de profundidad con una botella muestreadora de acero inoxidable. Se conservaron a 4°C y posteriormente se transportaron a las instalaciones del Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO), UNAM en Morelia Michoacán para su análisis.

Se midieron in situ los parámetros fisicoquímicos: temperatura, oxígeno disuelto, conductividad específica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y pH por medio una sonda multiparamétros YSI modelo 6600M-V2 (ISY Ohio).

La profundidad fue medida con una sondaleza y la transparencia con un Disco de Secchi.

Tabla 4. Ubicación de los sitios de colecta en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán.

| Zona   | Clave | Localidad       | Latitud | Longitud |
|--------|-------|-----------------|---------|----------|
| Norte  | 1     | Tzintzuntzan    | 19°39'  | 101°33'  |
|        | 2     | San Jerónimo    | 19°40'  | 101°34'  |
| Centro | 3     | Cuello          | 19°38'  | 101°36'  |
|        | 4     | Pacanda         | 19°36'  | 101°39'  |
|        | 5     | Erongarícuaro   | 19°34'  | 101°38'  |
|        | 6     | Janitzio        | 19°35'  | 101°40'  |
| Sur    | 7     | Jarácuaro       | 19°32'  | 101°39'  |
|        | 8     | Camino a Hitzio | 19°33'  | 101°38'  |
|        | 9     | Ihuatzio        | 19°33'  | 101°36'  |
|        | 10    | Embarcadero     | 19°32'  | 101°37'  |

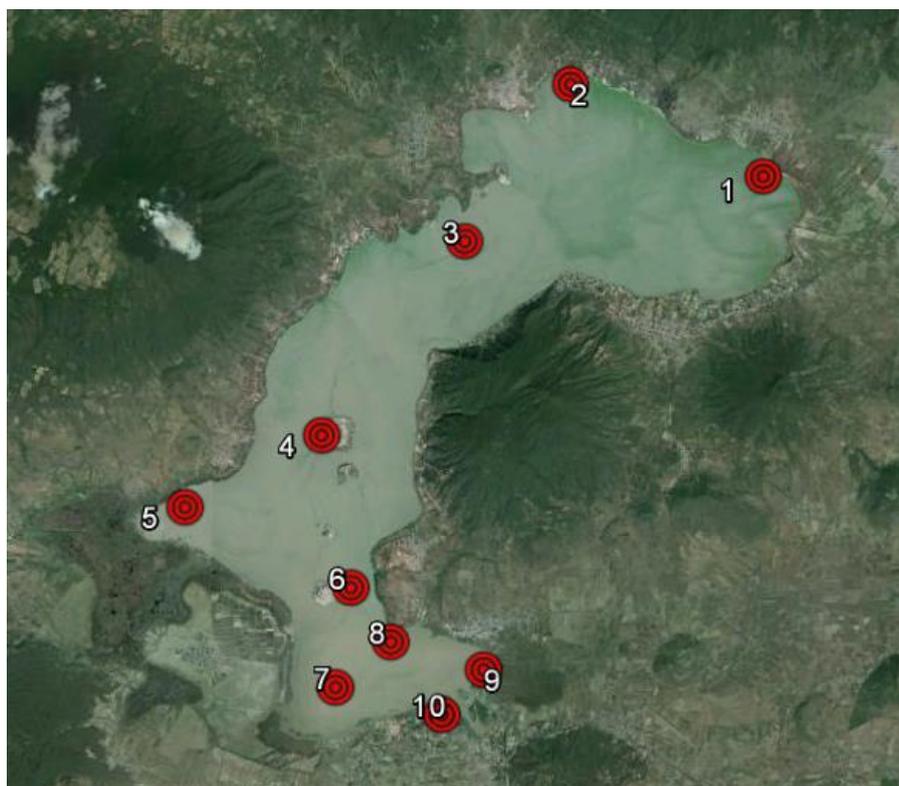


Figura 1. Sitios de colecta en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012. Imagen tomada de Google Earth ©2013. 1, Tzintzuntzan; 2, San Jerónimo; 3, Cuello; 4, Pacanda; 5, Erongarícuaro; 6, Janitzio; 7, Jarácuaro; 8, Camino Hitzio; 9, Ihuatzio; 10, Embarcadero.

## 5.2. Métodos analíticos

Para el análisis bacteriológico, se determinaron coliformes fecales y enterococos fecales, empleando el método de filtración a través de membrana (Murray, 1995; APHA, 2005). Se utilizaron membranas de acetato de celulosa de 0.45  $\mu\text{m}$  (Millipore MF tipo HA, Millipore Corp Bedford). Dada la naturaleza de las muestras, se realizaron tres diluciones seriadas  $10^0$ ,  $10^{-1}$  y  $10^{-2}$  en un buffer de fosfatos a un pH 7. Para realizar la primera dilución se tomó un mililitro de la muestra y se colocó en un tubo de ensaye con 9 mL de buffer, homogenizando el mismo con un vórtex modelo SI-T233; se repitió el mismo procedimiento para obtener las siguientes diluciones.

Para coliformes fecales se utilizó el medio Agar M-FC (Becton Dickinson, Cockeysville, MD, USA) y para enterococos fecales el Agar KF (Becton Dickinson, Cockeysville, MD, USA). Posteriormente las coliformes fecales se incubaron a  $44.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$  durante 24 horas, mientras los enterococos fecales se incubaron a  $35.0 \pm 2^\circ\text{C}$  por 48 horas. Al terminar el tiempo de incubación, las bacterias se cuantificaron y se reportaron en unidades formadoras de colonia en 100 mL (UFC/100 mL) (Murray, 1995; APHA, 2005). Para dar una idea general del origen de la contaminación microbiológica, es posible usar la proporción de CF/EF (Toranzos *et al.*, 2007). Dónde se indica que una proporción  $>4$  es evidencia de una contaminación de origen humano. Un valor entre 2 y 4 una mezcla de ambos, pero donde predomina la contaminación de tipo humano; mientras que una proporción entre 0.7 a 0.2, indica una mezcla de contaminantes, donde predomina la contaminación de tipo animal. Finalmente un valor  $<0.7$  indica una evidencia de contaminación animal (Toranzos *et al.*, 2007).

Para realizar el análisis de nutrientes se utilizaron las técnicas propuestas en el manual de métodos estandarizados (HACH, 2005). Se utilizó un espectrofotómetro marca HACH Modelo DR2400 (Loveland, CO). Específicamente se utilizó el método de silicato (0.23 a 30.00 mg/L  $\text{NH}_3\text{-N}$ ) para analizar nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ). Para nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) se utilizó el método de reducción por cadmio (0.01 a 0.50 mg/L  $\text{NO}_3\text{-N}$ ). Mientras que para el nitrógeno total (Nt) se empleó el método de digestión con persulfato. (10 a 50

mg/L N)(0.5 a 25.0 mg/L N). Para la cuantificación de ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) se empleó el método de aminoácidos (0.23 a 30 mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$ ) y ácido ascórbico PhosVer 3 USEPA (0.02 a 2.50 mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$ ). Por último, para fósforo total (Pt) se empleó el método PhosVer3 con digestión ácida USEPA (0.06 a 3.50 mg/L P) y el método de molibdato digestión ácida con persulfato (1 a 100 mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$ ). Para los métodos de Nt y Pt, se utilizó el digester Digital Reactor Block 200 marca HACH modelo DRB200 (Loveland, CO) (HACH, 2005).

En lo que se refiere a la investigación documental, se reunieron 12 estudios realizados entre 1936 a 2012; referentes a la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua (Anexo III y V). Con base en lo anterior se realizó una comparación cualitativa con el fin de analizar el comportamiento y transformación del lago a lo largo de las últimas décadas. Dentro del aspecto microbiológico se consideró el trabajo realizado por Mazari-Hiriart (1981) y se compararon los sitios 1, Tzintzuntzan; 3, Cuello; 4, Pacanda; 5, Erongarícuaro; 6, Janitzio; 7, Jarácuaro y 9, Ihuatzio. Mismos que coinciden con el presente estudio.

De igual manera, se compararon los resultados con las normas nacionales e internacionales enfocados a los límites permisibles para las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales; así como protección de vida acuática y de aguas usadas con fines recreativos.

### **5.3. Análisis estadísticos**

Se realizó la prueba Kruskal-Wallis con el fin establecer diferencias significativas entre los parámetros registrados en cada sitio y las tres temporadas. La prueba Kruskal-Wallis es una prueba no paramétrica que utiliza intervalos de datos de poblaciones, con medianas de tres o más muestras independientes para poner a prueba la hipótesis nula. Esta hipótesis considera que no existen diferencias entre los intervalos analizados (Triola, 2009). Para realizar esta prueba se utilizó el programa STATGRAPHICS Centurion XVI versión 16.1.15. (Warrenton, 2013).

## 6. Discusión de resultados

### 6.1. Resultados de parámetros fisicoquímicos

A lo largo del ciclo de muestreo los sitios San Jerónimo y Cuello registraron la profundidad máxima, con un promedio de 8 m, mientras que en el sitio Ihuatzio se registró la profundidad mínima (2 m). Los sitios restantes (Tzintzuntzan, Erongarícuaro, Janitzio, Jarácuaro, y Camino Hitzio) registraron en promedio 3.5 m (Fig.2).

Si se considera el estudio realizado por Mazari-Hiriart (1981), se pueden comparar de manera cualitativa siete sitios que coinciden en ambos estudios; Tzintzuntzan, Cuello, Pacanca, Erongarícuaro, Janitzio, Jarácuaro e Ihuatzio. En ambos casos se utilizó una sondaleza para medir este parámetro.

Como se observa en la figura 3, las regiones más afectadas por la pérdida de profundidad son Tzintzuntzan, Pátzcuaro y Erongarícuaro.

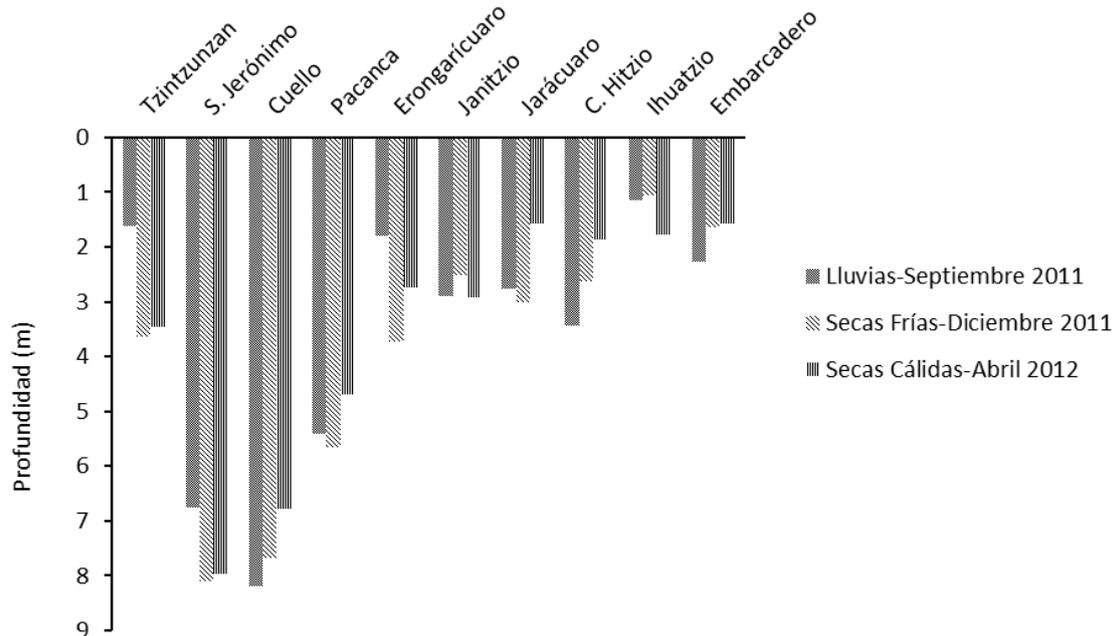


Figura 2. Profundidad registrada en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

Esta disminución puede deberse a varios factores, tales como evaporación, extracción, azolvamiento y otras causas. En el primer caso, SEMARNAT (2000) reporta una disminución en la precipitación en los últimos 16 años; lo cual afecta la profundidad. En conjunto con el proceso de azolve provocado por la disminución de la cobertura vegetal.

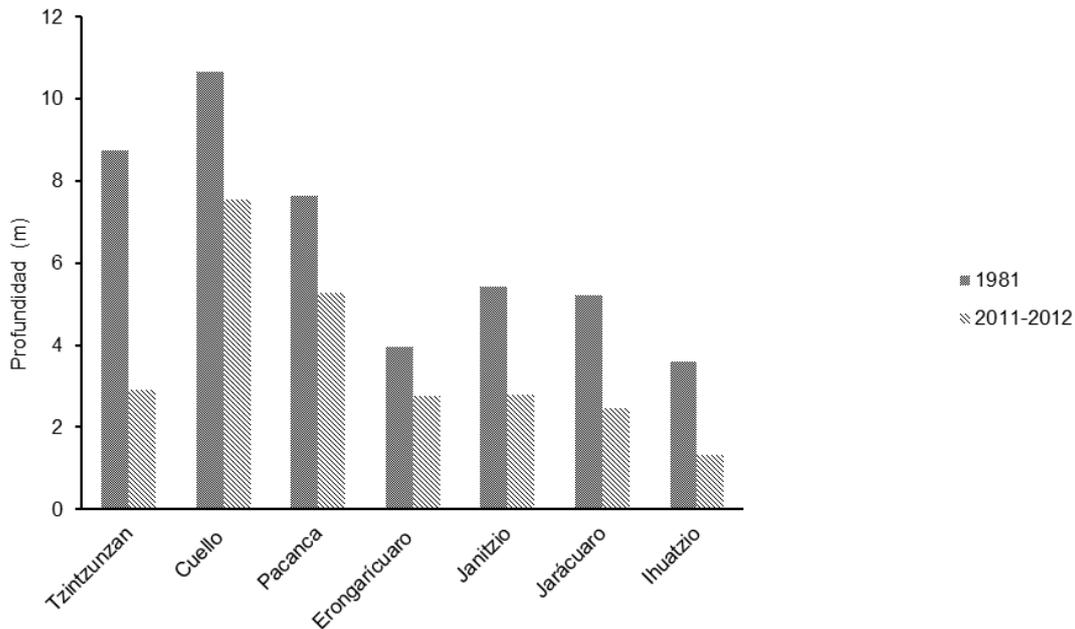


Figura 3. Profundidad del Lago de Pátzcuaro 1981 y 2011-2012.

Con respecto a la transparencia, los datos obtenidos en el ciclo 2011-2012 no superaron 30 cm. Además de que los valores registrados fueron distintos en las tres zonas (norte, centro y sur). Comparado con estudios previos (Anexo V) se observó una reducción de por lo menos 70 cm en las tres zonas del lago en los últimos 30 años.

La temperatura osciló entre 15 a 21°C y los valores de pH fluctuaron entre 7.4 a 8.7; lo que indica que se trata de un sistema alcalino (Fig.4). No se encontraron diferencias significativas entre los sitios de muestreo para estos datos (Tabla 6 y 7).

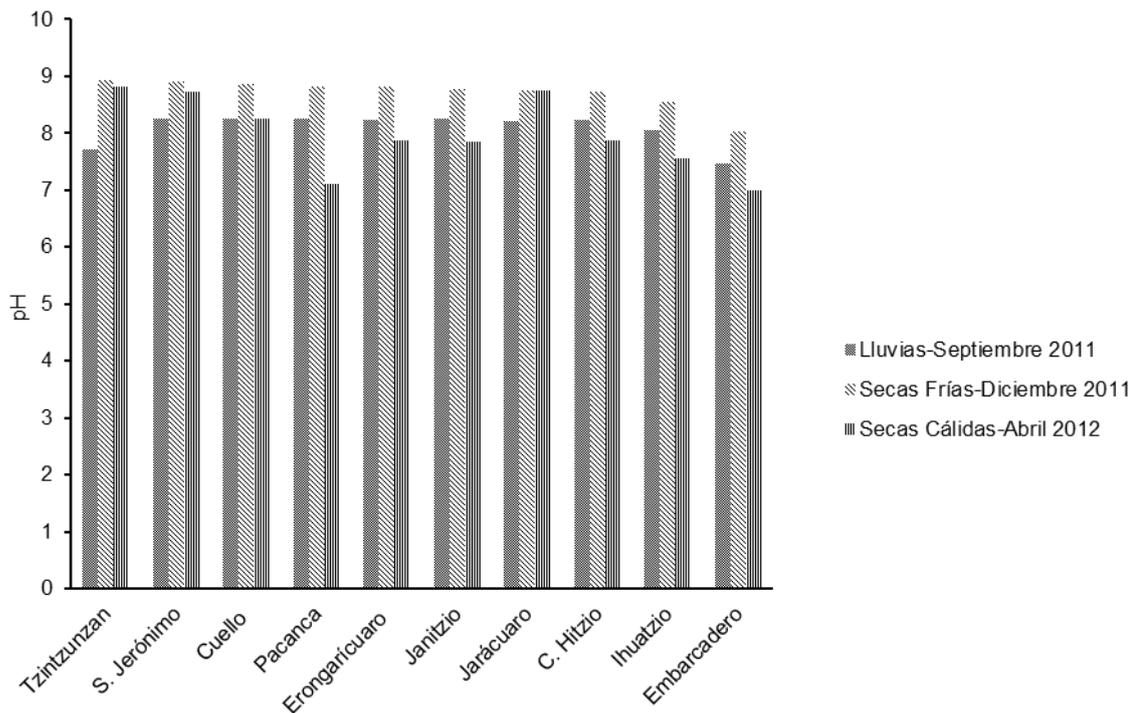


Figura 4. Valores de pH registrados en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

En lo que se refiere a la conductividad específica, el promedio anual fue de 953  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Y de acuerdo a los valores promedio por sitio, los valores más altos fueron 1046 y 1047  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspondientes a los sitios Tzintzuntzan y Erongarícuaro. Los valores mínimos se registraron en Ihuatzio y Embarcadero con 780 y 766  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los sitios restantes registraron valores entre 870 y 1043  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Fig. 5). De acuerdo al análisis estadístico, secas cálidas mostró una diferencia significativa respecto a las temporadas restantes, por registrar los valores más altos (1064  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Tabla 6 y 7); mientras que en lluvias se registraron los valores mínimos (808  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La temporada de secas frías, registró un valor de 988  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

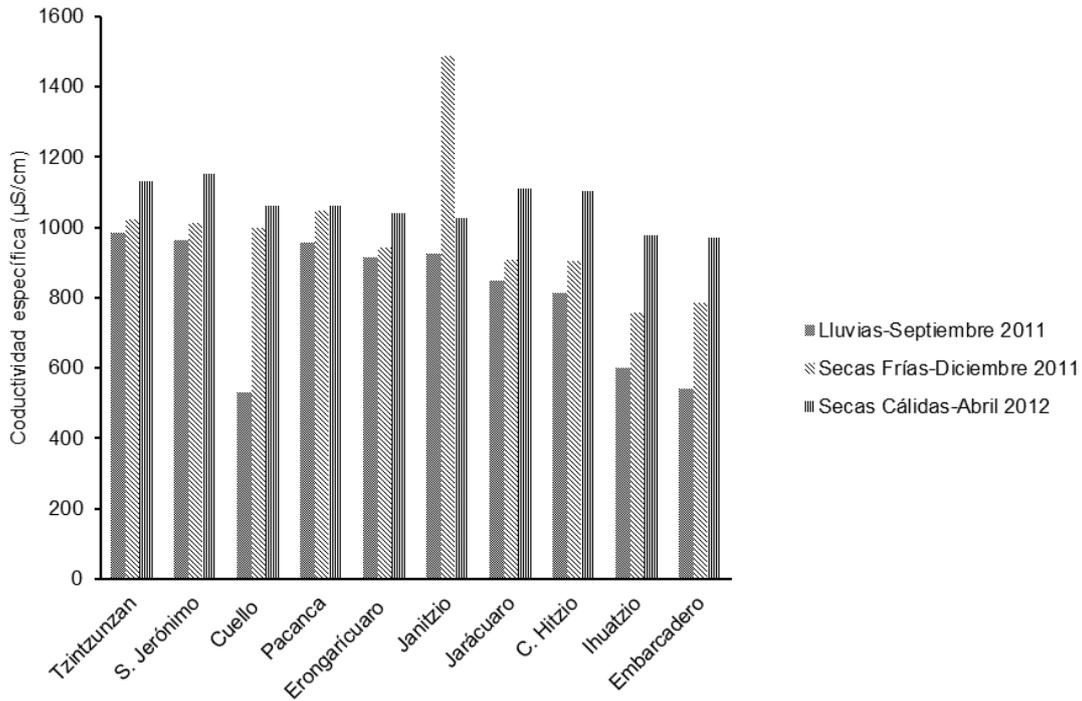


Figura 5. Conductividad específica registrada en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

Es probable que el incremento de conductividad específica durante la temporada de secas, se deba al incremento de la tasa de evaporación que sufre el lago durante esta época del año; incrementando la concentración de los iones (sodio y potasio) (Bernal-Brooks, 2008).

Es importante señalar que durante la temporada de secas frías, en Janitzio se registró un valor de 1488  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el cual corresponde al valor máximo registrado por sitio. Es probable que este valor sea resultado de la aportación de aguas residuales provenientes de la isla; como resultado de la celebración del día de muertos (1 y 2 de diciembre), ya que el muestreo se realizó 29 días después del mismo.

En el caso de oxígeno disuelto, nueve de los diez sitios registraron un valor entre 6.4 mg/L a 7.8 mg/L, excepto Embarcadero ya que registró una concentración promedio de 3.9 mg/L.

En la época de lluvias el valor promedio fue de 5.7 mg/L; en secas frías 7.0 mg/L y en secas cálidas 7.8 mg/L.

De acuerdo a LFDMA (2007), las tres zonas cumplen con la concentración mínima sugerida para la protección de vida acuática (5 mg/L) (Fig. 6); sin embargo el sitio denominado Embarcadero, correspondiente a la zona sur mostró un valor inferior a este valor.

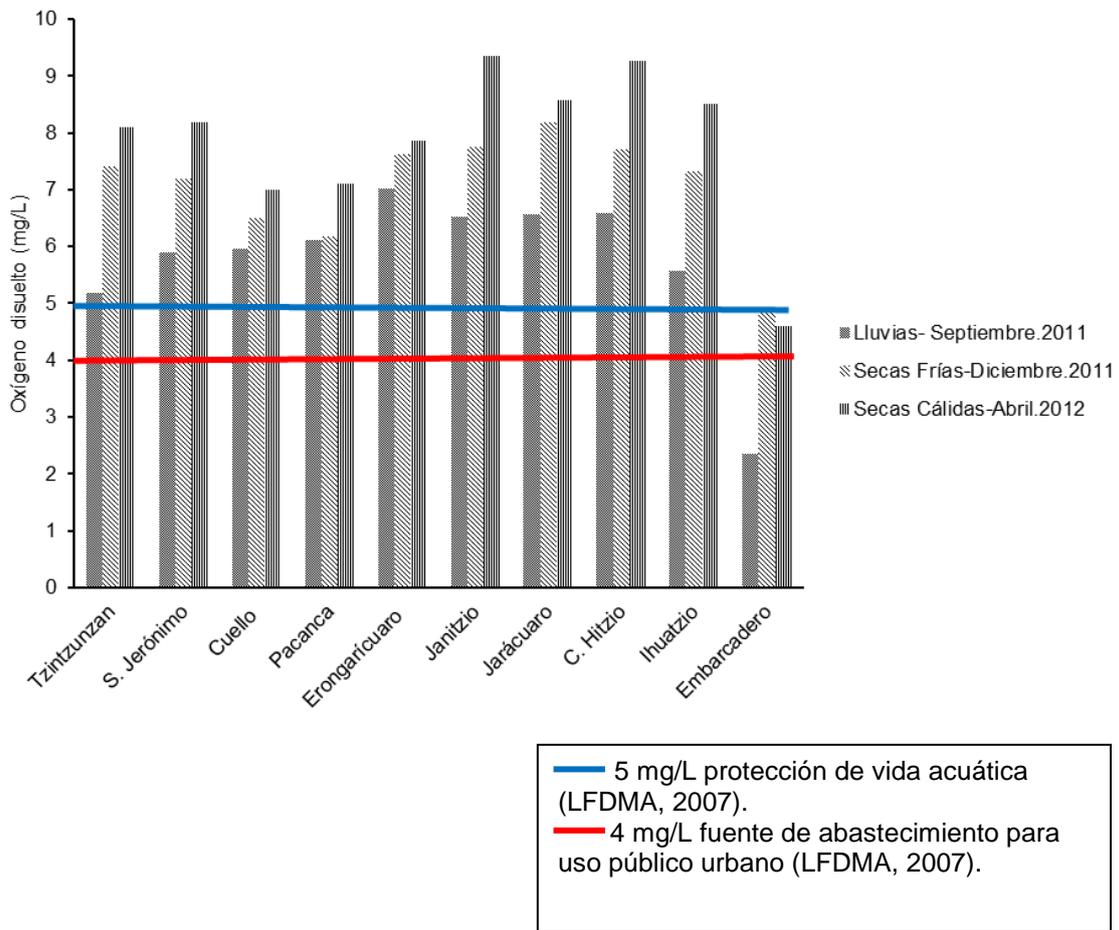


Figura 6. Concentración de oxígeno disuelto registrado en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

## 6.2 Resultado de nutrientes

Durante el ciclo anual se registró presencia de nitrógeno en los diez sitios de muestreo.

A lo largo de las tres temporadas el valor promedio del nitrógeno total, fue 3.1 mg/L con valores entre 1.6 a 5.3 mg/L. Los sitios que registraron la mayor concentración fueron Tzintzuntzan (3.4 mg/L), C.Hitzio (3.37 mg/L), Ihuatzio (4.6 mg/L) y Embarcadero (5.3 mg/L). San Jerónimo, Janitzio, y Jarácuaro registraron una concentración entre 2.4 a 3.2 mg/L; mientras que los sitios Cuello (1.31 mg/L), Pacanda (1.68 mg/L) y Erongarícuaro (1.77 mg/L) registraron la menor concentración (Fig. 7).

En la temporada de lluvias se registró una concentración promedio de 4.8 mg/L; en secas frías 2.8 mg/L y en secas cálidas 1.6 mg/L (Tabla 8 y 9).

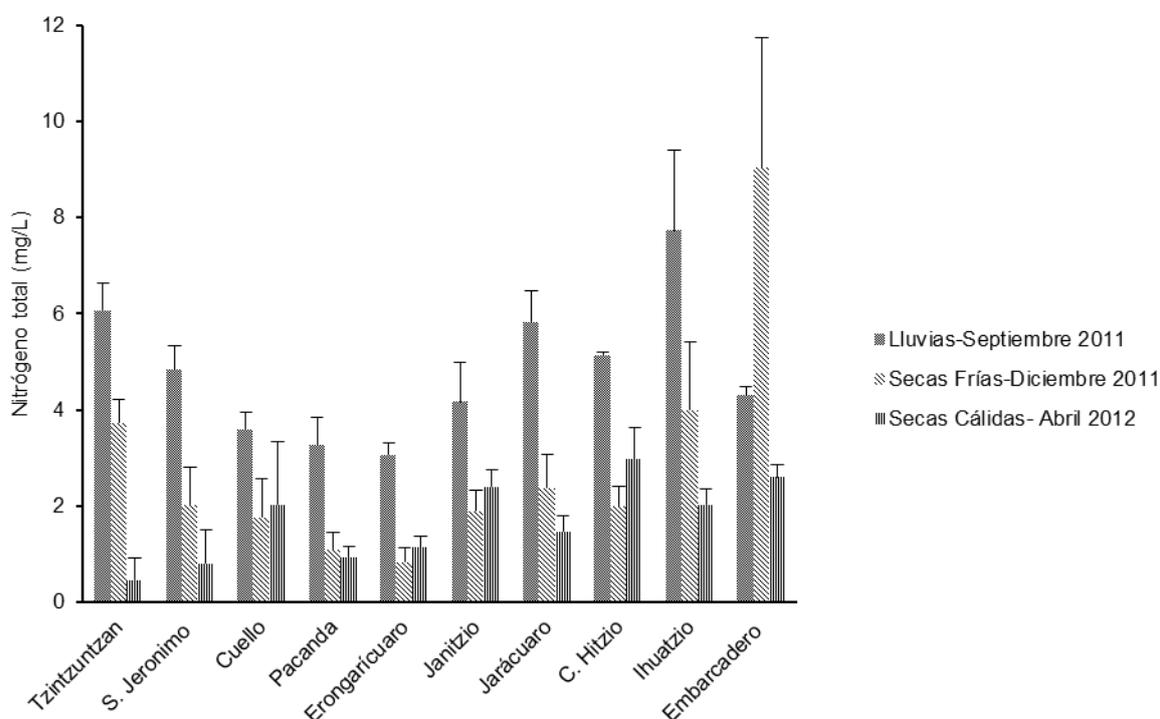


Figura 7. Concentración de nitrógeno total registrada en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

Para el el caso de nitratos se registró una concentración promedio de 0.7 mg/L. Tzintzuntzan, San Jerónimo, Cuello, Pacanda, Erongarícuaro y Janitzio registraron una concentración entre 0.10 a 0.79 mg/L. Los sitios Jarácuaro, C. Hitzio, Ihuatzio y Embarcadero registraron una concentración entre 0.91 a 1.71 mg/L.

La concentración más alta se registró durante la temporada de lluvias (1.5 mg/L), seguido de secas frías y seca cálidas con 0.30 y 0.36 mg/L (Fig. 8).

Es probable que el incremento del nutriente durante la temporada de lluvias, sea resultado del ingreso de aguas residuales y las escorrentías que se generan en esta época del año. Esto último arrastra material proveniente de las zonas agrícolas y de la cuenca; producto del deslave del mismo.

Se realizó una comparación a nivel cualitativo con el estudio realizado por Mazari-Hiriart (1981) enfocado a la calidad de agua; en el que se realizó una cuantificación del nutriente. Los sitios que coincidieron en ambos estudios fueron Tzintzuntzan, Cuello, Pacanda, Erongarícuaro, Janitzio, Jarácuaro e Ihuatzio.

Cabe mencionar que el método usado en cada uno fue ellos fue diferente por lo que solo se consideró el resultado final de cada estudio.

Derivado de este análisis se observa que en los sitios San Jerónimo, Cuello y Janitzio la concentración se ha incrementado entre 0.07 a 0.09 mg/L; en el sitio Jarácuaro de 0.09 a 1.54 mg/L y en el sitio Ihuatzio de 0.1 a 1.71 mg/L (Fig. 9). Lo anterior sugiere que probablemente los procesos de degradación de materia orgánica se han incrementado y son constantes a lo largo de todo el año; sobre todo en la zona sur.

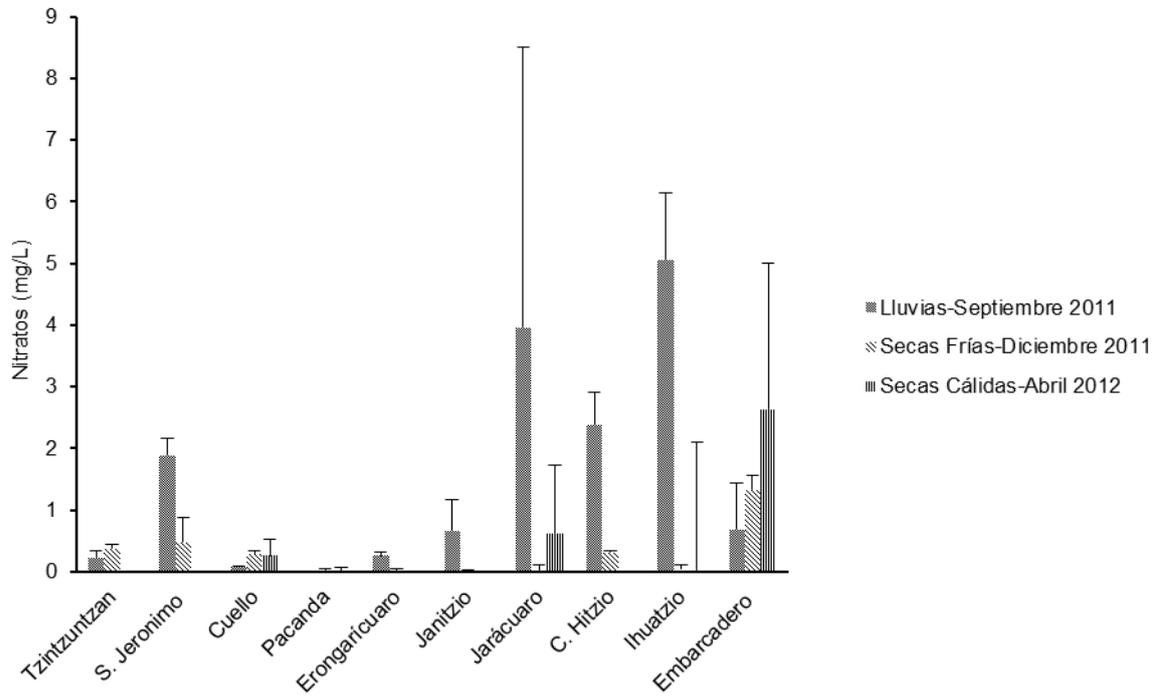


Figura 8. Concentración de nitratos registrado en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

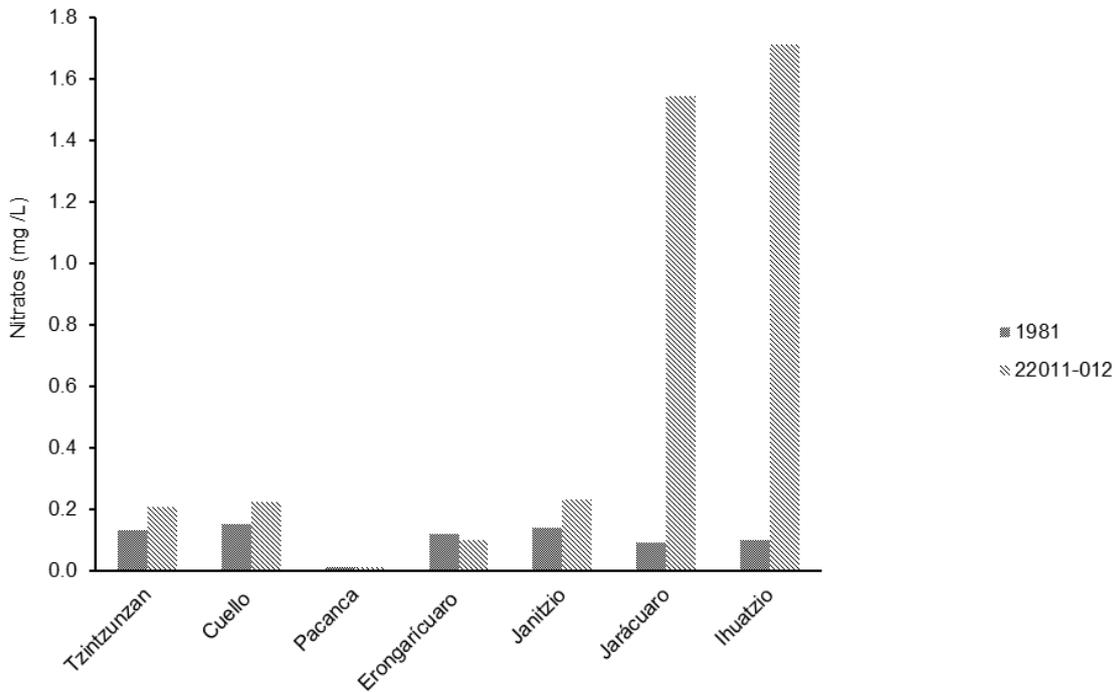


Figura 9. Nitratos en el Lago de Pátzcuaro en 1981 y 2011-2012.

Para nitrógeno amoniacal se registró un valor promedio de 0.45 mg/L; con una oscilación entre 0.11 a 2.47 mg/L. Los sitios Tzintzuntzan y Pacanda registraron las concentraciones más bajas (0.11 y 0.13 mg/L). Seguido por los sitios San Jerónimo, Cuello, Erongarícuaro, Janitzio, y Jarácuaro (0.25 mg/L a 0.14 mg/L); mientras que los sitios Camino Hitzio, Ihuatzio y Embarcadero registraron entre 0.36 a 2.47 mg/L (Fig. 10).

La temporada de lluvias registró un valor promedio de 0.53 mg/L, secas frías 0.66 mg/L y secas cálidas 0.17 mg/L.

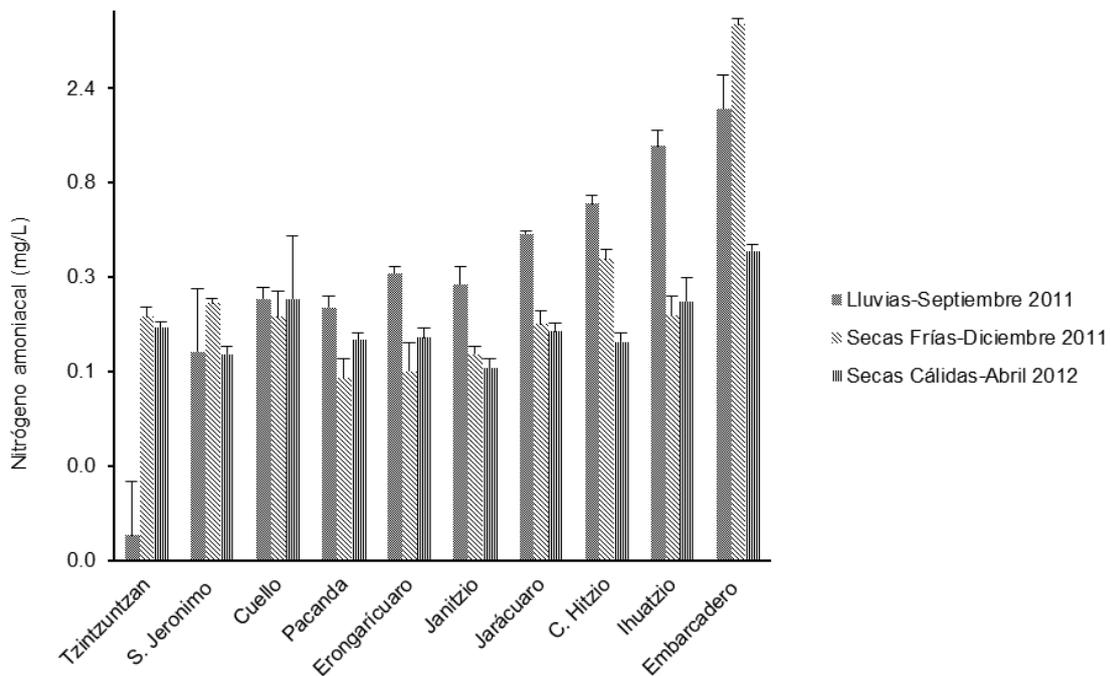


Figura 10. Concentración de nitrógeno amoniacal registrada en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

Respecto a la diferencia que se encuentra con el estudio de 1981; se observa que en los siete sitios que coinciden en ambos estudios (Tzintzuntzan, Cuello, Pacanda, Erongarícuaro, Janitzio, Jarácuaro e Ihuatzio), la concentración ha disminuido, excepto en Embarcadero (Fig. 11). Esta disminución se ha

registrado principalmente en la zona norte y centro del lago, mientras que en la zona suroeste la concentración ha aumentado.

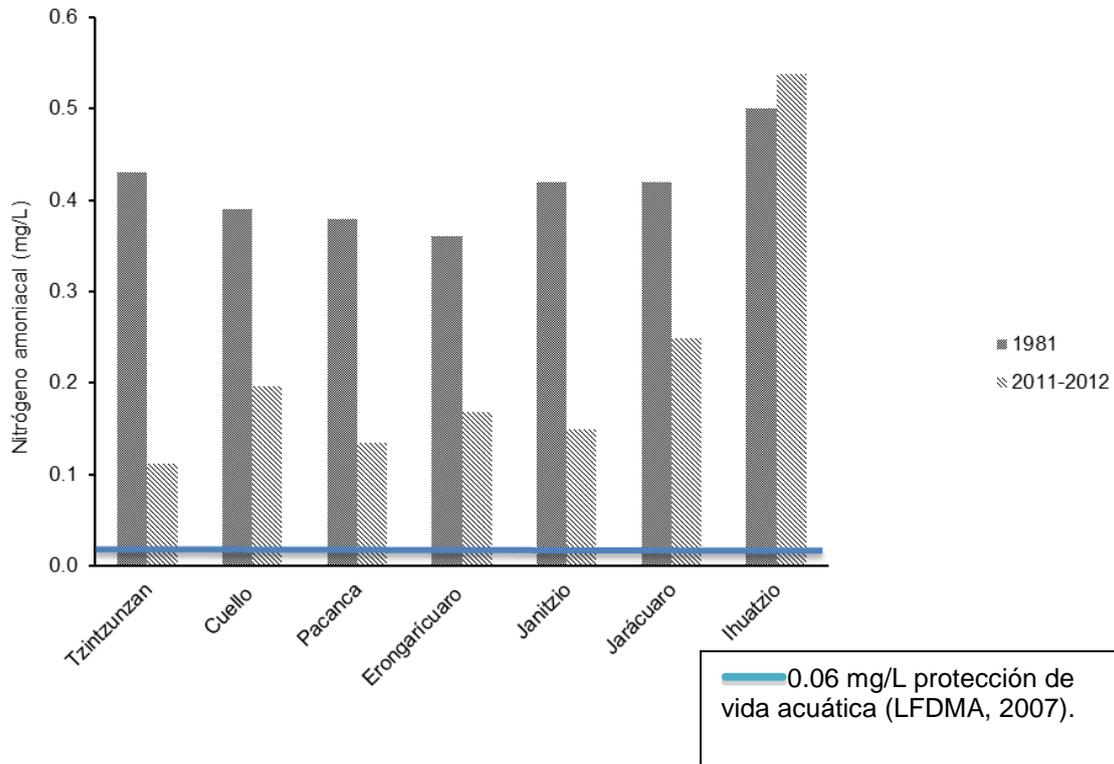


Figura 11. Nitrógeno amoniaco en el Lago de Pátzcuaro 1981 y 2011-2012.

En lo que se refiere al fósforo total, se pudo cuantificar en los 10 sitios y en las tres temporadas climáticas. El valor promedio registrado fue 0.91 mg/L y su concentración osciló entre 0.64 a 1.28 mg/L. La temporada de lluvias registró un valor promedio más bajo de 0.88 mg/L, secas frías 0.90 mg/L y en secas cálidas 0.96 mg/L.

Los sitios Tzintzunzan, C. Hitzio, Ihuatzio y Embarcadero registraron una concentración entre 1.07 y 1.28 mg/L, correspondiente a los valores más elevados. Los sitios Janitzio y Jarácuaro registraron 0.79 y 0.87 mg/L; mientras que los sitios San Jerónimo, Cuello, Pacanda y Erongaricuaro registraron una concentración entre 0.64 a 0.72 mg/L (Fig. 12).

La concentración de fósforo total que Mazari-Hiriart (1981) reportó oscilaba entre 0.05 y 0.09 mg/L; siendo el sitio Ihuatzio el de mayor concentración.

Mientras tanto en el ciclo 2011-2012 se registró un valor superior a 0.64 mg/L y un máximo de 1.28 mg/L. Es decir; que en cinco sitios (Cuello, Pacanda, Erongarícuaro, Janitzio y Jarácuaro) es muy probable que la concentración se ha incrementado entre 0.60 a 0.82 mg/L y en dos de ellos (Tzintzuntzan y Ihuatzio) aumentó 1 mg/L (Fig. 14).

En cuanto a la concentración de ortofosfatos, en el ciclo 2011-2012 se registró una concentración entre 0.15 a 0.74 mg/L; donde Embarcadero registró el valor máximo y San Jerónimo el mínimo. Los sitios Tzintzuntzan, cuello, Pacanda, Erongarícuaro y Janitzio; registraron una concentración entre 0.24 a 0.30 mg/L, seguido de los sitios Jarácuaro, C. Hitzio e Ihuatzio con valores entre 0.39 y 0.62 mg/L (Fig. 13).

En la temporada de lluvias se registraron los valores más elevados, registrando un valor promedio de 0.48 mg/L; en secas frías 0.35 mg/L y secas cálidas 0.33 mg/L.

El fósforo es un nutrimento esencial para el crecimiento de plantas y organismos acuáticos. Se puede encontrar en forma orgánica e inorgánica; sin embargo, la forma asimilable para plantas y fitoplancton es en forma de ortofosfato. En condiciones naturales su concentración fluctúa entre 0.0005 y 0.020 mg/L (Salas y Martino, 1991; Welch y Jacoby, 2004).

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (CEPIS), considera que una concentración  $>0.1$  de PT mg/L corresponde a lagos eutrófico e hiper-eutrófico. De acuerdo a esta clasificación, el Lago de Pátzcuaro se encuentra dentro del rango de lagos en estado eutrófico.

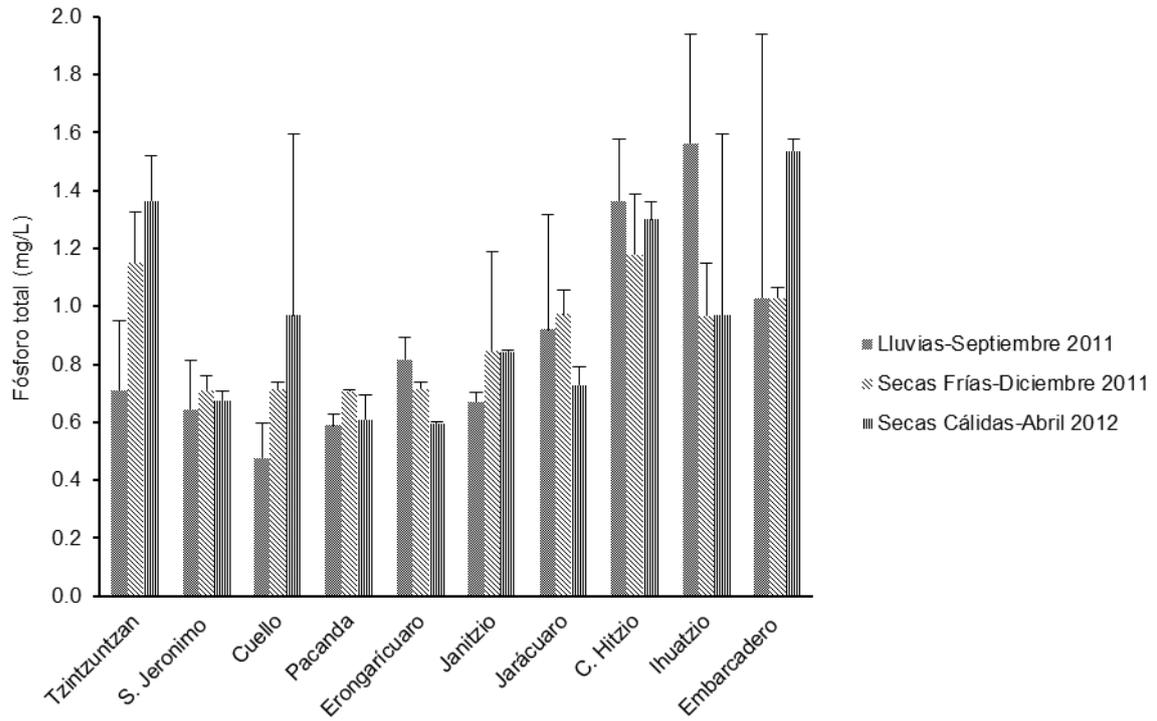


Figura 12. Concentraciones de fósforo total registradas en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

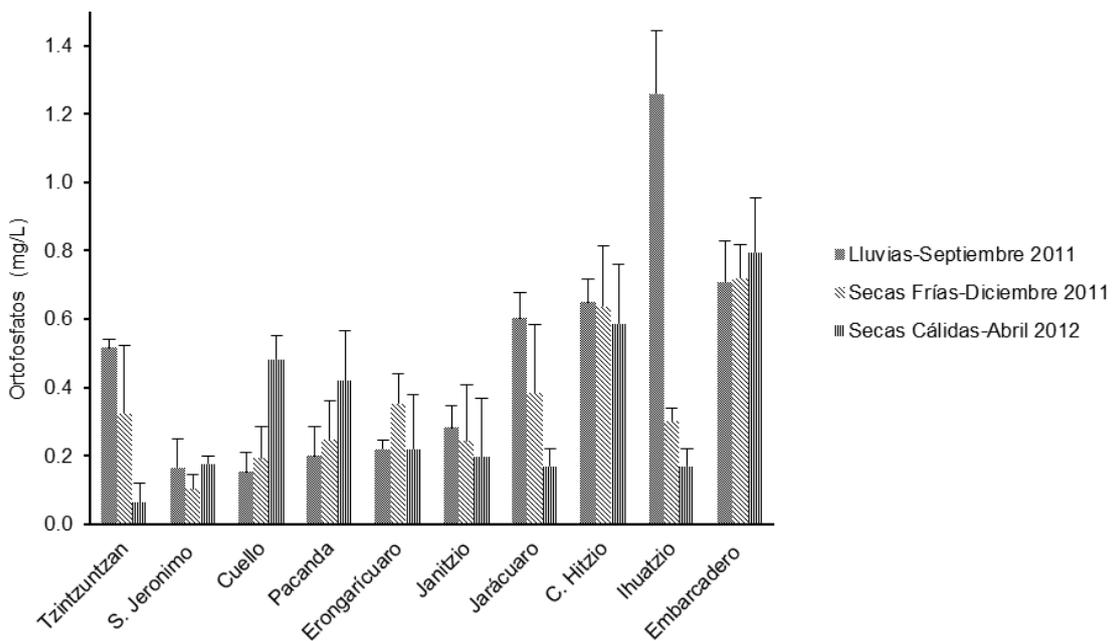


Figura 13. Concentración ortofosfatos registrado en el lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

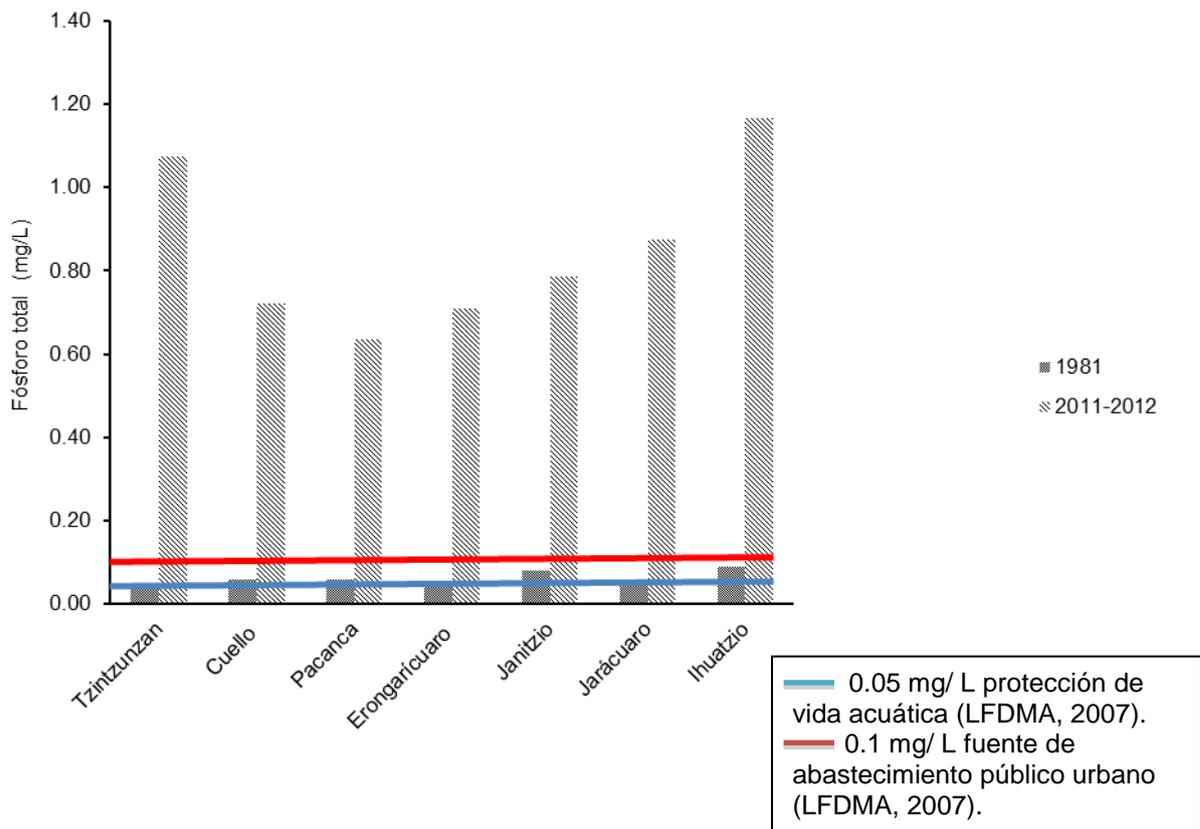


Figura 14. Concentración de fósforo total en el Lago de Pátzcuaro en 1981 y 2011-2012.

### 6.3. Resultados bacteriológicos

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante el ciclo anual 2011-2012 de coliformes fecales (CF) y enterococos fecales (EF).

Durante el ciclo 2011-2012 se registró presencia de CF en los diez sitios de muestreo en al menos una temporada climática.

En la temporada de lluvias la densidad de bacterias CF osciló entre 751,007 a 100 UFC/100 mL, siendo Ihuatzio el que registró la mayor cuantificación y Cuello el valor más bajo.

En sentido norte a sur, a partir Erongarícuaro a C. Hitzio; se registró un valor entre 1,289 y 1,587 UFC/100 mL. Mientras que Tzintzuntzan, Pacanda y Embarcadero registraron 8,193; 10,323 y 7,047 UFC/100 mL respectivamente (Fig. 15).

En la temporada de secas frías la cuantificación disminuyó, con valores entre 36 a 109,678 UFC/100mL. Los sitios Pacanda, Erongarícuaro, Jarácuaro, C.Hitzio e Ihuatzio registraron valores inferiores a 112 UFC/100 mL. Los sitios Tzintzuntzan, San Jerónimo y Cuello registraron entre 1,000 a 8,143 UFC/100mL, mientras que el sitio de Embarcadero registró un valor de 109,678 UFC/100 mL.

Durante la temporada de secas cálidas la densidad microbiológica se registró en nueve sitios (excepto Jarácuaro), con una oscilación de 10 a 112 UFC/100 mL. El sitio Embarcadero registró el valor más alto, seguido de Ihuatzio (270 UFC/100 mL); mientras que Janitzio reportó el valor más bajo. En los sitios Tzintzuntzan, San Jerónimo y Pacanda se registró una densidad de 198 a 156 UFC/100 mL; los sitios restantes (Erongarícuaro, Cuello y C. Hitzio) registraron menos de 79 UFC/100mL (Fig. 15).

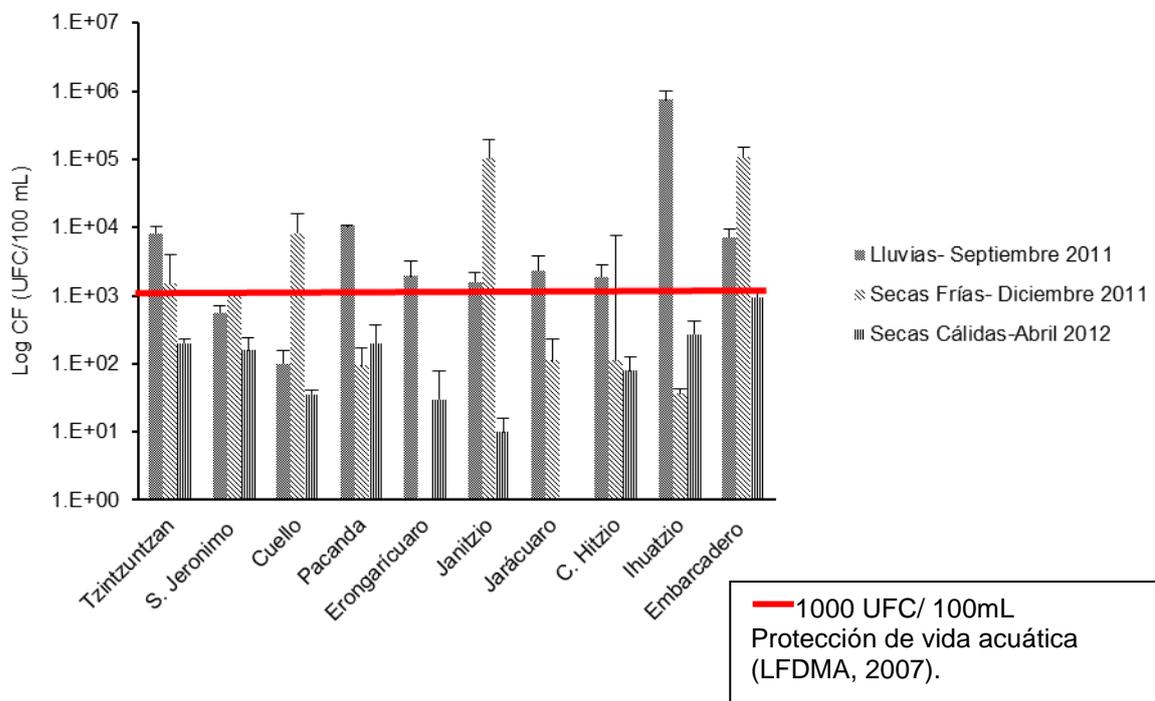


Figura 15. Cuantificación de coliformes fecales, en el Lago de Pátzcuaro durante el ciclo 2011-2012.

De acuerdo a las unidades de cuantificación establecidas en la LFDMA (2007) es probable realizar un análisis cualitativo con relación a la densidad de bacterias registradas en el estudio de Mazari-Hiriart (1981) y el ciclo 2011-2012. Cabe aclarar que los métodos realizados son distintos, por lo tanto no se pretende obtener una comparación a nivel cuantitativo. En el primer caso se trata de la técnica número más probable (NMP), mientras que en el segundo se realizó con el método de filtración por membrana. Con ambos métodos se pudo observar la tendencia bacteriológica a lo largo del tiempo en los sitios relacionados (Tzintzuntzan, Cuello, Pacanda, Erongarícuaro, Janitzio, Jarácuaro e Ihuatzio).

De acuerdo a la figura 16 (a) la densidad microbiológica durante la temporada de lluvias se ha incrementado entre 1 a 4 órdenes de magnitud en los últimos 30 años; ya que en el 1981 la cuantificación oscilaba entre 4 a 43 NMP/100 mL mientras que en el ciclo 2011-2012 los valores ascendieron entre 100 a 751,007 UFC/100 mL. En el caso de la temporada de secas, la tendencia es similar. Sin embargo, cinco de los siete sitios comparables han incrementado su densidad en más de 10 unidades, sin rebasar una orden de magnitud (Fig.16b).

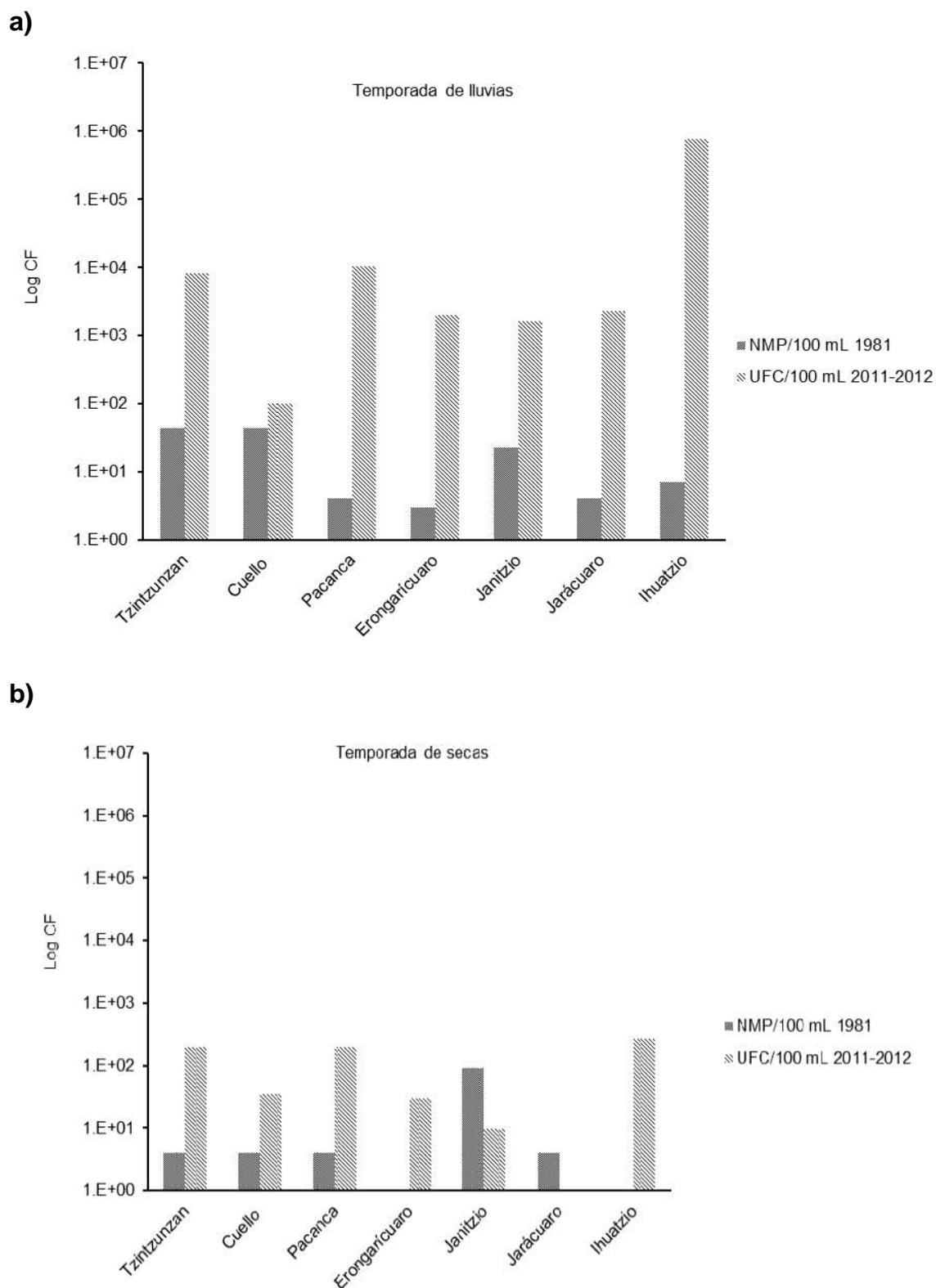


Figura 16. Cuantificación de coliformes fecales en UFC y NMP en 100 mL durante la temporada de lluvias a) y secas b) en 981 y 2012.

Respecto al grupo de bacterias enterococos fecales todos los sitios registraron presencia de las mismas, excepto el sitio Cuello. La cuantificación más alta se observó en la temporada de lluvias, con un valor promedio de 794 UFC/100 mL, seguido de secas frías con 68 UFC/100 mL y secas cálidas con 4 UFC/100 mL.

En la temporada de lluvias los sitios C. Hitzio e Ihuatzio registraron 594 y 6,622 UFC/100 mL, los sitios Tzintzuntzan y Jarácuaro registraron 120 y 317 UFC/100 mL, mientras que los sitios restantes (Pacanda, San Jerónimo y Janitzio) registraron un valor menor a 53 UFC/100 mL.

En la temporada de secas frías seis sitios registraron presencia de bacterias; mientras que en los sitios Cuello, Erongarícuaro, Janitzio y Jarácuaro no se obtuvo una cuantificación significativa. Los sitios C.Hitzio, Ihuatzio y Embarcadero registraron 458, 56 y 168 UFC/100 mL respectivamente. Mientras Los sitios restantes (Tzintzuntzan, San Jerónimo y Pacanda) registraron entre 1 a 3 UFC/100 mL.

Durante secas cálidas en los sitios Tzintzuntzan, San Jerónimo, Pacanda, Erongarícuaro, Janitzio, C.Hitzio, y Embarcadero se registró una cuantificación menor a 20 UFC/100 mL. En los sitios restantes (Cuello, Jarácuaro e Ihuatzio) no se registró presencia de bacterias (Fig. 17).

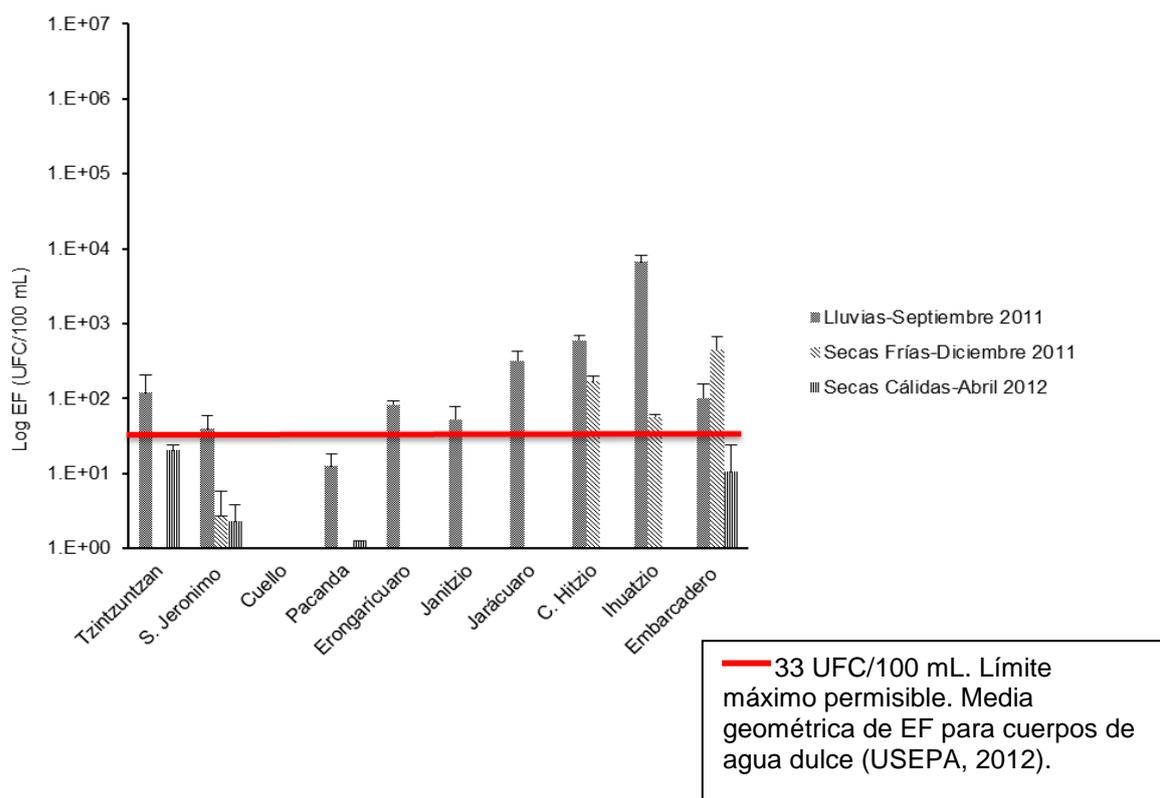


Figura 17. Densidad de enterococos fecales en ciclo anual 2011-2012.

De acuerdo al cociente propuesto por Geldreich y Kenner (1969) para identificar el origen de la contaminación, se observa que es muy probable que en ocho de los sitios la contaminación sea de origen humano.

En el sitio de Cuello a pesar de que este coeficiente no pudo ser aplicable, es probable que la mayor parte de la contaminación también sea de origen humano. Solo el sitio C. Hitzio presentó una mezcla de origen animal y humano (Tabla 5).

Tabla 5. Posibles fuentes de contaminación de acuerdo con Geldreich y Kenner (1969) en el Lago de Pátzcuaro durante los años 2011-2012.

|    | Localidad     | CF   | EF   | CF/EF     | Origen de contaminación     |
|----|---------------|------|------|-----------|-----------------------------|
| 1  | Tzintzunzan   | 3293 | 47   | 70.5      | Humano                      |
| 2  | San Jerónimo  | 569  | 14   | 41.2      | Humano                      |
| 3  | Cuello        | 2726 | 0    | No aplica | Preferentemente humano      |
| 4  | Pacanda       | 3537 | 5    | 765.7     | Humano                      |
| 5  | Erongarícuaro | 649  | 28   | 23.5      | Humano                      |
| 6  | Janitzio      | 3472 | 17   | 1987.7    | Humano                      |
| 7  | Jarácuaro     | 800  | 106  | 7.6       | Humano                      |
| 8  | Camino Hitzio | 643  | 254  | 2.5       | Mezcla H/A predomina humano |
| 9  | Ihuatzio      | 2503 | 2226 | 112.5     | Humano                      |
| 10 | Embarcadero   | 3921 | 154  | 254.4     | Humano                      |

## 7. Resultado de análisis estadísticos

### 7.1. Análisis estadísticos de parámetros fisicoquímicos y nutrientes

De los parámetros fisicoquímicos evaluados temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad específica y transparencia, no se encontró una diferencia significativa entre los sitios, excepto para los valores de turbidez (UNT); donde el sitio de Ihuatzio se diferenció de los demás por registrar los valores más elevados (Tabla 6).

En cuanto a la diferencia entre las temporadas climáticas, se observó una diferencia significativa para temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad específica (Tabla 7).

Tabla 6. Prueba Kruskal-Wallis entre sitios muestreo.

| <b>Diferencia entre sitio</b>    |         |         |            |
|----------------------------------|---------|---------|------------|
| Fisicoquímicos                   | Razón F | Valor P | Diferencia |
| Temperatura (°C)                 | 4.66    | 0.8625  |            |
| Ph                               | 9.33    | 0.4069  |            |
| Oxígeno disuelto (mg/L)          | 13.25   | 0.1512  |            |
| Conductividad específica (µS/cm) | 10.08   | 0.3437  |            |
| Transparencia (cm)               | 13.52   | 0.1401  |            |

\*\* Muestra diferencia significativa.

Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para temporadas de muestreo.

| <b>Diferencias entre temporadas</b> |         |         |            |
|-------------------------------------|---------|---------|------------|
| Fisicoquímicos                      | Razón F | Valor P | Diferencia |
| Temperatura (°C)                    | 18.01   | 0.0001  | **         |
| pH                                  | 12.10   | 0.0023  | **         |
| Oxígeno disuelto (mg/L)             | 12.01   | 0.0019  | **         |
| Conductividad (µS/cm)               | 14.24   | 0.0008  | **         |
| Transparencia (cm)                  | 0.04    | 0.9797  |            |

\*\* Muestra diferencia significativa.

Los nutrimentos Nt, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo total y ortofosfatos, presentaron una diferencia significativa entre los sitios de muestreo. Las concentraciones de Nt aumentaron en dirección sur a partir del sitio de Cuello. En el caso del nitrógeno amoniacal, la concentración aumentó de manera gradual en dirección norte a sur.

El comportamiento de nitratos fue diferente, ya que los sitios de la zona centro presentaron la menor concentración, seguido de la zona norte y sur. En este último caso la concentración se vio incrementada paulatinamente a partir de Jarácuaro a Ihuatzio (Fig. 18). Posteriormente en Embarcadero la concentración disminuyó nuevamente.

En el caso de fósforo total los sitios Tzitzuntzan, C.Hitzio, Ihuatzio y Embarcadero se vieron diferenciadas de la zona centro, por registrar las concentraciones más elevadas. En general, el comportamiento de ortofosfatos, aumentó en sentido norte a sur. Sin embargo, la concentración entre un sitio a otro aumentó y disminuyó en forma alternativa (Fig.18).

En cuanto a la diferencia entre las temporadas, los nutrientes Nt, nitrógeno amoniacal y nitratos mostraron una diferencia significativa entre las temporadas de muestreo; mientras que las concentraciones de fósforo total y ortofosfatos no mostraron diferencia alguna (Tabla 9; Fig. 19).

Tabla 8. Prueba Kruskal-Wallis entre sitios para nutrientes.

| Diferencias entre sitios |         |         |            |
|--------------------------|---------|---------|------------|
| Nutrimientos             | Razón F | Valor P | Diferencia |
| Nitrógeno total          | 40.64   | 0.0000  | **         |
| Amonio                   | 36.34   | 0.0000  | **         |
| Nitratos                 | 17.34   | 0.0435  | **         |
| Fósforo total            | 38.79   | 0.0000  | **         |
| Ortofosfatos             | 41.40   | 0.0000  | **         |

\*\* Muestra diferencia significativa.

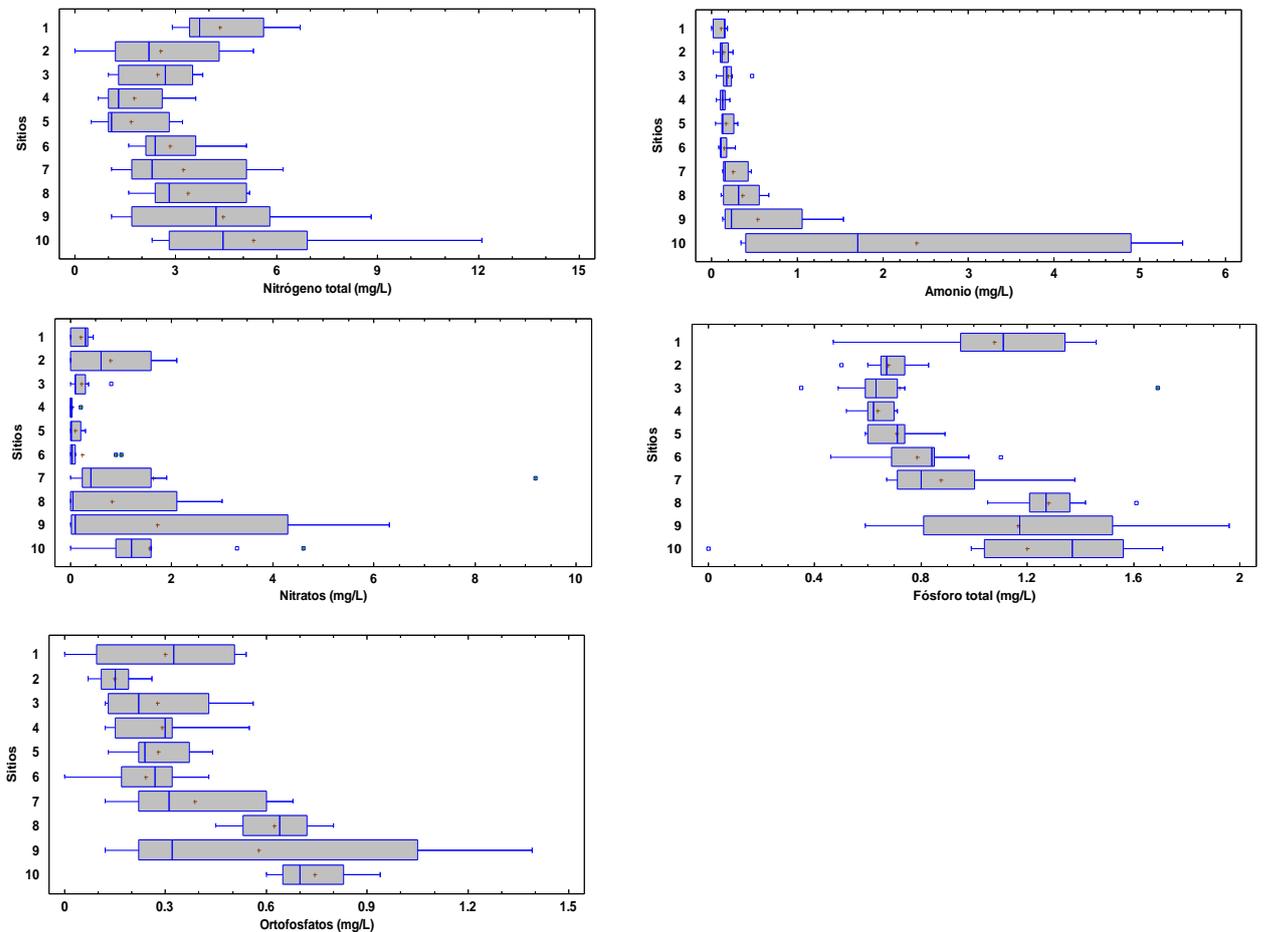


Figura 18. Nutrimientos que mostraron diferencia significativa al 95 % entre sitios

Tabla 9. Prueba Kruskal-Wallis para nutrientes entre temporadas.

**Diferencias entre temporada**

| Fisicoquímicos  | Razón F | Valor P | Diferencia |
|-----------------|---------|---------|------------|
| Nitrógeno total | 40.64   | 0.0000  | **         |
| Amonio          | 12.66   | 0.0017  | **         |
| Nitratos        | 32.34   | 0.0000  | **         |
| Fósforo total   | 1.79    | 0.4074  |            |
| Ortofosfatos    | 2.89    | 0.2347  |            |

\*\* Muestra diferencia significativa.

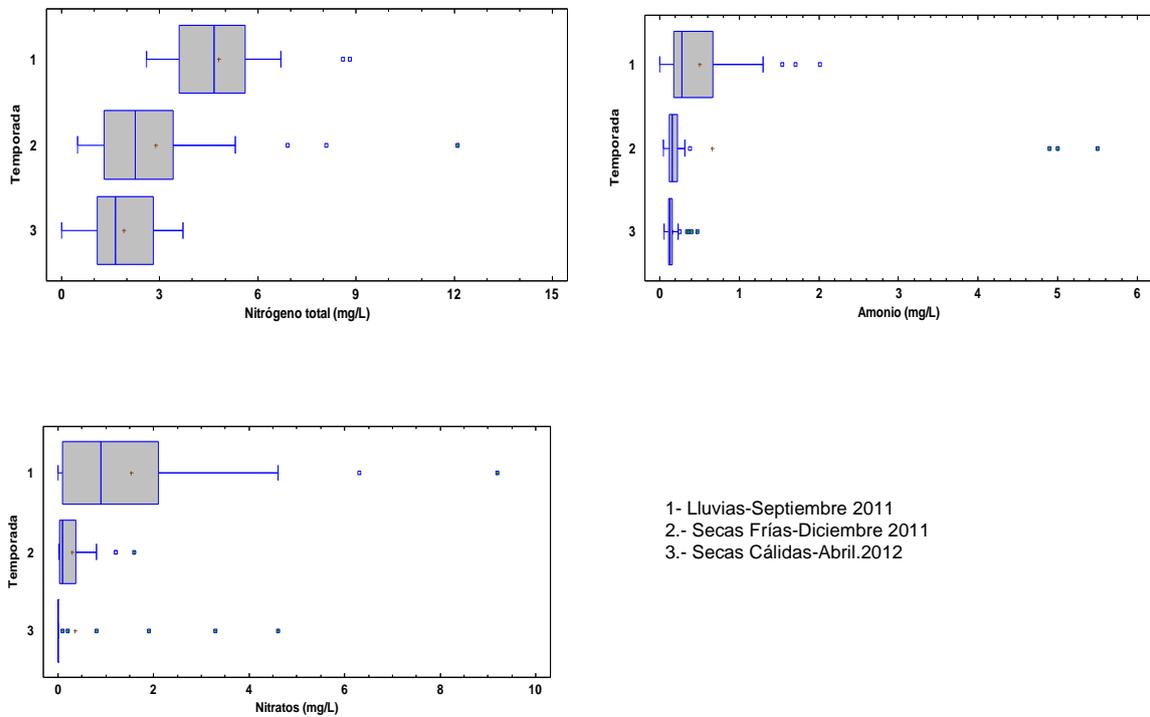


Figura 19. Nutrimientos que mostraron diferencia significativa al 95 % entre temporadas.

### 7.3. Análisis estadísticos para bacterias CF y EF

La cuantificación de bacterias CF y EF mostraron una diferencia significativa entre los diez sitios de muestreo. En el sitio 9 se registraron los valores más altos para los dos grupos de bacterias (Tabla 10; Fig.20).

Para CF no se obtuvo una diferencia significativa entre las temporadas. En el caso de EF sí se registró una diferencia entre las temporadas, donde la temporada de lluvias se diferenció de las temporadas restantes por registrar la mayor densidad de bacterias (Tabla 11; Fig. 20).

Tabla 10. Prueba Kruskal-Wallis.

| Diferencias entre sitio |         |         |            |
|-------------------------|---------|---------|------------|
|                         | Razón F | Valor P | Diferencia |
| CF                      | 23.75   | 0.0047  | **         |
| EF                      | 34.98   | 0.0000  | **         |

\*\* Muestra diferencia

| Diferencias entre temporada |         |         |            |
|-----------------------------|---------|---------|------------|
|                             | Razón F | Valor P | Diferencia |
| CF                          | 5.77    | 0.0556  |            |
| EF                          | 15.63   | 0.0004  | **         |

Tabla 11. Prueba Kruskal-Wallis para bacterias entre temporadas.

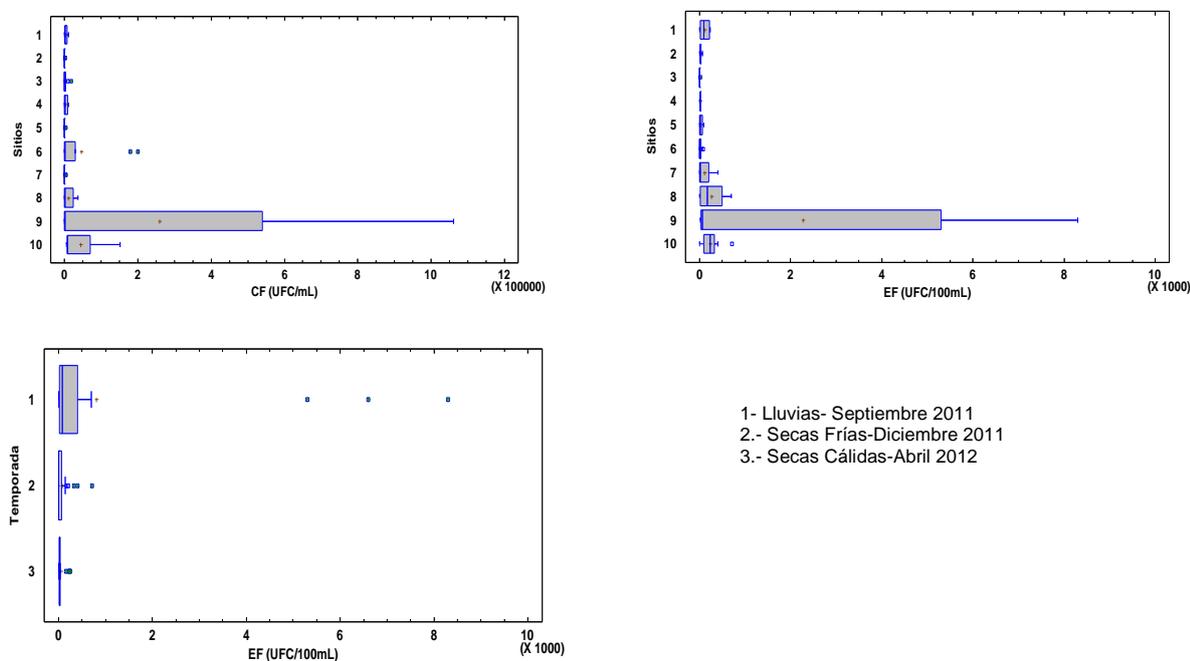


Figura 20. Se muestran los gráficos de bacterias CF y EF que tuvieron una diferencia significativa al 95 % entre sitios y temporadas.

## 8. Discusión general

De acuerdo con los resultados bacteriológicos, es probable que la mayor parte del lago tenga indicios de contaminación fecal de origen humano la mayor parte del año; incluso en aquellas zonas que se consideran áreas conservadas (zona centro). En el caso de enterococos fecales (EF), se observó que la mayor aportación fue durante la temporada de lluvias, al igual que las bacterias coliformes fecales (CF). Se intuye que esto se debe a las escorrentías que se generan en esta época, ya que ingresa mayor cantidad de materia fecal proveniente de animales de ganado, aunado a las aportaciones residuales.

Respecto al análisis comparativo, es probable que la densidad de bacterias CF se ha incrementado entre uno a tres órdenes de magnitud en las últimas tres décadas. En el caso de Ihuatzio la densidad ha superado esta magnitud. Esto puede explicarse por el incremento poblacional que ha tenido la cuenca en las últimas tres décadas; ya que duplicó su número de habitantes (de 80, 000 a aproximadamente 190 000) (Mazari-Hiriart, 1981; INEGI, 2010). Como consecuencia, las descargas de aguas residuales se han incrementado y las plantas de tratamiento implementados hasta ahora, son insuficientes para resguardar el ecosistema.

En cuanto a la profundidad del lago, si se compara con estudios previos como el de Mazari-Hiriart (1981), ha disminuido entre 2 a 4 m, principalmente en la zona sur y noroeste. Es probable que esto se encuentre relacionado con varios factores como sobreexplotación de los mantos acuíferos, incremento en la tasa de evaporación o procesos de azolvamiento. Este último factor podría afectar de manera importante; ya que debido a la pérdida de cobertura forestal que la cuenca ha sufrido en los últimos años, el material susceptible a la erosión se ha incrementado (Téllez y Mott, 1976; Mazari-Hiriart, 1981; Chacón-Torres, 2000; Mazzeo *et al.*, 2001; Camarena 2003). Este proceso incrementa la entrada de nutrientes, sobre todo en la temporada de lluvias (Ryding y Rast, 1992; Mazzeo *et al.*, 2001; Whish-Wilson, 2002).

En el caso del fósforo, no se encontró una diferencia de concentración significativa entre una temporada a otra, de manera que este puede encontrarse asociado directamente a las descargas de aguas residuales principalmente de Tzintzuntzan, Jarácuaro, Ihuatzio y Pátzcuaro.

De acuerdo a la LFDMA (2007), todos los sitios superaron el nivel de concentración de nitrógeno amoniacal, sugerida para el beneficio de los organismos acuáticos (Fig. 11). La alta concentración en la zona sur, se puede asociar a la descarga del Dren Zurumútaró y el Río Guani; ya que traen consigo aportaciones de origen urbano y agrícola que ingresan al sistema, además de que esto indica que en esta área hay procesos de degradación de materia orgánica. Mientras tanto, las bajas concentraciones en la zona centro y norte, se asocia a la incorporación del mismo en los procesos metabólicos de productividad primaria.

Por lo anterior es importante considerar las condiciones microbiológicas y fisicoquímicas, además de las problemáticas sociales para efectuar programas a nivel de cuenca que detengan el deterioro del lago. De manera urgente se deben implementar estrategias que reduzcan el ingreso de fósforo y nitrógeno, sobre todo de las aportaciones de aguas residuales de Tzintzuntzan, Jarácuaro, Ihuatzio y Pátzcuaro. De lo contrario, es probable que dentro de pocas décadas se pierdan los servicios ambientales; principalmente el de provisión, regulación y culturales. Mismos de los que depende la población aledaña e islas hoy en día.

## 9. Conclusiones

La calidad del agua del Lago de Pátzcuaro no resultó ser apta para protección de vida acuática y tampoco para uso con fines recreativos de contacto secundario.

Derivado del análisis microbiológico y fisicoquímicos las zonas más afectadas por las actividades antropogénicas fue la zona sur y noroeste; mientras que la zona centro resultó ser la más conservada. No obstante, este último también registró indicios de contaminación fecal.

Los sitios Tzintzuntzan, Jarácuaro, Camino Hitzio, Ihuatzio y Embarcadero resultaron ser los sitios con mayor grado de alteración. Por lo que merecen una atención especial, por la posible repercusión que pudieran tener a nivel ambiental y sanitario; ya que la los sitios localizados en la zona sur mantienen condiciones propicias para albergar organismos patógenos.

Cabe resaltar que la densidad microbiológica, así como la concentración de nutrientes se ve influenciado por las temporadas climáticas. De manera que si se desea implementar algún programa de restauración se debe considerar este factor.

## Referencias

- Alonso-Eguía L., González-Valencia L., Estrada C. y Rocha M. 2011. La fauna de macro invertebrados bénticos del Lago de Pátzcuaro y su uso como indicadores del estado de salud e integridad del hidrosistema. 157-186. *En*: Huerto R., Vargas S. y Ortiz C. (Eds.). Estudio ecosistémico del Lago de Pátzcuaro Aportes en gestión ambiental para el fomento del desarrollo sostenible. Intituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad Autónoma del Estado de Morelos México, Universidad Michoacana de San Nicolas De Hidalgo. México.
- Amador R. y Huerto A. 2011. Análisis multicriterio de naturalidad de embalse y del cambio de uso de suelo elementos para la planeación de obras y acciones de restauración en la cuenca de Pátzcuaro, 87-156 *En*: Huerto D., Vargas V. y Ortiz P. (Eds.). Estudio Ecosistémico del Lago de Pátzcuaro. IMTA/FGRA/UAEM/UMSH.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association, Water Environmental Federation. 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. United Book Press. Washington, D.C.
- Arcos M., Ávila S., Estupiñán S. y Gómez P. 2005. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *Nova Publicación Científica* 3:1-116.
- Ashbolt N., Grabow W. y Snozzi M. 2001. Indicators of microbial water quality. Consulta: 28 de septiembre del 2013.: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/iwachap13.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/iwachap13.pdf).
- Balvera P. y Cotler E. 2009. Estado de conservación y tendencias de cambio, 185-245. *En*: Capital natural de México, vol. II. Conabio, México.
- Barrenechea A. 2009. Aspectos fisicoquímicos de la calidad de agua. Fecha de consulta 01-11-13. Disponible en <http://www.bvsde.opsoms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomol/uno.pdf>.
- Bernal-Brooks F. 2008. La Estación Limnológica de Pátzcuaro 1938-2008. Morelia, Michoacán: 87 p.
- Bernal-Brooks F., Dávalos-Lind L y Lins Owen T. 2003. Seasonal and spatial variation in algal growth potential and growth-limiting nutrients in a shallow endorheic lake: Lake Pátzcuaro (Mexico). *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 8: 83–93.
- Caballero M. 2003. Estudio del fitoplancton del Lago de Pátzcuaro Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. 74 p.
- Camarena M. 2003. Estudio del fitoplancton del lago de Pátzcuaro Michoacán México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología, Morelia. 74.

- Campos C. 1999. Indicadores de contaminación fecal en la reutilización de aguas residuales para riego agrícola. Tesis doctoral. Facultad de Biología, Universidad de Barcelona. 250 p.
- Campos C. 2003. Indicadores de contaminación fecal en aguas, 224-229. *En: Agua potable para las comunidades rurales, reúso y tratamiento avanzados de aguas residuales domésticas*, RYDA-CYTED/CIRA-UAMEX. México.
- Carpenter S.R., Caraco N., Correll D., Howarth R., Sharpley A. y Smith V. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8:559–568.
- Castilleja A. 2004. La cuenca del lago de Pátzcuaro como escenario y objeto de políticas públicas. Fecha de consulta 20 de Febrero, 2014. Disponible en: [http://www.cdi.gob.mx/pnud/seminario\\_2003/cdi\\_pnud\\_aida\\_castilleja.pdf](http://www.cdi.gob.mx/pnud/seminario_2003/cdi_pnud_aida_castilleja.pdf).
- Chacón-Torres A. 2000. Proyecto de rescate y restauración del sur del Lago de Pátzcuaro: Calidad del agua e hidrodinámica en la zona sur del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. Informe del Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia: 28 p.
- Chacón-Torres A., Pérez-Mungía R. y Muzquiz E. 1991. Biología acuática 1. Síntesis Limnológica del Lago de Pátzcuaro. Michoacán, México. *Secretaría de Difusión Cultural*. Editorial Universitaria, Ciudad de México: 44 p.
- Cohen J. y Shuval H. 1972. Coliforms, fecal and streptococci as indicator of water pollution. *Water, Air and Soil Pollution* 2: 85-95.
- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA).2011. El agua en México. Fecha de consulta: 14 de agosto del 2013. Disponible en <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>.
- Cortés-Lara M. 2003. Importancia de los coliformes fecales como indicadores de contaminación en la Franja Litoral de Bahía de Banderas, Jalisco-Nayarit. *Biomedica*.14: 121-123.
- De Buen F. 1944. Los Lagos Michoacanos. II Pátzcuaro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* V. México. 99-125 pp.
- De Buen, F. 1941. Las variaciones físicas y químicas de las aguas del Lago de Pátzcuaro (st. X.), desde octubre de 1939 a Marzo de 1941. *Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro* 7: 25.
- Diario Oficial de la Federación (2007). Ley Federal de Derechos en Materia de Agua. México, D.F.: 167-174.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1997. NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F., 23 de abril, 2003. México.

- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2000. NMX-AA-004-SCFI-2000. Análisis de agua - determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. México, D.F. 18 de diciembre, 2001.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2010. NMX-AA-093-SCFI-2009. Análisis de agua-determinación de la conductividad eléctrica-método de prueba. México, D.F. Diario Oficial de la Federación. 18 de diciembre, 2000.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1998. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. 21 de septiembre, 1998. México.
- Diario Oficial de la Federación. 2000. 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. México, D.F. 16 de diciembre, 1999.
- Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE). 2008. Relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, por la que se modifican y derogan ulteriormente las Directivas 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE y 86/280/CEE del Consejo, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE.
- Environmental Protection Agency (USEPA). 2012. National Recommended Water Quality Criteria. Fecha de consulta 21-11-13. Disponible en <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/current/index.cfm>.
- Fisher C., Pollard P., Israde-Alcántara I., Gardun V. y Banerjee S. 2003. A reexamination of human-induced environmental change within the Lake Pátzcuaro Basin, Michoacán, Mexico. *Proceeding of de National Academy of Science* 100 (8):4957–4962.
- Fisher K. y Phillips C. 2009. The ecology, epidemiology and virulence of Enterococcus. *Microbiology* 155:1749–1757.
- Folabella A., Escalante A., Pérez G. y Zamora A. 2006. Indicadores bacterianos de calidad de agua recreacional en la laguna de los padres (Buenos Aires Argentina). 1º Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua. Abril, 2006. Córdoba–Argentina.
- Ford T. y Hamner S. 2010. Control of Waterborne Pathogens in Developing Countries. 36-45. *En: Ralph Mitchell y Ji-Dong Gu (Eds). Environmental Microbiology*. 2da ed. Wiley-Blackwell. New Jersey.
- García E., 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen. Talleres de Offset Larios, S.A., México, D.F. 217 p.
- Geldreich R. y Kener B. 1969. Concepts of fecal streptococci in stream pollution. *J. water pollut. Control Fed.* 41: 336-352.
- Gómez-Tagle A., Bernal-Brooks F. W. y J. Alcocer. 2002. Lake Patzcuaro (Mexico): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables, and GIS. *Hydrobiologia* 467: 187–197.

- Guerrero G., Masera O. y Maass J.F. 2008. Land use / Land cover change dynamics in the Mexican highlands: current situation and long term scenarios. *Model comparison applied to deforestation and reforestation*: 58-75. En: Paegelow M. y Camacho M. (Eds). *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions*. Springer Berlin Heidelberg.
- Hernández C., Arreola M. y Castro G. 2011. Situación de las enfermedades gastrointestinales en México. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología*. 31 (4):137-151.
- Herrera S. 2012. La política normativa para controlar la contaminación de los cuerpos de agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Fecha de consulta 14-10-2013. Disponible en [http://www.atl.org.mx/coloquio/attachments/132\\_La%20pol%C3%ADtica%20normativa%20de%20la%20calidad%20del%20agua%20en%20M%C3%A9xico.pdf](http://www.atl.org.mx/coloquio/attachments/132_La%20pol%C3%ADtica%20normativa%20de%20la%20calidad%20del%20agua%20en%20M%C3%A9xico.pdf).
- Holdren J. y Taggart J. 2001. *Managing Lakes and Reservoirs*. 3a ed. North American Lake Manage Society. Terrene Institute. Office Water Assessment of Watershed Protection Division, US.EPA. Madison, Wisconsin: 41-46 pp.
- Huerto D.R., Alonso P.E., Vargas V., Ortiz C., Amador G.A., Zambrano L. y Fong J. 2009. Manejo integral para el control de malezas acuáticas, especies invasoras y remoción de sedimentos en apoyo a la recuperación de especies emblemáticas y mejora de la calidad del agua del lago. Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental, Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua/ Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Informe Final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)-Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA). 340p.
- Huerto D.R., Alonso P.E., Vargas V.S., Martínez J.M., Mijangos C.M. y Amador G.A. 2008. Manejo integral para el control de malezas acuáticas, especies invasoras y remoción de sedimentos en apoyo a la recuperación de especies emblemáticas y mejora de la calidad del agua del lago. Informe Final. Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental, Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua/Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Informe Final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)-Fundación Gonzalo Río Arronte México: 198p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA). 2004. Descubre una cuenca: el lago de Pátzcuaro. IMTA-FGRA. Jiutepec, Morelos. 309 p.
- Lewis W. 2000. Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 5: 35-48.
- Lot A. y Novelo A. 1988. Vegetación y Flora Acuática del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *The Southwestern Naturalist* 33 (2): 167-175.
- Martínez J.M. 1996. Estudio de la calidad de las aguas superficiales del río San Pedro. *Investigación y Ciencia* 17: 27-39.

- Mazari-Hiriart M. 1981. Evaluación de la calidad de agua desde el punto de vista bacteriológico y fisicoquímico en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México: 45 p.
- Mazzeo N., Clemente J., García-Rodríguez F., Kruk K., Larrea D., Meerhoff M., Quintans F., Rodríguez-Gallego R. y Scasso F. 2001. Eutrofización, causas, consecuencias y manejo. 39-55. *En: Mazzeo N. Criterios y bases para un monitoreo de los sistemas acuáticos continentales en la Reserva de Biosfera Bañados del Este Montevideo, Nordan-Comunidad. Montevideo. Uruguay.*
- Méndez R. 2004. Desarrollo y validación de una prueba fácil aplicación para determinar enterococos en agua de consumo humano. Informe de tesis. Facultad de ciencias químicas y farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. 56p.
- Metcalf y Eddy. 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. 3 ed. McGraw-Hill. New York: 1334 p.
- Murray P., Baron E., Pfaller M., Tenover F. y Tenover R. 2007. *Manual of Clinical Microbiology*. 9 ta edición. ASM press. Washington, D. C: 1482.
- Orbe-Mendoza A., Acevedo J., Lyons J. 2002. Lake Patzcuaro fishery management plan. *Fish Biology and Fisheries* 12: 207-217.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2006. *Guías para la calidad del agua potable*. Primer apéndice a la tercera edición. Volumen 1 Ginebra: 105-126.
- Oseguera F.L. 2011. Calidad de agua y sedimentos en sitios con diferente grado de dragado en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán México. Tesis de Maestría. INIRENA/Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia. Michoacán:183.
- Roldán A. y Ramírez J. 2008. Los Lagos. *En: Roldán A. y Ramírez J. Fundamentos de Limnología*. 2da. Universidad de Antioquia. Colombia: 339 p.
- Ruiz-Fernández A.C., Hillaire-Marcel C., Ghaleb B., Soto-Giménez M y Páez-Osuna F. 2002. Recent sedimentary history of anthropogenic impacts on the Culiacan River Estuary, northwestern Mexico: geochemical evidence from organic matter and nutrients. *Environ Pollut* 118: 365–377.
- Ryding S. y Rast W (Eds). 1992. El control de la eutrofización en lagos y pantanos. UNESCO.Piramides. Madrid, España: 375 p.
- Saavedra Sola. 1982. Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad de agua del Lago de Pátzcuaro. Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, D.F. 45 p.
- Salas H. y Martino P. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales programa regional cepis/hpe/ops1981-1990. Organización Panamericana de la Salud (OPS) - División de Salud y Ambiente Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud (OMS): 58p.
- Salcedo Sánchez E. 2006. Aplicación de indicadores de sustentabilidad para la evaluación del manejo del agua en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Mich. Tesis de

- maestría. Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México: 89 p.
- Sánchez O. 2007. Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. 11-36. *En:* Sánchez O., Herzig M., Peters E., Márquez-Huitzil R. y Zambrano L (Eds).INE-SEMARNAT. México.
  - Sanchez-Chávez J., Bravo I., Tomasini O., Cordova R., Sandoval V., Mijangos C., Saldaña F., Salado H. y Hernandez L. 2007. Monitoreo periódico de la calidad del agua de Pátzcuaro y de las descargas.TC-0847. IMTA, SEMARNAT,FGRA, I.A.P., Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental, Coordinación de Tratamiento y Calidad de Agua. México: IMTA-FGRA.
  - Sánchez-Chávez J., Bravo-Inclán L., Tomasini-Ortiz C., González-Villela R., Córdoba-Rodríguez M. y Villalobos H. 2011. Monitoreo de la calidad del agua del lago y de las descargas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Informe final TC-0847. Jiutepec, Morelos: 205.
  - Sánchez-Chávez J., Bravo-Inclán L.,Tomasini-Ortiz C. y Bernal-Brooks F. 2011. Calidad de Agua del Lago de Pátzcuaro. 29-86. *En:* Huerto R., Vargas S y Ortiz C. (eds.). Estudio ecosistémico del Lago de Pátzcuaro Aportes en gestión ambiental para el fomento del desarrollo sostenible. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad Autónoma del Estado de Morelos Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Morelia Michoacán.
  - Sánchez-Chávez J., Cordova R., Bravo I., Saldaña F.,Tomasini O., Sánchez C., González V. y Salcedo S. 2009. Monitoreo periódico de la calidad del agua de Pátzcuaro y de las descargas.TC-0847. Intituto Mexicano de Tecnología del Agua, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Fundación Gonzalo Rio Arronte, I.A.P., Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental, Coordinación de Tratamiento y Calidad de Agua. México: IMTA-FGRA. 162 p.
  - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).2008.Agua.Fecha de consulta: 13 de agosto del 2013.Disponible en [http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/documents/sniarn/pdf/yelmedioambiente/version\\_2008/4\\_agua\\_v08.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/documents/sniarn/pdf/yelmedioambiente/version_2008/4_agua_v08.pdf).
  - Seoáñez, M. 1999. Ingeniería del Medio Ambiente aplicada al medio natural continental. 2a ed. Mundi-Prensa. Madrid: 328-380 pp.
  - Shufang L. 2002. Fecal coliform decay and regrowth kinetics in anaerobic dairy wastewater environment. Tesis de Maestria. Institute of Chemical Metallurgy, University of Chemical Technology M.S. Luisiana. United States of America: 84 p.
  - Suárez M. 2002. Tendencia actual del estreptococo como indicador de contaminación fecal. Revisión bibliográfica. *Revista cubana de higiene y seguridad:* 40(1): 38-43.
  - Tafall B. 1944. Biodinámica del Lago de Pátzcuaro. Ensayo de interpretaciones de sus relaciones tróficas. *Sociedad Mexicana de Historia Natural.* Tomo V (3-4): 197-209.

- Téllez R y Mott G. 1976. Estudio planctonológico preliminar del lago de Pátzcuaro, Michoacán. Departamento de Pesca: 1799-1836.
- Toledo M., Caballero J., Mapes C., Barrera N., Argueta A. y Núñez M. 1980. Los Purepechas de la cuenca del Lago de Pátzcuaro (una aproximación ecológica). *America Indígena*: 11 (1): 52 p.
- Toranzos G., Washinton D., McFeters A., Borrego J., y Savill M. 2007. Detection of microorganisms in environmental freshwaters and drinking waters, 249-260. En: Hurst J.C., Garland L.J., Mills L.A., Crawford L.R., Lipson A.D. y Stetzenbach D.L. Manual of Environmental Microbiology, ASM Press C. Washington. United States of America.
- Triola M. 2009. Prueba de Kruskal-Wallis. 702- 707 En: Triola M. Estadística 10<sup>a</sup>. Pearson Educación de México: 857 p.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2012. Recreational Water Quality Criteria (RWQC). Fecha de consulta 10-10-2013. Disponible en: <https://www.federalregister.gov/articles/2012/11/29/2012-28909/2012-recreational-water-quality-criteria>.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).2011. Recreational Water Quality Criteria. Health and Ecological Criteria Division. Office of Science and Technology. United States: 53p.
- United Nations Childrens Fund (UNICEF). 2008. Unicef handbook on Water Quality. New York:143 p.
- Welch E. y Jacoby J. 2004. Nutrient cycles. 57-85 En: Pollutant effects in freshwater: Applied Limnology. 3 er edición. Spon Press. London.
- Whish-Wilson P. 2002. The Aral Sea environmental health crisis. *Journal of Rural and Remote Environmental Health*: 1(2): 29-34.
- World Health Organization (WHO). 2001. Water quality: Guidelines, standards and health.Fecha de colsulta 14 de agosto del 2013. Disponible en [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/who/wa/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/who/wa/en/).
- World Health Organization (WHO). 2003. Guidelines for safe recreational water environments. Coastal and fresh water. Volumen 1. Suiza. 118-124pp.
- World Health Organization (WHO). 2012. Consultation on the Development of a Strategy on Water Quality and Health. 8-10 december 2010.Geneve.59 p.
- World Wildlife Fund (WWF). 2011. Big Cities, Big Water, Big Challenges. Water in an Urbanizing World. Fecha de consulta: 23 de abril de 2013. Disponible en: [http://www.wwf.se/source.php/1390895/Big%20Cities\\_Big%20Water\\_Big%20Challenges\\_2011.pdf](http://www.wwf.se/source.php/1390895/Big%20Cities_Big%20Water_Big%20Challenges_2011.pdf).
- World Wildlife Fund (WWF). 2013. Water Scarcity. Fecha de consulta: 26 de abril del 2013. Disponible en <http://worldwildlife.org/threats/water-scarcity> .
- Younis M. 2008. Sources of human pathogens in urban waters. Halmstad University. 6-13. Fecha de consulta 12-11-13. Disponible en <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:239572/FULLTEXT01.pdf>.

## Anexos

Anexo I. Tabla programas implementados en el lago de Pátzcuaro para su recuperación durante el periodo de 1968-2014.

| <b>Año</b> | <b>Programas</b>   | <b>Dependencias</b>   | <b>Nivel de cobertura</b> |
|------------|--|---|---------------------------|
| 1968       | Plan de dragado.   | Dirección de dragado perteneciente a la Secretaría de Marina.                                       | Lago                      |
| 1978       | Programa para la Recuperación de suelos degradados y control de azolve del Lago de Pátzcuaro.<br>Impulso de reforestación de los cerros Blanco y Colorado. | Dirección de dragado.<br>Comisión Forestal del Estado   | Cuenca                    |
| 1981-1986  | Recuperación Vegetal de la Cuenca del Pátzcuaro (REVELAPA)   | Centro de Investigaciones Forestales de Occidente (CIFO).   | Cuenca                    |
| 1986       | Programa de apoyo económico.   | Paraestatal PEMEX.  | Cuenca                    |
| 1990-2014  | Programa permanente de extracción mecánica de la maleza y sólidos sedimentables.   | Comisión de Pesca del Gobierno del Estado de Michoacán.   | Lago                      |
| 1996-2002  | "Plan Pátzcuaro 2000"  | Representantes de dependencias de los tres niveles de gobierno y organizaciones no gubernamentales. | Cuenca                    |
| 2005       | Proyecto Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-036-Pesc-2005, Pesca Responsable.   | SAGARPA   | Lago                      |
| 2003-2014  | Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro.  | SEMARNAT, CONAGUA, IMTA y FGRA.   | Cuenca                    |
| 2006       | Proyecto de Equipamiento Pesquero a las Organizaciones del Lago de Pátzcuaro para la Captura de Carpa durante el 2006-2007.                                | COMPESCA  | Lago                      |

Anexo II. Investigaciones realizadas en el Lago de Pátzcuaro en el periodo 1909-2014. Se consideran los trabajos más relevantes de cada autor.

| Año                     | Autor   | Contribución   |
|-------------------------|---|--|
| 1909                    | Villarello, J.  | Hidrología subterránea de los alrededores de Pátzcuaro.  |
| 1936                    | Matsui, T y Yamashita, I.   | Informes acerca de las apreciaciones visuales del lago, poblados y mercados.<br>Informes acerca del establecimiento del laboratorio Limnológico de Pátzcuaro.<br>Propuesta de proyectos que se llevarán en La Estación Limnológica de Pátzcuaro. |
| 1937                    | Matsui, T.  | Instalación de la estación Limnológica.<br>Proyecto de los trabajos que se desarrollan en la Estación Limnológica de Pátzcuaro, Michoacán.   |
| 1939                    | Yamasita, I.  | Evaluación de las características físicas y químicas de algunas secciones del lago.<br>Informes rendidos sobre investigaciones realizadas en el Lago de Pátzcuaro.   |
| 1939                    | Uéno, M.  | Zooplankton of Lago de Pátzcuaro México.   |
| 1940                    | Instituto de Biología UNAM<br>Ancona I., Batalla M., Caballero E.,<br>Hoffmann Roberto., Martin del<br>Campo., Ochoterena I., Rioja E.,<br>Roca J., Vega C., Villagran F. | Se llevan a cabo estudios sobre plancton, esponjas, hidrozoarios, moluscos, insectos, crustáceos, vertebrados, macrofitas y análisis químico del agua.   |
| 1941                    | Zozaya, M.  | Observaciones Termopluviométricas en Pátzcuaro.  |
| 1941 y 1944             | Osorio, T.  | Descripción de las especies de macrofauna y vegetación acuática.   |
| 1940, 1941, 1944 y 1945 | De Buen, F.   | Realiza trabajos sobre ictiología, piscicultura y artes de pesca con relación al género <i>Chirostoma</i> .<br>Trabajos sobre variaciones fisicoquímicas de las aguas del Lago de Pátzcuaro.   |
| 1941                    | De Buen, F.   | Realiza estudios limnológicos.   |
| 1941                    | Xirau, J.   | Realizan trabajos sobre ictiología y piscicultura.   |
| 1956                    | Hutchinson, G. Patrick, Ruth y<br>Deevey, E.  | Llevan a cabo un estudio sobre sedimentos.<br>Sediments of Lake Patzcuaro, Michoacán, Mexico.<br><i>Bulletin of the Geological Society of America</i> . Vol. 67 (11).<br>pp. 1491-1504.  |

|                         |  |  |
|-------------------------|--|--|
|                         |  |  |
| 1970                    | Blasquez, L. y Lozano-García, P.                                     | Llevan a cabo estudios sobre minerales no metálicos. Hidrogeología y minerales no metálicos de la zona norte del estado de Michoacán. <i>Anales del Instituto de Geología</i> . Tomo IX.153. pp. México, D.F.  |
| 1955, 1961 y 1963       | Solórzano, A.  | Realiza trabajos sobre ictiología y piscicultura. La pesca en el Lago de Pátzcuaro Michoacán. Contribución al conocimiento de la biología del charal prieto del Lago de Pátzcuaro, Michoacán.  |
| 1962                    | Álvarez, J. y Cortés, M.   | Ictiología Michoacana. Origen y distribución de la ictiofauna dulceacuícola de Michoacán.  |
| 1970                    | Moya, R.   | Realiza trabajos sobre ictiología y piscicultura. La pesca en el Lago de Pátzcuaro.  |
| 1970 y 1976             | Rosas, M.  | Realiza trabajos sobre ictiología y piscicultura.  |
| 1977 a 1980             | Toledo M., Caballero J., Mapes C., Barrera N., Argueta A. y Núñez M. | Se llevan a cabo investigaciones etnobiológicas. Los purépechas de Pátzcuaro: una aproximación ecológica.  |
| 1981                    | Mazari-Hiriart, M.<br>Caballero, J. Barrera, N. Lot, A.<br>Mapes, C. | Evaluación de la calidad de agua desde el punto de vista bacteriológico y fisicoquímico en el lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. UNAM. México.<br>Cuenca del Lago de Pátzcuaro. Guías botánicas de excursiones en México. Sociedad Botánica. México: 40 pp.  |
| 1982                    | Saavedra, J.   | Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad de agua del lago de Pátzcuaro. Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México   |
| 1989, 1992 1993a, 1993b | Chacón, A.   | Estudio Limnológico del Lago de Pátzcuaro "A limnological study of Lake Patzcuaro, México, with a consideration of the application of remote sensing techniques"<br>El ecosistema lacustre en Pátzcuaro 2000.<br>El Lago de Pátzcuaro Michoacán, México: bosquejo limnológico de un lago amenazado" UMSNH.<br>Lake Patzcuaro, México: watershed and water quality deterioration in a tropical high-altitude Latin American Lake. |
| 1985                    | Alvarado J., Zubieta, T., Ortega, R., Chacón, A., y Espinoza, R.     | Hipertroficación de un lago tropical somero (Lago Cuitzeo, Michoacán, México).   |
| 1985                    | Rojas, P.  | Crecimiento del pescado blanco en estanquería rústica con tres tipos de alimento.  |

|                   |   |   |
|-------------------|---|---|
| 1987, 1991 y 2003 | Rauda, J.   | Contribución al conocimiento de la biología pesquera del charal pinto <i>Chirostoma Pátzcuaro</i> Meek 1902 (Pisces Atherinidae) del lago de Pátzcuaro. Tesis de Licenciatura.<br>Aplicación de la técnica de Woynarovich en huevos de pescado blanco, <i>Chirostoma estor Jordan</i> 1879 del lago de Pátzcuaro, Michoacán.<br>Cultivo del pescado blanco del lago de Pátzcuaro. |
| 1991              | D.Planas J. A. y G.Moreau   | Natural eutrophication in a warm volcanic lake.   |
| 1993              | Rosas, I., Velasco, A., Belmont, R., Báez, A. y Martínez, A.                            | The algal community as an indicator of the trophic status of Lake Pátzcuaro, México.<br>Evaluación de la calidad de agua con base en algunos aspectos de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM.  |
| 1993              | Sládecek, V. y Vilaclara, G.  | A water –bloom in Lake Pátzcuaro (Michoacán, México).   |
| 1994              | Rosas, C.   | Cultivo experimental de crías de pez blanco: <i>Chirostoma estor Jordan</i> 1879 (Pisces Atherinidae) en jaulas de cultivo y bajo régimen de alimentación con cinco dietas. Tesis de licenciatura.  |
| 1996              | Dávalos-Lind, O.  | Ecología del Plancton   |
| 2001              | Hernández, S., Bernal-Brooks, F.W., Velarde, G., Ortiz, D., Lind, O. y Dávalos-Lind, L. | The algal growth potential and limiting nutrient of 30 lakes and reservoirs of Mesa Central of México.  |
| 2002 y2003        | Dávalos-Lind, L. y Lind, O.T.   | Assessing trophic state an endorheic tropical lake: the algal growth potential and limiting nutrients”<br>Seasonal and spatial variation in algal growth potential and growth limiting nutrients in a shallow Mexican lake:Lake Pátzcuaro.  |
| 2002              | Bernal-Brooks, F.W., A. Gómez-Tagle R. y Alcocer-Durand, J.                             | Lake Patzcuaro (Mexico): acontroversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS.  |
| 2002b, 2003       | Bernal-Brooks, F.W  | La limnología del lago de Pátzcuaro: una visión alternativa a conceptos fundamentales. Tesis de Doctorado. UNAM.<br>Nutriente limitante y de la productividad acuática  |
| 2002              | Martínez C.A., Ríos-Durán., G., Campos A., Toledo M. y Ross, L.G.                       | “Avances en el cultivo del pescado blanco de Pátzcuaro <i>Chirostoma estor</i> “  |
| 2002              | Bernal-Brooks, F. y MacCrimmon, H.  | Lake Zirahuen (México ): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level   |

|           |   |   |
|-----------|---|---|
|           |   | fluctuations and sediment inputs.   |
| 2003      | Rodríguez- Casillas, A.S.   | Reserva de conservación ecológica del pescado <i>Chirostoma estor</i> y acumárea <i>Algansea lacustris</i> .  |
| 2008-2011 | Sánchez-Chávez, J., Bernal-Brooks, F.W., Bravo Inclán L.A. y Tomasini Ortíz, A. C. (IMTA-FGRA)          | Calidad de agua del lago de Pátzcuaro Volumen y Calidad del Agua en una Cuenca Endorreica, el Lago de Pátzcuaro.  |
| 2008-2011 | Huerto-Delgadillo, R. Y Amador García R.I. (IMTA-FGRA)  | Evaluación y análisis de la vegetación acuática en el lago de Pátzcuaro y bases para su control.<br>Análisis Multicriterio de naturalidad de Embalse y proyecciones markovianas del cambio de uso de suelo: elementos para la planeación de obras y acciones de restauración en la cuenca de Pátzcuaro. |
| 2008-2011 | Zambrano, L., Cordova, F., Ramírez J., Mar V., Bustamante, L., Camargo, T. y Bustamante, E. (IMTA-FGRA) | Las especies exóticas del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México.   |
| 2008-2011 | Alonso-Eguíalis, P., González-Valencia, L., Estrada, C. y Rocha, M.A. (IMTA-FGRA)                       | La fauna de Macro invertebrados bentónicos del lago de Pátzcuaro y su uso como indicadores del estado de salud e integridad del hidrosistema.   |
| 2011      | Cordova-Tapia F.  | Caracterización de la estructura trófica del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. UNAM. México.   |
| 2011      | Osegura Figueroa, L.  | Calidad de agua y sedimentos en sitios con diferente grado de dragado en el lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Tesis de Maestría. INIRENA/UMSNH. México.   |
| 2008-2011 | Vargas, S. (IMTA-FGRA)  | Los pescadores del lago; entre el manejo comunitario y el deterioro ambiental.  |
| 2008-2011 | Fong, J.A. (IMTA-FGRA)  | La carpa en el comercio de pescado, la cultura alimentaria y las estrategias de vida en la región del lago de Pátzcuaro, Michoacán.   |

Anexo III. Investigaciones realizadas en el Lago de Pátzcuaro, enfocado a nutrientes.

| Autor  | Año       | Sitio             | Amonio (mg/L) | Fosforo total (mg/L) | Ortophosfatos (mg/L) | Nitrógeno total (mg/L) | Nitratos (mg/L) |
|--|-----------|-------------------|---------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------------|
| Mátsui. T y Yamashita, I.  | 1936-1939 | San pedrito       | ND            | 1.2                  | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Ihuatzio          | ND            | 0.0                  | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Cucuchucho        | ND            | 1.2                  | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Janitzio          | ND            | 0.0                  | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Tecuen            | ND            | 0.0                  | ND                   | ND                     | ND              |
| Tafall. O.   | 1940      | Máximo            | ND            | ND                   | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Mínimo            | ND            | ND                   | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Promedio          | ND            | ND                   | ND                   | ND                     | 0.24            |
| De Buen, F.  | 1941-1944 |                   | ND            | ND                   | ND                   | ND                     | 0.002           |
| Mazari-Hiriart, M.   | 1981      | Quiroga           | 0.43          | 0.05                 | ND                   | ND                     | 0.13            |
|  |           | Cuello            | 0.39          | 0.06                 | ND                   | ND                     | 0.15            |
|  |           | Napízaro          | 0.38          | 0.06                 | ND                   | ND                     | 0.013           |
|  |           | Erongarícuaro     | 0.36          | 0.05                 | ND                   | ND                     | 0.12            |
|  |           | Janítzio          | 0.42          | 0.08                 | ND                   | ND                     | 0.14            |
|  |           | Jarácuaro         | 0.42          | 0.05                 | ND                   | ND                     | 0.09            |
|  |           | Ihuatzio          | 0.5           | 0.09                 | ND                   | ND                     | 0.10            |
|  |           | Pátzcuaro         | 1.22          | 0.31                 | ND                   | ND                     | 0.23            |
| Saavedra, J.J  | 1982      | Quiroga           | ND            | 0.031                | ND                   | ND                     | 0.13            |
|  |           | Cuello            | ND            | 0.04                 | ND                   | ND                     | 0.15            |
|  |           | Napizaro          | ND            | 0.04                 | ND                   | ND                     | 0.13            |
|  |           | Erongarícuaro     | ND            | 0.03                 | ND                   | ND                     | 0.12            |
|  |           | Janitzio          | ND            | 0.06                 | ND                   | ND                     | 0.14            |
|  |           | Ihuatzio          | ND            | 0.07                 | ND                   | ND                     | 0.23            |
|  |           | Pátzcuaro         | ND            | 0.031                | ND                   | ND                     | ND              |
| Chacón-Torres, A.  | 1991      | Promedio          | 0.1           | 0.059                | 39.2                 | ND                     | 0.10            |
| Camarena, M.   | 2003      | Norte             | 0.33          | ND                   | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Cuello            | 0.33          | ND                   | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Erongarícuaro     | 0.05          | ND                   | ND                   | ND                     | ND              |
|  |           | Sur               | 0.03          | ND                   | ND                   | ND                     | ND              |
| Oseguera, L.   | 2011      | Promedio          | ND            | 0.17                 | 0.14                 | ND                     | 0.005           |
| Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA)-Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA). | 2003-2009 | Quiroga           | ND            | 0.13                 | ND                   | 2.07                   | ND              |
|  |           | Espíritu (cuello) | ND            | 0.12                 | ND                   | 2.11                   | ND              |
|  |           | Pacanda           | ND            | 0.15                 | ND                   | 2.17                   | ND              |
|  |           | Napízaro          | ND            | 0.15                 | ND                   | 2.24                   | ND              |
|  |           | Janitzio-Sur      | ND            | 0.21                 | ND                   | 2.44                   | ND              |
| Instituto Mexicano de Tecnología del agua  | 2006-2012 | Promedio          | ND            | 0.165                | ND                   | 2.235                  | ND              |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| (IMTA)-Fundación<br>Gonzalo Río Arronte<br>(FGRA). |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|

Anexo IV. Antecedentes de estudios bacteriológicos

| Autor  | Año       | Sitio         | CF                   | EF |
|--|-----------|---------------|----------------------|----|
| Instituto Mexicano de Tecnología<br>del agua (IMTA)-Fundación<br>Gonzalo Río Arronte (FGRA). | 2006-2012 | Tzintzuntzan  | 68E 6 NMP/100<br>mL  |    |
|  |           | San Jerónimo  | >161.2 NMP/100<br>mL |    |
|  |           | Cuello        | >161.2 NMP/100<br>mL |    |
|  |           | Pacanda       | >161.2 NMP/100<br>mL |    |
|  |           | Erongarícuaro | 341E6 NMP/100<br>mL  |    |
|  |           | Janitzio      | >161.2 NMP/100<br>mL |    |
|  |           | Jarácuaro     | >200 NMP/100<br>mL   |    |

Anexo V. Estudios enfocados a parámetros fisicoquímicos.

| Autor                      | Año       | Sitios        | Profundidad (m) | T °C | pH    | OD (mg/l) | Conductividad (mS/cm) | Solidos disueltos totales (SDT) (mg/L) | Transparencia Secchi (m) |
|----------------------------|-----------|---------------|-----------------|------|-------|-----------|-----------------------|--|--------------------------|
| Matsui, T. y Yamashita, I. | 1936-1939 | Quiroga       | 14.4            | ND   | 8.5   | ND        | ND                    | ND                                     | ND                       |
|                            |           | Cuello        | 10.20           | 15.6 | 8.5   | 4.87      | ND                    | ND                                     | 2.20                     |
|                            |           | Erongarícuaro | 6.7             | ND   | 8.5   | ND        | ND                    | ND                                     | ND                       |
|                            |           | Janitzio      | ND              | 15.6 | 8.5   | 4.4       | ND                    | ND                                     | 2.20                     |
|                            |           | Ihuatzio      | 5.7             | 15   | 8.5   | 4.4       | ND                    | ND                                     | 2.40                     |
|                            |           | Pátzcuaro     | ND              | ND   | 8.5   | ND        | ND                    | ND                                     | 2.20                     |
|                            |           | Máximo        | ND              | 18.6 | 8.5   | 5.09      | ND                    | ND                                     | 2.40                     |
|                            |           | Mínimo        | ND              | 17.8 | 8.5   | 4.76      | ND                    | ND                                     | 2.20                     |
| Yamashita. T.              | 1939      | San Pedrito   | 5.8             | 16.9 | 8.5   | 4.16      | ND                    | ND                                     | 2.80                     |
|                            |           | Ihuatzio      | 7.3             | 15.8 | 8.5   | 5.0       | ND                    | ND                                     | 2.4                      |
|                            |           | Cucuchucho    | 8.0             | 15.8 | 8.51  | 4.9       | ND                    | ND                                     | 2.30                     |
|                            |           | Janitzio      | 5.7             | 16.0 | 8.52  | 4.9       | ND                    | ND                                     | 2.20                     |
|                            |           | Tecuen        | 9.6             | 16.3 | 8.53  | 4.8       | ND                    | ND                                     | 2.20                     |
| Tafall. O.                 | 1940      | Máximo        |                 | 21   | 8.9   | ND        | ND                    | ND                                     | 0.50                     |
|                            |           | Mínimo        |                 | 13   | 8.6   | ND        | ND                    | ND                                     | ND                       |
|                            |           | Promedio      | 6.0             | ND   | ND    | ND        | ND                    | ND                                     | ND                       |
| De Buen, F.                | 1941-1944 | Seno Quiroga  | 15              | 20   | ND    | ND        | ND                    | ND                                     | 1.60                     |
|                            |           | Cuello        | 10.2            | ND   | 6CC   | ND        | ND                    | ND                                     | 1.40                     |
|                            |           | Erongarícuaro | 6.7             | ND   | 4.8CC | ND        | ND                    | ND                                     | ND                       |
|                            |           | Ihuatzio      | 4               | 20   | ND    | ND        | ND                    | ND                                     | 1.40                     |
|                            |           | Máximo        | ND              | 22   | 8.9CC | 5.75      | ND                    | ND                                     | 1.96                     |
|                            |           | Mínimo        | ND              | 19   | 8.6   | 4.07      | ND                    | ND                                     | 1.94                     |

Análisis y determinación de la calidad del agua mediante el uso de bacterias indicadoras en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán.

|                       |           |                   |      |      |      |      |       |     |      |
|-----------------------|-----------|-------------------|------|------|------|------|-------|-----|------|
|                       |           | Promedio          | ND   |      | 8.7  | 4.97 | ND    | ND  | 1.45 |
| Téllez, C.y Motte, O. | 1976      | Máximo            | ND   | 22.2 | 8.5  | 8.5  | 2.50  | ND  | 1.32 |
|                       |           | Mínimo            | ND   | 15.0 | 6.5  | ND   | 0.500 | ND  | ND   |
|                       |           | Promedio          | ND   | 19.9 | 8.4  | 6.2  | 0.733 | ND  | 1.64 |
| Mazari-Hiriart, M.    | 1981      | Quiroga           | 8.74 | 19.7 | 8.4  | 5.4  | ND    | ND  | 0.84 |
|                       |           | Cuello            | 10.6 | 20.0 | 8.5  | 5.6  | ND    | ND  | 1.12 |
|                       |           | Napízaro          | 7.64 | 20.1 | 8.5  | 5.7  | ND    | ND  | 0.96 |
|                       |           | Erongarícuaro     | 3.96 | 20.3 | 8.6  | 6.14 | ND    | ND  | 1.1  |
|                       |           | Janítzio          | 5.4  | 19.7 | 8.4  | 6.18 | ND    | ND  | 0.91 |
|                       |           | Jarácuaro         | 5.2  | 19.9 | 8.56 | 5.76 | ND    | ND  | 1.0  |
|                       |           | Ihuatzio          | 3.6  | 20.2 | 8.6  | 5.2  | ND    | ND  | 1.18 |
| Pátzcuaro             | 2.4       | 21.4              | 8.3  | 2.8  | ND   | ND   | 0.41  |     |      |
| Velasco, A.           | 1982      | ND                | ND   | ND   | ND   | 6.62 | ND    | ND  | 0.92 |
| Saavedra, J.          | 1982      | Quiroga           | 8.74 | 20.6 | 8.52 | 5.42 | ND    | ND  | 0.84 |
|                       |           | Cuello            | 10.6 | 21.2 | 8.6  | 5.6  | ND    | ND  | 1.12 |
|                       |           | Napizaro          | 7.6  | 20.4 | 8.6  | 5.0  | ND    | ND  | 0.96 |
|                       |           | Erongarícuaro     | 3.96 | 22.1 | 8.6  | 6.1  | ND    | ND  | 1.10 |
|                       |           | Janitzio          | 5.4  | 20.6 | 8.5  | 6.38 | ND    | ND  | 0.91 |
|                       |           | Ihuatzio          | 3.6  | 21.3 | 8.6  | 5.02 | ND    | ND  | 1.18 |
|                       |           | Pátzcuaro         | 2.4  | 22.5 | 8.3  | 2.82 | ND    | ND  | 0.41 |
| Chacón-Torres, A.     | 1991      | Máximo            | 12.2 | ND   | 9.8  | ND   | ND    | ND  | ND   |
|                       |           | Mínimo            | 1.5  | ND   | ND   | ND   | ND    | ND  | ND   |
|                       |           | Promedio          | 4.9  | 17.0 | 9.3  | 7.1  | 0.820 | 572 | 0.40 |
| IMTA-FGRA             | 2003-2009 | Quiroga           | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.722 | 130 | ND   |
|                       |           | Espíritu (cuello) | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.734 | ND  | ND   |

|              |           |                   |      |         |      |      |               |     |      |
|--------------|-----------|-------------------|------|---------|------|------|---------------|-----|------|
|              |           | Pacanda           | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.625         | ND  | ND   |
|              |           | Janitzio-Sur      | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.727         | ND  | ND   |
|              |           | Napízaro          | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.668         | ND  | ND   |
|              |           | Máximo            | 10.9 | ND      | 9.91 | ND   | 0.945         | ND  | ND   |
|              |           | Mínimo            |      | ND      | 7.56 | ND   | 0.666         | ND  | ND   |
|              |           | Promedio          | 4.9  | 14-22   | 8.7  | 6.77 | 0.695 y 0.734 | ND  | 0.28 |
| Camarena G.  | 2003      | Norte             | ND   | 19.3    | 8.7  | 5.28 | 0.934         | ND  | 0.34 |
|              |           | Cuello            | ND   | 19.6    | 8.3  | 5.94 | 0.956         | ND  | 0.37 |
|              |           | Erongarícuaro     | ND   | 19.4    | 8.2  | 5.63 | 0.956         | ND  | 0.41 |
|              |           | Sur               | ND   | 19.54   | 8.3  | 6.19 | 0.949         | ND  | 0.40 |
|              |           | Promedio          | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.919         | ND  | ND   |
| Oseguera, L. | 2011      | Isla Yunuen       | ND   | ND      | 9.2  | 5.12 | 1.023         | 303 | 0.30 |
|              |           | Uranderes         | ND   | ND      | 8.4  | 3.98 | 0.486         | 27  | 0.12 |
|              |           | Ihuatzio          | ND   | ND      | 9.1  | 3.10 | 0.943         | 148 | 0.18 |
|              |           | Erongarícuaro     | ND   | ND      | 9.2  | 5.64 | 1.028         | 31  | 0.12 |
| IMTA-FGRA*   | 2006-2012 |                   | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.722         | 130 | ND   |
|              |           | Espíritu (cuello) | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.734         | ND  | ND   |
|              |           | Pacanda           | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.625         | ND  | ND   |
|              |           | Janitzio-Sur      | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.727         | ND  | ND   |
|              |           | Napízaro          | ND   | ND      | ND   | ND   | 0.668         | ND  | ND   |
|              |           | Máximo            | 10.9 | ND      | 9.91 | ND   | 0.945         | ND  | ND   |
|              |           | Mínimo            |      | ND      | 7.56 | ND   | 0.666         | ND  | ND   |
|              |           | Promedio          | 4.9  | 14 y 22 | 8.7  | 6.77 | 0.695 y 0.734 | ND  | 0.28 |