

INFORME TÉCNICO FINAL

GTO-2012-C03-195044

Dinámica poblacional del lirio acuático en la laguna
de Yuriria

Responsable técnico

Carlos Alberto Leal Morales

Universidad de Guanajuato

Guanajuato, Gto., a 23 de febrero de 2016

2. RESUMEN DEL PROYECTO

El lirio acuático, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, es una planta capaz de crecer en una amplia variedad de hábitats de agua dulce, se encuentra distribuida en casi todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo y se le considera como la peor y más cara maleza del mundo. En la laguna de Yuriria (7000 ha), esta planta ha llegado a cubrir hasta el 60% de su superficie. Para su control, en Yuriria, se ha empleado la fumigación con herbicidas, el control biológico y la extracción manual o con maquinaria, sin embargo, no ha habido una cuantificación sistemática de los valores de infestación por la planta. El presente estudio tiene la finalidad de en la laguna de Yuriria: 1) conocer el histórico de la extensión del lirio mediante imágenes satelitales; 2) establecer si hay correlación de los parámetros fisicoquímicos del agua con la presencia espacial de la planta; 3) calcular la capacidad de extracción necesaria de las plantas del lirio para mantener un nivel bajo de infestación en Yuriria; 4) determinar el valor nutricional de la planta de lirio; 5) conocer la concentración de metales pesados en las plantas para establecer si ello impide algún uso; 6) establecer si los metales pesados estudiados se geo acumulan en los sedimentos y 7) estudiar la variación de temperatura, precipitación y evaporación en un histórico de 63 años. El estudio de las imágenes satelitales indican que la infestación en la laguna de Yuriria ha tenido grandes variaciones, y que su extensión depende del grado de compactación que se puede presentar en la laguna por efecto del viento, sin embargo, no fue posible establecer la condición de viento que lo acumula y mueve, debido a que se contó con una sola estación meteorológica, que no estuvo ubicada en el suroeste de la laguna para determinarlo. Por esta conclusión, ninguno de los parámetros fisicoquímicos determinados tiene una correlación con la ubicación de la planta en la laguna y no fue posible establecer un modelo de la dinámica poblacional del lirio. En lo que respecta a la capacidad de extracción de la planta se concluye que se debe de al menos duplicar o cuadruplicar para mantener bajos los niveles de infestación. Se separaron, deshidrataron y molieron hojas, tallo y raíz de muestras de plantas de lirio acuático colectadas en la Laguna de Yuriria al final de cada una de las cuatro estaciones del año 2014. Se analizó humedad, proteína, cenizas, extracto etéreo, fibra cruda e hidratos de carbono y se determinó As, Cd, Cu, Pb y Zn. Los resultados muestran que los valores más altos se presentan en la hoja para las proteínas e hidratos de carbono, mientras que la humedad y fibra cruda fueron en el tallo, siendo la raíz el tejido que presentó más cenizas y lípidos. Por estación del año, en primavera se presenta un mayor contenido de lípidos y cenizas, en verano es la fibra cruda y los hidratos de carbono los que predominan, mientras que en otoño fueron las proteínas, por lo que se observa una diferenciación química en los tejidos. En la raíz de la planta el As, Cd y Pb, se presentaron en concentraciones por arriba de las normas mexicanas, por lo que no es recomendable el uso de la planta en la alimentación animal, pero podría utilizarse en otra actividad que no implique su consumo por seres vivos. Se considera que la laguna ejerce un efecto microclima afectando los parámetros meteorológicos locales, como la temperatura, la precipitación y la evaporación. Las lluvias registraron aumentos con el tiempo debido al efecto de la presencia del cuerpo de agua condicionando una mayor nubosidad y precipitación. La evaporación disminuyó a lo largo de los años debido probablemente a una disminución en la temperatura o a un aumento en la nubosidad. La dirección dominante del viento resultó del Este, con velocidades más frecuentes en el rango de 0.5-2.1 m/s seguido por vientos calmados. El viento predominante junto con las corrientes de agua internas de la laguna acumulan las poblaciones de lirio acuático hacia las orillas occidentales durante la mayor parte del año. Se confirmaría que Yuriria va incrementando con los años los procesos de eutrofización a través de la entrada de nutrientes por descargas en las orillas del cuerpo lacustre. Esto es evidenciado porque las zonas de los bordes de la laguna presentaron contenidos elevados de materia orgánica y N total,

en comparación con la zona central. Los puntos denominados “Uriangato” y “Zempoala” seguramente reciben el mayor aporte de materia orgánica a través de las descargas de aguas residuales y agrícolas. La concentración de los metales en los sedimentos resultó por debajo del valor de fondo de las rocas de la corteza continental para Al, Fe, Mg, Cu, Cr, Zn, Pb y As. Para el caso del Cd, su contenido presenta valores por arriba del valor de fondo. Se concluye que la contribución antrópica comenzaría a tener una participación influyente en la acumulación de metales en los sedimentos de Yuriria, especialmente para el Cd.

3. RESULTADOS DEL PROYECTO

3.1 Metas y objetivos alcanzados

Se presenta de manera comparativa las metas establecidas por cada una de las dos etapas y los objetivos alcanzados por el proyecto. Al final se incluyen los logros adicionales.

Etapa I	
Metas establecidas	Objetivos alcanzados
1. En los mapas, colocar los datos de la extensión de la masa del lirio, los cuales serán tomados de las fotografías gestionadas.	Se obtuvieron las imágenes satelitales por gestión ante ERMEX y se obtuvieron los valores de infestación, los cuales se presentan en el Anexo 3, Capítulo I.
2. Resultados del estudio de los parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna.	<p>Se observa que hay variaciones importantes a lo largo del año, siendo el mes de julio el que presentó una mayor variación, por lo que se seleccionó para estudiar la distribución en la laguna de los diferentes parámetros determinados. En el caso de la determinación de amonio y nitratos, el electrodo tuvo problemas, se cambiaron de garantía y solo se logró la determinación en mayo y agosto para amonio y en abril agosto para nitratos, por lo que estos parámetros y el fosfato fueron estudiados en su distribución en el mes de mayo.</p> <p>Se observa que el pH y el oxígeno disuelto dependen de la temperatura. También se observa la correlación de la conductividad y de los sólidos totales disueltos, para todos estos parámetros su valor más alto se encuentra al sur de la laguna. La resistividad presenta una distribución muy similar a la turbidez, encontrándose valores bajos en la mayoría de la laguna y valores más altos en una franja muy pequeña al sur de ella.</p> <p>El amonio y el nitrato se encontraron en una mayor concentración en la parte noreste de la laguna, lo que implica que las poblaciones de Loma de Zempoala y La Angostura contribuyen a la contaminación de la laguna. Por su parte el fosfato se encontró en mayor concentración en</p>

	<p>el poniente de la laguna lo que implica que la actividad agrícola de esta zona es el principal aporte de este compuesto.</p> <p>Ninguno de los parámetros determinados esta fuera de las normas, por lo que el uso del agua de la laguna no está limitado para ningún uso.</p> <p>Los datos, metodología y otras consideraciones se encuentran en el Anexo 3, Capítulo I.</p>
<p>3. Contar con la base de datos de la extensión de la masa del lirio, los valores de intensidad, dirección del viento y temperatura a lo largo del año en la laguna.</p>	<p>Los datos de la extensión de la mancha del lirio en el histórico de 2009 a la fecha, se presentan en el Anexo 3. La intención era contar con datos mes a mes de la infestación de la laguna por lirio acuático, sin embargo, no existen las imágenes satelitales necesarias para esta determinación. Del análisis de las imágenes satelitales con las que se cuentan concluimos que hay variaciones debido al grado de compactación del lirio por el viento, ya que hay variaciones importantes en la extensión de un día a otro.</p> <p>La posición del lirio es cambiante pero el estudio del viento no nos permitió asociarlos, seguramente debido a que la determinación del viento se llevó a cabo en la ciudad de Yuriria y no en donde se encuentra la mayor parte del tiempo que es el Oeste de la laguna.</p> <p>Los datos de la temperatura, metodología y otras consideraciones se encuentran en el Anexo 3, Capítulo I.</p>
<p>4. Contar con los valores de densidad, tamaño, peso de las plantas en el estanque construido y en la laguna.</p>	<p>Para realizar estas determinaciones se había planeado un estanque cubierto con geomembrana y llenado con agua de la laguna con una bomba, sin embargo, no se pudo contar con un terreno aledaño a la laguna que estuviese protegido del vandalismo, por lo que se optó por delimitar tres espacio contiguos de 9 x 3 m con postes de madera y tela para gallinero dentro de la laguna. Esta estrategia funcionó por muy poco tiempo debido a que la mancha del lirio pasó varias veces y destruyó el sitio. Por lo que para contar con estos valores se recurrió a determinar el peso y número de plantas por metro cuadrado en dos condiciones de densidad, alta y baja y a valores de la bibliografía. Los datos y otras consideraciones se encuentran en el Anexo 3, Capítulo I.</p>
<p>Etapa II</p>	
<p>Metas establecidas</p>	<p>Objetivos alcanzados</p>
<p>1. Determinar la capacidad de extracción que se requiere para mantener la superficie cubierta por lirio acuático en la laguna a una</p>	<p>De los datos proporcionados por el Instituto de Ecología se extraen anualmente de 100,800 a 172,800 ton de planta. Si en abril del 2014 habían 241 ha de lirio y en abril del 2015 habían 1,181 ha (por las imágenes satelitales del día 12), implica que hay 940 ha más de lirio. Considerando que en promedio se extrajeron 423 ha en el año, se tendrían 1,363</p>

extensión no mayor a 250 ha.	ha más de abril de 2014 a abril de 2015, lo que implica que la planta aumenta 5.7 veces en un año. Con estos valores, la capacidad que se debería de tener para mantener controlada la infestación del lirio en la laguna de Yuriria, debería de ser 3.1 veces mayor que la que se tiene actualmente. Si se considera el valor en marzo de 2015 de 584.8 ha (imagen satelital del día 3), la planta aumenta 4.2 veces en un año y la capacidad instalada debería de ser 2.3 veces mayor que la actual.
2. Establecer el modelo de la dinámica poblacional del lirio en la laguna de Yuriria	No se observa una regularidad en la posición de la planta, ya que está en constante movimiento, debido al viento, por lo que no es posible correlacionarlo con algún o algunos de los parámetros determinados y por ello no es posible establecer un modelo. Si el movimiento del lirio se lo atribuimos al viento, las determinaciones de su velocidad y dirección en el presente estudio no permitió corroborarlo, debido a que solo se contó con una estación meteorológica ubicada en la ciudad de Yuriria, por lo que habría que tener datos del Oeste de la laguna, lugar en el que se ubica la mancha del lirio en la mayor parte del tiempo.
3. Dos publicaciones	Ya se envió una publicación y se trabaja en otras tres. Ver anexo 3.
4. Dos presentaciones en congresos	No se han realizado debido a que aún se está procesando los datos.
5. Dos tesis de licenciatura.	No se realizaron, debido a que el cronograma planteado implicó la colecta de las muestras y luego su procesamiento. Aunado a que la Dra. Bautista se jubiló en abril de 2015, ella misma realizó el análisis bromatológico y no un alumno como se tenía planeado. La otra beca comprometida, fue rechazada por el CONACYT, debido a que la solicitud se hizo con solo cinco y no seis meses antes de la fecha de término del proyecto.
Logros adicionales	
1. Análisis bromatológico y metales pesados de las plantas del lirio de la laguna de Yuriria. Se concluye que el lirio es una planta con alto contenido de hidratos de carbono, sin embargo, por su contenido de metales pesados no se recomienda como alimento. Anexo 3, Capítulo II.	
2. El estudio de los sedimentos de la laguna permite establecer que las partes con mayor contenido de materia orgánica está en las orillas de la laguna y que el Cadmio es el metal pesado que se encuentra acumulado. Anexo 3, Capítulo III.	
3. Estudio histórico de temperatura, precipitación y evaporación de la estación meteorológica denomina Santa María Yuriria, la cual está ubicada en el muelle de Yuriria, siendo la única estación con la que se cuenta con datos y que está cerca de la laguna. También se incluyen los mismos parámetros y el viento de la estación meteorológica adquirida en el presente proyecto. Los datos muestran un balance hídrico negativo y que el viento predominante en la ciudad de Yuriria es hacia el Este, por lo	

que no es posible establecer que el viento sea el factor de la ubicación del lirio, sin embargo, pensamos que esto se debe a la ubicación de la estación meteorológica. Anexo 3, Capítulo IV.

3.2 Contribución técnica del proyecto

El proyecto contribuye a establecer la extensión del lirio acuático en la laguna de Yuriria, que si bien la extensión es cuantificada por distintas dependencias del gobierno del estado de Guanajuato, no se habían tomado en cuenta fotos satelitales, lo que permite tener datos referenciados.

Por primera vez se hacen estudios de metales pesados en la planta presente en la laguna de Yuriria, lo que permite establecer que no es apta para consumo y que hay que determinar si la concentración que se tiene permite otros usos como la manipulación por las personas o composta en las zonas agrícolas.

También por primera vez se hace un estudio de los sedimentos de la laguna de Yuriria, encontrando una gran cantidad de materia orgánica en ellos, pero principalmente en las orillas. Se estableció también que hay aporte de Nitrógeno por las descargas en el Noreste y Suroeste de la laguna.

Se determinó que la zona Suroeste es la que más aporta fosfato a la laguna, mientras que en la zona Noreste el principal aporte es de amonio y nitrato.

Por lo anterior se presentan una serie de recomendaciones para mitigar la eutrofización de la laguna, como son plantas de tratamiento agua para las poblaciones que descargan en ella y fortalecer el humedal que de forma natural presenta la laguna en la zona Suroeste.

Se está trabajando en cuatro publicaciones, ver Anexo 3 y se harán al menos dos presentaciones en congresos.

3.3 Productos de la investigación

1. Dos publicaciones	Ya se envió una publicación y se trabaja en otras tres. Ver anexo 3.
2. Dos presentaciones en congresos	No se han realizado debido a que aún se está procesando los datos, pero se llevarán a cabo.
3. Dos tesis de licenciatura.	No se realizaron, debido a que el cronograma planteado implicó la colecta de las muestras y luego su procesamiento. Aunado a que la Dra. Bautista se jubiló en abril de 2015, ella misma realizó el análisis bromatológico y no un alumno como se tenía planeado. La otra beca comprometida, fue rechazada por el CONACYT, debido a que la solicitud se hizo con solo cinco y no seis meses antes de la fecha de término del proyecto.

3.4 Formación de recursos humanos

No se realizaron, debido a que el cronograma planteado implicó la colecta de las muestras y luego su procesamiento. Aunado a que la Dra. Bautista se jubiló en abril de 2015, ella misma realizó el análisis bromatológico y no un alumno como se tenía planeado. La otra beca comprometida, fue rechazada por el CONACYT, debido a que la solicitud se hizo con solo cinco y no seis meses antes de la fecha de término del proyecto. Sin embargo la alumna ANGÉLICA RUBÍ HERNÁNDEZ LUNAR, tienen registrado su anteproyecto de tesis con el título Evaluación de la contaminación por metales pesados en el sedimento de la laguna de Yuriria (Guanajuato) para el periodo 2014 – 2015.

3.5 Colaboración interinstitucional y multidisciplinaria

La institución en la que se desarrolló el presente proyecto fue la Universidad de Guanajuato.

El equipo de trabajo estaba conformado por las Dras. Mayela Bautista Justo, Gabriela Ana Zanor, Ma. Teresa Vieyra Hernández, el M. en C. Ricardo González Barbosa y Dr. Carlos Alberto Leal Morales. Sin embargo, Ricardo González no cumplió con su parte en el proyecto que era el análisis de las imágenes satelitales y el desarrollo de los mapas con las interpolaciones de los parámetros fisicoquímicos y compuestos, por lo que fue necesario contratar a una persona para cumplir con lo establecido en el proyecto en este sentido.

La Dra. Mayela Bautista Justo realizó el estudio bromatológico de la planta del lirio durante el año 2014 y terminó el estudio en abril de 2015 justo antes de jubilarse. Fue la encargada de iniciar el artículo enviado a publicar.

La Dra. Gabriela Ana Zanor realizó el estudio de los sedimentos y fue la encargada de terminar de procesar las muestras de la planta y llevarlas para obtener los resultados de los metales pesados. Dirigió la tesis de la alumna Angélica Rubí Hernández Lunar. Escribió los manuscritos de sedimentos y el de clima y se encargará de su publicación.

La Dra. Ma. Teresa Vieyra Hernández realizó la parte del estudio de los compuestos de nitrógeno y fosfatos de las muestras de agua y los cálculos para las determinaciones de la capacidad de extracción de la planta. Escribió la parte de análisis de imágenes satelitales y extensión de la planta y cálculos de la extracción y se encarga de su publicación.

El Dr. Carlos Alberto Leal Morales estuvo a cargo de las salidas a la laguna de Yuriria, de las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos y compilar y entregar los informes técnicos. Incorporó el estudio de los metales pesados al artículo del análisis bromatológico y se está haciendo cargo de su publicación. Participa en incorporar los datos de los parámetros fisicoquímicos en la publicación del análisis de las imágenes satelitales.

Por acuerdo del grupo de trabajo en las publicaciones que se generen del proyecto se incluirá el nombre de los tres doctores, ya que la Dra. Mayela Bautista decidió que su nombre no fuera incluido, el nombre de la alumna se incluirá en los trabajos en los que haya participado.

4. IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN EN LOS SECTORES USUARIOS

4.1 Productos del proyecto transferidos o transferibles a los usuarios

Los productos transferidos, además del presente informe son las siguientes recomendaciones para mejorar la calidad del agua y disminuir la presencia del lirio en la laguna.

Establecer un retén de la planta en la zona Suroeste de la laguna a fin de evitar su movilidad y reducir su tasa de reproducción

Aumentar la capacidad instalada de extracción mecánica de la planta del lirio de la laguna, de 2 a 4 veces

Se hace necesario continuar con determinaciones fisicoquímicas y de los compuestos amonio, nitrato y ortofosfato. Hay que incluir la determinación de urea que es el fertilizante químico más empleado en la región aledaña a la laguna

Iniciar determinaciones biológicas permanentes de coliformes y productores primarios, buscando el establecimiento de otras acciones tendientes a mejorar la salud de la laguna

Iniciar determinaciones químicas de la Demanda Química y Biológica de Oxígeno, a fin de determinar el índice de eutrofización de la laguna

El viento es la principal variante que determina la posición del lirio en la laguna, por lo que se hace necesario contar con al menos tres estaciones meteorológicas más para establecer una relación posición-compactación-fuerza de viento

Continuar con el monitoreo de crecimiento de lirio en las diferentes épocas para establecer la velocidad de crecimiento de lirio en diferentes condiciones de compactación y estacionalidad

Identificar fuentes de contaminación antrópica de metales pesados para su atención

Conocer la eficiencia de las plantas de tratamiento de agua de Uriangato y Yuriria y establecer plantas de tratamiento funcionales para las poblaciones de Lomas de Zempoala y La Angostura

Promover el uso de fertilizantes orgánicos

Establecer humedales en las zonas agrícolas para bajar la carga de fertilizantes que llegan a la laguna y fortalecer el humedal de la zona Suroeste de la laguna con árboles y plantas macrófitas.

Estimar el costo de servicios ambientales y turísticos que se tendrían que asumir si no se realizan acciones para reducir la extensión del lirio en la laguna

Promover usos viables del lirio como papel, biogás u otro para fibra previos estudios de toxicidad por metales pesados

4.2 Mecanismos de transferencia utilizados

El 29 de enero de 2016 se presentaron los resultados del proyecto en la “Reunión para establecer una estrategia integral e interinstitucional del control del lirio acuático en la laguna de Yuriria”, la cual se llevó a cabo de 10 a 12 h, en el Centro de Atención de la Laguna de Yuriria, en el municipio de Yuriria, con integrantes del Instituto de Ecología, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y

Rural y del municipio de Yuriria, la cual sirvió para proponer acciones para mitigar la presencia del lirio en la laguna. Anteriormente se han tenido tres reuniones de trabajo con personal de la Dirección de Recursos Naturales del Instituto de Ecología para hacer la presentación de resultados y acordar modificaciones en la presentación de los mismos a efecto de tener mayor claridad y afinar las propuestas que se realizan en el presente informe.

4.3 Beneficio potencial del proyecto

Con los datos obtenidos del proyecto, se proponen acciones muy concretas para disminuir la presencia del lirio y aumentar la calidad del agua de la laguna de Yuriria, por lo que el implemento de las acciones propuestas en la sección 4.1 del presente documento y en particular las listadas a continuación, permitirán disminuir la eutrofización de la laguna.

1. Con los datos de la infestación del lirio en la laguna de Yuriria, se propone aumentar la capacidad instalada de 2 a 4 veces para mantener un valor bajo de infestación
2. Se propone que en un estudio ulterior se determinen parámetros biológicos como coliformes para conocer la salud biológica del agua de la laguna, ya que los datos de las características fisicoquímicas de la laguna no indican impedimento en el uso humano del agua de la laguna
3. Conociendo los valores y su distribución de compuestos clave que marcan contaminación por la actividad humana, aguas residuales y agrícolas, se propone tratar el agua de las poblaciones de Loma de Zempoala y La Angostura antes de verterlas a la laguna y fortalecer el humedal de la zona Suroeste.

4.4 Compromisos asumidos por los usuarios

Plantear acciones en el futuro inmediato para disminuir la presencia del lirio en la laguna de Yuriria.

4.5 Observaciones a la evaluación de los usuarios

Consideramos que los usuarios comprendieron las dificultades para la obtención de algunos datos y los que se presentan correspondieron a sus expectativas, lo que permitirá plantear acciones para disminuir la presencia del lirio en la laguna de Yuriria, cumpliendo con el objetivo del proyecto.

5. APLICACIÓN DE LOS RECURSOS FINANCIEROS

5.1 Resumen financiero

Se presentan los Anexos D y E con la información correspondiente.

5.2 Resumen de aportaciones complementarias

No hubo en este proyecto.

6. RECOMENDACIONES

6.1 Para la implementación de las acciones derivadas del proyecto

Buscar la manera de conjuntar las diversas acciones propuestas con otros actores del gobierno estatal y federal, como pudieran ser la Comisión Nacional de Agua, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural de estado de Guanajuato, la Comisión Estatal del Agua y los organismos municipales operadores del agua y saneamiento.

6.2 Para la difusión de los resultados

Se presentarán los resultados en Congresos Nacionales y se harán las publicaciones de los resultados más relevantes.

7. ANEXOS

Anexo 1 Desarrollo del proyecto

Los artículos a publicar se han estado trabajando a la par que el presente informe y para efectos de éste se han denominado Capítulos.

CAPÍTULO I. Infestación de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México. En la pág 12

CAPÍTULO II. Composición química y contenido de metales pesados del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) recolectado en las cuatro estaciones del año en la Laguna de Yuriria, Guanajuato, México. En el formato para la Revista Fitotecnia Mexicana. En la pág 32

CAPÍTULO III. Evaluación de la contaminación por metales pesados en sedimentos de la laguna de Yuriria (Guanajuato) para el periodo 2014-2015. En la pág 49

CAPÍTULO IV. Análisis climatológico en la laguna de Yuriria (Guanajuato). En la pág 68

CAPÍTULO I

Infestación de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México

Vieyra-Hernández Ma. Teresa, Bautista-Justo Mayela, Zanor Gabriela y Leal-Morales Carlos
Alberto

Universidad de Guanajuato

Resumen

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es considerada la peor y más cara maleza acuática del mundo por su gran capacidad de crecimiento y por el gasto que se ejerce para controlarla. No se cuenta con un registro histórico sobre los niveles de infestación de esta maleza en la laguna de Yuriria, sin embargo, se sabe que ha llegado a cubrir el 60% de su superficie (4200 ha aproximadamente). En diversas ocasiones se ha fumigado la planta con herbicidas, se han realizado inoculaciones con nequetinos, insecto que ejerce control biológico sobre la planta, y actualmente se está ejecutando un programa de extracción de la planta. Sin embargo los resultados no han sido del todo satisfactorios porque no se conocen datos de su velocidad de crecimiento y comportamiento a lo largo del año de la planta en la laguna aunado a que no se han tomado medidas para evitar la presencia de compuestos que promueven el crecimiento de la planta. Los datos estudiados indican una variación muy grande en los niveles de infestación a lo largo de un año, teniendo variaciones importantes de un día a otro, por lo que se estima que la planta está en constante movimiento y que su densidad varía significativamente por efecto del viento y las corrientes de agua en la laguna. En lo que respecta a la capacidad de extracción de la planta se concluye que se debe al menos duplicar para mantener bajos los niveles de infestación. De la determinación los parámetros fisicoquímicos indican que el más con mayor variación fue julio y que el pH, la conductividad eléctrica, la resistividad, los sólidos totales disueltos y la turbidez están en función de la temperatura y todos ellos presentan una distribución en una orientación este – oeste, sin que ninguno de ellos este fuera de las normas para considerarse limitativo para su uso humano. El amonio y el nitrato se encontraron en una mayor concentración en la parte noreste de la laguna, lo que implica que las poblaciones de Loma de Zempoala y La Angostura contribuyen a la contaminación de la laguna. Por su parte el fosfato se encontró en mayor concentración en el poniente de la laguna lo que implica que la actividad agrícola de esta zona es el principal aporte de este compuesto, por lo que se propone plantas de tratamiento de agua para las poblaciones mencionadas y fortalecer el humedal en la parte Suroeste de la laguna.

Introducción

El lirio acuático, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, es una planta capaz de crecer en una amplia variedad de hábitats de agua dulce (Gopal, 1987), es Brasileña de origen, pero actualmente y con la ayuda del hombre, se encuentra distribuida en casi todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Goyer y Stark, 1981; Wright y Center, 1984; Gopal, 1987; Harley, 1990; Aguilar, 1994; Cofrancesco, 1998; Rzedowski y Rzedowski, 2001; Martínez y Gutiérrez, 2001). El lirio acuático es 90 % agua, sus hojas son de forma elípticas a oblata, llegando a ser casi circulares, sus peciolo, de hasta 40 cm de largo, son esponjosos y forman bulbos flotantes, que

pueden llegar a medir hasta 5 cm de diámetro (Gopal, 1987). La planta se reproduce eficientemente de forma vegetativa por medio de los estolones y sexualmente por las semillas que se desarrollan abundantemente en las inflorescencias, las cuales se forman en la espiga que puede llegar hasta los 16 cm de altura y en la que se podrían desarrollar hasta 12 flores que son de color lila con una mancha amarilla en uno de sus pétalos (Rzedowski y Rzedowski, 2001). Ha sido precisamente la belleza de sus flores lo que la ha dispersado como planta ornamental por el mundo y a casi todo nuestro país, particularmente en Yuriria ha llegado a ocupar el 60% de la superficie del embalse (Ramos y Novelo, 1993).

La laguna de Yuriria se encuentra localizada en el municipio del mismo nombre al sur del Estado de Guanajuato, presenta una superficie de 7000 ha con una capacidad de almacenamiento de 187 millones de m³ de agua. La laguna se ubica en la Cuenca Lerma – Santiago y su principal captación de agua es controlada desde la Presa Solís. Los alrededores de la laguna se aprovechan en diversos cultivos, aunque la principal actividad económica era la pesca (Ramírez, 2000), también ha provocado la desaparición de flora y fauna silvestre, la dificultad para el eficiente aprovechamiento del agua al invadir canales y compuertas y el aumento en los riesgos de salud. A pesar de que desde 1992 se ha aplicado tanto el control mecánico como el químico y el biológico buscando la erradicación de la planta en la Laguna de Yuriria, esto no ha sido posible conseguirlo principalmente debido al alto costo, a la frecuencia con que debe de realizarse el trabajo y a la velocidad con la que la planta se reproduce.

Actualmente en la laguna de Yuriria, el gobierno del estado de Guanajuato, está llevando a cabo la extracción de la planta en la comunidad de la Puerta de Andaracua, en la Isla San Pedro y manualmente, mediante el pago de jornales. El trabajo que se llevó a cabo en 2015 (febrero a diciembre), se calcula que se extrajeron 423 ha, equivalente a 102,464 ton de planta.

El objetivo del presente trabajo es determinar la superficie cubierta del lirio en la laguna de Yuriria, mediante el uso de imágenes satelitales, la velocidad de crecimiento de la planta y calcular en base a ello la capacidad de extracción necesaria para controlar la infestación. Además conocer los valores de diversos parámetros fisicoquímicos y compuestos marcadores de contaminación, así como conocer su distribución.

Materiales y Métodos

Imágenes satelitales. Para tener acceso a las imágenes satelitales fue necesario inscribirse como gestor en el en la Estación de Recepción México Nueva Generación (ERMEX NG), que es un proyecto conjunto entre la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA); que tiene entre otras funciones la de gestionar las imágenes satelitales del territorio nacional. La ERMEX NG recibe telemetría de la constelación de Satélites Para la Observación de la Tierra (SPOT). Se trató de hacer un estudio histórico de los últimos cinco años en lo que se refiere a la infestación del lirio en la laguna de Yuriria, pero solo se contó con siete imágenes del 2005 al 2013, sin contar con datos en el 2006 a 2008. Se contó con 12 imágenes del 2014 (todos los meses con excepción de los meses de marzo, mayo y diciembre), en el caso del año 2015 se han analizado imágenes hasta abril, con excepción del mes de enero, ya que no se cuenta con la de ese mes.

Procesamiento de las imágenes satelitales. Primero se realizó una selección de imágenes considerando que se debería de tener todo el espejo de agua, que la nubosidad de la imagen fuera menor al 20% y que la imagen tuviera un nivel de procesamiento 3A, esto es, imágenes con correcciones radiométricas y de sensor. Las imágenes fueron procesadas empleando el software ERDAS Imagine 2014 (v14.00) y ESRI ArcMap 10 (v10.0).

Si las imágenes fueron procesadas en ERDAS Imagine: a. Exportación de archivos de formato .JPEG 2000 (Joint Photographic Experts Group – Grupo Conjunto de Expertos en Fotografía) al .IMG (Imagine) nativo de ERDAS. b. Exportación de archivos de formato .TIFF (File Format Tagged Image - Formato de Archivo de Imagen Etiquetado) al .IMG (Imagine) nativo de ERDAS. c. Se delimitó un área de interés (AOI) exclusivamente del espejo de agua en la Laguna. d. Clasificación NO supervisada, mediante el método de K Means (K Medias) el cual permite la agrupación de casos. Se basa en las distancias existentes entre ellos en un conjunto de variables. Los parámetros utilizados fueron: Parámetro Valor Clustering options: Initialize from statistics Method: K Means, number of clases: 5, Maximun Iterations: 10, Convergence Threshold: 0.950, Skip Factor: X: 1 - Y: 1, Classify zeros: Uncheck, AOI Espejo_agua_2. e. A la imagen resultante se le aplicó un filtro de barrido. Lo anterior, porque de la clasificación se presentan una serie de pixeles aislados, los cuales no representan un área significativa y es necesario aplicar un filtro para que las clases dominantes absorban estos pixeles. Los parámetros fueron: Parámetro Valor Coordinate Type: Map, Output: Unsigned 8 bit, Neighborhood Definition: 5x5, Function: Majority, Use all values in computation Ignore Zero in Stats Apply only at specified value(s). a) A la imagen resultado se le debe aplicar un proceso de recodificación local. Este consiste de aplicar los filtros: Clump, que es la agrupación de pixeles vecinos con niveles digitales (ND) iguales, uniéndolos en una entidad: Parámetro Valor Coordinate Type: Map, Connected Neighbors: 8, Ignore Zero in Output Stats Check, Transfer Attributes to Output Check. Se realizó la eliminación de polígonos pequeños, uniéndolos a polígonos más grandes, mediante Parámetro Valor Coordinate Type: Map, Ignore Zero in Stats Check, Minimun: 0.02 ha, Output: Unsigned 8 bit. Asignación de clases a la imagen resultado de filtros. Las clases determinadas para este proceso fueron: Clase Descripción: Lirio, vegetación identificada entro del área de interés. Agua, pixeles identificados como agua dentro del área de interés. Nube, cobertura de nubes dentro del área de interés. Sombra, sombra proyectada dentro del área de interés.

Si las imágenes fueron procesadas en ESRI ArcMap: Se realizó la conversión del formato .IMG a tipo Shapefile (Vectorial), posteriormente se realizó la asignación de campo de superficie en hectáreas (SUP_HA) en cada capa vectorial y se realizó la exportación de capas a formato .JPG.

Se cuenta con las imágenes en formato .JPG de la clasificación de cada imagen tanto el original, como en falso color infrarrojo (IR) y se cuenta con los valores en hectáreas (ha) de la superficie cubierta en cada imagen. El procedimiento fue llevado a cabo por el Lic. Germán Sánchez Altamirano, de Información Estadística y Estudios – SNIDRUS, de la Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural del gobierno del estado de Guanajuato.

Cuantificación de la densidad del lirio en Yuriria. El número de plantas, la talla y peso del lirio se determinó sacando las plantas que caben en un metro cuadrado. Los parámetros se determinaron a

dos densidades, alta y media densidad, ya que las plantas en la laguna se dispersan o comprimen dependiendo del viento y las corrientes.

Determinación de los parámetros fisicoquímicos. Los parámetros fisicoquímicos determinados a 30 cm de profundidad fueron: temperatura, pH, conductividad eléctrica (EC), resistividad, sólidos totales disueltos (TDS), salinidad, oxígeno disuelto (DO) y turbidez. Los parámetros se determinaron mediante la sonda multiparámetros marca Hanna instruments modelo HI9829 con GPS. La sonda se calibró antes de su uso con las soluciones estándar que recomienda el fabricante.

Determinación de amonio y nitrato. En cada uno de los puntos, en cada uno de los 12 meses muestreados en la laguna de Yuriria para el presente estudio se tomó una muestra de 500 mL de agua. Las muestras se transportaron frías al laboratorio en la ciudad de Guanajuato para almacenarse a 4°C hasta su uso. Se tomó una muestra de 20 mL, se dejó 30 min a temperatura ambiente y se realizó la determinación de amonio y nitrato mediante el electrodos específicos, no de catálogo HI7609829-10 y HI7609829-12 de Hanna instruments, respectivamente, calibrados antes de su uso con las soluciones de 10 y 100 ppm.

Determinación de fosfato. De las mismas muestras de agua tomadas para amonio y nitrato, se determinó el contenido de fosfato mediante la reacción espectrofotométrica con disulfato de potasio empleando el reactivo HI93713-y el espectrofotómetro de Hanna instruments modelo HI96773.

Resultados

Nivel de infestación de la laguna por lirio acuático

Las imágenes satelitales son muy útiles para cuantificar el nivel de infestación de, en este caso, el lirio acuático en la laguna de Yuriria, como se muestra en la Fig. 1. Del análisis de ésta imagen y las que se tienen en archivo, indican claramente una variación muy importante de noviembre del año 2013 a abril del año 2015, ya que se presentan valores de infestación de 400 a 1,200 ha de infestación (Fig. 2). Sin embargo, este cambio no es lineal, ya que los niveles de infestación muestran una disminución al final del invierno de cada año (marzo). Es importante hacer notar que se observan grandes variaciones en los niveles de infestación de un día a otro (ver 05/03/2015 y 06/03/2015 además de 01/04/2015 y 02/04/2015, Tabla 1 marcas con asterisco, Fig. 3), lo que no se puede explicar por el solo crecimiento de la planta, por tanto debe de haber factores ambientales, viento y corrientes de agua, que afectan significativamente el valor de infestación observado. El Instituto de Ecología ha registrado los valores de infestación como se describe en la siguiente sección, concluyendo que la compactación del lirio por el viento es el principal factor que afecta las determinaciones. También puede ser debido a que el color rojo en las imágenes satelitales fueron igualados, para decidir rojo o fondo, es decir el valor de color se decidió tomando en cuenta el valor de cada pixel y los cinco de su alrededor. Tratando de hacer una corrección, se realizó un análisis más detallado de algunas de las imágenes sin este promedio y los resultados (Tabla 2) y Fig. 4 C, muestran que al comparar los niveles de infestación de los valores sin y con corrección por la densidad de las plantas, que hay una diferencia que no es constante entre ambos valores (Tabla 2), siendo por lo general más bajo el valor ya corregido. Sin embargo, debemos de tomar alguno de los valores para el estudio, por lo que se decidió, por contar con un mayor número de

ellos y porque no manipula artificialmente los datos, guiarnos por los valores sin corregir. Además, consideramos que las conclusiones del estudio no son muy diferentes empleando uno u otro dato.

Capacidad de extracción de la planta

La extracción de lirio acuático que se realiza en la laguna de Yuriria a cargo del Instituto de Ecología fue de 102,464 ton en el año 2015. Si consideramos que la planta en los meses de noviembre a abril es menos robusta, calculamos que pesa 20 Kg/m², mientras que en los meses de mayo a octubre pesa 31.7 Kg/m². La Fig. 5, representa los valores del lirio en la laguna en el año 2015, pasando de 340 ha a 684.1 ha (febrero a diciembre) y si se le adiciona la superficie extraída, 422.8 ha, la presencia del lirio a finales de 2015 sería de 1107 ha, y si se corrige el valor considerando el crecimiento de las hectáreas extraídas, el valor total sería de 1166 ha, por lo que se calcula que la planta creció en 11 meses del año 2015, 3 veces.

Mientras que por medio de las imágenes satelitales, el 15 de abril del 2014 habían 216 ha de lirio (Fig. 2) y el 12 de abril del 2015 habían 1,181 ha (Fig. 2 y Tabla 1), implica que hay 965 ha más de lirio. Considerando que en promedio se extrajeron 423 ha en el año 2015, se tendrían 1,388 ha más de abril de 2014 a abril de 2015, lo que implica que la planta aumenta 5.7 veces en un año. Con estos valores, la capacidad que se debería de tener para mantener controlada la infestación del lirio en la laguna de Yuriria, debería de ser 3.2 veces mayor que la que se tiene actualmente. Si se considera el valor del 5 de marzo de 2015 de 669 ha (Fig. 2), la planta aumenta 3.5 veces en un año y la capacidad instalada debería de ser de 1.5 veces la actual. Estos valores son sin considerar el efecto que haya podido tener las fumigaciones que realizó Secretaría de Desarrollo Agroalimentario y Rural del gobierno del estado de Guanajuato en noviembre y diciembre de 2014 a unas 400 ha, por lo que el valor de extracción debería de ser al menos de 2 a 3 veces mayor del que se tiene actualmente. Este aumento de la capacidad de extracción se podría obtener trabajando al mismo tiempo las cuatro bandas de extracción con la que cuenta el Instituto de Ecología en Yuriria, pero para lograrlo se necesita de los remolques y tractores para llevarlo a cabo. También hay que considerar el trabajar más en invierno que es la época en que la planta se reproduce a una mucha menor tasa y la planta es de menor tamaño y por ende de menor peso.

Parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna de Yuriria

Los 55 puntos de muestro geo referenciados en la laguna de Yuriria (Tabla 4, Fig. 6) para tomar muestras de agua para las determinaciones de amonio, nitrato y fosfato y en el mismo punto determinar los parámetros fisicoquímicos del agua como temperatura, pH, conductividad eléctrica, resistividad, sólidos totales disueltos, salinidad, oxígeno disuelto y turbidez (Fig. 7). En algunos de los meses muestreados no fue posible tomar valores y muestras de los 55 puntos, debido principalmente a que el lirio no permitía la navegación, sin embargo siempre se muestrearon más de 49 puntos. De los valores registrados, se realizó un promedio mensual y los valores se graficaron, como se muestra en la Fig. 7.

Al analizar la temperatura se observa que los meses de diciembre, enero y febrero son los más fríos, con un rápido aumento para el mes de marzo mientras que el mes de junio fue el más caliente, con un descenso gradual hacia el mes de noviembre (Fig. 7). El valor de pH es alcalino y lo es más en los meses de calor, marzo a agosto, manteniéndose entre 8.0 y 8.4, no llegando a 8.5

(Fig. 7). Este rango de valores se encuentra dentro de los valores permitidos para el agua potable por la EPA y la Unión Europea.

La conductividad eléctrica (EC) del agua está en función de los iones disueltos y la temperatura y es inversa a la resistencia, por lo que las gráficas son inversas, la conductividad es más alta en el mes de Junio y en el mismo mes la resistencia es más baja (Fig. 7). El valor de conductividad de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ está dentro de los valores permitidos para el agua de uso doméstico.

La presencia de los sólidos totales disueltos (TDS) está relacionada con todo aquello que no sedimenta en el agua, como pueden ser las sales y metales disueltos, así como cualquier otra cosa presente en el agua, como puede ser hojas, arena, plancton, fertilizantes y pesticidas. Este valor está muy relacionado con la Conductividad y como puede observarse en la Fig. 7, son trazos muy parecidos. La EPA establece un máximo de 500 ppm de TDS y el valor más alto encontrado en la laguna de Yuriria fue de 350 ppm por lo que se encuentra por debajo del límite máximo permitido.

La salinidad, cloruro de sodio disuelto, determinado como una unidad práctica de salinidad (PSU), está en función de la temperatura, por lo que observamos que su máximo valor fue en el mes de junio (Fig. 7). El valor máximo encontrado en la laguna de Yuriria fue de 0.33 PSU, por lo que se considera apta para consumo humano.

El Oxígeno disuelto (OD) en un cuerpo de agua se produce y a la vez se consume, la producción de oxígeno está relacionada con la fotosíntesis, mientras el consumo dependerá de la respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas. También puede intercambiarse oxígeno con la atmósfera por difusión o mezcla turbulenta. La concentración total de OD dependerá del balance entre todos estos fenómenos. Otros factores como la salinidad, o la altitud afectan los niveles de OD. Además, la cantidad de OD depende de la temperatura, el agua más fría puede contener más oxígeno en ella que el agua más caliente, lo que explica que los valores más bajos casi coincida con el mes más caliente, Junio. Se ha reportado que los niveles de OD varían con la profundidad, pero en el presente estudio este parámetro no se estudió, ya que las determinaciones fueron realizadas a 30 cm de la superficie. El OD se mantuvo a lo largo del año entre 4 y 8 ppm (Fig. 7), valores dentro del rango adecuado para la mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.

La turbidez es la medida de desviación de la luz por las partículas no disueltas en el agua y está en función del tamaño y formas de las mismas, por lo que es una medida de la claridad del agua. En el caso de la laguna de Yuriria, los valores siguen el patrón de la temperatura, menores valores en los meses fríos y más altos en los meses de calor, siendo el valor más alto el del mes de Julio (Fig. 7).

Además de estos parámetros fisicoquímicos, se determinó la concentración de amonio, nitratos y fosfato. En el caso de los dos primeros compuestos, se determinó a través de un electrodo específico, sin embargo, se tuvieron muchos problemas para su uso y en el caso del amonio solo fue posible hacer las determinaciones en los meses de mayo y agosto y en el caso del nitrato solo se realizó en los meses de mayo a agosto. Para la determinación del fosfato se empleó una reacción química, la cual se realizó en las muestras de todos los meses.

Compuestos de nitrógeno. El nitrógeno es uno de los constituyentes de la materia orgánica que forma parte de las proteínas de las células y es indispensable en el crecimiento de los organismos fotosintéticos. En la química del agua, los compuestos de nitrógeno, NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- , así como el nitrógeno orgánico, juegan un papel importante, ya que son indispensables para el desarrollo de la vida animal y vegetal en agua.

Los compuestos nitrogenados del agua provienen fundamentalmente de los compuestos orgánicos o vegetales y en aguas naturales y sin contaminar suele ser un elemento poco abundante. La mayor parte del nitrógeno es de origen atmosférico, pero asimilado gracias a las bacterias y a ciertos vegetales, los cuales transforman el nitrógeno molecular y el nitrógeno nítrico en nitrógeno orgánico. El nitrógeno del suelo, ya sea en forma amoniacal, ya en la de nítrico o nitratos, así como el que está formando parte de los tejidos animales o vegetales, vuelve a la atmósfera por la acción de las bacterias o por la combustión de los tejidos orgánicos. El nitrógeno nítrico difícilmente se acumula en depósitos en la tierra por su extraordinaria solubilidad.

Amonio. Se sabe que el amonio en el medio ambiente proviene de procesos metabólicos de los organismos, o tiene un origen agropecuario o industrial. Este compuesto por tanto es un indicador de posible contaminación del agua con bacterias, aguas residuales o residuos de animales. La presencia de amonio en el agua de consumo no tiene repercusiones inmediatas sobre la salud, de modo que no se propone un valor de referencia basado en efectos sobre la salud, pero la OMS en 1993 estableció que el amoniacal puede ocasionar problemas de sabor y olor a concentraciones mayores que 35 y 1.5 ppm, respectivamente, pero en el humano se observan efectos toxicológicos a exposiciones superiores a alrededor de 200 mg/kg de peso corporal. En el caso de las determinaciones realizadas en la laguna de Yuriria se encontraron valores promedio de 1.2 y 0.9 ppm (Fig. 7), por lo que no se espera que este compuesto influya en el cambio de sabor u olor del agua.

Nitratos. Los nitratos existentes en el agua son, por lo general, a consecuencia de una nitrificación del nitrógeno orgánico o proceden de la disolución a través de la erosión por el agua de la tierra o como contaminantes debido a actividades humanas provienen de contaminación orgánica o de la contaminación por abonos químicos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) incluye a los nitratos entre los componentes del agua que pueden ser nocivos para la salud, ya que en el estómago se reducen a nitritos por acción bacteriana. Este compuesto es peligroso a concentraciones superiores a 50 ppm. El valor más alto encontrado en la laguna de Yuriria fue de 9 ppm (Fig. 7), por lo que no se espera que esto genere problemas de salud.

Compuestos de fósforo. Los fosfatos y compuestos de fósforo se encuentran en las aguas naturales en pequeñas concentraciones. Los compuestos de fósforo que se encuentran en las aguas residuales o se vierten directamente a las aguas superficiales provienen de fertilizantes eliminados del suelo por el agua o el viento; excreciones humanas y animales; y detergentes y productos de limpieza. Los compuestos del fósforo (particularmente el orto-fosfato) se consideran importantes nutrientes de las plantas, y conducen al crecimiento de algas en las aguas superficiales, pudiendo llegar a promover la eutrofización de las aguas. Los fosfatos están directamente relacionados con la eutrofización de ríos, pero especialmente de lagos y embalses. Las concentraciones críticas de fosfatos para una eutrofización incipiente se encuentran entre 0.1-0.2 ppm $\text{PO}_4\text{-P}$ en el agua

corriente y entre 0.005-0.01 ppm en aguas tranquilas. Los valores de la laguna de Yuriria se encontraron ente 0.1 a 1.8 ppm a lo largo del año (Fig. 7), por lo que se considera que la laguna presenta un alto grado de eutrofización.

Interpolación de los parámetros fisicoquímicos y de los compuestos determinados

Para tener interpretaciones más detalladas sobre el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en la laguna de Yuriria, se desarrollaron los mapas por interpolación de los parámetros en estudio. Para ello se estudió el mes con más variaciones, ya que es el que nos indicará la distribución del parámetro en la laguna. El mes que presentó una mayor variación de los parámetros fue Julio (Fig. 7).

La temperatura muestra una variación a lo largo de la laguna de acuerdo a la hora en que se realizó la determinación, ya que hay que considerar que el primer punto muestreado es al Noreste y los últimos fueron los del sur (Fig. 8). Una distribución muy similar la presente el oxígeno disuelto (OD) (Fig. 8), ya que este parámetro está directamente relacionado con la temperatura. También la distribución del pH es similar a la temperatura, más bajo en el Noreste y más alto al sur de la laguna. La conductividad eléctrica (EC) y los sólidos disueltos totales (TDS) presentaron una distribución muy similar solo que la franja de menor concentración es muy angosta al Noreste y la mayoría de la laguna presenta los valores altos de estos parámetros (Fig. 8). En contraste, la resistividad (RES) y la turbidez muestra valores bajos en la mayoría de la laguna y elevados en la zona Sureste de la laguna (Fig. 8).

Los compuestos determinados, amonio, nitratos y fosfato, presentan distribuciones diferentes entre sí. El amonio se encuentra concentrado en la parte Noreste (Fig. 8), lugar en que descarga Loma de Zempoala y La Angostura, lo que indica que estos valores elevados se debe a la población humana. Sorprende que este valor no se encontrara elevado al sur, en la descarga de la ciudad de Yuriria, lo que implica que la planta de tratamiento de agua abate a este compuesto.

El nitrato presenta una distribución elevada en Loma de Zempoala y la Angostura, pero valores intermedios en las demás zonas de la laguna, con excepción de la parte Sureste (Fig. 8) Lo que significa que este compuesto se distribuye en la laguna o que hay aportes importantes de otras partes de la laguna, además de los centros poblacionales referidos.

En el caso del fosfato se observa una distribución inversa al amonio, la concentración más baja se encuentra en el Noreste, aumentando gradualmente en diagonal hacia el Suroeste de la laguna, para llegar a su máximo en la esquina del Suroeste de la laguna (Fig. 8) en el lugar de la descarga del canal la Cinta, por lo que seguramente la descarga de agua de la agricultura y de los centros poblacionales de Moroleón y Uriangato son los que mantienen este alto nivel.

Para mantener bajos los niveles de estos tres compuestos consideramos que habría dos acciones importantes que realizar:

1. Plantas de tratamiento del agua residual de los centros poblacionales de Loma de Zempoala y La Angostura
2. El desarrollo de un humedal artificial con árboles y plantas acuáticas en la zona de entrada del Suroeste de la laguna

Al parecer ninguno de los parámetros fisicoquímicos ni los tres compuestos determinados se ven influenciados por aportaciones del río Lerma, ya que en la zona Este de la laguna no se aprecia un aumento de ninguno de ellos (Fig. 8).

Tabla 1. Infestación del lirio acuático en la laguna de Yuriria, Gto. México, mediante el análisis de imágenes satelitales, de febrero a abril del 2015.

Fecha (día/mes/año)	Infestación (ha)
08/02/2015	607.88
21/02/2015	666.83
05/03/2015*	935.5
06/03/2015*	584.8
01/04/2015*	1024.7
02/04/2015*	932.8
12/04/2015	1180.8

*Datos de dos días seguidos. Un o tomado por el satélite Spot 6 y el otro por el Spot 7.

Tabla 2. Infestación del lirio acuático en la laguna de Yuriria, Gto. México, mediante el análisis de imágenes satelitales, tomando o no en cuenta la densidad de la planta.

Fecha (día/mes/año)	Infestación (ha) Sin corrección	Infestación (ha) Corregido	Relación Corregido/sin corrección
10/02/2009	733.3	1534.6	2.09
27/11/2010	1579.8	1956.0	1.24
29/09/2011	960.6	1016.8	1.06
27/01/2012	931.2	869.9	0.93
23/03/2013	197.3	27.5	0.14
12/12/2013		340.0	
13/12/2013	372.0	394.1	1.05
10/02/2014	471.1	345.4	0.73

Tabla 3. Número de plantas y peso por metro cuadrado a dos densidades diferentes de lirio acuático en la laguna de Yuriria, Gto. México, tomados el 29 de junio de 2015.

Densidad	Número de plantas	Peso (Kg)	Peso (Kg) por planta
Alta	80	39.8	0.50
Media	45	23.6	0.52
Promedio	63	31.7	0.50

Tabla 4. Coordenadas de los puntos muestreados. Se presentan las coordenadas correspondientes al mes de julio de 2014.

PUNTO	Latitud (N)	Longitud (W)
1	20°16'31.1"	101°05'21.0"
2	20°16'30.7"	101°07'04.0"
3	20°16'29.9"	101°07'36.5"
4	20°15'51.2"	101°08'05.8"
5	20°15'50.8"	101°07'37.1"
6	20°15'51.6"	101°07'04.0"
7	20°15'49.4"	101°06'27.6"
8	20°15'51.6"	101°05'55.1"
9	20°15'51.5"	101°05'21.2"
10	20°15'13.2"	101°05'21.2"
11	20°15'13.1"	101°05'59.7"
12	20°15'13.9"	101°06'29.9"
13	20°15'13.5"	101°07'03.2"
14	20°15'14.2"	101°07'36.8"
15	20°15'13.8"	101°08'08.1"
16	20°15'13.2"	101°08'48.1"
17	20°15'13.4"	101°09'22.8"
18	20°15'51.5"	101°09'23.9"
19	20°15'50.3"	101°10'01.0"
20	20°15'12.6"	101°10'01.1"
21	20°15'14.8"	101°10'35.9"
22	20°15'14.1"	101°11'06.4"
23	20°14'40.3"	101°11'37.6"
24	20°14'39.8"	101°11'04.9"
25	20°14'39.4"	101°09'55.0"
26	20°14'40.6"	101°10'00.2"
27	20°14'39.6"	101°09'24.4"
28	20°14'40.1"	101°08'44.8"
29	20°14'40.5"	101°08'07.1"
30	20°14'40.7"	101°07'35.4"
31	20°14'40.5"	101°07'02.1"
32	20°14'40.6"	101°06'28.2"
33	20°14'40.7"	101°05'55.6"
34	20°14'40.7"	101°05'20.6"
35	20°14'40.8"	101°04'41.8"
36	20°14'17.4"	101°04'43.0"
37	20°14'14.7"	101°05'22.7"
38	20°14'13.0"	101°05'54.5"
39	20°14'14.7"	101°06'30.3"
40	20°14'08.4"	101°07'05.3"

41	20°14'14.5"	101°07'36.8"
42	20°14'12.7"	101°08'08.6"
43	20°14'15.8"	101°08'47.9"
44	20°14'14.2"	101°09'24.1"
45	20°14'13.9"	101°10'01.3"
46	20°14'13.4"	101°10'35.0"
47	20°14'14.2"	101°11'06.8"
48	20°14'14.4"	101°11'37.5"
49	20°13'56.9"	101°11'05.3"
50	20°13'44.4"	101°09'22.3"
51	20°13'45.8"	101°08'46.0"
52	20°13'45.6"	101°08'04.4"
53	20°13'47.2"	101°07'35.2"
54	20°13'45.0"	101°06'27.8"
55	20°13'47.9"	101°05'20.0"

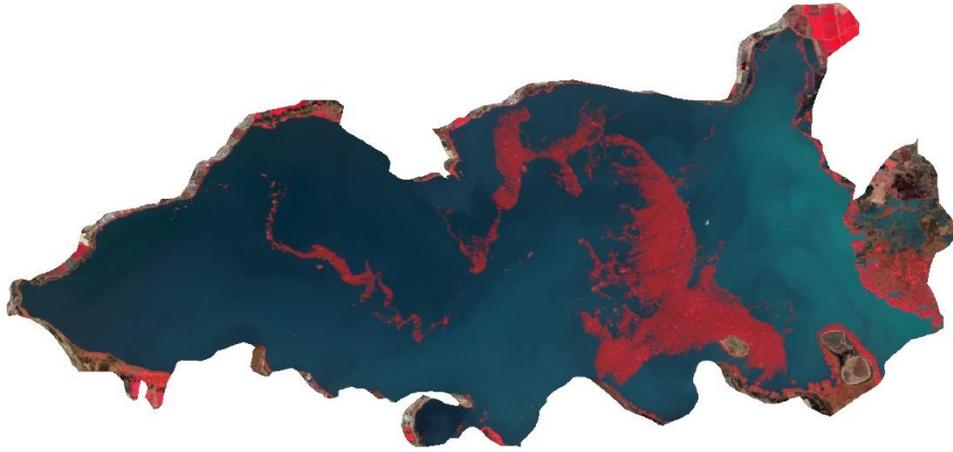


Figura 1. Imagen satelital de la laguna de Yuriria, Gto. Se muestra el contorno de la laguna de Yuriria y la maleza resalta en rojo. La imagen fue tomada por el satélite Spot 6 el 27 de enero de 2012 (931.18 ha) y procesada con el programa ArcGis como se indica en Materiales y Métodos.

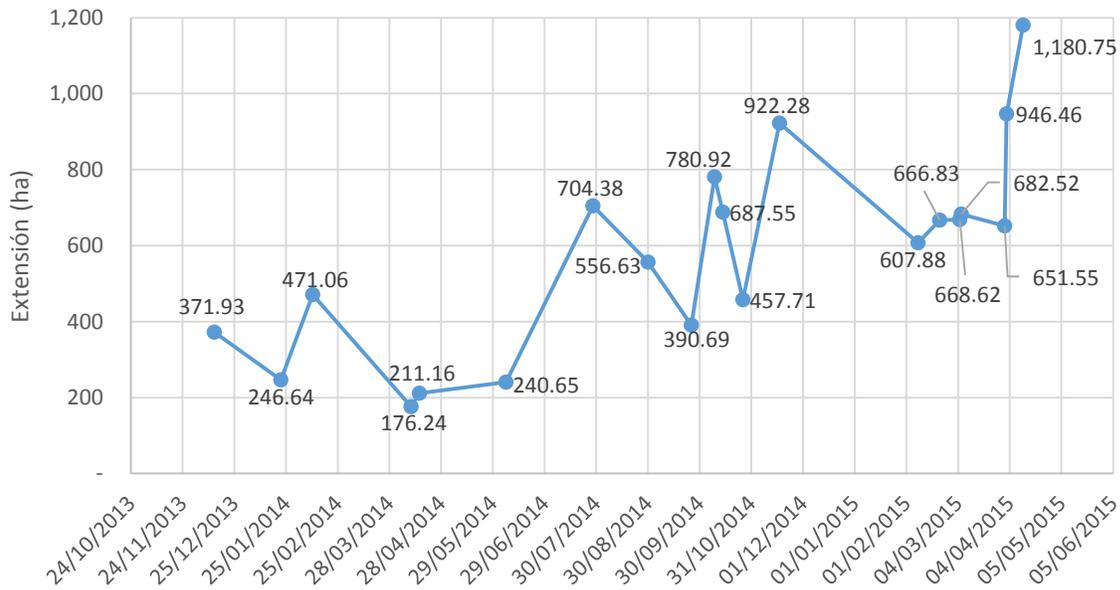


Figura 2. Infestación de la laguna de Yuriria, Gto., por lirio acuático mediante el análisis de imágenes satelitales. El eje Y muestra la fecha, considerando el día, mes y año.

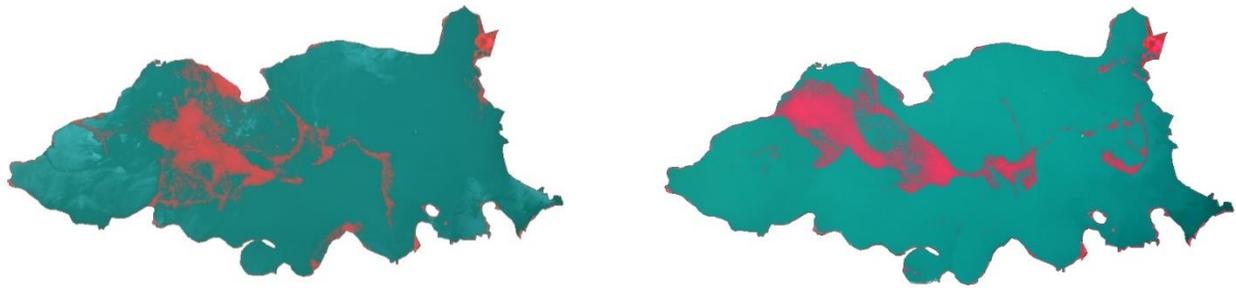


Figura 3. Imagen satelital de la laguna de Yuriria, Gto. Se muestra el contorno de la laguna de Yuriria y la maleza resalta en rojo. A) Imagen del 01/04/2015, tomada por el satélite Spot 7 (651.6 ha de lirio); B) Imagen del 02/04/2015, tomada por el satélite Spot 6 (946.5 ha de lirio). Ambas imágenes fueron procesadas en el programa ArcGis como se describe en Materiales y Métodos.

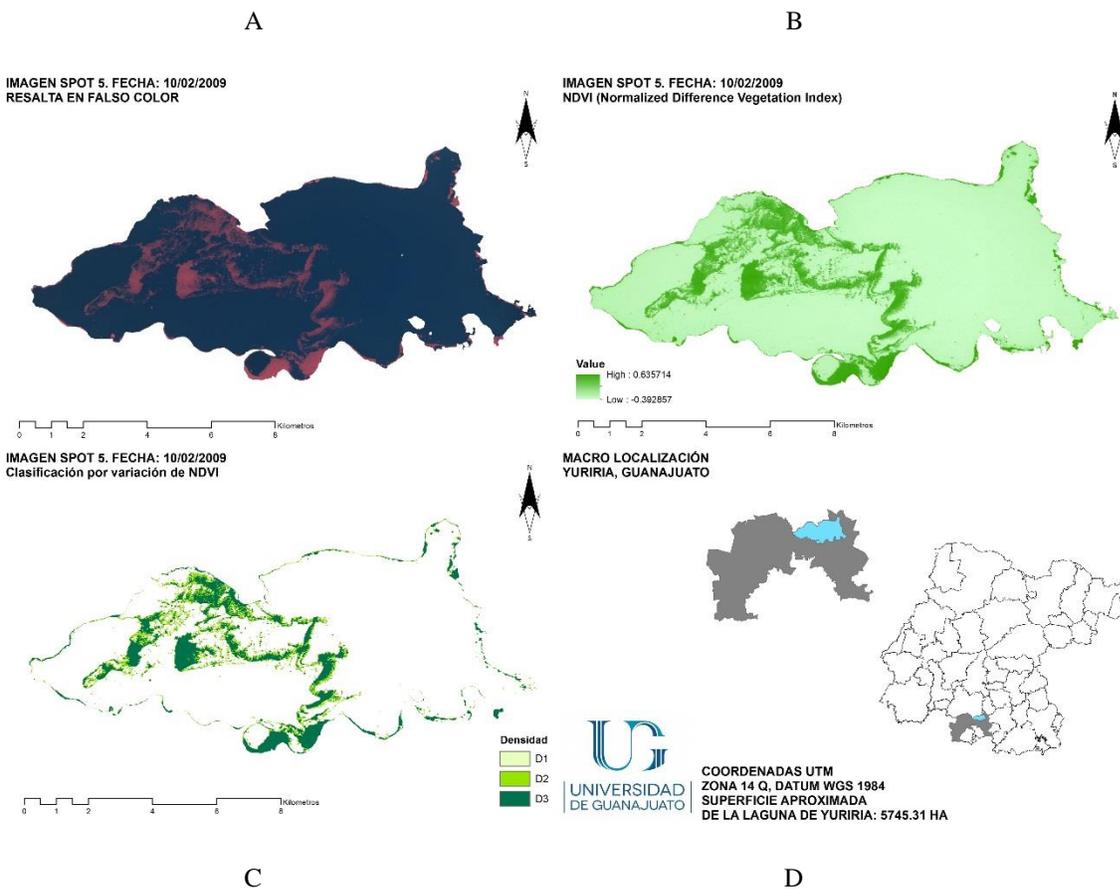


Figura 4. Imagen satelital de la laguna de Yuriria, Gto. Se muestra el contorno de la laguna de Yuriria de la imagen tomada por el satélite Spot 5 el 10/Feb/2009. A) Imagen resaltando en falso color la maleza. B) Imagen normalizados los valores de color de la maleza; C) Imagen considerando las tres densidades de la planta como se establece en la Tabla 3, D1: densidad media; D2: densidad promedio y D3: densidad alta. D) Marco de localización de la laguna de Yuriria en el municipio del mismo nombre.

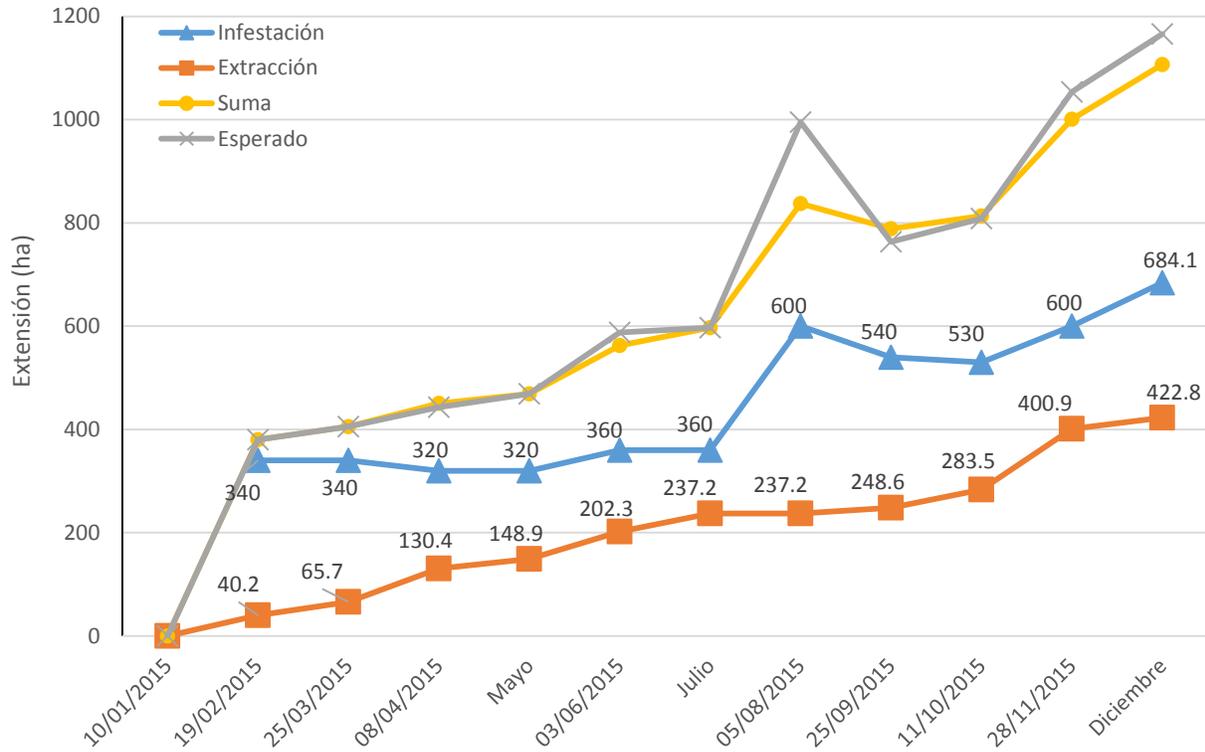


Figura 5. Presencia del lirio en la laguna de Yuriria en 2015. Los valores de infestación y extracción fueron proporcionados por el Instituto de Ecología. La infestación está calculada según las observaciones realizadas en la laguna en la fecha que se indica. La extracción se calculó de acuerdo al peso extraído al final de cada mes y los valores que se muestran es el acumulado. El valor esperado se calculó adicionando la proporción de crecimiento que tendría la planta que se extrajo en el mes, mediante una regla de tres al crecimiento observado para cada mes.

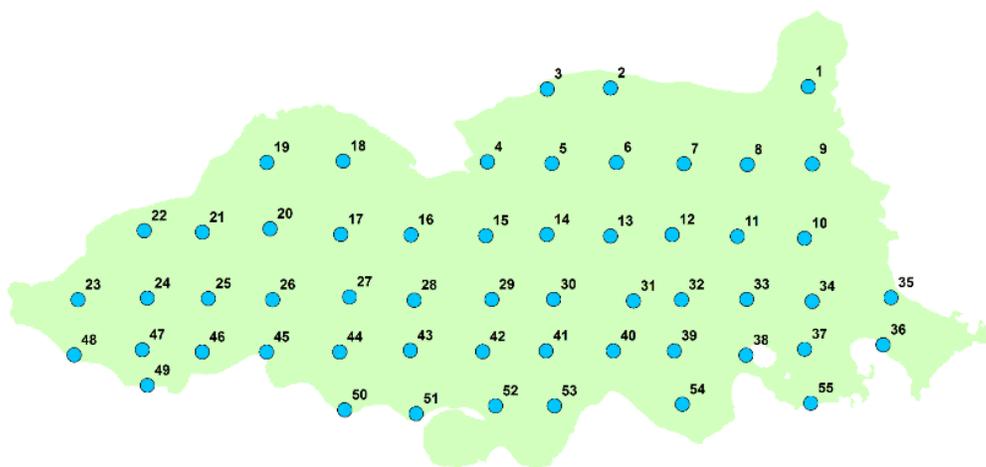
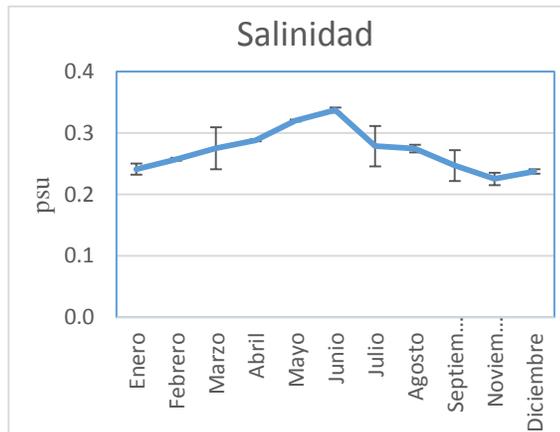
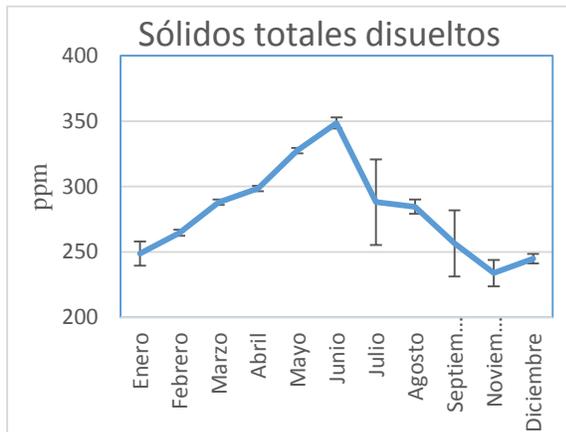
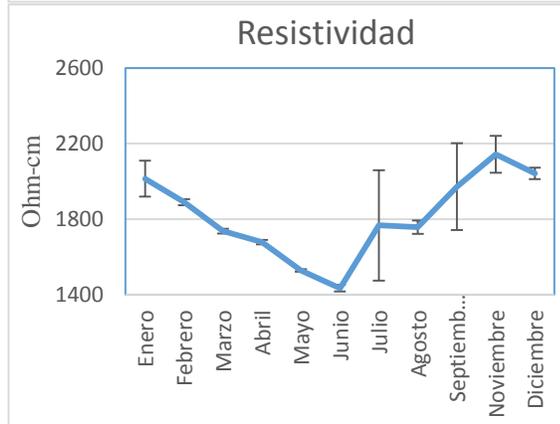
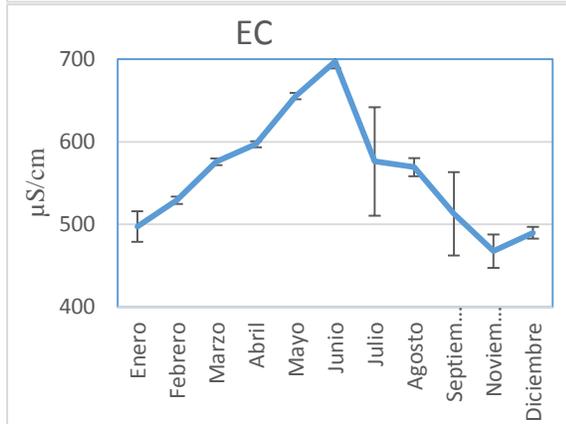
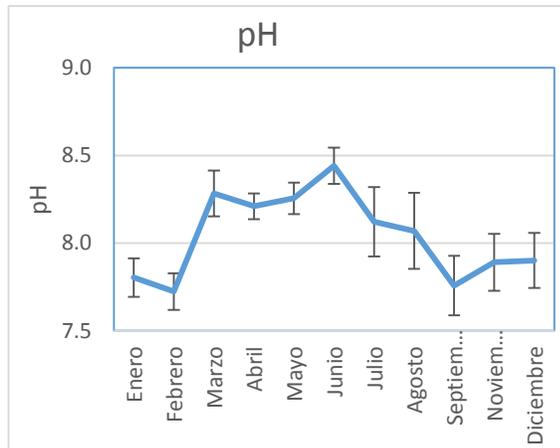
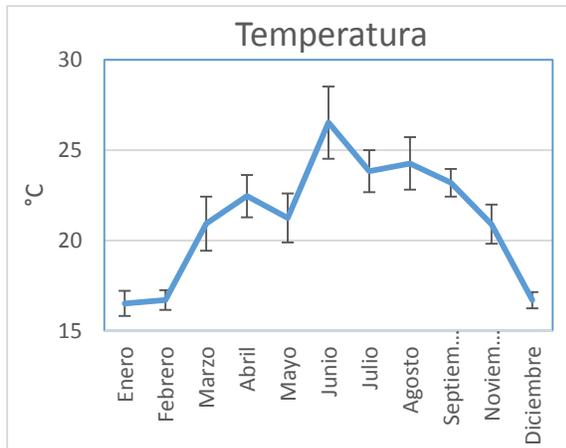


Figura 6. Localización de los 55 puntos muestreados en la laguna de Yuriria. Los puntos están geo referenciados y su localización se muestra en la Tabla 4 para el mes de Julio.



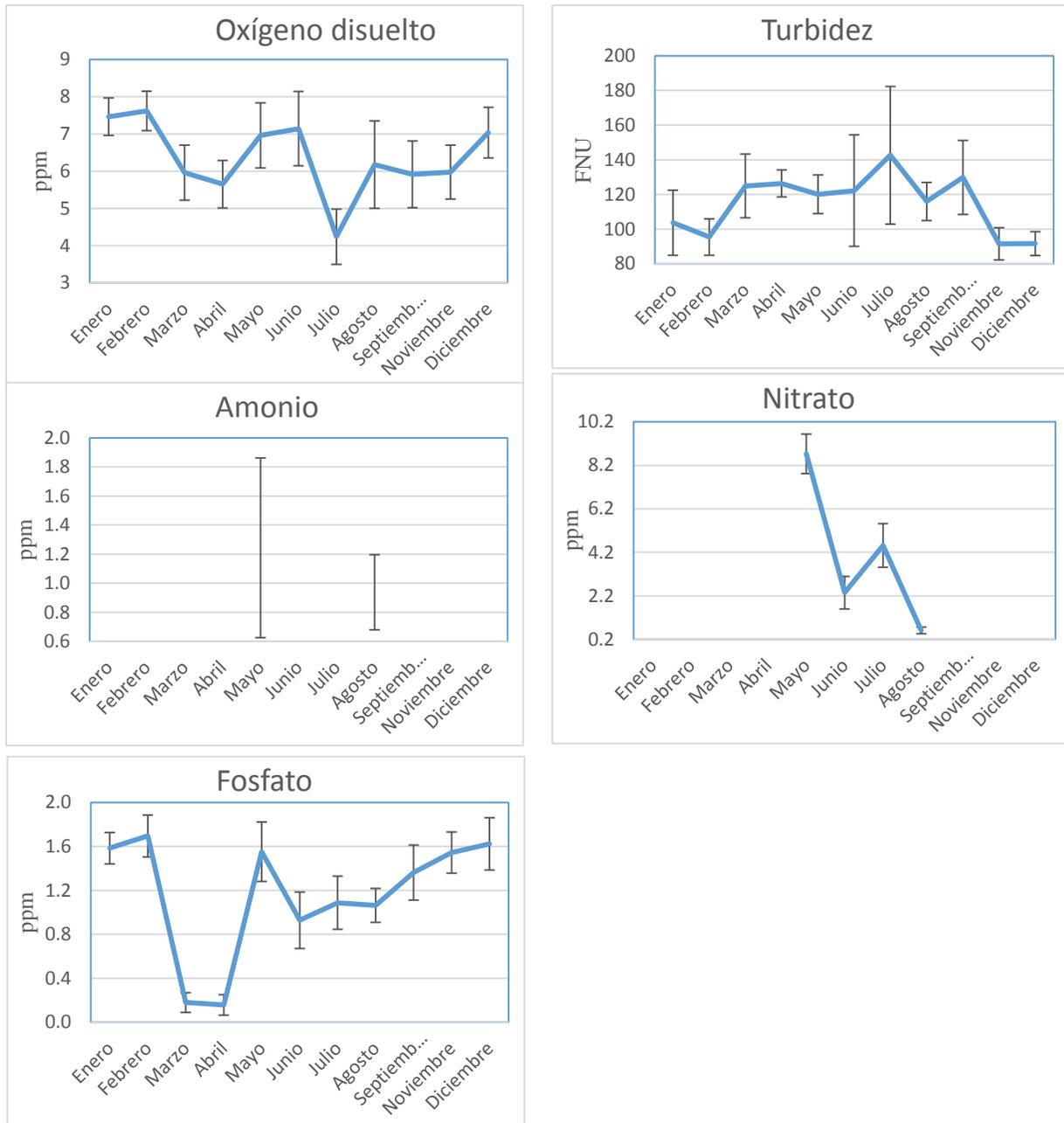


Figura 7. Promedio mensual de los parámetros determinados en la laguna de Yuriria. Los valores determinados en cada mes, se promediaron y se muestran en las gráficas correspondientes.

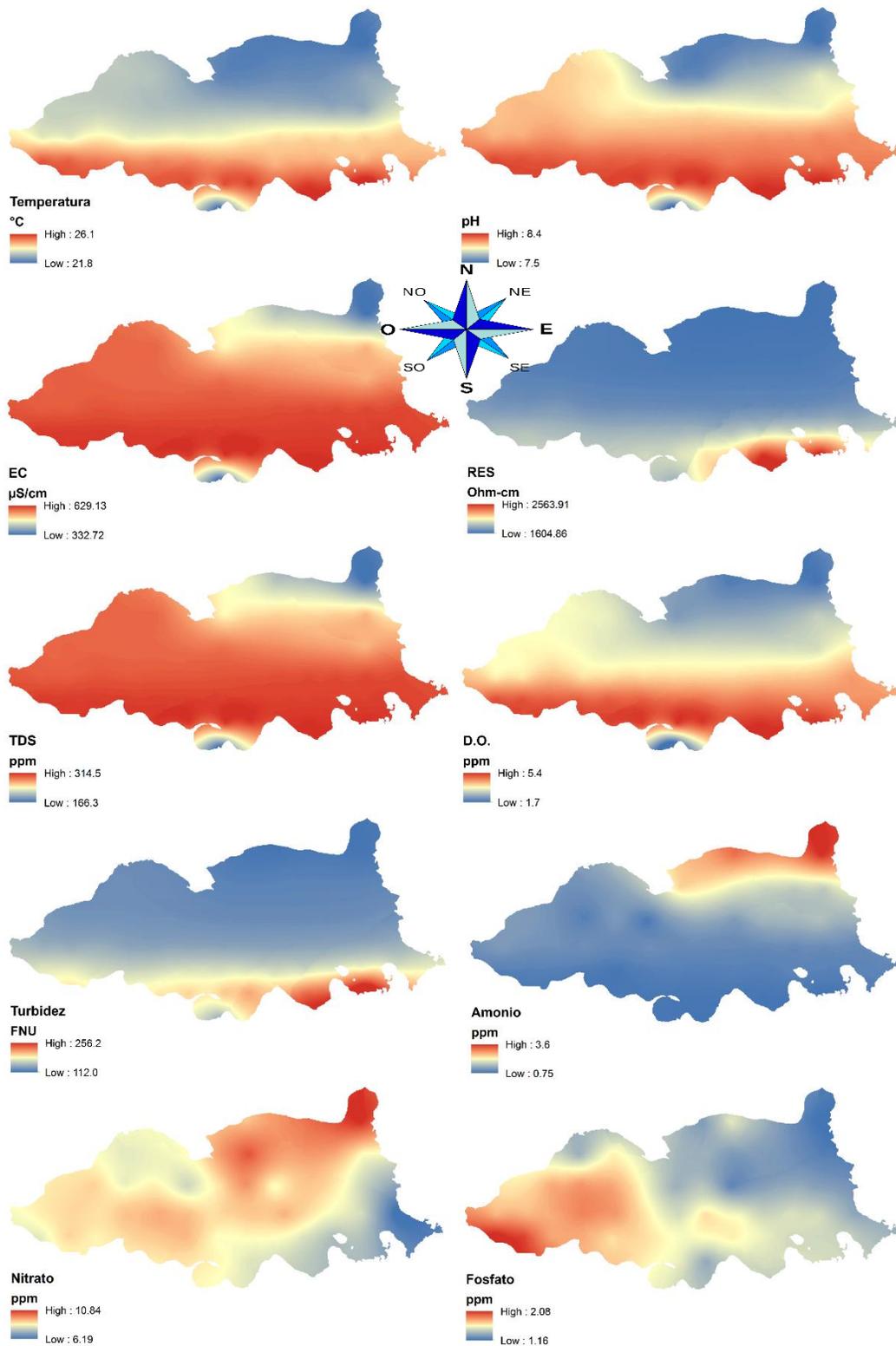


Figura 8. Parámetros fisicoquímicos determinados en la laguna de Yuriria, Gto. Cada figura indica el parámetro y las unidades de que se trata. Todas las figuras muestran los datos obtenidos en el mes de Julio, el de mayor variación por parámetro, a excepción de Amonio, Nitrato y Fosfato, en los que se muestran los datos obtenidos en el mes mayo.

Discusión

El lirio acuático es considerado como la maleza más cara del mundo por los millones de dólares que se gastan en tratar de controlarla, ya que sus efectos nocivos son amplios y no se limitan solamente al cuerpo de agua, sino que se extiende a la salud humana. Para controlarla se han buscado diferentes usos, pero todos ellos se enfrentan al costo que implica el sacarla del cuerpo de agua y secarla, ya que el 90% de su peso es agua, por lo que no se cuenta con un uso que sea económicamente viable. Por lo que el presente estudio se centra en conocer el grado de infestación de la laguna de Yuriria, su velocidad de crecimiento y así calcular la capacidad de extracción que se debe de tener para tener bajos niveles de infestación.

Con el análisis de las imágenes satelitales queda de manifiesto lo que ya es conocido, el lirio acuático no está localizado en un lugar, se mueve en toda la laguna a merced del viento y seguramente también a las corrientes de agua de la propia laguna, ya que el análisis de la resultante del viento por hora, no explica el movimiento del lirio dentro del embalse (datos no mostrados). Quizá el viento sea el principal responsable del movimiento del lirio en la laguna pero solo se contó con una estación meteorológica que se colocó en la parte sur de la laguna, cerca de la isla de San Pedro, y el lirio se encontró principalmente en la parte oeste de la laguna y muy probablemente exista una diferencia importante en el viento en diferentes puntos de la laguna, pero no cuenta con los datos para afirmarlo.

En el presente trabajo se intentó determinar la velocidad de crecimiento del lirio en la laguna de Yuriria, colocando un malla perimetral para contener el lirio, sin embargo, este fue destruido en varias ocasiones cuando el lirio era arrastrado por el viento. Lo que se pudo rescatar de las mediciones que se hicieron, fue que el lirio crecía dependiendo de la densidad de población, esto es, a una alta densidad de población, muchas plantas por m^2 , el crecimiento era menor. Esta observación ya ha sido documentada por Reddy y DeBusk (1984), ya que determinaron que a una densidad de 38 Kg de planta en peso húmedo por m^2 el tiempo de duplicación de la planta fue de 69.3 días y si la densidad de plantas se reduce a una quinta parte, el tiempo de duplicación fue de solo 11.6 días, datos que fueron determinados para el mes de agosto, que es uno de los meses en que la planta presenta mayor crecimiento. Por ello, si la planta en la laguna de Yuriria presenta diferente densidad a lo largo del día, debido a su movimiento por el viento, es imposible determinar un valor de crecimiento por día que pueda aplicarse a la planta presente en la laguna de Yuriria. Por tanto debemos referirnos a los datos que se calcularon de las imágenes satelitales con la salvedad de que estas imágenes promediaron la densidad de población en la imagen para dar un solo color y por tanto la presencia o ausencia del lirio. Es interesante hacer notar que la máxima densidad de 38 Kg/m^2 reportada por Reddy y DeBusk (1984) coincide con la determinada en el presente estudio que fue de 39.8 Kg/m^2 , en el cual se contaron 80 plantas por m^2 .

El estudio de los parámetros fisicoquímicos en los 55 puntos muestreados en la laguna de Yuriria, muestra que ninguno de ellos está fuera de las normas que se consideran para sustentar vida silvestre o las normas para considerarla agua de consumo humano, sin embargo no se realizó un estudio microbiológico para determinar la cantidad de coliformes que pudiera contener la laguna para determinar su “salud microbiológica”. Pero consideramos que se hace necesario continuar con las determinaciones fisicoquímicas y de los compuestos amonio, nitrato y ortofosfato, teniendo que incluir la determinación de urea que es el fertilizante químico más empleado en la región aledaña

a la laguna, e iniciar determinaciones químicas de la Demanda Química y Biológica de Oxígeno, a fin de determinar el índice de eutrofización de la laguna.

Los compuestos determinados, amonio, nitratos y fosfato, son contaminantes indicadores de actividad agropecuaria o humana, y sus valores fueron superiores a lo esperado, por lo que para mantener bajos los niveles de estos tres compuestos consideramos que habría nueve acciones importantes que realizar:

1. Instalar plantas de tratamiento del agua residual de los centros poblacionales de Loma de Zempoala y La Angostura y conocer la eficiencia de la plantas de tratamiento de agua de Uriangato y Yuriria
2. Promover el uso de fertilizantes orgánicos principalmente en las zonas agrícolas que aportan agua a la laguna
3. Establecer humedales en las zonas agrícolas para bajar la carga de fertilizantes que llegan a la laguna y fortalecer el humedal de la zona Suroeste de la laguna con árboles y plantas macrófitas enraizadas.
4. Estimar el costo de servicios ambientales y turísticos que se tendrían que asumir si no se realizan acciones para reducir la extensión del lirio en la laguna
5. Identificar fuentes de contaminación antrópica de metales pesados para su atención
6. Establecer un retén para la planta del lirio que ingresa por la zona Suroeste de la laguna a fin de evitar su movilidad y reducir su tasa de reproducción
7. El viento es la principal variante que determina la posición del lirio en la laguna, por lo que se hace necesario contar con al menos tres estaciones meteorológicas más para establecer una relación posición-compactación-fuerza de viento
8. Continuar con el monitoreo de crecimiento de lirio en las diferentes épocas para establecer la velocidad de crecimiento de lirio en diferentes condiciones de compactación y estacionalidad
9. La influencia que pueda tener el aporte de agua del río Lerma a las determinaciones realizadas en la laguna de Yuriria, no parece ser importante, ya que en la zona Este de la laguna no se aprecia un aumento de ninguno de los parámetros fisicoquímicos o los compuestos de amonio, nitrato o fosfato, por lo que no se proponen acciones para mejorar algún parámetro en particular en las aguas que aporta.

Bibliografía

- Aguilar, J.A. (1994). Control de lirio acuático en el distrito de riego 010, Culiacán-Humaya-San Lorenzo, Sinaloa, México. Anexo No.2, IMTA, CNA. Jiutepec, Morelos. 80 pp.
- Cofrancesco, A.F. (1998). Overview and future direction of biological control technology. *J. Aquat.Plant Manage.* 36: 49-53.
- Gopal, B. (1987). Water hyacinth. (Aquatic plant studies 1). Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, the Netherlands. 471 pp.
- Goyer, R.A. y Stark, J.D. (1981). Suppressing water hyacinth with an imported weevil. *Ornamental South.* 3 (4): 21-22.
- Harley, K.L.S. (1990). The role of biological control in the management of water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. *Biocontrol News and Information.* 11(1): 11-22.

- Martínez, M. y Gutiérrez, E. (2001). Host range of *Cercospora piaropi* and *Acremonium zonatum*, potential fungal biocontrol agents for waterhyacinth in Mexico. *Phytoparasitica* 29(2): 175-177.
- Ramírez, G. (2000). Guanajuato: Historia y Geografía. Tercer grado educación primaria. 2ª ed. México, D.F. 160 pp.
- Ramos, V.L. y Novelo R.A. (1993). Vegetación y Flora acuáticas de la laguna de Yuriria Guanajuato, México. *Acta Botánica Mexicana*. 25: 61-79.
- Reddy K.R. y Debusk W.F. (1984). Growth characteristics of aquatic macrophytes cultured in nutrient-enriched water: I. Water Hyacinth, Water Lettuce, and Pennywort. *Economic Botany*, 38(2): 229-239.
- Rzedowski, G.C. de y Rzedowski, J. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México. 2ª ed., Instituto de Ecología A. C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán. 1406 pp.
- Wright, A.D. y Center, T.D. (1984). Predicting population intensity of adult *Neochetina eichhorniae* (Coleoptera: Curculionidae) from incidence of feeding on leaves of Waterhyacinth, *Eichhornia crassipes*. *Environ. Entomol.* 13: 1478-1482.

CAPÍTULO II

COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CONTENIDO DE METALES PESADOS DEL LIRIO

ACUÁTICO DE LA LAGUNA DE YURIRIA

CHEMICAL COMPOSITION AND CONTENT OF HEAVY METALS FROM WATER

HYACINTH AT YURIRIA LAGOON

Carlos Alberto Leal-Morales^{1*}, Gabriela Zanor², Ma. Teresa Vieyra-Hernández³

¹Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Edificio K, 202, Sede Noria Alta, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Gto., CP 36050, México.

²Departamento de Ingeniería Ambiental, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, ³Universidad de Guanajuato

** Autor de correspondencia (lealc@ugto.mx)*

RESUMEN

Se separaron, deshidrataron y molieron hojas, tallo y raíz de muestras de plantas de lirio acuático colectadas en la Laguna de Yuriria al final de cada una de las cuatro estaciones del año 2014. Se analizó humedad, proteína, cenizas, extracto etéreo, fibra cruda e hidratos de carbono y se determinó As, Cd, Cu, Pb y Zn. Los resultados muestran que los valores más altos se presentan en la hoja para las proteínas e hidratos de carbono, mientras que la humedad y fibra cruda fueron en el tallo, siendo la raíz el tejido que presentó más cenizas y lípidos. Por estación del año, en primavera se presenta un mayor contenido de lípidos y cenizas, en verano es la fibra cruda y los hidratos de carbono predominan, mientras que en otoño fueron las proteínas, por lo que se observa una diferenciación química en los tejidos. En la raíz de la planta el As, Cd y Pb, se presentaron en concentraciones por arriba de las normas mexicanas, por lo que no es recomendable el uso de la planta en la alimentación animal, pero podría utilizarse en otra actividad que no implique su consumo por seres vivos.

Palabras clave: *Eichhornia crassipes*, proteína, carbohidratos, Arsénico, Plomo.

SUMMARY

Leaves, stem and root samples were separated, dehydrated and ground from collected water hyacinth in Yuriria Lagoon at the end of each of the four seasons of 2014. Moisture, protein, ash, ether extract, crude fiber, carbohydrates, As, Cd, Cu, Pb and Zn were determined. The results show that the highest values occur in the leaves for proteins and carbohydrates, while moisture and crude fiber was on the stem, but the root tissue showed more ashes and lipids. By season of the year, a higher lipid and ashes content were found in spring, while in summer crude fiber and carbohydrates predominate, but in autumn were the proteins, so a chemical differentiation is observed in the

tissues. At the root plant As, Cd and Pb were presented at concentrations above the Mexican standards, so it is not advisable to use the plant in animal feed, but could be used in another activity that does not involve their consumption by living organisms.

Keywords: *Eichhornia crassipes*, protein, carbohydrates, Arsenic, Lead.

INTRODUCCIÓN

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) crece abundantemente en cuerpos de agua y es considerado como una plaga. Ramos y Novelo (1993) informaron que el embalse de la Laguna de Yuriria está en proceso de envejecimiento, ocasionando con esto una lenta pero continua pérdida de hábitats acuáticos; en gran parte debido al desarrollo masivo de *Eichhornia crassipes*, que llega a cubrir hasta 60 % de la superficie lacustre, situación que se repite en otros lugares del país y del mundo. Consecuentemente, el lirio acuático ha sido objeto de numerosos estudios en los que se han propuesto diversos usos entre los que se encuentran: su utilización como forraje en la alimentación animal (Tejada, 1975; Anjana y Matai, 1990), para el tratamiento biológico de efluentes industriales, encontrando que disminuye fenoles y metaboliza metales pesados en efluentes contaminados con petróleo, también contribuye a mejorar la calidad del agua debido a que esta especie es capaz de absorber cadmio y níquel a través de sus raíces (Vega, 1990), entre otros usos. Recientemente, se está estudiando como fuente de carbono para fermentaciones en la producción de bioetanol debido a su contenido de hemicelulosa (Nigam, 2002; Kumar y col., 2009; Aswathy, 2010).

Los metales se encuentran en la corteza terrestre y su contenido en el medio ambiente varía dependiendo de la región y la influencia de factores ambientales (Khlifi y Hamza-Chaffai, 2010). El término de metales pesados se refiere a aquellos que tienen un peso atómico superior a los 40.04

que es la masa atómica del Calcio (Ming-Ho, 2005). Aproximadamente 30 metales y metaloides son potencialmente tóxicos para el humano, el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb) no son benéficos para el humano y se consideran los más tóxicos, llegando a tener, aún a bajas concentraciones, efectos neurotóxicos y acción cancerígena carcinogénica (Castro-González y Méndez-Armenta, 2008; Jomova y Valko, 2011; Tokar y *col.*, 2011). Si bien algunos individuos son expuestos a los metales pesados en el lugar de trabajo, para la mayoría de las personas la exposición a estos elementos es a través de la comida o el agua, ya que se sigue una cadena que va de la industria a la atmósfera pasando por el suelo, el agua, los cultivos para llegar finalmente al humano. Desde luego que la toxicidad está en función de la concentración, es bien sabido que la exposición crónica a los metales pesados a bajas concentraciones puede causar efectos adversos (Castro-González y Méndez-Armenta, 2008). Particularmente en el caso de la mezcla de cromato cobre arsénico (CCA; 34.0% As_2O_5 , 47.5% CrO_3 y 18.5% CuO , p/p), empleado en la industria maderera como preservativo, se ha documentado que la piel y la ingestión son las principales rutas de absorción (Cocker y *col.*, 2006).

Por lo que el objetivo del presente trabajo fue determinar la composición química del lirio acuático presente en la Laguna de Yuriria a lo largo de un año y su contenido de metales tóxicos para determinar sus posibles usos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

El muestreo se realizó al final de cada estación durante el año 2014. Inicialmente se pensó muestrear siempre en la misma zona; sin embargo, debido a que las plantas no permanecen fijas por el viento que las va moviendo continuamente, los puntos de muestreo variaron y se decidió tomar las muestras en donde había una población extensa de ellas. Los puntos de muestreo se

presentan en la Fig. 1 y en la Tabla 1 se especifica la fecha y el lugar de colecta. Las muestras se transportaron en recipientes de plástico manteniendo la raíz sumergida en agua, para evitar que se secaran.

Procesamiento de las muestras

En el laboratorio las plantas se separaron, se lavaron se trocearon con tijeras por separado las hojas, el tallo y la raíz, y se pesaron por separado en charolas de aluminio previamente puestas a peso constante. Las partes de las plantas se deshidrataron en un horno con aire de convección forzada marca Shel Lab a 40°C durante 24 h. Una vez deshidratadas, las diferentes partes de las plantas, se pasaron a un molino de mano y una vez molidas se guardaron en recipientes herméticos para su análisis posterior.

Análisis químico

A todas las muestras se les determinó la humedad (pérdida por secado), proteína (N x 6.25), cenizas (calcinación a 550°C), fibra cruda por hidrólisis ácida y alcalina, lípidos (extracto etéreo) e hidratos de carbono calculados por diferencia de 100 menos los componentes anteriores, por los métodos de la AOAC (1990). El análisis se realizó por triplicado.

Análisis estadístico

Para los datos de la Tabla 2 se hizo un análisis de varianza (ANOVA), usando un nivel de confianza del 95% y para los datos de la Tabla 3 se realizó la Prueba de "t". En ambos casos se empleó el paquete de análisis estadístico Statgraphics Plus versión 2.1.

Determinación de metales pesados

Las concentraciones totales de los elementos As, Cd, Cr, Cu, Pb y Zn de las muestras de plantas del lirio colectadas según se muestra en la Tabla 1, se realizó en el Centro de Geociencias-UNAM (Juriquilla, Querétaro), por espectrofotometría de emisión óptica con plasma acoplado

inductivamente (Thermo iCAP 6500 Dúo). Previo al análisis, las muestras se sometieron a una digestión con un horno de microondas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis químico en la que se observa que el tallo es la parte que retiene más agua seguido por la raíz, aunque está en función de la estación del año en que se muestreó. Este valor de humedad más alto coincide con su contenido mayor de fibras, las cuales generalmente están constituidas por celulosa y hemicelulosa, polímeros que retienen gran cantidad de agua. Los resultados humedad en las muestras colectadas están dentro del rango informado en la literatura (4-16%) (Tejada, 1975; Anjana y Matai, 1990), aunque fue un poco superior en las hojas colectadas de verano y otoño (21.5 y 18.25 respectivamente). Por otro lado, el contenido de proteína para la hoja presentó diferencia estadística significativa $p < 0.05$ entre todas las estaciones del año. El CV para el contenido de proteína en la hoja fue de 6.3, de 13.5 para el tallo y de 13.3 para la raíz (datos no mostrados). Estudios previos revelan que el contenido de N total y por ende de proteína es muy variable dependiendo del hábitat. Boyd y Vickers (1971) estudiaron la composición química de *Eichhornia crassipes* en 17 puntos de muestreo en un radio de 80 Km en Orlando Florida encontrando variaciones en el contenido de N de 1.33 a 3.33 % con un CV de 22.68 %. Anjana y Matai (1990) informan que en el lirio acuático hay un 14.5 % de proteína cruda y un 0.8 % de nitratos por lo que se considera que no todo el N es proteína. En el mismo estudio se encontró que 4.1% de peso seco de la planta se debe a polifenoles, que son compuestos que disminuyen la digestibilidad de la proteína. Boyd (1968) encontró de 25.67 a 26.21 % en peso seco de proteína cruda y de 19.35 a 19.55 % de proteína verdadera obtenida por análisis de aminoácidos en muestras de *Eichhornia crassipes*, por lo que el N no proteico fue de 6.32 a 6.66 % (Boyd, 1968). Se ha experimentado en la utilización de harina de lirio completo y harina de

hoja y bulbos para la alimentación de pollos encontrando limitado su uso por el alto contenido de fibra cruda (24.5% en base al peso seco) y bajo nivel de energía metabolizable siendo que el contenido de proteína de la harina completa utilizada fue de 10.8% (Tejada, 1975).

Los mayores contenidos de cenizas se encontraron en la raíz en donde el valor más alto fue de 34.9% en las muestras recolectadas en primavera y el menor valor fue de 11.7 para la hoja en verano. Tejada (1975), informa valores de materia mineral de 17.7% para planta completa y de 17.0% para harina de bulbo y hojas similares a los reportados en este trabajo para hoja y tallo, mientras que Anjana y Matai (1990) hacen referencia a un contenido de 13.2 % de cenizas en hojas, sin embargo no se menciona la estación del año en que se hizo la colecta, que para la raíz principalmente, tiene una gran influencia.

En cuanto a los resultados de lípidos en hojas (4.3 a 6.2 %), éstos fueron parecidos a los a los 4.3% reportados en la literatura (Anjana y Matai, 1990). Sin embargo, en nuestro estudio separamos la hoja, el tallo y raíz se analizaron por separado, siendo ésta última la fracción que más alto contenido de lípidos mostró (promedio de 5.6%). Los lípidos cuantificados son todos los componentes solubles en éter dentro de los que se encuentran los ácidos grasos, pigmentos, ceras y otros compuestos liposolubles, por lo que no todo lo que se cuantifica es material de reserva.

Como era de esperarse, los valores de fibra cruda fueron elevados y se encontraron por arriba del 17 % en peso seco, lo cual es parecido con datos de la literatura que reportan para las hojas del lirio acuático 20.8% (Anjana y Matai, 1990). Por el tipo de análisis que es próximo y se realiza mediante la hidrólisis ácida y alcalina de la muestra, esta fibra cruda está constituida principalmente por celulosa y lignina por lo que el lirio ha sido utilizado para la fabricación de papel (Basu, 1921) incluso el de la laguna de Yuriria (Imagen agropecuaria, 2008); asimismo, se ha utilizado para la obtención de enzimas hemicelulasas y celulasas, enzimas con aplicación en la degradación de material vegetal y en la generación de combustibles. Los hidratos de carbono totales sin contar la

fibra, estuvieron entre 33.8 y 53.0% para la hoja, con valores similares para el tallo, pero menores para la raíz (Tabla 2). En esta fracción se incluye la hemicelulosa y otros hidratos de carbono como pueden ser azúcares, almidones y otros polisacáridos. Debido a que los azúcares antes mencionados son el componente mayoritario, existen diversos estudios en los que se ha cuantificado el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en la hoja encontrando valores de estos tres polisacáridos que van desde 56.4% (Mishima y *col.*, 2006) hasta 78.3% (Chanakya y *col.*, 1993), por el tipo de análisis en este estudio correspondería a la suma de la fibra cruda y parte de los hidratos de carbono totales (Suma de FC e HC, Tabla 2), que caen entre 52.8 y 72.2% para la hoja observando que el cambio se debe a la estación del año, mayor en verano y menor en otoño. De igual forma en el tallo, la suma de la fibra cruda y los hidratos de carbono estuvieron entre 58.1 y 75.6%, que podrían compararse con datos de celulosa, lignina y hemicelulosa en planta completa que de acuerdo con datos de la literatura, osciló entre 59.0 (Mishima y *col.*, 2006) y 70.4 % (Nigam, 2002). Para en la raíz el valor varió entre 48.5 y 64.8% y no se encontraron datos con los cuales comparar; no obstante se puede decir que como en las anteriores fracciones, los hidratos de carbono son los componentes mayoritarios, habiendo cambios importantes según la estación.

Se observó que uno de los factores que influenciaron la composición química fue el tamaño de la planta, por lo que para comprobar esta suposición se compararon los resultados de dos muestras tomadas en el mismo día pero en distintas zonas, la muestra marcada como Zona Noreste era de mayor tamaño y tenía el tallo largo en tanto que las plantas de la zona de “La Trompeta” estaban en forma de roseta. Los resultados se presentan en la Tabla 3, se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) principalmente entre el contenido de proteínas y lípidos, en el caso de la fibra cruda solo se encontraron diferencias significativas entre las hojas y la raíz de las plantas colectadas en los diferentes sitios, aunque el tallo la presentó en una mayor concentración.

Se concluye en este trabajo que existieron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre la composición química de las muestras tomadas en las distintas estaciones del año, en las que varió la temperatura y el pH de las aguas, así como el tamaño de las plantas, factor muy importante sobre todo en el contenido de lípidos y proteína. Finalmente se ha visto que el lirio tiene múltiples aplicaciones, que se limitan, la mayoría de las veces, por la dificultad de la cosecha y la separación de la planta de su raíz; sin embargo, por su alto contenido de hidratos de carbono el uso que ahora se le da es en procesos biotecnológicos.

Metales pesados

El estudio realizado de los metales pesados muestra una alta concentración en las tres partes de la planta estudiada, hojas, tallo y raíz (Tabla 4) considerando los valores de referencia que establece la NOM-130-SSA1-1995 para vegetales envasados. El Zinc es el metal que se presenta en mayor concentración en las cuatro épocas del año, siendo la hoja en primavera la que presenta la mayor concentración. Hay metales pesados como el Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Fierro (Fe), Magnesio (Mg), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Nickel (Ni), Selenio (Se) y Zinc (Zn) que son nutrientes esenciales que se emplean en diversas funciones bioquímica y fisiológicas, pero se sabe que su concentración elevada conlleva a una variedad de enfermedades y síndromes (WHO/FAO/IAEA, 1996), lo que explicaría la presencia del Zn en todas las partes de la planta estudiadas, sin embargo la concentración determinada es muy superior a los valores que se consideran de un elemento traza que es del orden de las 10 ppm (Kabata-Pendia, 2001). En contraste el As es el metal que no se presentó en la mayoría de las muestras, ya que solo se presentó en la raíz de la planta en tres de las cuatro épocas del año en que se determinó presentando valores casi constantes (Tabla 4). Los metales pesados que se especifican en las NOM 130-SSA1-1995 y 247-SSA-2008 son As, Cd, Pb y Estroncio (Sn), sin embargo éste último no se determinó, y los tres restantes se presentan en el lirio en valores muy superiores a los establecidos. La NOM-247-

SSA-2008 establece como valores permisibles 0.5 y 0.1 mg/Kg para Pb y Cd respectivamente en cereales, mientras que la NOM-130-SSA1-1995 establece el doble para cada metal en vegetales y sus derivados envasados, y valores de 1.0 mg/Kg para As, por lo que concluimos que el lirio no debería de emplearse como alimento para animales. Alternativamente se ha planteado el uso del lirio acuático de la laguna de Yuriria para producir papel artesanal, por lo que habría que establecer la biodisponibilidad del metal para ser adsorbido por la piel, ya que se ha descrito que la adsorción por la piel puede ser un factor importante en la intoxicación con metales pesados (Cocker y *col.*, 2006). Sin embargo, el papel sería elaborado con hojas y tallos y estas partes no presentan As y el Pb solo se presentó en junio a una concentración ocho veces mayor que la permitida para alimentos al igual que el Cd. Probablemente esto permita su uso, solo en el entendido que las plantas a emplearse estarían mezcladas de las cuatro épocas del año, disminuyendo así la concentración final de los metales pesados estudiados.

CONCLUSIONES

Debido al contenido de metales pesados del lirio, no es conveniente su uso como forraje y que su posible uso para producir papel artesanalmente deberá de ser realizado al mezclar plantas de diferentes épocas del año con la finalidad de disminuir la presencia de metales pesados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del estado de Guanajuato por su apoyo económico, a través del proyecto con clave GTO-2012-C03-195044.

También agradecemos infinitamente la participación de la Dra. Mayela Bautista Justo, quien hizo el análisis bromatológico.

BIBLIOGRAFÍA

Anjana B. and S. Matai (1990) Composition of Indian aquatic plants in relation to utilization as animal forage. *Journal of Aquatic Plant Management* 28:69-73.

AOAC (1990) Methods of Analysis (15th ed.). Association of Official Analytical Chemist, Washington, D.C.

Aswathy U. S., R. K. Sukumaran, G. L. Devi, K. P. Rajasree, R. R. Singhania and A. Pandey (2010) Bio-ethanol from water hyacinth biomass: An evaluation of enzymatic saccharification strategy. *Bioresource Technology* 101:925-930.

Basu N. C. (1921) Paper making as a home industry. *Bengal Agricultural Journal* 1:96-101.

Boyd A. E. (1968) Fresh-water plants: a potential source of protein. *Economic Botany* 22:359-368.

Boyd A. E. (1969) The nutritive value of three species of waterweeds. *Economic Botany* 23:123-127.

Boyd C. E. and D.H. Vickers (1971) Variation in elemental content of *Eichhornia crassipes*. *Hydrobiologia* 38:409-414.

Chanakya H. N., S. Borgaonkar, G. Meena, and K. S. Jagadish (1993) Solid-phase biogas production with garbage or water hyacinth. *Bioresource Technology* 46:227-231.

Castro-González M. I. and M. Méndez-Armenta (2008) Heavy metals: Implications associated to fish consumption. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 26:263-271.

Cocker J., J. Morton, N. Warren, J. P. Wheeler, and A. N. Garrod (2006) Biomonitoring for chromium and arsenic in timber treatment plant workers exposed to CCA wood preservatives. *Ann. Occupational Hygiene* 5:517-525.

Imagen agropecuaria (2008) Producen Celulosa y papel de lirio acuático. Consultado el 24 de noviembre del 2015.

http://imagenagropecuaria.com/2008/producen_celulosa_y_papel_con_lirio_acuatico/

Jomova K. and M. Valko (2010) Advances in metal-induced oxidative stress and human disease. *Toxicology* 283:65-87.

Kabata-Pendia A. (2001) Trace Elements in Soils and Plants. : CRC Press. Florida, USA.

Khelifi R. and A. Hamza-Chaffai (2010) Head and neck cancer due to heavy metal exposure via tobacco smoking and professional exposure: A review. *Toxicology Applied Pharmacology* 248:71-88.

Kumar A., L. K. Singh and S. Ghosh (2009) Bioconversion of lignocellulosic fraction of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to ethanol by *Pichia stipitis*. *Bioresource Technol* 100, 3293-3297.

Ming-Ho Y. (2005) Environmental toxicology: biological and health effects of pollutants: *In: Basic Concepts of Environmental Chemistry*. D. W. Connell (ed.). CRC Press. Florida, USA.

Mishima D., M. Tateda, M. Ike and M. Fujita (2006) Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. *Bioresource Technology* 97:2166-2172.

Norma Oficial Mexicana NOM-130-SSA1-1995. Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias.

Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008. Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba.

- Nigam J. N. (2002)** Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast. *Journal of Biotechnology* 97:107-116.
- Ramos V. L. and R. A. Novelo (1993)** Vegetación y flora acuáticas de la laguna de Yuriria Guanajuato, México. *Acta Botánica Mexicana* 25:61-79.
- Tejada I. (1975)** Valor nutritivo de lirio acuático *Eichhornia crassipes* para el pollo en crecimiento. *Tecnología Pecuaria* 28:7-12.
- Tokar E. J., L. Benbrahim-Tallaa, and M. P. Waalkes (2011)** Metal ions in human cancer development. *Metal Ions in Life Sciences* 8:375-401.
- Vega N. (1990)** Las malezas y su combate. Universidad Central de Venezuela. Ediciones de la Biblioteca, Caracas-Venezuela.
- WHO/FAO/IAEA. World Health Organization. Switzerland: Geneva (1996)** Trace Elements in Human Nutrition and Health.

Leyendas de Tablas y Figura

Tabla 1. Fecha y puntos de muestreo del lirio acuático.

Tabla 2. Resultados del análisis químico proximal y estadístico del lirio acuático (g/100 g base seca).

Tabla 3. Comparación entre los resultados del análisis químico proximal de dos muestras de lirio acuático recolectadas el mismo día (g/100g en peso seco excepto para la humedad).

Tabla 4. Concentración de metales pesados en hojas, bulbo o raíz del lirio acuático presente en la laguna de Yuriria a lo largo de las estaciones del año.

Figura 1. Localización de los puntos de muestreo en la Laguna de Yuriria. Los números (1-4) corresponden a los sitios muestreados indicados en la Tabla 1. En la parte superior derecha se muestra la silueta de la República Mexicana, resaltando la posición del estado de Guanajuato. La figura de la extrema izquierda representa al estado de Guanajuato y en la parte correspondiente a Yuriria se marca líneas para en una imagen satelital mostrar a la laguna de Yuriria y los puntos aproximados en los que se tomaron plantas en el muestreo llevado a cabo, según se indica en la Tabla 1.

Tabla 1.

Fecha de muestreo	Estación	Zona muestreada
10/03/2014	Invierno	Noreste (1) y La Trompeta (2)
02/06/2014	Primavera	Norponiente (3)
18/09/2014	Verano	Noreste (1)
13/12/2014	Otoño	Puerta de Andaracua (4)

Tabla 2.

Parámetro Tejido (valor promedio)	Primavera Media \pm σ	Verano Media \pm σ	Otoño Media \pm σ	Invierno Media \pm σ
Humedad				
Hoja (82.3)	82.3 \pm 0.6 ^a	78.5 \pm 10.3 ^a	81.8 \pm 2.1 ^a	86.4 \pm 1.0 ^a
Tallo (92.2)	91.6 \pm 0.7 ^b	91.1 \pm 0.7 ^b	92.4 \pm 1.7 ^b	93.7 \pm 0.9 ^a
Raíz (91.8)	88.4 \pm 1.5 ^b	93.0 \pm 1.2 ^a	92.8 \pm 0.4 ^a	93.1 \pm 1.5 ^a
Proteína				
Hoja (18.7)	15.6 \pm 0.4 ^c	9.9 \pm 0.3 ^d	31.6 \pm 0.7 ^a	17.6 \pm 1.7 ^b
Tallo (11.0)	9.3 \pm 0.4 ^b	4.8 \pm 0.1 ^c	20.3 \pm 0.3 ^a	9.4 \pm 2.1 ^b
Raíz (9.2)	9.3 \pm 0.1 ^b	4.6 \pm 0.1 ^c	13.3 \pm 0.3 ^a	9.7 \pm 0.6 ^b
Cenizas				
Hoja (13.5)	17.4 \pm 2.4 ^a	11.7 \pm 0.3 ^b	12.8 \pm 0.7 ^b	12.0 \pm 0.3 ^b
Tallo (20.2)	21.9 \pm 0.7 ^b	15.1 \pm 1.3 ^d	17.7 \pm 1.1 ^c	26.0 \pm 0.3 ^a
Raíz (27.6)	34.9 \pm 1.1 ^a	30.1 \pm 4.0 ^b	19.1 \pm 0.3 ^c	26.4 \pm 0.6 ^b
Lípidos				
Hoja (4.4)	4.3 \pm 0.3 ^b	6.2 \pm 0.3 ^a	2.8 \pm 0.2 ^c	4.3 \pm 1.2 ^b
Tallo (4.9)	4.1 \pm 0.3 ^b	4.4 \pm 0.9 ^b	3.8 \pm 0.2 ^b	6.2 \pm 1.7 ^a
Raíz (5.6)	8.3 \pm 0.3 ^a	6.4 \pm 1.0 ^{ab}	2.8 \pm 0.2 ^c	5.9 \pm 2.1 ^b
Fibra cruda				
Hoja (17.4)	16.9 \pm 1.6 ^b	19.2 \pm 0.7 ^a	19.1 \pm 0.5 ^a	14.6 \pm 1.5 ^c
Tallo (22.6)	22.1 \pm 0.8 ^b	32.7 \pm 0.7 ^a	19.7 \pm 1.1 ^c	16.2 \pm 0.7 ^d
Raíz (17.3)	12.6 \pm 1.4 ^c	23.0 \pm 1.9 ^a	19.1 \pm 1.5 ^b	14.4 \pm 2.4 ^c
Hidratos de carbono				
Hoja (46.0)	45.8	53.0	33.8	51.4
Tallo (41.6)	42.7	43.0	38.5	42.2
Raíz (40.3)	36.0	35.8	45.8	43.5
Suma de FC e HC				
Hoja (63.4)	62.7	72.2	52.8	63.4
Tallo (64.2)	64.8	75.6	58.1	58.4
Raíz (57.5)	48.5	58.9	64.8	58.0

Los valores de hidratos de carbono se calcularon de la resta de 100 con respecto de la suma de los demás componentes, por lo que no se calculó un valor de $\pm \sigma$.

Tabla 3.

Parámetro	ZN ¹	LT ²	CV	ZN	LT	CV	ZN	LT	CV
	Hoja	Hoja		Tallo	Tallo		Raíz	Raíz	
Humedad	86.4±1.6 ^a	86.5±0.3 ^a	1.3	93.3±0.4 ^a	94.5±0.2 ^b	0.3	90.4±3.1 ^a	93.0±0.3 ^a	2.4
Proteína	16.2±0.3 ^b	18.9±0.4 ^a	3.4	7.5±0.5 ^b	11.3±0.2 ^a	3.7	9.3±0.3 ^b	10.2±0.4 ^a	3.4
Cenizas	12.0±0.3 ^a	12.0±0.1 ^a	2.2	16.1±0.4 ^a	16.6±1.8 ^a	2.6	27.2±0.1 ^a	26.4±0.6 ^a	1.5
Lípidos	5.6±0.1 ^a	4.9±0.1 ^b	3.7	4.6±0.2 ^b	6.0±0.1 ^a	8.1	4.2±0.2 ^b	6.4±0.1 ^a	2.9
Fibra cruda	15.3±1.5 ^a	12.9±0.1 ^b	5.8	19.4±1.3 ^a	18.6±1.5 ^a	1.8	14.4±1.8 ^b	16.1±1.5 ^a	1.9
Hidratos de carbono	50.9	51.3		52.5	47.6		45.0	41.0	

Nota: ¹Zona Noreste, ²La Trompeta, CV= Coeficiente de Variación.

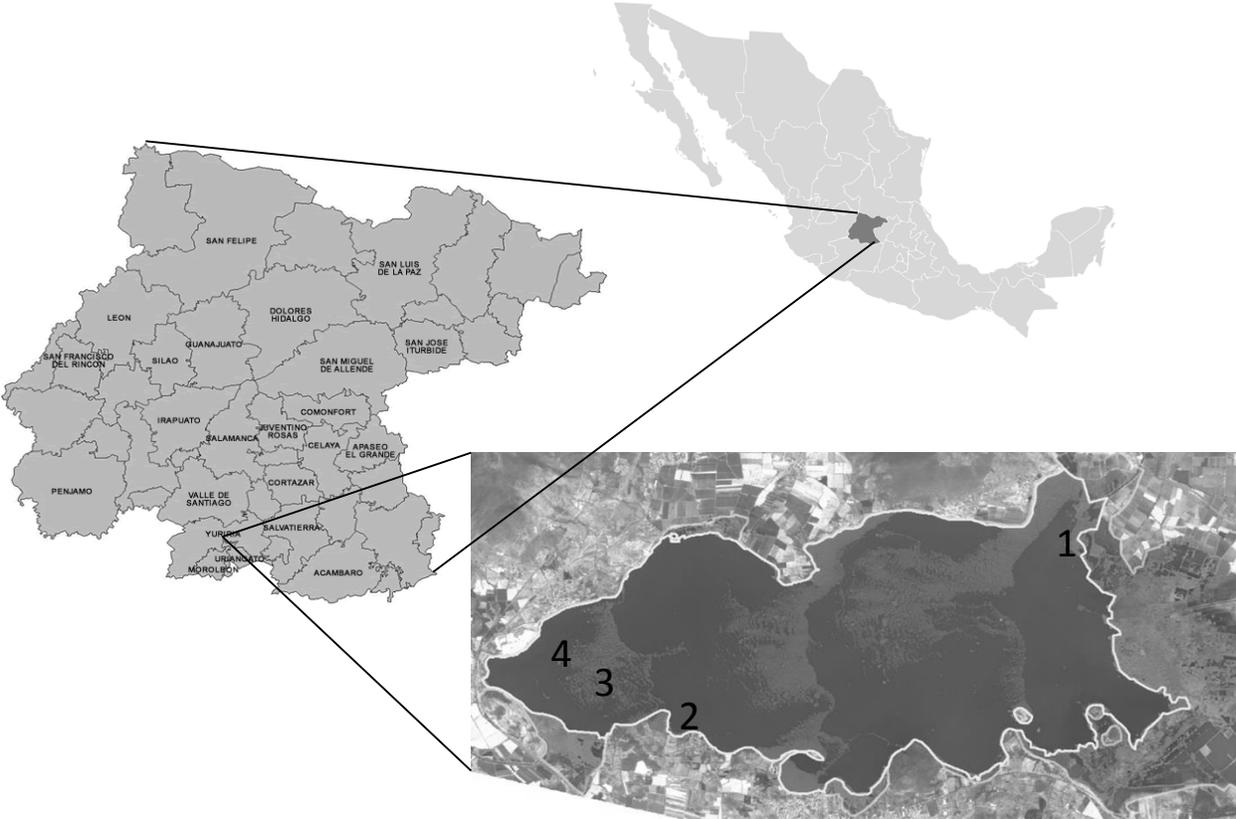
Tabla 4.

PARTE DE LA PLANTA	LUGAR	MES 2014	As mg/Kg	Cd mg/Kg	Cr mg/Kg	Cu mg/Kg	Pb mg/Kg	Zn mg/Kg
Hoja	La Trompeta	03	<lc	0.14	4.97	14.38	<lc	43.16
Bulbo	La Trompeta	03	<lc	0.25	4.94	7.15	<lc	30.52
Raíz	La Trompeta	03	8.13	2.71	19.34	19.42	13.60	63.73
Hoja	NW	06	<lc	0.57	9.67	11.78	6.12	85.81
Bulbo	NW	06	<lc	0.78	11.57	17.06	8.69	67.42
Raíz	NW	06	10.39	2.42	16.98	19.06	17.97	53.15
Hoja	Loma de Zempoala	09	<lc	<lc	6.54	6.42	<lc	25.21
Bulbo	Loma de Zempoala	09	<lc	<lc	2.22	2.85	<lc	8.51
Raíz	Loma de Zempoala	09	8.15	2.81	11.42	4.61	10.90	33.42
Hoja	Puerta de Andaracua	12	<lc	<lc	0.60	5.67	<lc	17.18
Bulbo	Puerta de Andaracua	12	<lc	<lc	1.66	4.44	<lc	17.49
Raíz	Puerta de Andaracua	12	<lc	0.45	4.50	12.75	3.45	78.67
NOM-130			1.0	0.2	NE	NE	1.0	NE
NOM-247			NE	0.1	NE	NE	0.5	NE

<lc. Valor menor que el límite de cuantificación

NE. No se establece valor para estos metales en la NOM respectiva

Figura 1.



CAPÍTULO III

Evaluación de la contaminación por metales pesados en sedimentos de la laguna de Yuriria
(Guanajuato) para el periodo 2014-2015

Gabriela A. Zanor, Ma. Teresa Vieyra Hernández, Mayela Bautista Justo, Carlos Alberto Leal
Morales

Universidad de Guanajuato



Laguna de Yuriria (Guanajuato)

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua se ha convertido en un problema de preocupación mundial. La mayor parte de los niveles elevados de metales provienen de fuentes culturales, aunque una gran parte son introducidos por aportes litogénicos derivados de los procesos de meteorización de las rocas circundantes. Según diversos autores (por ejemplo, Connell y Miller, 1984), se consideran metales pesados a aquellos elementos con densidad mayor a 5 g/cm^3 o aquellos elementos que poseen pesos atómicos mayor que el del hierro (55.85 g/mol). Sin embargo, con esta precisión se excluirían ciertos metales con pesos atómicos menores que el del hierro (por ejemplo, el V: 50.95, el Mn: 54.44 y el Cr: 52.01), por lo que en ciertas ocasiones resulta más conveniente hablar de elementos traza o simplemente metales. Todos los términos aluden a problemas de contaminación y toxicidad.

Una vez liberados los metales por diversas fuentes, son movilizados a lo largo de diferentes ecosistemas bajo la acción constante de los agentes externos, principalmente acuáticos y eólicos. Luego de ser incorporados a un medio depositacional específico, como un sistema acuático, pueden distribuirse bajo alguna de las siguientes formas (Peng et al., 2009): como especies solubles, coloides, formas suspendidas o asociados a fases sedimentarias. Los metales pueden estar ligados a varios compartimientos de los sedimentos en formas diferentes: adsorbidos a los minerales de arcillas o a los oxihidróxidos de hierro/manganeso, asociados a los carbonatos o sulfuros, ligados a la materia orgánica o incorporados a la estructura cristalina de minerales (silicatos). De esta manera se separan dos fracciones geoquímicas en los sedimentos: la fracción residual o inerte (metales incluidos en la estructura de los minerales primarios) y las fracciones no residuales (metales asociados a las restantes fases sólidas; Filgueiras et al., 2002). El comportamiento de los elementos metálicos en las aguas naturales está fuertemente influenciado por las interacciones entre el agua y los sedimentos; es por ello, que los metales no permanecen inmobilizados en las fases sedimentarias del fondo sino que pueden ser liberados según los cambios en los factores físico-químicos del agua. Según Elder (1988), las condiciones ambientales que favorecen la partición metálica (inmovilización y removilización) entre las fases acuosas y sólidas son: el pH, el Eh, la concentración de materia orgánica, la carga de sedimentos suspendidos, la diversidad de organismos, la temperatura, la luz, la salinidad, entre otros.

Actualmente, algunos métodos utilizados para determinar la peligrosidad, movilidad y disponibilidad de los metales se basan en procedimientos químicos y mineralógicos. Los métodos más usados son: 1. Determinación de la concentración total de metales; 2. Extracción simple y, 3. Extracción secuencial (Tessier et al., 1979; Keon et al., 2001). La medición de la concentración total de metales en sedimentos sirve para conocer el riesgo existente de acumulación en un ambiente determinado. El segundo procedimiento, separa la fracción no residual de la residual resultando un buen indicador de biodisponibilidad. La tercera técnica intenta valorar la distribución de los metales respecto a las distintas fases de un suelo y su movilidad relativa, y permite discernir si los metales se asocian a fuentes naturales o antropogénicas.

A nivel mundial, muchos estudios han analizado los metales pesados en relación a otras características geoquímicas de los sedimentos (materia orgánica, carbonatos, óxidos de Fe y Mn, isótopos estables, minerales, etc.) para evaluar los efectos ambientales de sistemas lacustres. Entre ellos, se pueden citar los trabajos de Panda et al. (1995), García-Rodríguez et al. (2002), Kische y Machiwa (2003), Tylmann (2005), Wu et al. (2013), Yao y Xue (2014), Yu et al. (2014). En México y especialmente, en el estado de Guanajuato, el problema de contaminación de cuerpos de agua ha cobrado mucha importancia debido al crecimiento económico de esta región del centro del país. Actualmente, diversas actividades económicas, especialmente la actividad agrícola e industrial,

están ejerciendo una alta presión sobre los recursos hídricos. A pesar de ello, hasta el momento no se cuenta con numerosas investigaciones de metales traza en los sedimentos de lagunas naturales o artificiales en la región guanajuatense (por ejemplo, Cano et al., 2002). Aunado a los contaminantes, muchos cuerpos de agua, como es el caso de la Laguna de Yuriria, sufren un proceso de envejecimiento debido al aporte continuo de sedimentos tanto por afluentes naturales como artificiales y problemas de eutrofización por la alta descarga de nutrientes (fósforo y nitrógeno; Ramos Ventura y Novelo Retana, 1993). Existe un trabajo reciente de Espinal Carreón et al. (2013) sobre la evaluación de la calidad de aguas de la Laguna de Yuriria, reportando datos de parámetros físicos y químicos de sus aguas. Un informe del Instituto Politécnico Nacional (2010) muestra un diagnóstico de la salud de la biota acuática de la laguna y algunos datos de contaminantes en agua y sedimentos. Existe una tesis de licenciatura de Torres De la O (2005) que reporta algunos datos de arsénico en el agua de la laguna.

En este estudio se efectuó un diagnóstico de la contaminación en sedimentos analizando los niveles totales de metales en la Laguna de Yuriria. Estos resultados permitirán tener un panorama de la peligrosidad potencial de los contaminantes analizados para este ambiente lacustre.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar la concentración total de elementos mayoritarios y trazas (Fe, Mg, As, Cu, Pb, Zn, Cd y Cr) en sedimentos de la Laguna de Yuriria (Guanajuato) a fin de evaluar la contaminación del ambiente lacustre y sus posibles fuentes de aporte.

2.2. Objetivos particulares

1. Caracterizar el clima del área de estudio analizando datos instrumentales (Temperatura, Lluvias, Evaporación) de estaciones meteorológicas cercanas.
2. Determinar la composición granulométrica de los sedimentos.
3. Determinar el contenido de agua en los sedimentos.
4. Determinar el contenido de materia orgánica en los sedimentos.
5. Determinar el contenido de carbono inorgánico en los sedimentos.
6. Analizar y comparar los contenidos de elementos mayoritarios y trazas obtenidos en diferentes puntos de muestreo y en diferentes estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño) para el periodo 2014-2015.
7. Relacionar los parámetros físicos y químicos determinados en los sedimentos con la concentración de los elementos analizados.
8. Calcular el Índice de geoacumulación y compararlo con los valores de fondo (*background*) de la corteza terrestre.
9. Utilizar técnicas estadísticas (matrices de correlación) para analizar el comportamiento de las variables.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada al sur del estado de Guanajuato, entre los paralelos 20° 13' 00''-20° 17' 20'' LN y los meridianos 101° 12' 30''-101° 03' 35'' LW (Figura 1), ocupando parte de los municipios de Salamanca, Valle de Santiago, Jaral del Progreso y Yuriria. La región

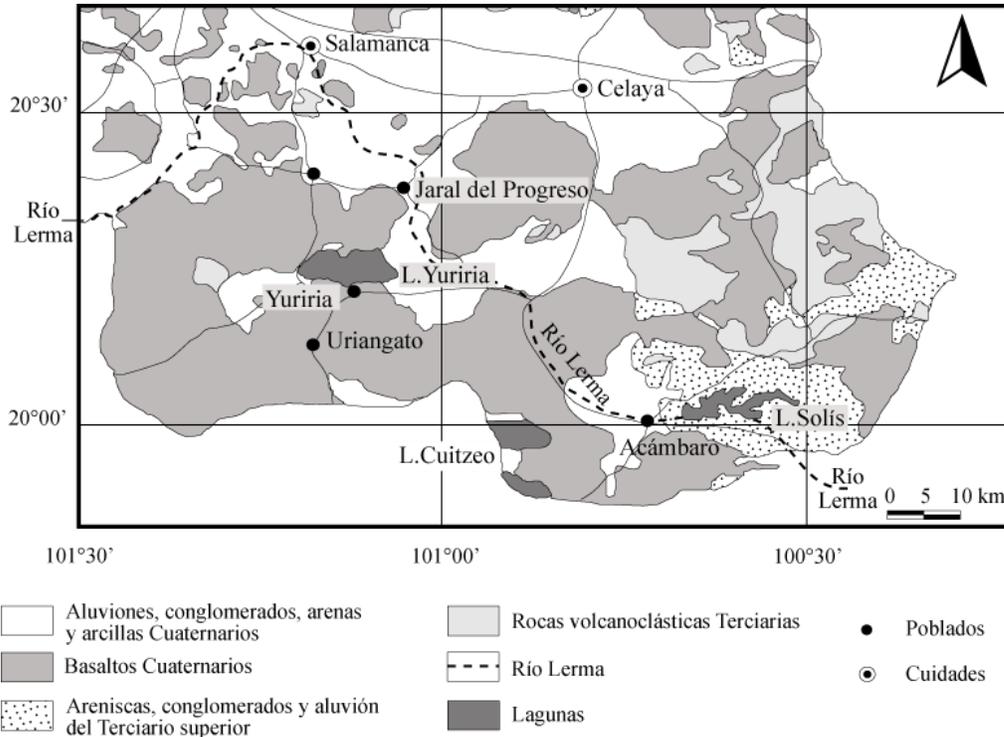
posee un típico clima cálido subhúmedo caracterizado por veranos muy cálidos y precipitaciones irregulares concentradas en una sola estación. Las máximas precipitaciones y temperaturas se producen durante el verano (junio a septiembre) mientras que la estación seca ocurre durante el invierno (diciembre a marzo). Según datos analizados a partir de la estación Santa María Yuriria, en el sector sur de la laguna en la localidad de Yuriria (Periodo 1940-2013), la precipitación media anual es de 669.1 mm, la temperatura media es de 19.2°C y la evaporación media anual es de 1921.0 mm, con un balance hídrico negativo de 1251.9 mm (Tabla 1). En el sur del estado se reconocen suelos de tipo vertisol, caracterizados por la abundancia de arcilla.

Tabla 1. Datos meteorológicos para la estación Santa María Yuriria (Periodo 1940-2013). T: temperatura, PRE: precipitación; EV: evaporación; BH: balance hídrico.

	T (C°)	PRE (mm)	EV (mm)	BH (mm)
Enero	15.0	13.8	109.6	-95.7
Febrero	16.5	12.7	132.0	-119.4
Marzo	19.0	7.9	197.8	-189.9
Abril	21.3	5.4	222.0	-216.6
Mayo	22.9	28.1	232.3	-204.2
Junio	22.5	121.3	195.9	-74.6
Julio	21.0	152.7	171.1	-18.4
Agosto	20.8	149.7	169.8	-20.1
Septiembre	20.3	114.1	144.0	-29.9
Octubre	18.8	42.3	138.3	-96.0
Noviembre	16.8	12.8	110.1	-97.3
Diciembre	15.3	8.3	98.1	-89.8
ANUAL	19.2	669.1	1921.0	-1251.9

El territorio sur del estado de Guanajuato pertenece a la provincia fisiográfica conocida como “Eje Neovolcánico” y a la subprovincia Bajío Guanajuatense y Michoacán. Esta provincia se caracteriza por un típico paisaje volcánico conformado por sierras que presentan alturas medias de 1800 m s.n.m. y extensos valles intermontanos rellenos de sedimentos continentales modernos. Las rocas volcánicas están representadas por basaltos de edad Cuaternaria, las cuales forman conos piroclásticos constituidos por bombas, lapilli y cenizas (Consejo de Recursos Minerales, 1992; Figura 2). Los minerales principales son plagioclasa, olivino y piroxenos (Silva Mora, 1988), mientras que los accesorios más comunes son magnetita, ilmenita y apatito. Los depósitos detríticos Cuaternarios son sedimentos lacustres, aluviones, conglomerados, arenas y arcillas.

Figura 1. Mapa geológico del área de estudio, mostrando las principales rocas, localidades, lagunas y el Río Lerma.



La región hidrológica a la que pertenece la Laguna de Yuriria es la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago, donde las aguas fluyen hacia el Océano Pacífico. El río más importante es el río Lerma, con una longitud total del cauce de 708 km. El río Lerma nace al pie del Nevado de Toluca (estado de México) y desagua en el Lago de Chapala (estado de Jalisco), aportando un caudal medio anual de 2,150 millones de m³. Por su parte, la Laguna de Yuriria (1750 m s.n.m.) se alimenta de aguas del río Lerma y por su extremo occidental recibe de manera intermitente agua por el canal de La Cinta proveniente del lago Cuitzeo. Cuenta con una superficie de 66 km² y una profundidad media de 2.8 m. Tiene un único efluente situado en su extremo nororiental, cercano al poblado Loma de Zempoala. Existen varias localidades ribereñas en la laguna tales como la ciudad de Yuriria en el litoral sur, Cahuageo y La Angostura en el borde norte, entre otras. Las principales actividades de la zona son la agricultura mixta, la ganadería extensiva y la pesca. Asimismo, esta laguna aporta aguas al distrito de riego 011 Alto Río Lerma, donde está asentado el desarrollo agrícola más importante del estado de Guanajuato sirviendo al mismo tiempo como vaso regulador de avenidas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Muestreo

Se tomaron cinco puntos de muestreo en la laguna, cuatro en las orillas y uno en el centro (Tabla 2 y Figura 2).

Tabla 2. Localización de los puntos de muestreo de sedimentos en la Laguna de Yuriria.

N°	MUESTRA	LAT	LONG
		grados, minutos, segundos	
1	Zempoala	20°16'31.6" N	101°05'21.7" W
2	Andaracua	20°15'16.9" N	101°11'06.1" W
3	Centro	20°14'41.3" N	101°07'33.8" W
4	San Pablo	20°14'17.8" N	101°04'42.9" W
5	Uriangato	20°14'12.5" N	101°11'42.4" W

Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos en la Laguna de Yuriria.



La colecta de sedimentos se realizó con una draga EKMAN a una profundidad de 30 cm. Las muestras se tomaron en las cuatro diferentes estaciones del año: invierno, primavera, verano, otoño del año 2014 e invierno del año 2015. Los puntos de muestreo de los bordes de la laguna se seleccionaron tomando en cuenta las descargas de aguas residuales o de retorno de aguas de riego recibidas. El punto central se seleccionó para tener un punto de referencia que permita efectuar comparaciones con los otros sitios sometidos a los efectos de las descargas. Una vez obtenidas las muestras, éstas se colocaron en bolsas de plástico herméticas y se refrigeraron a 4 °C hasta la realización de las determinaciones analíticas.

4.2. Análisis de laboratorio

Para cada determinación analítica se efectuaron 3 repeticiones, las cuales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Aguas de la División de Ciencias de la Vida (DICIVA-Universidad de Guanajuato).

4.2.1. Determinación del contenido de humedad

El contenido de agua del suelo se determinó mediante el método gravimétrico (Heiri *et al.*, 2001), pesando las muestras en estufa antes y después de someterlas a una temperatura de 105 °C por 24 horas.

4.2.2. Determinación de la composición granulométrica

Para cuantificar la composición granulométrica, las muestras fueron previamente lavadas con ácido clorhídrico 1 M para eliminarles los carbonatos y además, se procedió a la eliminación de la materia orgánica con H₂O₂ al 30%. Las determinaciones granulométricas se efectuaron en el Centro Mexicano de Energías Renovables (CEMER, Salamanca), con un Analizador de Partículas, Bluewave S3500.

4.2.3. Determinación del pH

Para la determinación del pH se empleó el método potenciométrico. Este método consistió en la preparación de una suspensión de sedimento-agua en una relación 1:2, se agitó por 30 minutos dejando reposar por 15. Luego se midieron los valores de pH con un potenciómetro, previamente calibrado con soluciones reguladoras a pH 4, 7 y 10.

4.2.4. Determinación del contenido de materia orgánica

Para la cuantificación de la materia orgánica por calcinación se utilizó la técnica Pérdida por Ignición (PPI o LOI: *Loss on Ignition*), propuesta por Heiri *et al.* (2001). Las muestras fueron calcinadas en un horno de mufla a una temperatura de 550 °C por 3 horas, para cuantificar los contenidos de materia orgánica.

4.2.5. Determinación del contenido de carbono inorgánico

El contenido de carbono inorgánico se realizó por la técnica PPI, calcinando las muestras a una temperatura de 1000 °C por 2 horas. La pérdida de peso experimentada por la muestra durante esta reacción se determinó pesando el residuo en una balanza analítica y se la comparó con el peso de la muestra antes de ser calcinada.

4.2.6. Determinación de N total

La determinación de N total se realizó siguiendo el método Micro-Kjeldahl. Este método se basa en el calentamiento de la muestra con ácido sulfúrico concentrado y posterior destilación con hidróxido de sodio recogiendo el destilado en ácido bórico y titulando con ácido sulfúrico al 0.25 N.

4.2.7. Determinación de las concentraciones totales de elementos mayoritarios y traza

Las concentraciones totales de los elementos Fe, Mg, Cu, Cr, Zn, Pb, Cu y As en las muestras de sedimentos se realizó en el Centro de Geociencias-UNAM (Juriquilla, Querétaro), por Espectrofotometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente Thermo iCAP 6500 Dúo. Previo al análisis, las muestras se sometieron a una digestión con un horno de microondas.

4.3. Determinación del Índice de Geoacumulación

Se utilizó el Índice de Geoacumulación (I_{geo}) propuesto por Müller (1969) para conocer el nivel de contaminación de los sedimentos estudiados. Se calculó el índice con base en la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \ln \frac{C_n}{1.5 B_n}$$

Donde C_n es la concentración medida del elemento en el sedimento y B_n es el valor del elemento en los sedimentos pelíticos, tomado como el valor de fondo geoquímico o *background* (Müller, 1969). En este trabajo el valor B_n se tomó con base en las concentraciones de los elementos de la corteza continental (Rudnick y Gao, 2003; Loska et al., 2004). El I_{geo} consta de 7 clases (Tabla 3), desde la clase 0 (prácticamente sin contaminación) a la clase 6 (extremadamente contaminado).

Tabla 3. Valores de I_{geo} con las clases correspondientes a diferentes niveles de enriquecimiento del sedimento con respecto al valor de fondo.

Clase	Valor de I_{geo}	Contaminación
0	$I_{geo} < 0$	Prácticamente no contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

4.4. Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statgraphics 5.1 y los datos fueron expresados en medias \pm error estándar. Las diferencias entre los tratamientos fueron analizadas utilizando un ANDEVA de una vía, seguido por una prueba de comparación de medias de Tukey (Montgomery, 2004). Además, se construyó una matriz de correlación de Pearson para determinar los pares de variables que mostraban relación entre ellas (Johnson y Wichern, 2002). Las diferencias estadísticamente significativas se reportaron cuando $p < 0.05$.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad de los parámetros físicos y químicos en los sedimentos

La Tabla 4 muestra los resultados de los parámetros físicos y químicos determinados en los sedimentos de la Laguna de Yuriria para el periodo 2014-2015. Los análisis estadísticos señalaron diferencias significativas entre los porcentajes de humedad de las muestras analizadas, con variaciones en sus contenidos entre 72.85 y 92.07 % (SAN-JUN-14 y SAN-SEP-14, respectivamente) y un promedio para todas las muestras de 88.71 %.

Tabla 4. Parámetros físicos y químicos en los sedimentos de la Laguna de Yuriria.

MUESTRAS	HUMEDAD (%)	Mz (mm)	CO (%)	PPI (%)	CI (%)	pH	NT (%)	C/N
Invierno 2014								
ZEM-MAR-14	91.44 ± 0.04 ab	0.013	11.87 ± 0.16 def	21.96 ± 0.29 def	3.53 ± 0.14 hi	6.97 ± 0 jk	0.67 ± 0.01 e	17.89 ± 0.4 abc
AND-MAR-14	90.76 ± 0.02 bc	0.018	12.27 ± 0.02 cd	22.71 ± 0.04 cd	3.55 ± 0.02 ghi	6.93 ± 0 l	0.7 ± 0 de	17.53 ± 0.03 abc
Primavera 2014								
ZEM-JUN-14	81.08 ± 0.04 l	0.020	11.69 ± 0.02 def	21.63 ± 0.04 def	4.2 ± 0.01 defgh	6.97 ± 0 jkl	nd	nd
AND-JUN-14	88.52 ± 0.09 efg	nd	13.87 ± 0.02 b	25.65 ± 0.04 b	5.23 ± 0.18 bc	6.97 ± 0 jk	nd	nd
CENTRO-JUN-14	81.55 ± 0.07 l	0.014	9.51 ± 0.01 h	17.59 ± 0.02 h	5.14 ± 0.02 bc	7.41 ± 0 d	nd	nd
SAN-JUN-14	72.85 ± 0.22 n	0.010	11.39 ± 0.12 f	21.07 ± 0.23 f	4.16 ± 0.04 efg	6.94 ± 0 kl	nd	nd
URI-JUN-14	91.02 ± 0.01 bc	0.016	14.83 ± 0.01 a	27.44 ± 0.02 a	5.16 ± 0.04 bc	6.77 ± 0 m	nd	nd
Verano 2014								
ZEM-SEP-14	90.84 ± 0.04 bc	0.015	13.7 ± 0.03 b	25.34 ± 0.06 b	4.28 ± 0 defg	7.04 ± 0 i	0.91 ± 0 a	15.05 ± 0.03 cd
AND-SEP-14	90.36 ± 0.03 cd	0.011	11.79 ± 0.05 def	21.81 ± 0.1 def	4.76 ± 0.03 bcde	7.13 ± 0 h	0.84 ± 0 ab	14.04 ± 0.06 d
CENTRO-SEP-14	79.75 ± 0.18 m	0.011	7.61 ± 0.04 j	14.07 ± 0.07 j	4.31 ± 0 defg	7.67 ± 0 b	0.4 ± 0.01 f	19.32 ± 0.58 a
SAN-SEP-14	92.07 ± 0 a	0.017	12.66 ± 0.09 c	23.42 ± 0.17 c	4.52 ± 0.04 cdef	6.95 ± 0 jkl	0.76 ± 0 cd	16.59 ± 0.14 abcd
URI-SEP-14	88.47 ± 0.02 fg	0.017	12.08 ± 0.01 cde	22.34 ± 0.02 cde	4.79 ± 0.01 bcde	7.24 ± 0 g	0.77 ± 0 bcd	15.68 ± 0.01 bcd
Otoño 2014								
ZEM-DIC-14	90.62 ± 0.03 bc	0.008	13.44 ± 0 b	24.87 ± 0 b	4.01 ± 0.06 fgh	7.23 ± 0.01 g	nd	nd
AND-DIC-14	85.82 ± 0.12 j	0.013	10.68 ± 0.04 g	19.76 ± 0.07 g	4.95 ± 0.14 bcd	7.38 ± 0 de	nd	nd
CENTRO-DIC-14	83.97 ± 0.15 k	0.015	8.25 ± 0.02 i	15.26 ± 0.04 i	6.27 ± 0.06 a	7.64 ± 0 b	nd	nd
SAN-DIC-14	89.48 ± 0.02 de	0.022	11.66 ± 0.01 def	21.58 ± 0.01 def	5.31 ± 0.03 b	6.7 ± 0 n	nd	nd
URI-DIC-14	87.18 ± 0.01 hi	0.021	11.48 ± 0.01 ef	21.23 ± 0.02 ef	6.18 ± 0.03 a	7.34 ± 0 f	nd	nd
Invierno 2015								
ZEM-MAR-15	89.07 ± 0.01 efg	0.010	12.54 ± 0.01 c	23.2 ± 0.02 c	3.25 ± 0.01 i	7.34 ± 0.01 ef	0.81 ± 0.01 bc	15.6 ± 0.17 bcd
CENTRO-MAR-15	86.35 ± 0.05 ij	0.015	8.24 ± 0.05 i	15.24 ± 0.09 ij	4.77 ± 0.03 bcde	7.76 ± 0 a	0.46 ± 0.01 f	18.17 ± 0.33 ab
SAN-MAR-15	88.13 ± 0.01 gh	0.020	12.07 ± 0.01 cde	22.32 ± 0.01 cde	4.23 ± 0.03 defgh	6.98 ± 0 j	0.65 ± 0 e	18.71 ± 0.05 a
URI-MAR-15	89.24 ± 0.04 ef	0.018	11.72 ± 0.01 def	21.68 ± 0.02 def	4.2 ± 0.01 efg	7.47 ± 0 c	0.67 ± 0.01 e	17.65 ± 0.26 abc

ZEM: Zempoala; AND: Andaracua; SAN: San Pablo; URI: Uriangato.

Se muestran las medias ± error estándar para cada variable (n= 3) y los valores con diferentes letras son estadísticamente diferentes (p < 0.05). nd: no determinado.

La variación estacional afectó aparentemente los contenidos de este parámetro en los sedimentos ya que la muestra con menor contenido de humedad resultó San Pablo en primavera (SAN-JUN-14; Tabla 4) mientras que la de mayor contenido de humedad se registró en verano (SAN-SEP-14; Tabla 4). En la matriz de correlación de la Tabla 5, la humedad se correlacionó positivamente con los contenidos de carbono orgánico, materia orgánica y N total de los sedimentos, indicando que los materiales ricos en nutrientes desarrollan una alta porosidad ocasionando una mayor retención de humedad.

Tabla 5. Matriz de correlación entre las variables físicas y químicas, y las concentraciones de metales en los sedimentos analizados (mg/kg).

	Humedad (%)	Mz (mm)	CO (%)	PPI (%)	CI (%)	pH	NT (%)	CN	Al	Fe	Mg	Cu	Zn	Pb	Cd
Mz (mm)	0.386														
CO (%)	0.8573	0.3345													
PPI (%)	0.8573	0.3332	1												
CI (%)	-0.2825	0.3812	-0.3364	-0.3357											
pH	-0.7542	-0.415	-0.8148	-0.8139	0.3427										
NT (%)	0.7794	0.1585	0.9546	0.9549	-0.2585	-0.6687									
CN	-0.5721	0.0887	-0.7114	-0.7122	0.0618	0.3202	-0.8832								
Al	-0.6877	-0.3305	-0.8582	-0.8584	-0.005	0.5245	-0.9250	0.8860							
Fe	-0.5927	-0.1177	-0.7552	-0.7559	0.1995	0.3476	-0.8265	0.7941	0.8273						
Mg	-0.6713	-0.1619	-0.8916	-0.8922	0.165	0.5061	-0.9661	0.8967	0.9540	0.8856					
Cu	0.4695	0.3917	0.5865	0.5852	-0.2546	-0.4192	0.5254	-0.3709	-0.5889	-0.2355	-0.5208				
Zn	0.0781	0.1503	0.145	0.1439	0.0971	-0.4509	0.0916	0.0209	-0.0362	0.4506	0.0591	0.3885			
Pb	-0.5896	-0.575	-0.541	-0.5392	0.0224	0.4238	-0.5149	0.4638	0.6753	0.5852	0.5203	-0.4721	0.1605		
Cd	0.4389	0.2507	0.2044	0.2051	0.1265	-0.0009	0.2029	-0.2869	-0.3371	-0.5055	-0.2294	-0.0355	-0.5111	-0.5046	
Cr	-0.7483	-0.2635	-0.8972	-0.8968	0.1571	0.7081	-0.9428	0.8476	0.929	0.7528	0.9044	-0.524	-0.1583	0.6785	-0.1577

Valores en negrita: denota diferencia estadística significativa.

Asimismo, la granulometría fina de los sedimentos (limo + arcilla) favorecería la acumulación de agua en el espacio poroso de los mismos (Tabla 4). En este sentido, los sedimentos presentaron una Media (Mz) entre 0.008 mm (ZEM-DIC-14) y 0.022 mm (SAN-DIC-14; Tabla 4). Con base en la Escala granulométrica de Udden-Wentworth los sedimentos se clasificaron como limos finos (0.0039-0.031 mm). La alta superficie específica de los sedimentos finos les conferiría una alta actividad química y biológica a los sedimentos (Porta et al., 2010).

En cuanto a los valores de CO y MO, estos parámetros mostraron una correlación positiva muy alta ($r^2= 1$; Tabla 5), lo cual confirmaría que el carbono es un constituyente predominante en la materia orgánica de los sedimentos. Según un estudio de Metcalfe y O'Hara (1992) en sedimentos del cráter La Joya, las concentraciones de MO por la técnica de PPI (años 1981 y 1985) resultaron muy inferiores (entre 1.2 a 1.6 %) comparado con los datos reportados para la Laguna de Yuriria en el presente estudio. El valor promedio para las muestras de CO en Yuriria fue de 11.48 % y el de MO resultó de 21.24 % (Tabla 4). Con base en los análisis estadísticos, las muestras de sedimento obtenidas en los sitios del centro mostraron diferencias significativas con respecto a las muestras tomadas de los bordes de la laguna, como San Pablo, Uriangato, Andaracua y Zempoala (Tabla 4). La muestra URI-JUN-14 localizada en la descarga suroeste del Canal La Cinta alcanzó el máximo porcentaje de MO con un valor de 27.44 % y el mínimo lo obtuvo la muestra CENTRO-SEP-14 con un valor de 14.07 %. Los contenidos de materia orgánica altos se relacionarían con la descarga de aguas residuales al cuerpo lacustre a través de los poblados circundantes así como de productos agroquímicos que se emplean en la agricultura (Sandoval-Minero, 2004).

Con respecto al CI, las muestras de sedimentos del sitio de Zempoala mostraron los contenidos menores de CI, variando desde 3.25 a 4.28 % (Tabla 4) y presentaron diferencias significativas en comparación con las otras muestras. Asimismo, se observó que los contenidos menores de CI se registraron mayormente en invierno (mes de marzo) y los mayores porcentajes en otoño (diciembre). La concentración mayor de CI se registró en la zona del centro (CENTRO-DIC-14: 6.27 %) seguida por Uriangato y Andaracua (Tabla 4). Si bien la disolución-precipitación de los carbonatos está condicionada por los parámetros fisicoquímicos del agua (Drever, 1997), el pH no parecería ser el único factor condicionante para la disolución de carbonatos debido a que la muestra URI-JUN-14 presentó un pH levemente ácido (6.77) y sin embargo posee un alto contenido de CI. De manera similar, Espinal-Carreón et al. (2013) describió a la muestras de agua del canal La Cinta (Uriangato) con la mayor dureza en comparación con otros sitios de muestreo de la laguna. Es por ello que en este estudio se propone que las diferencias en los contenidos de CI podrían explicarse preferentemente por una descarga mayor de aguas ricas en nutrientes como el N que favorecen procesos de oxidación en los sedimentos (nitrificación) en áreas ribereñas, creando condiciones más ácidas (Tabla 4) que conducen a la disolución de carbonatos. En efecto, la matriz de correlación mostró una correlación negativa entre el pH y la MO y el N total de los sedimentos (Tabla 5). Un ejemplo se presentaría en la muestra de Zempoala que registró concentraciones elevadas de N total en los sedimentos, pH más ácidos y contenidos menores de CI (Tabla 4). En cuanto a los valores de pH, la zona central registra los pH más alcalinos (7.41-7.76) con condiciones favorables para la precipitación de carbonatos autigénicos (Tabla 4). Para la totalidad de las muestras el promedio de pH resultó de 7.24, con un mínimo de 6.92 y un máximo de 7.77.

Desde hace décadas, la Laguna de Yuriria ha estado sometida a un proceso continuo de eutrofización (Ramos Ventura y Novelo Retana, 1993; Salameh y Harahsheh, 2011). El

aumento de la densidad poblacional en las orillas de la laguna sumado a una intensificación de la agricultura y el consecuente incremento en las descargas puntuales y difusas han ocasionado un aumento notable en las concentraciones de nutrientes, como el N total y el P total (Espinal Carreón et al., 2013). Para el caso del N total, las muestras de sedimentos alcanzaron un promedio de 0.69 %, variando desde 0.40 (CENTRO-SEP-14) a 0.91 % (ZEM-SEP-14; Tabla 4). El N total mostró una fuerte correlación positiva con el carbono orgánico y la materia orgánica de los sedimentos (Tabla 5). Las muestras de los puntos denominados Zempoala y Andaracua tomadas en los meses de verano mostraron diferencias significativas con respecto a los sedimentos de los puntos denominados Uriangato, San Pablo y también con Zempoala y Andaracua para las otras estaciones del año diferentes a verano, y finalmente, con las muestras del centro. Los contenidos más altos de N total se observaron en las muestras de Zempoala (0.81-0.91 %) y Andaracua (0.84 %) principalmente para la estación de verano (septiembre 2014). En segundo lugar, las muestras de los puntos denominados San Pablo, Uriangato y Zempoala, todas pertenecientes a la estación de invierno, presentaron concentraciones intermedias (0.65-0.80 %) y por último, las muestras del centro registraron las concentraciones más bajas (0.40-0.46 %), tanto para verano como para invierno. Esta relación directa entre los sitios de muestreo ubicados en los bordes de la laguna y los contenidos más altos de N total evidenciaría que las orillas recibirían los mayores aportes del nutriente por las descargas directas. Asimismo, las muestras mostraron los valores más altos de N total durante el verano lo que sugeriría que las aguas de escorrentías y de retorno de riego cargadas con N ingresarían a la laguna durante la época de avenidas (verano boreal; Tabla 1). En cuanto a las relaciones C/N, las muestras mostraron un promedio general de 16.91 %, donde la muestra del punto denominado Andaracua mostró la menor relación C/N (14.04 %; Tabla 4) mientras que la mayor relación C/N la presentó el centro con un valor de 19.32 %, ambas en verano. Similares relaciones C/N fueron encontradas por Lanza-Espino et al. (2011) en sedimentos de ambientes de laguna afectados por escurrimientos agrícolas. Los autores indicaron que relaciones C/N altas (entre 30-40) corresponden a sedimentos con altos desechos de plantas. Por su parte, Meyers (2003) propuso que relaciones C/N en los sedimentos menores a 20 corresponden a plantas de origen vascular. Las diferencias estadísticamente significativas en este parámetro estudiado para los sedimentos de Yuriria entre la zona de borde (relaciones más bajas) y el centro (relaciones más altas) evidenciarían una mayor degradación de la materia orgánica en la zona ribereña de la laguna promovida por la concentración mayor de N total en esos sitios de descarga puntuales.

Distribución de los elementos mayoritarios y traza en los sedimentos y comparación con el valor de fondo bibliográfico

Considerando el promedio de las concentraciones totales de los metales y metaloides en los sedimentos estudiados en el presente estudio, se evidenció que los contenidos de Al, Fe, Mg, Cu y Cr están por debajo de su correspondiente valor de fondo de las rocas de la corteza continental superior (Tabla 6; Rudnick y Gao, 2003). En cambio, las concentraciones de Pb, Cd y Zn están por encima (i.e., Pb y Cd) o son iguales (i.e., Zn) que el valor de fondo reportado para esos metales en la corteza, encontrándose la diferencia más alta para el Cd. En la totalidad de las muestras, el As se encontró por debajo del límite de cuantificación (Tabla 6). Comparando los contenidos de los diferentes metales en las muestras, los sedimentos del centro resultaron mayormente enriquecidos con Al, Fe, Mg y Cr, independientemente de la estación del año (Tabla 6). El enriquecimiento de Al, Fe, Mg en

los sedimentos se debería a la presencia de minerales ferromagnesianos y óxidos de Fe presentes en las rocas volcánicas del área geológica circundante (basaltos y andesitas; Silva Mora, 1988). En la matriz de correlación de la Tabla 5 se identificó correlaciones positivas entre el Al, Fe, Mg y Cr, avalando la misma fuente de procedencia para los cuatro metales. Para el caso de los elementos Cr y Cu, éstos también pueden estar contenidos en los silicatos ferromagnesianos de rocas basálticas (Nriagu y Nieboer, 1988). El Cu puede ser aportado al sistema por actividades antrópicas, entre las cuales se encuentran, el uso de plaguicidas, fertilizantes y lodos de aguas residuales.

La muestra que presentó los contenidos más altos de Cu, Zn y Pb fue el punto denominado Uriangato (22.64 mg/kg) en el mes de junio (primavera) y la concentración más alta de Cd fue el punto denominado Andaracua seguida del denominado Uriangato. Cabe destacar que el sitio de muestreo denominado Uriangato es el que presentó el contenido más alto de carbono orgánico, materia orgánica y carbono inorgánico, sugiriendo probablemente que estas fases sólidas del sedimento favorecerían procesos de adsorción o co-precipitación de metales (Panda et al., 1995). Según Soon y Bates (1982), el Cd es uno de los elementos más tóxicos para los organismos cuando se encuentra biodisponible en grandes concentraciones, además de que se caracteriza por tener una gran persistencia en el ambiente. La existencia del Cd en rocas magmáticas y sedimentarias generalmente no excede de 0.3 mg/kg. Asimismo, el Cd puede ser introducido por fuentes antrópicas a los ecosistemas a través del uso de fertilizantes y por los lodos de aguas residuales. El Pb presenta una tendencia a concentrarse en rocas magmáticas y en sedimentos arcillosos en rangos que van de 10 a 40 mg/kg. En rocas ultrabásicas y en sedimentos calcáreos, los niveles pueden variar de 0.1 a 10 mg/kg (Gough et al., 1979). Las fuentes humanas que aportan este metal son principalmente la depositación atmosférica asociado a la quema de combustibles fósiles, los lodos de aguas residuales y los fertilizantes.

Tabla 6. Concentraciones totales de los metales en los sedimentos (Cm) y comparación con el valor de fondo de la corteza continental (Cc).

	Al	Fe	Mg	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As
ZEM-MAR-14	64386	25788	11063	19.10	70.72	17.78	0.15	34.81	<l.c.
AND-MAR-14	60853	24910	10838	21.03	69.34	15.52	0.20	32.94	<l.c.
ZEM-JUN-14	60532	24361	9377	19.87	69.69	18.21	0.20	35.17	<l.c.
AND-JUN-14	63330	25690	10910	20.60	74.15	17.35	0.10	34.30	<l.c.
CENTRO-JUN-14	70356	27271	12658	16.19	70.88	18.60	0.25	38.26	<l.c.
SAN-JUN-14	68420	24564	11061	17.95	66.20	15.90	0.15	37.19	<l.c.
URI-JUN-14	58106	25710	9510	22.65	77.59	28.49	0.15	33.13	<l.c.
ZEM-SEP-14	55187	23559	8870	18.82	67.98	16.77	0.10	30.38	<l.c.
CENTRO-SEP-14	71232	26805	12670	16.11	69.61	18.80	0.05	39.24	<l.c.
SAN-SEP-14	59543	24149	10429	16.78	68.18	16.88	0.35	33.62	<l.c.
URI-SEP-14	54296	24390	9647	21.25	70.38	16.16	0.25	32.02	<l.c.
ZEM-DIC-14	61983	23876	9431	20.15	72.76	19.15	0.25	36.25	<l.c.
AND-DIC-14	61926	25648	11324	20.83	65.07	18.19	0.40	36.67	<l.c.
CENTRO-DIC-14	73037	25794	12201	18.51	61.69	18.26	0.20	42.52	<l.c.
SAN-DIC-14	60234	25203	10684	18.41	62.68	18.14	0.30	35.09	<l.c.
URI-DIC-14	58819	24785	10542	19.41	63.05	17.45	0.38	35.70	<l.c.
ZEM-MAR-15	58254	22731	9427	18.03	58.16	16.73	0.30	33.16	<l.c.
CENTRO-MAR-15	66325	25297	11977	15.43	59.29	16.68	0.30	37.11	<l.c.
SAN-MAR-15	61535	24321	10619	17.77	63.53	16.58	0.20	34.35	<l.c.
URI-MAR-15	61051	24578	10381	20.86	64.19	17.20	0.25	36.07	<l.c.
PROMEDIO	62470	24972	10681	19	67	18	0.23	35	0
Valor de fondo (Cc)	91000	35000	15000	28	67	17	0.09	92	4.8
RELACIÓN Cm/Cc	0.69	0.71	0.71	0.68	1.00	1.06	2.52	0.38	0.00

Los valores más bajos de los metales con respecto al valor de fondo de las rocas indicarían que los metales acumulados en los sedimentos proceden de fuentes naturales, como la meteorización de las rocas. En contraste, las concentraciones de elementos en las muestras que son similares o más altas que el valor de fondo estarían evidenciando incrementos de los contenidos de los metales producto de fuentes principalmente antrópicas.

Índice de Geoacumulación en los sedimentos

Los índices Igeo de los metales Al, Fe, Mg, Cu, Zn y Cr en las muestras analizadas se encontraron en la clase 0, indicando un status no contaminado, es decir, un enriquecimiento prácticamente nulo de los metales con respecto a los valores de fondo (Tablas 8 y 9). Esto indicaría que los procesos naturales principalmente controlan los niveles de metales en los sedimentos. En cambio, para los metales Pb y especialmente para el Cd, se presentaron muestras con Igeo entre 0 y 1, indicando que los sedimentos se encuentran no contaminados a moderadamente contaminados por la acumulación de Cd.

Tabla 8. Valores del Índice de Geoacumulación para los diferentes metales en los sedimentos. Zem: Zempoala; AND: Andaracua; SAN: San Pablo; URI: Uriangato.

Muestras	Igeo Al	Igeo Fe	Igeo Mg	Igeo Cu	Igeo Zn	Igeo Pb	Igeo Cd	Igeo Cr
ZEM-MAR-14	-1.08	-1.03	-1.02	-1.14	-0.51	-0.52	0.17	-1.99
AND-MAR-14	-1.17	-1.08	-1.05	-1.00	-0.54	-0.72	0.57	-2.07
ZEM-JUN-14	-1.17	-1.11	-1.26	-1.08	-0.53	-0.49	0.57	-1.97
AND-JUN-14	-1.11	-1.03	-1.04	-1.03	-0.44	-0.56	-0.43	-2.01
CENTRO-JUN-14	-0.96	-0.94	-0.83	-1.38	-0.50	-0.46	0.90	-1.85
SAN-JUN-14	-1.00	-1.10	-1.02	-1.23	-0.60	-0.68	0.15	-1.89
URI-JUN-14	-1.23	-1.03	-1.24	-0.89	-0.37	0.16	0.15	-2.06
ZEM-SEP-14	-1.31	-1.16	-1.34	-1.16	-0.56	-0.60	-0.43	-2.18
CENTRO-SEP-14	-0.94	-0.97	-0.83	-1.38	-0.53	-0.44	-1.43	-1.81
SAN-SEP-14	-1.20	-1.12	-1.11	-1.32	-0.56	-0.59	1.37	-2.04
URI-SEP-14	-1.33	-1.11	-1.22	-0.98	-0.51	-0.66	0.88	-2.11
ZEM-DIC-14	-1.14	-1.14	-1.25	-1.06	-0.47	-0.41	0.89	-1.93
AND-DIC-14	-1.14	-1.03	-0.99	-1.01	-0.63	-0.49	1.57	-1.91
CENTRO-DIC-14	-0.90	-1.03	-0.88	-1.18	-0.70	-0.48	0.56	-1.70
SAN-DIC-14	-1.18	-1.06	-1.07	-1.19	-0.68	-0.49	1.15	-1.98
URI-DIC-14	-1.21	-1.08	-1.09	-1.11	-0.67	-0.55	1.49	-1.95
ZEM-MAR-15	-1.23	-1.21	-1.26	-1.22	-0.79	-0.61	1.16	-2.06
CENTRO-MAR-15	-1.04	-1.05	-0.91	-1.44	-0.76	-0.61	1.15	-1.89
SAN-MAR-15	-1.15	-1.11	-1.08	-1.24	-0.66	-0.62	0.57	-2.01
URI-MAR-15	-1.16	-1.09	-1.12	-1.01	-0.65	-0.57	0.88	-1.94

En rojo: valores positivos de Igeo.

Tabla 9. Clase de Índice de geoacumulación y grado de contaminación para los diferentes metales en los sedimentos de la Laguna de Yuriria.

ELEMENTO	PROMEDIO IGEO	CLASE
Al	-1.13	No contaminado
Fe	-1.07	No contaminado
Mg	-1.08	No contaminado
Cu	-1.15	No contaminado
Zn	-0.58	No contaminado
Pb	-0.52	No contaminado
Cd	0.59	No contaminado a moderadamente contaminado
Cr	-1.97	No contaminado
As	< l.c.	No contaminado

6. CONCLUSIONES

El estudio de los parámetros físicos, químicos y la concentración total de metales pesados en los sedimentos de la Laguna de Yuriria revelaron variaciones entre las muestras analizadas, resultando principalmente más notables los cambios espaciales con respecto a los temporales. De los parámetros físicos, los puntos de muestreo no mostraron variaciones de la granulometría, registrando diferencias mínimas entre los sedimentos estudiados. En cambio, el contenido de humedad resultó mayor en los meses de verano en la mayor parte de los sitios muestreados.

Los parámetros químicos mostraron diferencias entre los sedimentos, tanto espaciales como temporales. Con los resultados de esta investigación se confirmaría que Yuriria va incrementando con los años los procesos de eutrofización a través de la entrada de nutrientes por descargas en las orillas del cuerpo lacustre. Esto es evidenciado porque las zonas de los bordes de la laguna presentaron contenidos elevados de CO, MO y N total. En el punto denominado Uriangato recibiría el mayor aporte de materia orgánica a través de las descargas de aguas residuales. Por su parte, el punto denominado Zempoala presentó los contenidos más altos de N total en verano, probablemente debido al gran impacto de la actividad agrícola en esa área.

La concentración de los metales en los sedimentos resultó por debajo del valor de fondo de la corteza continental para Al, Fe, Mg, Cu y Cr. Para el caso del Zn, Pb y Cd, los contenidos de estos elementos presentaron valores iguales o estuvieron por arriba del valor de fondo, principalmente para el Cd. Estos resultados fueron confirmados por el Igeo, el cual resultó con una clase 1 para el Cd indicando que los sedimentos se encontrarían no contaminados a levemente contaminados por este metal. Los niveles de concentración de Al, Fe, Mg, Cu y Cr en los sedimentos de la laguna se explicarían por una herencia litológica de las rocas basálticas aledañas al sistema lacustre. En cambio, para los metales Pb, Zn y Cd la contribución antrópica comenzaría a tener una participación influyente en la acumulación de metales en los sedimentos de la laguna.

7. LITERATURA CITADA

Cano, R.I., Gómez, F.J. FV., Ramírez, V.M., Dueñas, O.F., Rodríguez, E.R. y Aguilera, A. F.A. (2000). Determinación de Contaminantes en la Presa la Purísima y su Efecto en el Sistema de Pozos Puentecillas de Guanajuato. En: Asignación, Productividad y Manejo de Recursos Hídricos en Cuencas, (Christopher A. Scott, Phillippus Wester y Boris Marañon-Pimentel eds.). Pp 123-133. International Water Management Institute, Serie Latinoamericana de México #20, México y Colombo, Sri Lanka.

Cohen, A.S. (2003) Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems. Oxford University Press, New York, 500 pp.

Connell, D.W. y Miller, G.J. (1984). Chemistry and Ecotoxicology of Pollution. John Wiley & Sons, New York, 444 pp.

Consejo de Recursos Minerales (1992). Monografía Geológico-Minera del Estado de Guanajuato: México, Secretaría de Energía, Minas e Industria. 136 pp.

Drever, J.I. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters. Surface and Groundwater Environment*. Prentice Hall, New Jersey.

Elder, J.F. (1988). *Metal biochemistry in surface-water systems: a review of principles and concepts*. U.S. Geological Survey, Circular 1013, 43 pp.

Eugster, H. P. y K. Kelts (1983). *Lacustrine chemical sediments*. En: Goudie A.S. y K. Pye, eds., *Chemical sediments and geomorphology: Precipitates and residua in the near-surface environment*. London, Academic Press, p. 321-368.

Espinal Carreón, T., Sedeño Díaz, J. y López López, E. (2013). *Evaluación de la calidad del agua en la Laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 147-163.

Filgueiras A. V., Lavilla I. y Bendicho C. (2002). *Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples*. *Journal of Environmental Monitoring*, 4, 823-857.

Förstner, U. y Wittmann, G.T. (1981). *Metal pollution in the aquatic environment*. Berlin, Springer, 486 pp.

García-Rodríguez, Mazzeo, N., Sprechmann, P., Metzeltin, D., Sosa, F., Treutler, H.C., Renom, M., Scharf, B. y Gaucher, C. (2002). *Paleolimnological assessment of human impacts in Lake Blanca, SE Uruguay*. *Journal of Paleolimnology*, 28, 457-468.

Gough, L.P., Shacklette, H.T. y Case, A.A. (1979). *Element concentrations toxic to plants, animals, and man*. U.S. Geological Survey Bulletin, 1466. 80 p.

Heiri, O., Lotter, A. F. y Lemcke, G. (2001). *Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results*. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101-110.

Instituto Politécnico Nacional (2010). *Estudio de los indicadores de salud de la laguna de Yuriria: calidad del agua, eutrofización, toxicidad de sedimentos y respuesta de las señales biológicas (biomarcadores y bioindicadores)*. Informe Técnico Final. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. 240 pp.

Jiménez-Cisneros B.E. (2007). *Sustentabilidad, un debate a fondo: Información y calidad del agua en México*. *Trayectorias*. 9, 45-56.

Johnson, R. A., y Wichern, D. W. (2002). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 5th Edition. Prentice Hall. pp: 319-326.

Keon, N.E., Swartz, C.H., Brabander, D.J., Harvey, C. y Hemond, H.F. (2001). Validation of an Arsenic Sequential Extraction Method for Evaluating Mobility in Sediments. *Environmental Science and Technology*, 35(13), 2778-2784.

Kishea, M.A., y Machiwab, J.F. Distribution of heavy metals in sediments of Mwanza Gulf of Lake Victoria, Tanzania. *Environment International*, 28, 619– 625.

Loska, K., Wiechla, D. y Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30, 159-165.

Metcalf, S.E. y O'Hara, S.L. (1992). Sensibilidad de lagos mexicanos a alteraciones en el medio ambiente: ejemplos del Eje Neovolcánico. *Ingeniería Hidráulica en México*, 7, 107-121.

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley, México. 100 p.

Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.

Nriagu, J.O., y Nieboer, E., eds., 1988, *Chromium in the natural and human environments*: Nueva York, Wiley. 571 p.

Panda, D., Subramanian, V. y Panigrahy, R.C. (1995). Geochemical fractionation of heavy metals in Chilka Lake (east coast of India)-a tropical coastal lagoon. *Environmental Geology*, 26, 199-210.

Peng, J-f., Song, Y-h., Yuan, P., Cui, X-y. y Qiu, G-l. (2009). The remediation of heavy metals contaminated sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 633-640.

Porta, J., López-Acevedo, M. y Poch, R.M. (2010). *Introducción a la Edafología, Uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa. 2da Edición. 535 p.

Ramos Ventura, L.J. y Novelo Retana, A. (1993). Vegetación y flora acuáticas de la Laguna de Yuriria, Guanajuato, México. *Acta Botánica Mexicana* 25, 61-79.

Rudnick, R. L., y Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. In: *Treatise on Geochemistry*, Vol. 3. (Holland, H. D., Turekian, K. K., eds.), Oxford: Elsevier, 1–64.

Salameh E. y Harahsheh S. (2011). Eutrophication Processes in Arid Climates. En *Eutrophication: Causes, Consequences and Control*. (A.A. Ansari, S. Singh Gill, G.R. Lanza y W. Rast, Eds.). Springer, New York, 69-90.

Sandoval-Minero R. (2004). Ficha informativa de los humedales de Ramsar (FIR). (En línea)

http://ramsar.conanp.gob.mx/docs/sitios/FIR_RAMSA/R/Guanajuato/Laguna_de_Yuriria/Laguna%20de%20Yuriria.pdf Consultado: 10/12/2015

Silva Mora, L. (1988). Algunos aspectos de los basaltos y andesitas Cuaternarios de Michoacan Oriental. Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Revista. vol. 7, núm. 1, 1988, p. 89-96

Soon, Y.K. y Bates, T.E. (1982). Chemical pools of Cd, Ni, and Zn polluted soils and some preliminary indications of their availability to plants. *Journal of Soil Science*, 33, 477–488.

Tessier A., Campbell P.G. y Bisson M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51, 844-850.

Torres De la O, M. (2005). Salud de veinte embalses de la cuenca Lerma-Chapala. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana. 67 pp.

Tylmann, W. (2005). Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake Pusty Staw, northern Poland). *Journal of Paleolimnology*, 33, 313–325.

Walkley, A. y Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.

Wu, J., Ma, L., Yu, H., Zeng, H., Liu, W. y Abuduwaili, J. (2013). Sediment geochemical records of environmental change in Lake Wuliangsu, Yellow River Basin, north China. *Journal of Paleolimnology*, 50, 245-255.

Yao, S y Xue, B. (2014). Heavy metal records in the sediments of Nanyihu Lake, China: influencing factors and source identification. *Journal of Paleolimnology*, 51, 15-27.

Yu, Y., Song, J., Duan, L., Li, X., Yuan, H. y Li, N. (2014). Sedimentary trace-element records of natural and humaninduced environmental changes in the East China Sea. *Journal of Paleolimnology*, 52, 277-292.

CAPÍTULO IV

Análisis climatológico en la laguna de Yuriria (Guanajuato)

Gabriela A. Zanor, Ma. Teresa Vieyra Hernández, Mayela Bautista Justo, Carlos Alberto
Leal Morales

Universidad de Guanajuato



Laguna de Yuriria (Guanajuato)

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El clima en México y Guanajuato

El clima se define como el valor medio de las variables meteorológicas (temperatura, lluvia, evaporación, presión, radiación solar, humedad, etc.), durante un período de 30 años (Casas y Alarcón, 1999). Para describir el clima se requiere, además de los valores medios, las fluctuaciones estacionales y los valores máximos y mínimos de las variables de un lugar. Según la clasificación climática de Köppen (1936), en México están representados cuatro de los cinco grupos de climas: A (Tropicales lluviosos), B (secos), C (templados lluviosos) y E (fríos). Con base en las modificaciones efectuadas al sistema climático de Köppen por García (1988), el clima en el estado de Guanajuato corresponde a los tipos seco y semiseco en el norte del estado, cálido subhúmedo en la parte sur y con distribución menor e irregular, el tipo climático templado subhúmedo.

1.2. El clima en la Laguna de Yuriria

En particular, el área de estudio se localiza al sur del estado de Guanajuato, entre los paralelos 20° 13' 00''- 20° 17' 20'' LN y los meridianos 101° 12' 30''-101° 03' 35'' LW (Figura 1), correspondiéndole un tipo climático cálido subhúmedo (García, 1988). La región se caracteriza por veranos muy cálidos y precipitaciones irregulares concentradas en una sola estación. Las máximas precipitaciones y temperaturas se producen durante el verano boreal (junio a septiembre) mientras que la estación seca ocurre durante el invierno (diciembre a marzo). Según datos generales por la Comisión Estatal del Agua (CEAG), la precipitación media anual en la Laguna de Yuriria es de aproximadamente 700 mm, la temperatura media es de 20 °C y la evaporación media anual alcanza aproximadamente los 2000 mm.

1.3. Importancia de estos estudios

Los estudios del clima en el mundo y en México son muy numerosos y variados, incluyendo temáticas diversas, entre ellas, la caracterización y tendencias del clima (Pasquini et al., 2006; López Moreno et al., 2015), el clima urbano (Capelli et al., 2005; Colunga et al. 2015), los fenómenos climáticos extremos (Gutzler et al., 2013), los eventos de variabilidad climática a escalas espaciales y temporales diferentes (Depetris et al., 1996; Timmermann et al., 1999), los mecanismos forzantes (Garreaud et al., 2007), los colapsos de grandes civilizaciones por causas climáticas (Haug et al., 2003), entre otros. En particular, en México existen estudios que abordan múltiples aspectos del clima aunque en años recientes hubo un aumento en las investigaciones asociadas a los temas del cambio climático. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC: <http://iecc.inecc.gob.mx/>) contempla diversos programas de acción para combatir el cambio climático en el país. Para el estado de Guanajuato existen varios informes y programas del Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (por ejemplo, COCLIMA: Comisión Intersecretarial de Cambio Climático del Estado de Guanajuato, <http://coclima.guanajuato.gob.mx/>).

En particular, este estudio presenta una caracterización climatológica del área en la que se localiza la Laguna de Yuriria (Guanajuato), analizando el comportamiento de variables meteorológicas (temperatura, lluvia, evaporación, dirección y velocidad del

viento), a lo largo de un año de registro (Estación del proyecto) hasta una serie de tiempo de 40 años (Estación Santa María Yuriria).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar la variabilidad climática anual e histórica de la Laguna de Yuriria estudiando series de tiempo de temperatura, lluvia, evaporación, velocidad y dirección del viento obtenidas a partir de registros instrumentales de estaciones meteorológicas.

2.2. Objetivos particulares

1. Analizar la serie de tiempo de lluvias, temperaturas y evaporación de la estación Santa María Yuriria (periodo 1940-2013).
2. Comparar las precipitaciones totales anuales de la estación Santa María Yuriria con respecto a la normal del país (1971-2000) y del estado de Guanajuato.
3. Comparar los valores mensuales de las variables de la estación del proyecto con respecto a las normales del municipio de Yuriria (Estación Cerano).
4. Confeccionar el climograma anual para la estación del proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).
5. Elaborar la rosa de los vientos anual para la estación del proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).
6. Elaborar un histograma con los rangos de velocidades del viento para la estación del proyecto.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Análisis histórico de temperatura, lluvia y evaporación

Se analizaron las series de tiempo de temperatura, lluvia y evaporación de la estación Santa María de Yuriria (Periodo 1940-2013) y de la estación del proyecto (Abril 2014-Marzo 2015; Tabla 1). Para el caso de la estación Santa María Yuriria el registro instrumental correspondió a una estación convencional y los datos fueron proporcionados por la Comisión Estatal del Agua (CONAGUA). Por su parte, la estación del proyecto fue adquirida con el presente proyecto y correspondió a una estación automática.

Con los datos de las variables se calculó el balance hídrico asumiendo que:

$$BH = P - E$$

Donde, BH: Balance Hídrico, P: Precipitación y E: Evaporación.

Luego de la obtención de los valores históricos de las variables para ambas estaciones (Santa María Yuriria y Estación del proyecto), se compararon estos datos con la normal de precipitación del país (1971-2000; CONAGUA, 2014) y con las normales de precipitación

del estado de Guanajuato (Comisión Estatal del Agua Guanajuato, 2001) y del municipio de Yuriria (Servicio meteorológico Nacional, normales climatológicas: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75). Todos los datos fueron procesados con el programa Excel.

Tabla 1. Nombre, ubicación y principales características de las estaciones meteorológicas analizadas en el presente trabajo.

ESTACIÓN	LOCALIDAD	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN	TIPO	PERIODO DE REGISTRO
		grados, minutos, segundos		m s.n.m.		
Sta. María Yuriria	Yuriria	20 13 17	101 8 10	1761	Convencional	1940-2013
Proyecto	Yuriria	20 13 18	101 8 11	1750	Automática	Abril 2014-Marzo 2015

4.2. Análisis de los vientos

Se analizaron la velocidad del viento (m/s) y la dirección del viento graficando ambas variables en la rosa de los vientos con ayuda del programa WRPlot (<http://www.weblakes.com/products/wrplot/>). Se determinaron los porcentajes de cada dirección del viento y de cada rango de velocidad (desde calmas a > 11.1 m/s).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

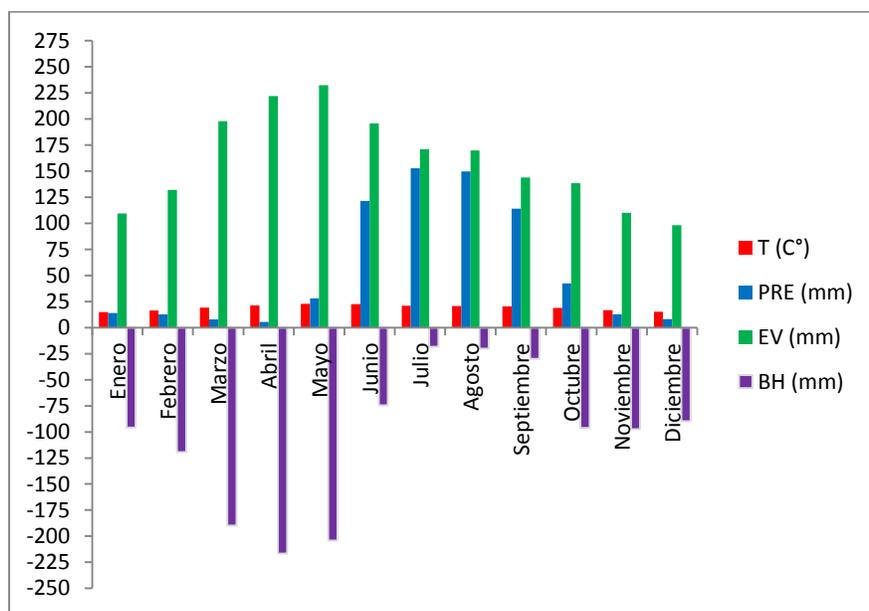
La Tabla 2 y la Figura 1 muestran la variabilidad climática del área de estudio a lo largo de 73 años (1940-2013), utilizando los registros instrumentales de la estación meteorológica Santa María de Yuriria. Los resultados indicaron que para el periodo analizado, la temperatura alcanzó un valor de 19 °C, la precipitación fue de 669 mm y la evaporación de 1921 mm. En la Figura 1 se observa que existe una distribución irregular de las precipitaciones a lo largo del año, ocurriendo las lluvias principalmente entre junio y septiembre (verano boreal) siendo los meses más secos, marzo y abril. Este comportamiento de las lluvias coincide con el patrón observado para la mayor parte del país (CONAGUA, 2014). La temperatura también mostró cambios considerables durante el año registrando el mes de enero la temperatura más baja (15.0 °C) y el mes de mayo, la temperatura más alta (22.9 °C). Coincidiendo con este máximo de temperatura, la evaporación resultó más alta en el mes de mayo (232.3 mm) mientras que la menor evaporación se registró en el mes de diciembre (98.1 mm). El balance hídrico histórico resultó negativo, con un valor de 1251.9 mm indicando que las salidas de agua (evaporación) son más altas que las entradas (precipitación). Hay que tener en cuenta que el cálculo de este balance de agua excluye dentro de las entradas a las escorrentías y descargas superficiales las cuales son muy importantes como aportes a la Laguna de Yuriria ya que mantienen el nivel de agua evitando que se deseeque en su totalidad.

Tabla 2. Medias mensuales y anuales históricas correspondientes a la Estación Santa María Yuriria (Periodo de registro: 1940-2013). Fuente: CONAGUA.

	T (C°)	PRE (mm)	EV (mm)	BH (mm)
Enero	15.0	13.8	109.6	-95.7
Febrero	16.5	12.7	132.0	-119.4
Marzo	19.0	7.9	197.8	-189.9
Abril	21.3	5.4	222.0	-216.6
Mayo	22.9	28.1	232.3	-204.2
Junio	22.5	121.3	195.9	-74.6
Julio	21.0	152.7	171.1	-18.4
Agosto	20.8	149.7	169.8	-20.1
Septiembre	20.3	114.1	144.0	-29.9
Octubre	18.8	42.3	138.3	-96.0
Noviembre	16.8	12.8	110.1	-97.3
Diciembre	15.3	8.3	98.1	-89.8
ANUAL	19.2	669.1	1921.0	-1251.9

T: Temperatura, Pre: Precipitación, EV: Evaporación, BH: Balance Hídrico

Figura 1. Distribución anual de la Temperatura (T), Precipitación (Pre), Evaporación (EV) y Balance Hídrico (BH) en la Estación Santa María Yuriria para el periodo 1940-2013.



Con el objetivo de identificar tendencias positivas o negativas en la temperatura, precipitación y evaporación a lo largo de los años de registro (1940-2013) en la Estación Santa María Yuriria se analizaron los datos por promedios móviles (Figuras 2-4).

Figura 2. Tendencia de la temperatura para el periodo 1940-2013 en la Estación Santa María Yuriria.

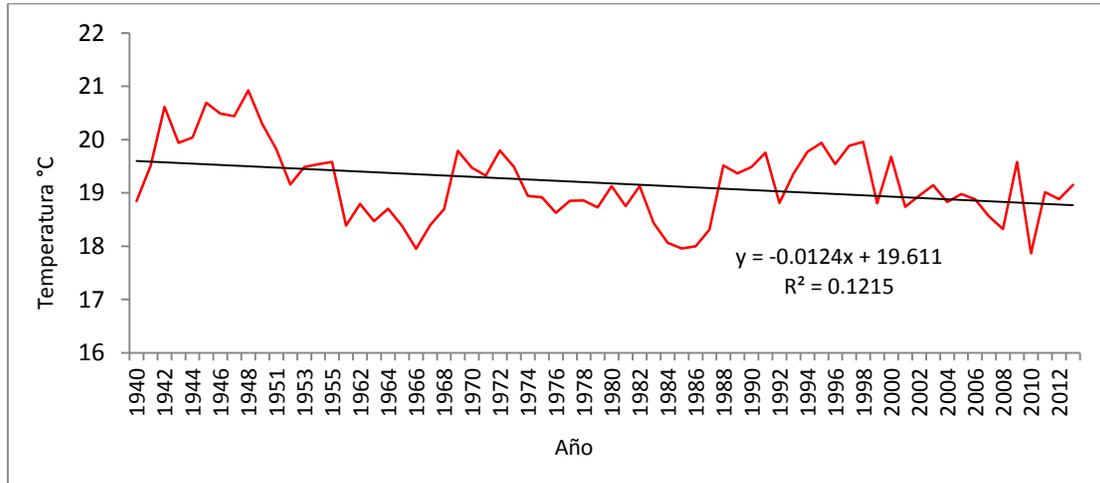
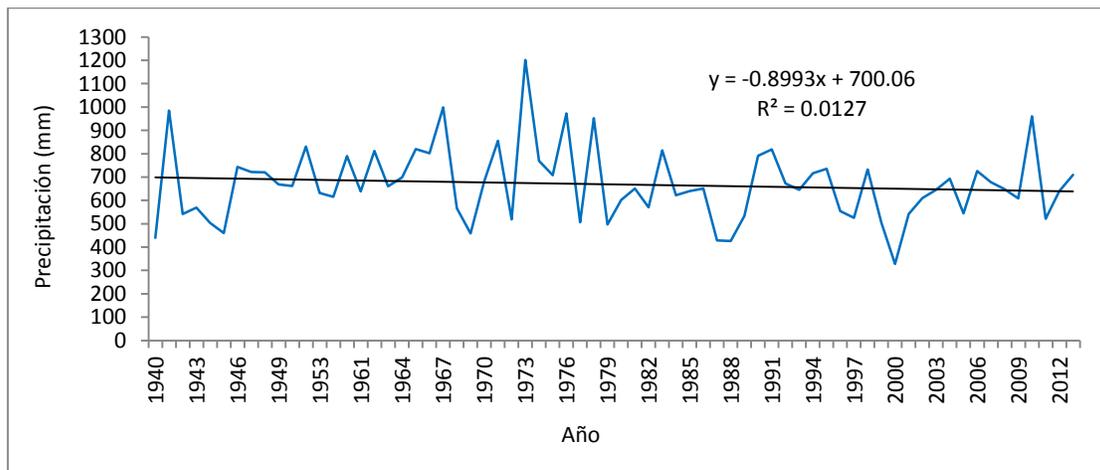


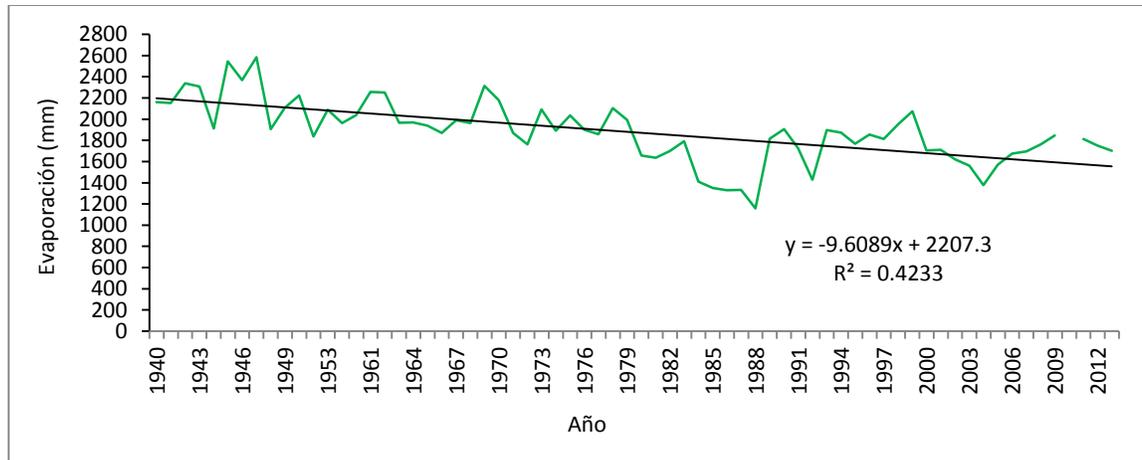
Figura 3. Tendencia de la precipitación para el periodo 1940-2013 en la Estación Santa María Yuriria.



Los resultados indicaron que la evaporación fue la variable meteorológica que mostró un mejor ajuste de la línea respecto a los datos (R^2 : 0.42), indicando que la evaporación ha ido disminuyendo de manera constante a lo largo de un periodo de 73 años. La temperatura y la precipitación no mostraron R cuadrados cercanos a 1, indicando que no existe una tendencia decreciente o creciente durante el tiempo analizado. La dirección de tendencia de la evaporación obtenida para la estación Santa María Yuriria es opuesta a lo reportado en distintas investigaciones para el estado de Guanajuato. Según lo publicado en el Diagnóstico Climatológico y prospectiva sobre vulnerabilidad al Cambio Climático en el estado de Guanajuato (IEE, 2011), en las últimas décadas la temperatura media anual ha incrementado de 0.6 a 0.8 °C en el estado, siendo más notable en la zona del Bajío. Este estudio revela que la evaporación aumentará sus tasas en los próximos años y el régimen de precipitación

cambiará hacia lluvias abundantes, concentradas en cortos periodos de fuerte precipitación seguidos de periodos largos sin lluvia. Probablemente la disminución en la evaporación a lo largo del tiempo en la Laguna de Yuriria pueda deberse al efecto microclima que ejerce la laguna de Yuriria afectando los parámetros atmosféricos locales.

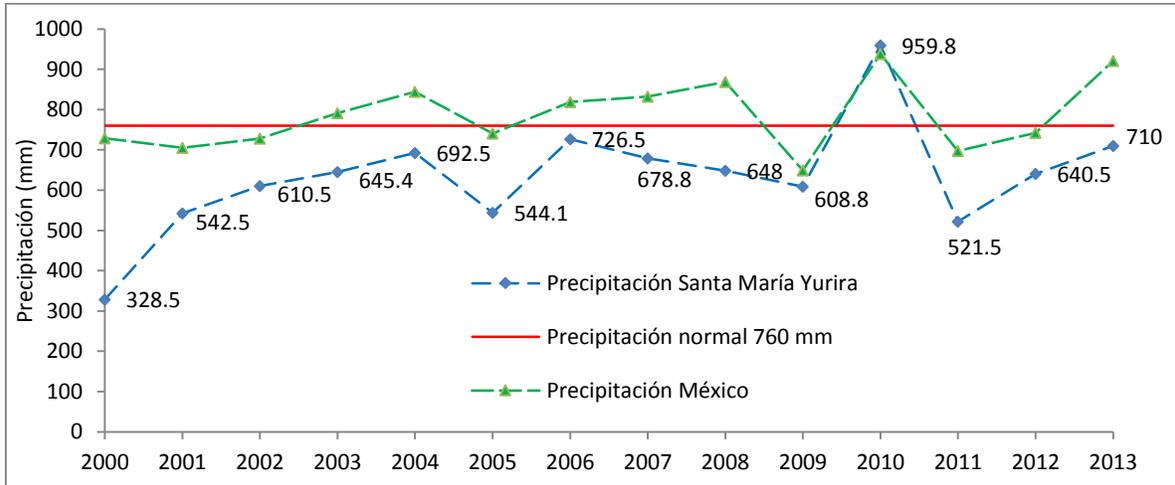
Figura 4. Tendencia de la evaporación para el periodo 1940-2013 en la Estación Santa María Yuriria.



En la Figura 5 se muestra la precipitación acumulada para la estación Santa María de Yuriria con respecto a la normal del país (periodo 1971-2000; CONAGUA, 2014). Las precipitaciones para México resultaron más altas en comparación con los valores de la estación analizada en este trabajo. Sin embargo, la precipitación acumulada desde el año 2000 al 2013 en Santa María Yuriria presentó en general un patrón de distribución similar al acumulado para la República Mexicana (CONAGUA, 2014), es decir, ambas series registraron valores máximos y mínimos para los mismos años (por ej., mínimos: 2005, 2009 y 2011; máximos: 2004, 2010 y 2013). En el informe Programa Estatal de Cambio Climático Guanajuato (IEE, 2011) también se reportan eventos atípicos que han modificado notablemente el comportamiento normal del periodo de lluvias en los últimos años (i.e., años 2009 y 2010). Estas anomalías positivas o negativas en las láminas de precipitación acumuladas podrían explicarse por los eventos El Niño-La Niña, fenómenos climáticos que modifican el esquema de lluvias a nivel global y que poseen una frecuencia de 3-5 años (IEE, 2011).

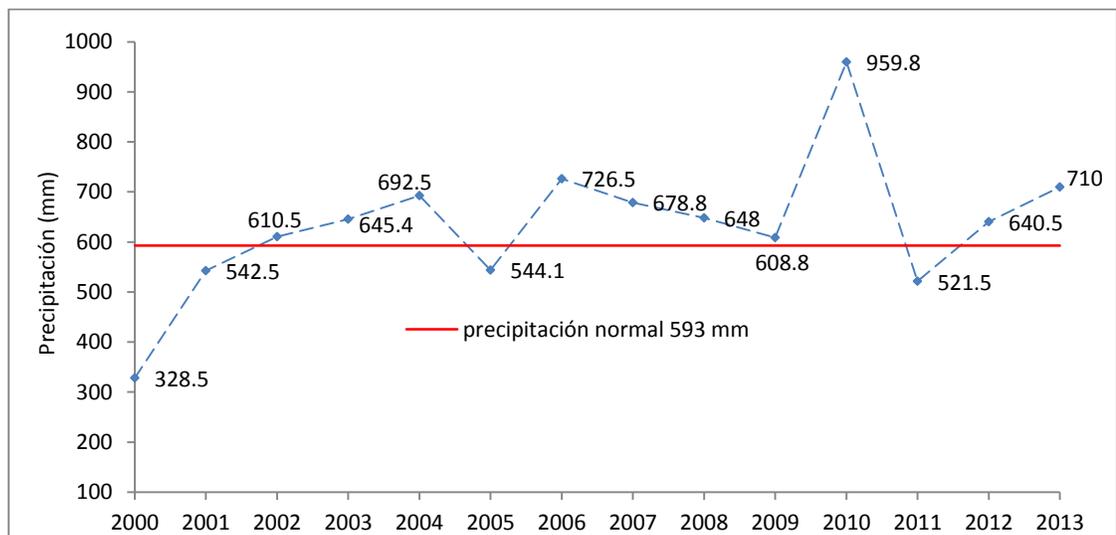
Para el caso de la serie de precipitación de México, el 50 % de los datos supera la normal del país (760 mm) mientras que el otro 50% se encuentra por debajo de este valor de referencia (Figura 2). Por el contrario, en la estación Santa María de Yuriria sólo la precipitación acumulada en el año 2010 (959.8 mm) supera en un 26.3% a la normal del país. Como fuera mencionado anteriormente, este hecho puede deberse a que el año 2010 en particular resultó un año atípico en la cantidad de lluvias registradas. Asimismo, el valor normal para la República Mexicana resulta un valor comparativo muy alto ya que el 84% del territorio estatal presenta un clima seco con una normal para el estado de Guanajuato de 593 mm (periodo 1941-1999; CEAG, 2001).

Figura 5. Comparativa entre la precipitación anual de Santa María Yuriria y la normal del país.



En la Figura 6 se muestra una comparativa de la precipitación anual para la estación Santa María de Yuriria con respecto a la normal de precipitación del estado. Se observó que el 71.4% de los años analizados en la estación estudiada se ubican por arriba de la precipitación normal del estado. Las altas tasas de evaporación alcanzadas en el cuerpo lacustre (ver Figura 4; Evaporación total anual: 1921 mm) contribuirían al aumento de la precipitación en la zona de la laguna.

Figura 6. Comparativa entre la precipitación anual de Santa María Yuriria y la normal del Estado de Guanajuato.

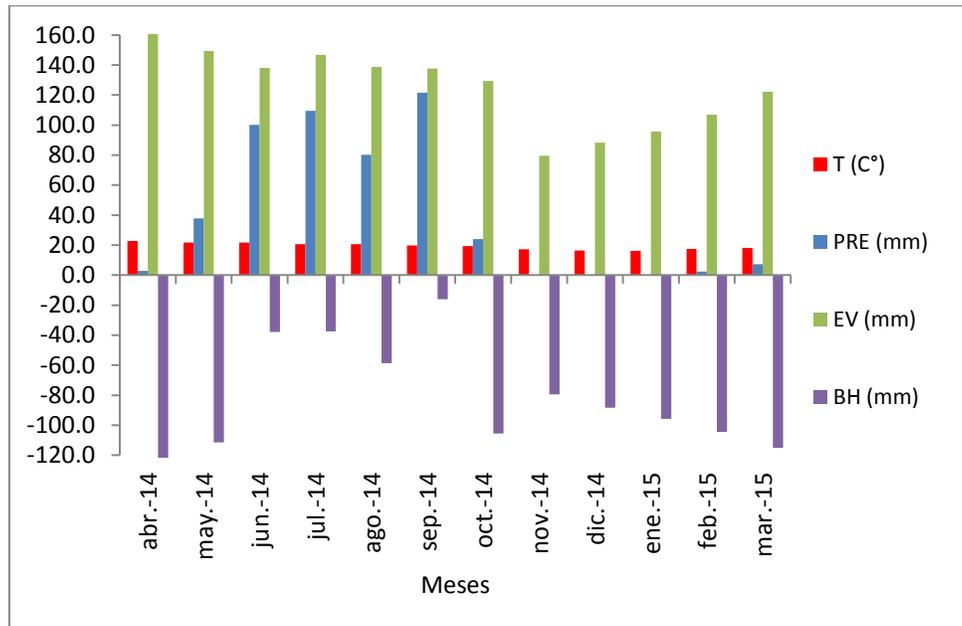


En la Estación Meteorológica del Proyecto, la lluvia media anual alcanzó los 485.7 mm (Abril 2014-Marzo 2015; Tabla 3 y Figura 7). El 84.7% de la lluvia ocurrió en los meses de junio a septiembre, el 13.3% en abril, mayo y octubre, y el 2% en los meses restantes. La evaporación total anual alcanzó los 1389.4 mm y el balance hídrico resultó negativo con un valor de -1040.0 mm.

Tabla 3. Medias mensuales históricas en la Estación del Proyecto durante Abril 2014 a Marzo 2015. Temperatura (T), Precipitación (Pre) y Evaporación (EV), BH: balance hídrico.

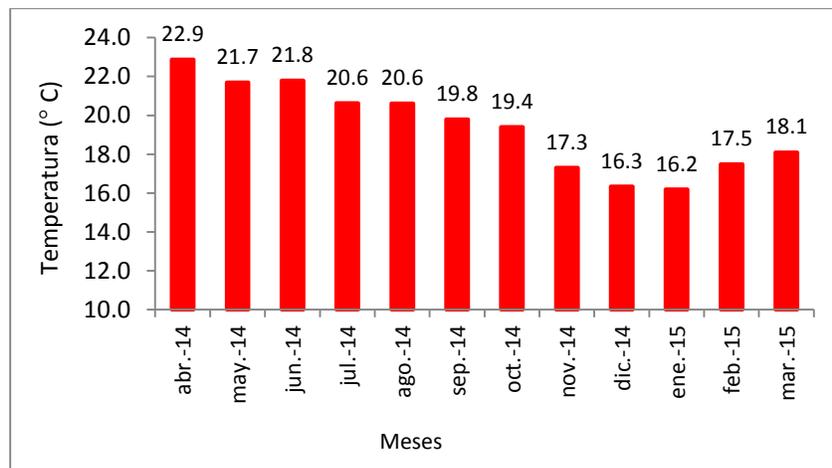
MES	T (C°)	PRE (mm)	EV (mm)	BH (mm)
Abr-14	22.9	2.8	192.8	-190.0
May-14	21.7	37.8	149.3	-111.5
Jun-14	21.8	100.2	138.1	-37.9
Jul-14	20.6	109.4	146.9	-37.5
Ago-14	20.6	80.2	138.8	-58.6
Sep-14	19.8	121.5	137.6	-16.1
Oct-14	19.4	24.0	129.4	-105.4
Nov-14	17.3	0.2	79.7	-79.5
Dic-14	16.3	0.0	88.4	-88.4
Ene-15	16.2	0.0	95.7	-95.7
Feb-15	17.5	2.4	106.9	-104.5
Mar-15	18.1	7.2	122.2	-115.0
ANUAL	19.4	485.7	1525.7	-1040.0

Figura 7. Climograma de la Estación del Proyecto (Abril 2014-Marzo 2015). Temperatura (T), Precipitación (Pre), Evaporación (EV), Balance Hídrico (BH).



El mes más cálido del año resultó abril (22.9 °C) y el mes más frío, enero (16.2°C; Figura 8).

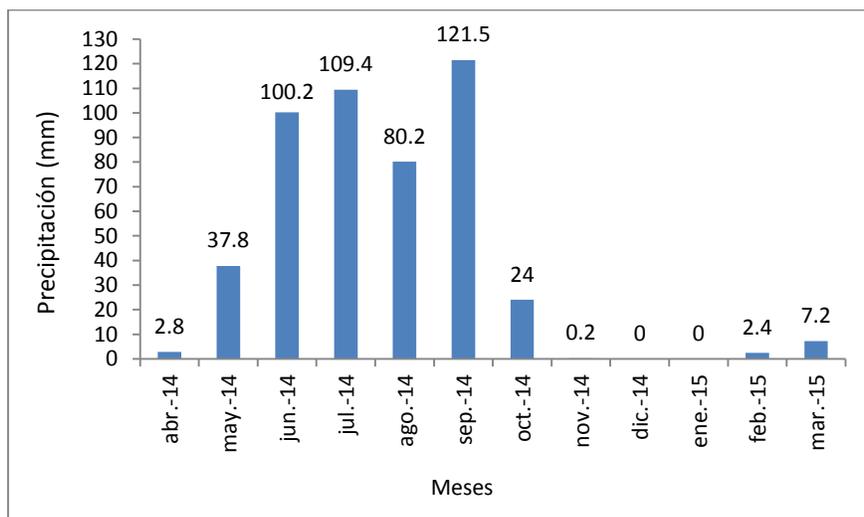
Figura 8. Variación de la temperatura en la Estación del Proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).



Como fuera mencionado anteriormente, se observó en la Figura 9 que la mayor cantidad de agua precipitada ocurrió durante los meses de junio a septiembre. Esto hecho resulta evidente ya que a la mayor parte de la superficie estatal le corresponde un clima con lluvias concentradas en los meses de verano. Como fuera propuesto por Esquivel Longoria (2012), las lluvias de verano son más abundantes que en otras estaciones del año por la gran cantidad

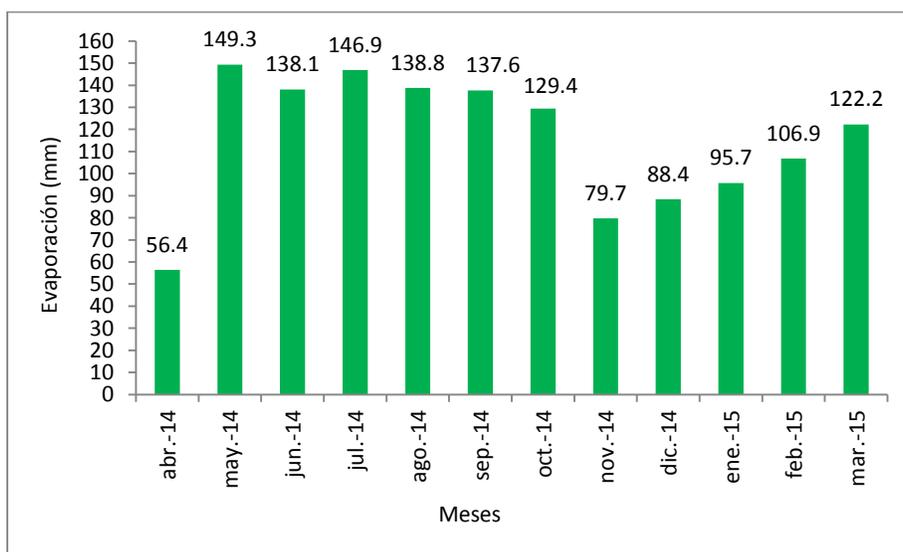
de humedad que penetra hacia la zona central de México a causa de las ondas tropicales y huracanes que se generan y afectan directamente a nuestro país.

Figura 9. Variación de la precipitación en la Estación del Proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).



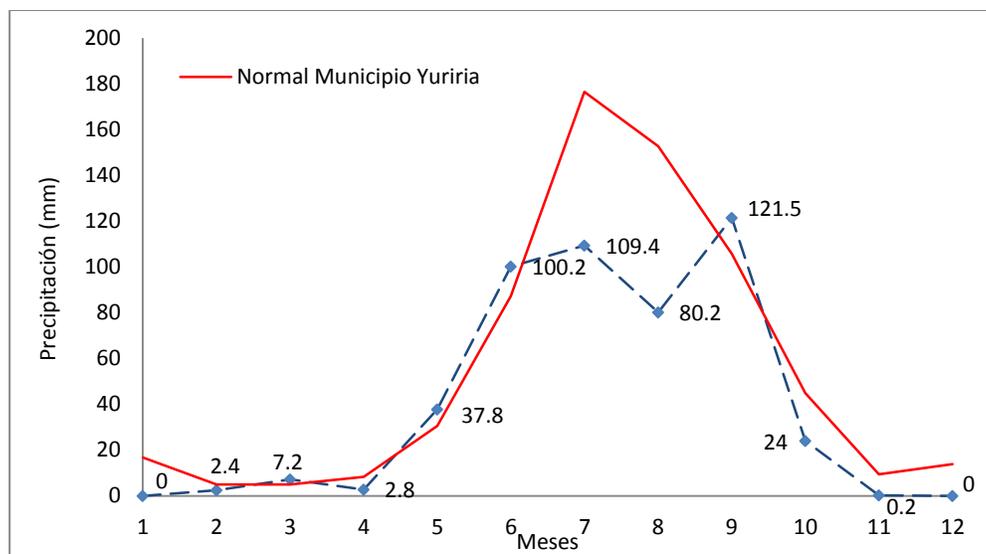
La Figura 10 muestra que las mayores evaporaciones se produjeron durante los meses de mayo a septiembre, coincidiendo con las temperaturas más altas registradas en esos meses (ver Figura 8).

Figura 10. Variación de la evaporación en la Estación del Proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).



Según la comparativa entre la normal de precipitación del municipio de Yuriria y los acumulados en la Estación del Proyecto (Figura 11) se observa que la media para la estación analizada en el presente estudio (487.5 mm) resultó menor que la del municipio (655.8 mm: periodo 1971-2000), con una diferencia de 168.3 mm.

Figura 11. Precipitación anual de la Estación del Proyecto con respecto a la normal del Municipio de Yuriria.



Este hecho probablemente se deba al efecto de las corrientes de aire existentes en la laguna que afectan el régimen de lluvias, transportando la humedad hacia zonas más distales. Además, hay que tener en cuenta que la estación de referencia del municipio se encuentra localizada en el sur del estado, al límite con el estado de Michoacán, lo cual le corresponde por su ubicación geográfica precipitaciones más altas. Cabe mencionar que la dirección dominante del viento en la Laguna de Yuriria para el periodo 2014-2015 resultó del Este (Figura 12), es decir, el viento sopla mayormente hacia el Oeste. Asimismo, en el mes de agosto ocurre una disminución notable en la cantidad de lluvia (en comparación con los meses de julio y septiembre). Esquivel Longoria (2012) reporta el mismo comportamiento de la lluvia para el mes de agosto indicando que este hecho puede deberse al efecto de Canícula, que afecta en gran medida a la zona interna del país. Por su parte, la evaporación en la estación del proyecto (1525.7 mm) resultó menor que la reportada para el municipio de Yuriria (1798.6 mm; http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=181&tmpl=component).

En cuanto a las direcciones del viento correspondiente a la estación del proyecto (Periodo abril 2014-marzo 2015) se observó que la dirección dominante a lo largo del año de registro resultó del Este, con un porcentaje de 19.0 %, seguida por la dirección Oeste con un porcentaje de 5.7% (Tabla 4 y Figuras 12 y 13). Por su parte, la velocidad promedio anual más frecuente fue en el rango de 0.5-2.1 m/s (44.8%) y en segundo lugar, las calmas alcanzando un porcentaje de 44.9% (Figura 14). La velocidad promedio anual del viento fue de 0.83 m/s. La dirección predominante del viento correspondiente al Este es evidenciada

por la acumulación de plantas de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) hacia la zona oeste y suroeste la mayor parte del año. Además se ha documentado corrientes de agua en la laguna que desplazan a las poblaciones de lirio hacia las orillas occidentales.

Tabla 4. Porcentajes de las direcciones dominantes y velocidades del viento (m/s) de la estación del Proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).

Dirección/Velocidad (m/s)	0.5-2.1	2.1-3.6	3.6-5.7	5.7-8.8	8.8-11.1	> 11.1	TOTAL
N	0.1252	0.0376	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1436
NNE	2.4036	0.7011	0.0876	0.0000	0.0000	0.0000	3.1923
NE	4.5193	0.1002	0.0376	0.0000	0.0000	0.0000	4.6571
ENE	3.4927	0.1753	0.1127	0.0000	0.0000	0.0000	3.7807
E	13.795	3.6179	1.5398	0.0876	0.0000	0.0000	19.041
ESE	4.1187	1.1267	0.4006	0.0000	0.0000	0.0000	5.646
SE	1.2143	0.0751	0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	1.3019
SSE	1.8152	0.0876	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.9028
S	0.1377	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1377
SSO	0.6635	0.1127	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7762
SO	1.0391	0.5508	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.5899
OSO	2.0406	0.4882	0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	2.5413
O	5.1327	0.5383	0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	5.6835
ONO	2.4662	0.0501	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.5163
NO	1.7401	0.3130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0531
NNO	0.0876	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0876
	44.8	8.0	2.2	0.1	0.0	0.0	55.1

Figura 12. Rosa de los vientos mostrando la dirección dominante y las clases de velocidades (m/s) de la estación del Proyecto (Periodo Abril 2014-Marzo 2015).

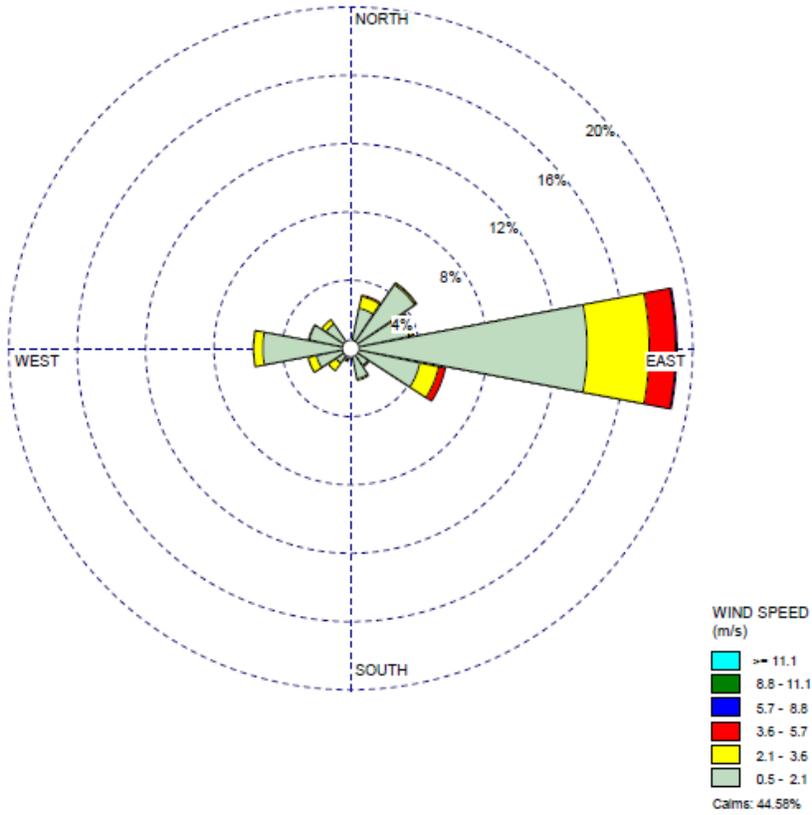


Figura 13. Porcentajes de las direcciones dominantes del viento de la estación del Proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).

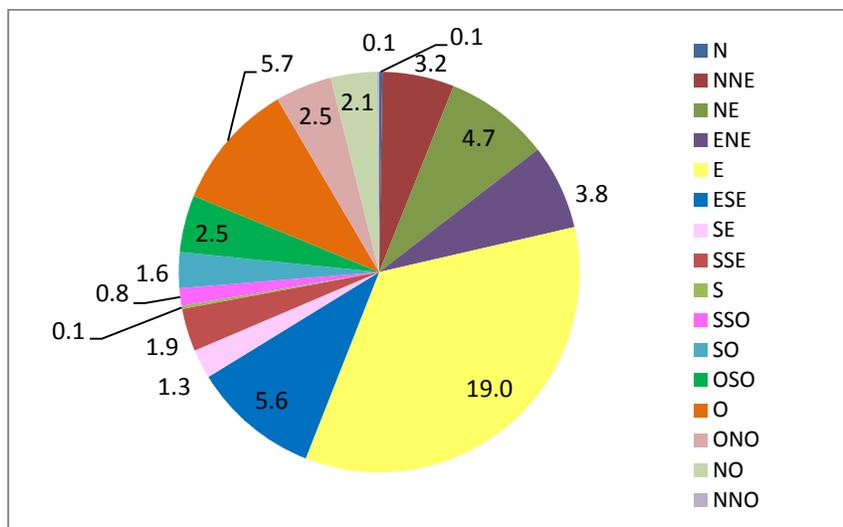
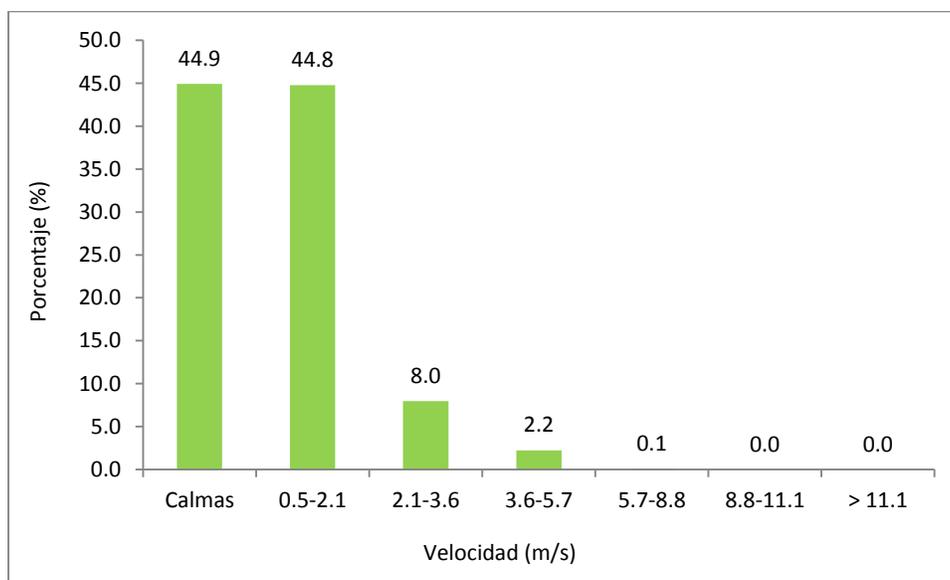


Figura 14. Histograma mostrando las diferentes velocidades del viento (m/s) correspondientes a la estación del Proyecto (Abril 2014-Marzo 2015).



6. CONCLUSIONES

Las variables meteorológicas de temperatura, precipitación y evaporación a partir de la estación Santa María Yuriria mostraron gran variabilidad a lo largo de la serie de tiempo analizada (periodo 1940-2013). Todas las variables se manifestaron dentro de los parámetros especificados para el tipo de clima de la zona donde se encuentra la laguna estudiada.

La precipitación total anual de la estación Santa María Yuriria (periodo 2000-2013) resultó más baja que la normal del país (periodo 1971-2000). Sin embargo, tomando como

referencia la normal del estado, el 67 % de los valores resultaron por arriba de la precipitación de Guanajuato. La evaporación fue la variable que mostró un patrón de tendencia decreciente con el tiempo en comparación con la temperatura y precipitación, indicando que probablemente el aumento de la velocidad del viento a lo largo de los años, la nubosidad o una disminución en la temperatura podrían ser los factores que repercuten principalmente en la disminución de esta variable.

Comparando los datos de precipitación de la estación del proyecto con respecto a la normal del municipio, la lluvia caída para la estación estuvo por debajo del valor de referencia. Este hecho podría explicarse por el efecto que ejerce el viento en la laguna transportando la humedad hacia zonas más distales o que la estación usada en la comparación se encuentra localizada geográficamente en una zona de precipitaciones más altas. La evaporación resultó menor comparada con la normal del municipio de Yuriria. El balance hídrico resultó negativo indicando que las pérdidas por evaporación son más altas que las entradas por precipitación. Se considera que la laguna ejerce un efecto microclima afectando los parámetros meteorológicos locales.

La dirección dominante del viento resultó del Este, con velocidades más frecuentes en el rango de 0.5-2.1 m/s seguido por vientos calmados. El viento predominante junto con las corrientes de agua internas de la laguna acumulan las poblaciones de lirio acuático hacia las orillas occidentales durante la mayor parte del año.

7. LITERATURA CITADA

Capelli de Steffens, A., Piccolo, M. y Campo de Ferreras, A. (2005). Clima urbano de Bahía Blanca. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 199 pp.

Casas Castillo, M.C. y Alarcón Jordán, M. (1999). Meteorología y Clima. Ediciones UPC. 155 pp.

CEAG. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (2001). Situación Hidráulica de Guanajuato: fortalezas y retos. Gobierno del Estado de Guanajuato. 78 p.

Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., McCabe, A.M. (2009). The Last Glacial Maximum: Science, 325, 710-714.

Colunga, M.L., Cambrón-Sandoval, V.H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A. y Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Queretaro city, Mexico. Atmosfera, 28(3), 205-218.

CONAGUA. COMISION NACIONAL DEL AGUA (2014). Estadísticas del Agua en México. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>. Consultado: 16 de octubre de 2015.

Depetris, P.J., Kempe, S., Latif, M. y Mook, W.G. (1996). ENSO-Controlled Flooding in the Paraná River. (1904-1991). *Naturwissenschaften*, 83, 127-129.

Esquivel Longoria, M.I. (2012). Cambio climático en Guanajuato identificado a partir de los registros de la Red Agroclimática de Fundación Guanajuato Produce, A.C. Patronato para el Desarrollo Agropecuario de Guanajuato. 39 pp.

García, E. (1988). Modificaciones al sistema climático de clasificación de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 217 pp.

Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J. (2007). Present-day South American Climate. *PALAEO3 Special Issue (LOTRED South America)*.

Haug, G.H., Günther, D., Peterson, L., Sigman, D., Hughen, K. y Aeschlimann, B. (2003). Climate and the Collapse of Maya Civilization. *Science*, 299, 1731-1735.

Köppen, W. (1936). Das geographische Systema der Klimate in *Handbuch der Klimatologie*. Band I, Teil C., Berlin, 1-44.

IEE. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (2011). Diagnóstico climatológico y prospectiva sobre vulnerabilidad al Cambio Climático en el estado de Guanajuato. 63 p.

IEE. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (2011). Programa Estatal de Cambio Climático. Disponible en: <http://ecologia.guanajuato.gob.mx/sitio/upload/articulos/121/files/S1-1-01.pdf>. Consultado: 1 de noviembre de 2015.

López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Bazo, J., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Sánchez-Lorenzo, A., Navarro-Serrano, F. Aguilar, E. y Chura, O. (2015). Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4459

Pasquini, A.I., Lecomte, K.L., Piovano, E.L. y Depetris, P.J. (2006). Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International*, 158, 127-139.

Timmermann, A., Oberhuber, J., Bacher, A., Esch, M., Latif, M. y Roeckner, E. (1999). Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 398, 694-697.

Anexo 2 Resúmenes financieros

Se presentan en los anexos correspondientes

Anexo 3 Productos generados e información de soporte

Se anexan en las siguientes páginas copias del Acta del Comité de Titulación de la División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, y el registro del anteproyecto de la alumna Angélica Rubí Hernández Lunar, titulado Evaluación de la contaminación por metales pesados en el sedimento de la laguna de Yuriria (Guanajuato) para el periodo 2014 – 2015.

Anexo 4 Entrega a los usuarios

Se incluye el Anexo 20 con la opinión del usuario. Después de las cartas del anexo anterior.

Se anexa la carta invitación, y los acuerdos de la reunión del 29 de enero de 2016. En esta reunión se presentaron los resultados del proyecto, lo que motivó los acuerdos tomados. Se incluye también el archivo con la presentación que se realizó.