

Factores abióticos que rigen la presencia y permanencia del género *Microcystis* en un lago tropical profundo

Hernández-Morales Rubén^{1✉}, Hidalgo-Anguiano Martha², Ortega Murillo María del Rosario¹ y Aguilera Ríos María Silvia³

¹Laboratorio de Biología Acuática "J. Javier Alvarado Díaz", Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Francisco J. Mujica s/n. Edificio BA, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México C.P. 58040.

²Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Francisco J. Mujica s/n. Edificio R, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México C.P. 58040.

³Laboratorio de Análisis Químico "Q. Rosa María Torres Ponce de León", Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Francisco J. Mujica s/n. Edificio B4, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México C.P. 58040.

Resumen

En la presente investigación se determinó la riqueza taxonómica del género *Microcystis* en el lago cráter la Alberca de Tacámbaro, un ecosistema mesotrófico con tendencia a la eutrofia, relacionándola con aquellos factores abióticos que propician la presencia de este taxón en la columna del agua en un ciclo anual, mencionando algunos de sus principales riesgos toxicológicos. Para lo cual se asistió al campo en cuatro estaciones climáticas. Se obtuvieron muestras de agua en diferentes estratos de la columna del agua en cinco sitios. Se registraron 10 parámetros fisicoquímicos y biológicos en campo, así como ocho parámetros en laboratorio. Las muestras biológicas se adquirieron con una botella de Van Dorn y una red cónica de 39 µm, preservadas con formol al 4%. La determinación se efectuó a nivel específico y la cuantificación se realizó con base en el método de Utermöhl. Se identifican cuatro especies pertenecientes al género *Microcystis* siendo en orden de frecuencia las siguientes: *M. aeruginosa*, *M. flos-aquae*, *M. wesenbergii* y *M. smithii*, con elevadas concentraciones en el epilimnio de verano. Se establece que *M. aeruginosa* y *M. flos-aquae* presentan la misma afinidad ecológica, siendo ésta cercana a *M. wesenbergii*, mientras que los requerimientos ecológicos de *M. smithii* son diferentes. Los factores abióticos con mayor peso en la presencia y permanencia de *Microcystis* son: Temperatura del agua, cociente nutrimental de nitrógeno y fósforo (N:P), demanda bioquímica de oxígeno, pH y sólidos suspendidos. Los riesgos toxicológicos que presenta éste género en el lago cráter de Tacámbaro, están relacionados a la producción de microcystinas (hepatotoxinas), así como de anatoxinas-a (alcaloide de amina secundaria), siendo la especie más tóxica *M. aeruginosa*.

Palabras clave: *Microcystis*, Diversidad, Ecología, Lago Cráter.

Abstract

In this study, the taxonomic richness of genus *Microcystis* was determined, in the crater lake "La Alberca of Tacámbaro", a mesotrophic ecosystem with tendency to eutrophic. Looking the abiotic factors that has influence in the presence of this taxon in the water column in an annual cycle, mentioning some of its major toxicological risks. For this objective we attended to the field in four seasons, obtaining water samples from different strata of the water column at five sites. Were determinate 10 physicochemical and biological parameters in the field, and eight parameters in the laboratory. Biological samples were collected with a Van Dorn bottle and a conical net of 39 µm, preserved with formalin (4%). The determination was made at a specific level, while the quantification was performed based on the Utermöhl method. We found four species of the *Microcystis* genus, being in frequency order: *M. aeruginosa*, *M. flos-aquae*, *M. wesenbergii* and *M. smithii*, with high concentrations in the epilimnion on summer. We established that *M. aeruginosa* and *M. flos-aquae*, have the same ecological affinity, and this is similar to *M. wesenbergii*, while the ecological requirements of *M. smithii*, are different. The abiotic factors with greater importance in the presence and permanence of *Microcystis* are: water temperature, nutrient ratio of nitrogen and phosphorus (N:P) biochemical oxygen demand, suspended solids and pH. The toxicological risks of this genus in the Crater Lake from Tacámbaro are related to the production of microcystinas (hepatotoxins), as well as anatoxin-a (secondary amine alkaloid), being the most toxic specie *M. aeruginosa*.

Key words: *Microcystis*, diversity, ecology, crater lake.

Introducción

En sistemas acuáticos epicontinentales se han registrado numerosos casos de toxicidad por organismos planctónicos, principalmente autótrofos, los cuales segregan productos metabólicos con actividad biológica diferente a las microcystinas (Falconer, 2007), las cuales son el tipo de toxina más frecuente en sistemas de agua dulce, generadas por organismos de Cyanobacteria.

✉ **Autor de correspondencia:** Hernández-Morales Rubén, Laboratorio de Biología Acuática "J. Javier Alvarado Díaz", Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Francisco J. Mujica s/n. Edificio BA, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México C.P. 58040. Email: quercusbios@hotmail.com

La presencia de este grupo se ha relacionado con el cambio de nivel trófico en los ecosistemas acuáticos (Wetzel, 2001), registrándose algas verde azules en sistemas oligotróficos que comienzan a presentar condiciones mesotróficas. Una vez que el sistema es considerado como mesotrófico, la diversidad de Cyanobacterias se incrementa albergando un gran número de especies, decreciendo esta riqueza específica al evolucionar a la eutrofia, en donde dicho taxa es abundante pero con dominancia en una a cinco especies con amplio éxito ecológico (Magalef, 2005).

Algunos trabajos exhiben que las algas verde-azules son comúnmente frecuentes en ambientes en donde existe un cociente nutrimental entre nitrógeno y fósforo menor a 5, cuando recurren

temperaturas cálidas por arriba de los 20 °C y un pH básico (>9), el cual refleja aguas considerablemente productivas si el origen no es cárstico (Visser *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006). Por otra parte, se ha estimado que cuando la concentración de fósforo es mayor a 10 mg/L en primavera en lagos estratificados se esperan fuertes florecimientos a mediados del verano (Reynolds, 1991).

En México se ha documentado que Cyanobacteria es el tercer grupo en importancia biológica en aguas continentales con aproximadamente 187 taxones registrados (Oliva-Martínez *et al.*, 2014), los cuales se encuentran en ambientes oligotróficos (Banderas-Taray, 1997), mesotróficos (Alvarado, 2003), y con gran éxito en ambientes eutróficos (Hernández-Morales *et al.*, 2008; Ortega-Murillo *et al.*, 2011).

De este gremio uno de los géneros mejor estudiados en México es *Microcystis*, debido a la importancia sanitaria, derivado de la toxicidad que presenta (Arzate-Cárdenas *et al.*, 2010). Sin embargo, pocos sistemas lacustres presentan una alta diversidad específica en éste taxón, o bien han sido reportados bajo el nombre de especies frecuentes en ambientes eutróficos como *Microcystis aeruginosa* y *Microcystis flos-aquae*.

La presente contribución determina la riqueza taxonómica del género *Microcystis* en el lago cráter La Alberca de Tacámbaro, un ecosistema mesotrófico con tendencia a la eutrofia, con la finalidad de dilucidar cuales son los factores que propician la presencia de este taxón en la columna del agua en un ciclo anual, así como sus principales riesgos toxicológicos en este sistema lacustre.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en el lago cráter La Alberca de Tacámbaro, el cual se localiza al centro este del estado de Michoacán (Fig. 1), en las coordenadas extremas 19° 14' 50" latitud norte y 101° 26' 41" longitud oeste (INEGI, 2000), dentro de un polígono de protección denominado Área Natural Protegida "Cerro Hueco – La Alberca" (Zubieta *et al.*, 2006).

Este cono volcánico está situado dentro del Cinturón Volcánico Mexicano (Garduño *et al.*, 1999), en una zona compuesta por rocas ígneas, que van desde



Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

rocas basálticas extrusivas hasta rocas ácidas, con depósitos fluviales de conglomerados gruesos a medios (INEGI, 1978), área que alberga una asociación de suelos formada por Andosol ocrico y Cambisol districo de textura media (INEGI, 1983).

El lago es un sistema exorreico y su efluente descarga al Río Tacámbaro, el cual se encuentra dentro de la Región Hidrológica número 18, correspondiente a la cuenca del Balsas (INEGI, 2000), con un clima predominante templado semifrío con un verano largo y fresco, subhúmedo con lluvias en verano cuya precipitación invernal es menor el 2.06%, isotermal marcha tipo Ganges (García, 1988).

En este sitio se asistió a campo en el apogeo de las estaciones climáticas durante el 2006, para obtener muestras de agua en superficie, 3, 5, 7, 10, 15, 20 y 26 metros de profundidad en cinco sitios, seleccionados considerando la accesibilidad al sistema, la batimetría, la entrada y salida del agua, así como las probables influencias antropogénicas.

Se registraron algunas variables ambientales *in situ* como la temperatura del aire, profundidad y transparencia, determinando con un multiparamétrico YSI 6600V2 (YSI Environmental, USA, <http://www.ysi.com>), la temperatura del agua, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad, pH, oxígeno disuelto y

clorofila A, mientras que en laboratorio se determinaron las concentraciones de: fósforo total, fósforo reactivo, nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitratos, nitrógeno de nitritos, sulfatos, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos sedimentables, siguiendo los métodos de APHA (1992), lo anterior con la finalidad de delimitar el espectro de distribución y las preferencias fisicoquímicas de los organismos determinados.

Para la obtención de muestras biológicas se efectuaron en cada periodo de muestreo arrastres verticales de los cuatro metros de profundidad hacia la superficie con una red cónica de 39 µm de luz de malla. Mientras que para el análisis cuantitativo se tomaron alícuotas de 250 mL en cada uno de los estratos en los seis sitios, utilizando una botella de Van Dorn horizontal de 2.5 litros de capacidad. Dicho material fue depositado en recipientes de plástico de 250 mL preservado con formol neutralizado con Borax a una concentración final del 4%.

La determinación en el laboratorio se realizó con un microscopio Amscope (Amscope, USA, <http://www.amscope.com>), con los objetivos de 40 y 100 X, y los criterios taxonómicos de Komárek y Anagnostidis (1999). Se utilizaron tinciones diferenciales para caracterizar al mucílago, mientras que la cuantificación se efectuó con un microscopio invertido marca Zeiss (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Alemania, <http://www.zeiss.com.mx>), Se sedimentaron alícuotas con base en el método de Utermöhl (1958), modificado por Schwoerbel (1975). Cabe resaltar que para las actualizaciones taxonómicas, así como la consulta de sinonimias se recurrió al portal de algaebase.org (Guiry y Guiry, 2014).

Se utilizó estadística descriptiva, para generar una matriz multivariada que permitió construir la inferencia ecológica de las especies del género, además de un análisis de similitud por el método de Ward, con el programa JMP versión 6.0, (SAS Institute, USA, 2005), mientras que para conocer la afinidad de las especies con las variables fisicoquímicas se efectuó un análisis de correlación múltiple de Pearson así como de componentes principales (ACP), con el mismo programa, para concluir con un análisis de ordenación con el programa PCord 4.10 (MjM Software, USA, 1999).

Resultados

Se determinaron cuatro especies de *Microcystis*, presentes en el lago cráter la Alberca de Tacámbaro durante un ciclo anual, las cuales concurren en el verano, principalmente en el epilimnio, con ligeras natas en la superficie. Las especies en orden de frecuencia fueron las siguientes *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Microcystis wesenbergii* (Komárek) Komárek in Kondrateva, *Microcystis smithii* Komárek & Anagnostidis y *Microcystis flos-aquae* (Wittrock) Kirchner.

A continuación se presenta una clave para identificar a los ejemplares del género *Microcystis* en el lago cráter de Tacámbaro, Michoacán, redactada a partir de los caracteres distintivos en el periodo de estudio, en donde se hace mención posteriormente de algunos aspectos taxonómicos de los ejemplares, además de comentar algunas características merísticas y diagnósticas para la identificación de los organismos:

Clave para la identificación de los taxones presentes en los lagos cráter de Michoacán

1. Colonias más o menos esféricas, sin perforaciones, con escasa densidad celular, (la distancia entre las células por lo general es mayor que el diámetro celular); presentan aerótopos solitarios, que se producen facultativamente.....(a) *Microcystis smithii*.
- 1'. Colonias más o menos irregulares, por lo menos en las etapas posteriores de desarrollo, con células más o menos densamente empaquetadas; por lo general con numerosos aerótopos, microscópicas y macroscópicas..... 2
2. Colonias microscópicas, compuestas por paquetes de subcolonias (rara vez solitarias), no lobuladas, a veces formando agregados, no clatradas, sin perforaciones, conformadas por densos paquetes celulares..... (b) *Microcystis flos-aquae*
- 2'. Colonias microscópicas y macroscópicas, irregulares, de forma esférica a ligeramente alargada cuando joven, mientras que en estadios maduros son generalmente alargadas, lobuladas y clatradas..... 3
3. Colonias envueltas por un mucilago moderadamente amplio (5 a 8 μm después del agregado celular), formando un margen hialino no distintivo, el cual forma lóbulos de densos paquetes celulares.....(c) *Microcystis aeruginosa*
- 3'. Colonias envueltas por un mucilago distintivo poco amplio (3 a 6 μm después del agregado celular), incoloro, liso, firme, continuo y refractivo, claramente delimitado, por lo general de refracción ligera en el margen y suave en la superficie; colonias intensamente lobuladas y perforadas..... (d) *Microcystis wesenbergii*

(a) *Microcystis smithii* Komárek & Anagnostidis 1995

Sinónimos

Aphanocapsa pulchra (Kützing) Rabenhorst 1865

Descripción

Las colonias están conformadas por baja densidad celular, aproximadamente el espacio que existe entre cada célula es mayor al diámetro de una de ellas, solo en pocas ocasiones se encuentran colonias con mayor densidad, son de forma esférica a subsférica

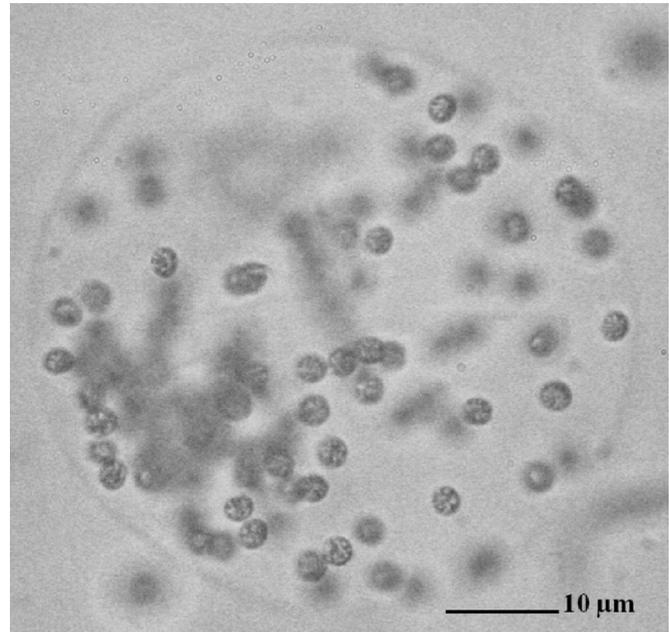


Figura 2. *Microcystis smithii* en el Lago Cráter de Tacámbaro.

en todos sus estadios, por lo general presentan un diámetro de entre 70 a 100 μm . El mucilago es fino e incoloro, por lo general está claramente delimitado y no presenta espacios. Las células presentan uno o varios aerótopos de color pardo, son esféricas de color azul-verde, azul verdoso brillante o verde oliva, pueden encontrarse solas o agruparse en parejas, las cuales llegan a medir 3.2 a 5.6 μm , en Tacámbaro el diámetro fluctúa de 4.2 a 5.6 μm . Este taxón presenta formas esféricas, aunque en ocasiones el mucilago es poco refractivo y pareciera que la colonia es irregular (Komárek y Anagnostidis, 1999; Wood *et al.*, 2005).

Ecología

Se encuentra en ambientes oligotróficos y eutróficos, de baja turbidez y elevada transparencia. Habita en agua dulce.

Distribución

Es una especie cosmopolita, con registros en Europa; Rumania, Alemania y España; en Asia: India, China, Israel, Corea y Singapur; en Oceanía: Australia y Nueva Zelanda; en América: Arkansas, Connecticut, el sur en Brasil y en México en los estados de Veracruz, Yucatán y Puebla (Novelo, 2011; Guiry y Guiry, 2014).

(b) *Microcystis flos-aquae* (Wittrock) Kirchner 1898

Sinónimos

Polycystis flosaquae Wittrock 1879, *Microcystis aeruginosa* f. *flosaquae* (Wittrock) Elenkin 1938, *Microcystis prasina* (Wittrock) Lemmermann 1904

Descripción

Las colonias están formadas por densos agregados celulares, son pulverulentas, rara vez macroscópicas y presentan formas esféricas o irregulares, sin llegar a formar lóbulos. No son clatradas, pero en

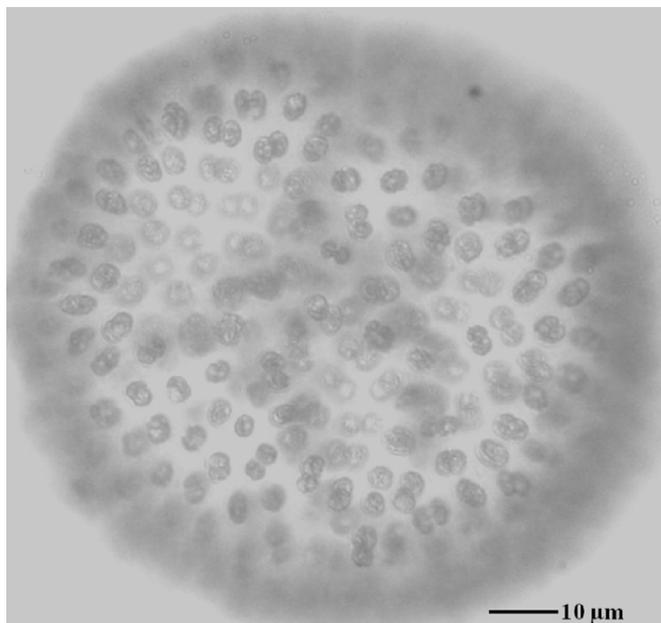


Figura 3. *Microcystis flos-aquae* en el Lago Cráter de Tacámbaro.

raras ocasiones presentan algunas perforaciones. El mucílago es fino y hialino, se encuentra dispuesto cerca de los agregados celulares, rara vez excede 1 μm de distancia. Las células presentan aerótopos, son esféricas con un diámetro que oscila entre (2.5) 3.05 a 4.08 (5.6) μm , en Tacámbaro las células presentan un diámetro de 3.6 a 5.3 μm . Este taxón aunque no presenta colonias macroscópicas puede llegar a formar densos agregados coloniales, dando origen a natas conspicuas en los cuerpos de agua (Oliva-Martínez *et al.*, 2008).

Ecología

Se encuentra presente en ambientes mesotróficos y eutróficos. Habita en agua dulce.

Distribución

Es una especie cosmopolita con registros en Europa: Gran Bretaña, Alemania, Rumania y Turquía; en Asia: Israel, Pakistán, Punjab, China, Corea y Singapur; en Oceanía: Australia y Nueva Zelanda; en América: Arkansas, Connecticut, Brasil y México (Vasconcelos *et al.*, 2010; Guiry y Guiry, 2014).

(c) *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing 1846

Sinónimos

Micraloa aeruginosa Kützing 1833, *Diplocystis aeruginosa* (Kützing) Trevisan 1848, *Clathrocystis aeruginosa* (Kützing) Henfrey 1856, *Clathrocystis aeruginosa* var. *major*, *Microcystis aeruginosa* f. *aeruginosa* Kützing

Descripción

Las colonias son mucilaginosas con densos paquetes celulares, en estadios juveniles son esféricas, lenticulares o débilmente alargadas, mientras que las maduras pueden llegar a ser macroscópicas de forma irregular, compuestas por lóbulos, claramente alargadas; generalmente presentan orificios y llegan a formar subcolonias con un margen irregular. Pueden llegar a medir entre (40) 600-

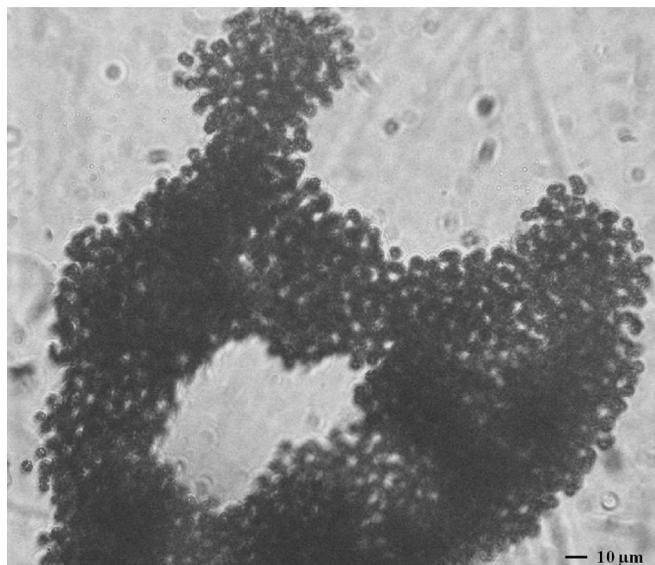


Figura 4. *Microcystis aeruginosa* en el Lago Cráter de Tacámbaro.

900 (1000) μm , alcanzando raramente los 8 mm de largo, en Tacámbaro su tamaño oscila entre los 600 y 1200 μm . El mucílago es incoloro, a veces con un margen distintivo, pero muy amplio, alcanzando entre 5 a 8 μm después del agregado celular. Las células contienen aerótopos, son esféricas, y un poco alargadas antes de la división, presentan un color verde azul pálido y llegan a medir entre (3) 4-6 (9.4) μm , en Tacámbaro el diámetro fluctúa entre 3.9 a 5.6 μm . Existen registros de que la especie presenta polimorfismos estacionales (Otsuka *et al.* 2000; Komárek y Anagnostidis, 1999).

Ecología

Se encuentra en ambientes eutróficos, formando florecimientos en verano. Habita agua dulce y salina.

Distribución

Es una especie cosmopolita, exceptuando a las regiones polar y subpolar.

(d) *Microcystis wesenbergii* (Komárek) Komárek ex Komárek in Joosen 2006

Sinónimos

Diplocystis wesenbergii Komárek 1958

Descripción

Las colonias presentan formas esféricas en estadios juveniles, cuando maduras tienden a alargarse formando lóbulos, a medida que crece forma profundos espacios y puede llegar a medir hasta 6 mm de largo. Se encuentra envuelta por un mucílago distintivo debido a que presenta refracción, es incoloro, firme y continuo el cual presenta de 3 a 6 μm de distancia del agregado celular. Las células presentan aerótopos, son esféricas y un poco alargadas después de la división, presentan un color verde azul y llegan a medir entre 7 (8.5-10) μm , en Tacámbaro el diámetro oscila entre 4.2 a 6 μm . Este taxón presenta variaciones en morfología y tamaño de gran valor taxonómico (Otsuka *et al.*, 2000; Komárek y Anagnostidis, 1999; Wood *et al.*, 2005).

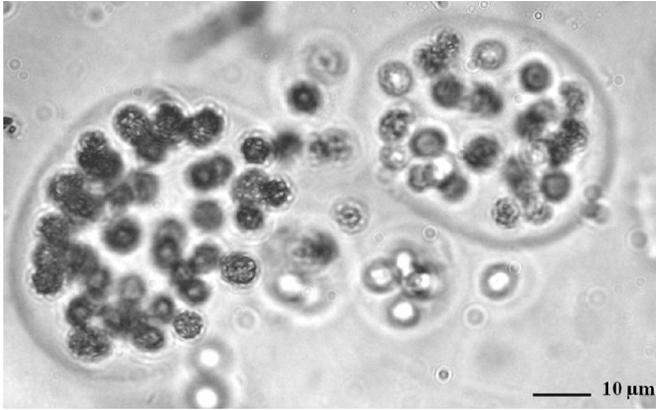


Figura 5. *Microcystis wesenbergii* en el Lago Cráter de Tacámbaro.

Ecología

Se encuentra en el plancton de ambientes eutróficos, raramente es dominante en florecimientos de cianoprocariontes. Habita en agua dulce.

Distribución

Es una especie cosmopolita, con la excepción de ambientes polares y subpolares. Registrada en Europa: Gran Bretaña, Alemania y Rumania; en Asia: China, Corea, Singapur e Israel; en Oceanía: Australia y Nueva Zelanda; en América: Argentina, Brasil, Cuba y México (Vasconcelos *et al.*, 2010; Guiry y Guiry, 2014).

Distribución estacional del género *Microcystis* en el lago cráter La Alberca de Tacámbaro

Este cianoprocarionte mucilaginoso se encuentra en altas densidades celulares en la superficie de la columna del agua durante el verano, cuando la relación N:P es de 7.9 (Fig. 6 y Tabla 1), alcanzando una densidad de 560 organismos por mililitro, siendo el taxón más abundante *M. aeruginosa*, seguido de *M. flos-aquae*, *M. wesenbergii* y *M. smithii*. Este género desde primavera a otoño se encuentra en toda la columna del agua, aunque en el hipolimnion en bajas densidades, alcanzando valores de uno a cinco organismos por mililitro

La contribución de este taxón a la abundancia de Cyanobacteria en la columna del agua es relevante únicamente durante el verano, ya que el aporte de este género a la densidad de dicho grupo en invierno es nulo. En éste periodo la máxima concentración celular tiene lugar en el epilimnion (Fig. 7), siendo los organismos más importantes *Chroococcus minutus* y

Gloeocapsopsis crepidinum. Durante primavera comienzan los primeros registros de *Microcystis* al incrementar la temperatura y la productividad de la columna, la primera especie en ocurrir es *M. smithii*, la cual contribuye con el 0.34% de la densidad total de las algas verde azules, encabezadas por *Limnococcus limneticus* y *Chroococcus minutus*.

En verano la proporción entre la densidad poblacional de Cyanobacteria y *Microcystis* se incrementa, aportando éste el 26.40% de la abundancia de las algas verde azules, encabezadas por *Anabaena catenula*, *Merimospedia glauca*, *Chroococcus limneticus* y *Chroococcus minutus*. Mientras que en otoño esta relación se reduce, contribuyendo con el 2.01% de la concentración de cianoprocariontes, dominados por *Anabaena catenula*, *Chroococcus dispersus*, *Chroococcus limneticus* y *Merimospedia glauca*.

Cabe resaltar que durante el periodo de estudio, fue evidente una asociación entre *M. aeruginosa*, *M. flos-aquae* y *M. wesenbergii*, las cuales están presentes en verano y otoño en toda la columna del agua, presentando afinidades ecológicas como lo muestran las figuras 8 y 9, así como la tabla 2. En relación a las dos primeras, el análisis de agrupamiento basado en distancias euclidianas exhibe que ambas presentan la misma afinidad ecológica (Fig. 8), cercanas a los requerimientos de *M. wesenbergii*, las cuales ocurren en un gradiente térmico de 26.2 a 28.6 °C, concentraciones moderadas de sólidos suspendidos (0.2 a 0.4 mL/L) y material orgánico (4.4 a 6.5 mg/L en DBO₅), en un epilimnion básico con un pH de 8.5 a 9 (Fig. 9 y Tabla 2).

Con respecto a *M. smithii* se establece que es una especie presente en las tres etapas de la estratificación térmica, cuando la temperatura está por encima de los 19 °C en una relación de N:P (Tabla 1) de 7.3 y 7.9 (oscilando entre los 19.5 y 23.5 °C), presente en el metalimnion e hipolimnion (Fig. 9 y Tabla 2), en bajas concentraciones de material orgánico degradable (6.69 a 7.68 mg/L en DBO₅). Este taxón ecológicamente comparte una baja relación con el resto del género encontrado en éste lago cráter ya que un análisis de agrupación muestra que *M. smithii* es ecológicamente disímil a las otras especies (Fig. 8).

Discusión

Pocos ecosistemas acuáticos presentan una alta diversidad específica en especies de *Microcystis*, como el lago cráter La Alberca de Tacámbaro. La mayoría de los registros en cuanto a la flora planctónica exhiben que las especies que comúnmente concurren en el mismo periodo son *Microcystis aeruginosa* y *M.*

Tabla 1. Relación nutrimental en el lago cráter La Alberca de Tacámbaro.

Variable	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
Fósforo Total (µg/L)	3.8	2.3	2.9	1.3	4.8	1.7	2.2	1.4
Nitrógeno Total (µg/L)	41	93.3	21.2	77.4	37.8	67.7	25.8	58.9
N:P	10.7		7.3		7.9		11.9	

N:P Cociente de Redfield

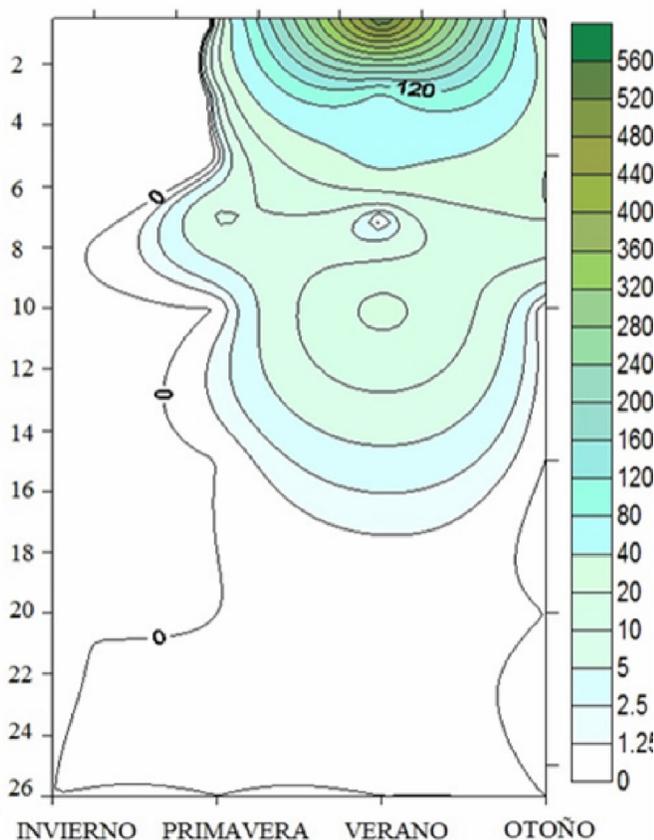


Figura 6. Abundancia estacional de *Microcystis* en la columna del agua.

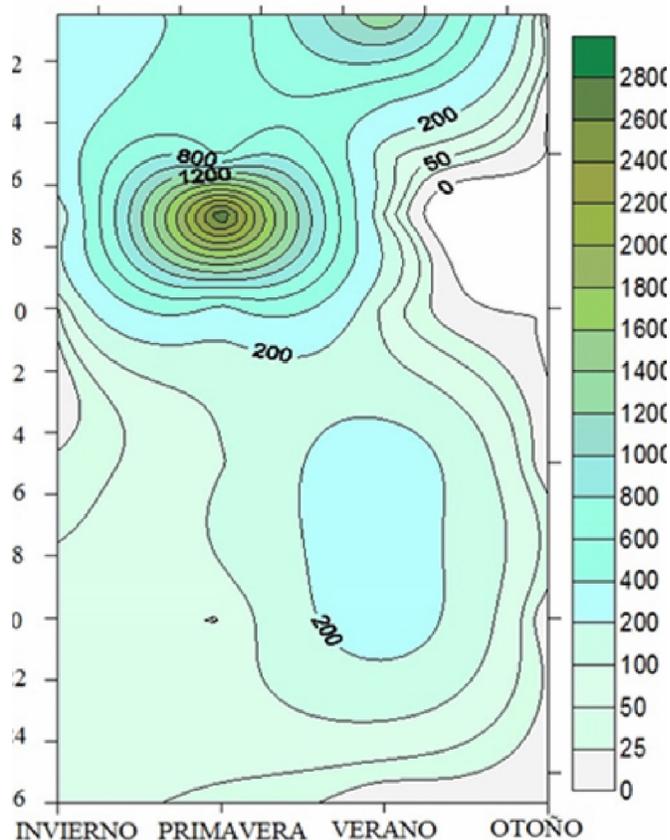


Figura 7. Abundancia estacional de Cyanobacteria en la columna del agua.

wesenbergii (Banderas-Tarabay, 1997; Hernández-Morales *et al.*, 2008), formando *M. aeruginosa* florecimientos en primavera y verano, acompañada de *M. wesenbergii*, ya que éste último no crece masivamente en la columna del agua (Komárek y Anagnostidis, 1999).

Esta relación taxonómica quizá se deba a que otras especies de *Microcystis* han sido registradas como *M. aeruginosa*, ya que esta especie presenta una alta plasticidad morfológica, generando polimorfismos estacionales (Otsuka *et al.*, 2000; Komárek y Anagnostidis, 1999), como es el caso de *M. flos-aquae*, la cual presenta la misma afinidad ecológica a *M. aeruginosa*, en el lago de Tacámbaro.

En México se ha registrado a *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *M. flos-aquae*, *M. botrys*, *M. protocystis*, *M. panniformis* y *M. smithii*, con una mención baja para el último taxón, ya que en algunas ocasiones se le ha relacionado con otros nombres en ambientes tropicales, designándole en la mayoría de los casos *Aphanocapsa pulchra* (Novelo, 2011). Mientras que la especie con un mayor número de observaciones es *M. aeruginosa*, la cual en México ha sido registrada en ambientes oligotróficos como el lago El Sol (Banderas-Tarabay 1997), en ambientes mesotróficos como el lago de Zirahuén (Berry *et al.*, 2011), y en ecosistemas eutróficos como el lago de Pátzcuaro (Berry *et al.*, 2011), el lago cráter de Tacámbaro (Hernández-Morales *et al.*, 2008), los Tuxtlas (Vázquez *et al.*, 2004 y 2005), en el extinto complejo lacustre del centro de México y Tecuitlapa (Alcocer-Durand y Escobar-Briones, 1992; Alcocer *et al.*, 2001), Zempoala (García

et al., 2010), Zimapán (Bravo-Inclán *et al.*, 2008), Valle de Bravo (Figueroa-Sánchez *et al.*, 2004), y en lagos urbanos de la ciudad de México (Oliva-Martínez *et al.*, 2008; Arzate-Cárdenas *et al.*, 2010), aun cuando las características ecológicas de la especie la relega a ecosistemas eutróficos o en transición a éste nivel trófico (Komárek y Anagnostidis, 1999).

Este cianoprocarionte mucilaginoso se encuentra en altas densidades celulares en la superficie de la columna del agua durante primavera y verano en Tacámbaro, cuando la temperatura del agua se encuentra por encima de los 19 °C y se presenta un cociente de N:P menor a 10:1, al igual que en otros ecosistemas de agua dulce (Visser *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006). La preferencia de este taxón en habitar aguas epilimnéticas, o bien en la superficie de los cuerpos de agua, radica en su capacidad fisiológica para mantenerse en estratos favorables a sus requerimientos fisiológicos (Walsby, 1988), ya que presenta un mucílago proteico de baja densidad, así como vesículas de gas, denominadas aerótopos, los cuales a manera de boyas lo mantienen en esta zonación del ecosistema acuático (Oliva-Martínez *et al.*, 2014).

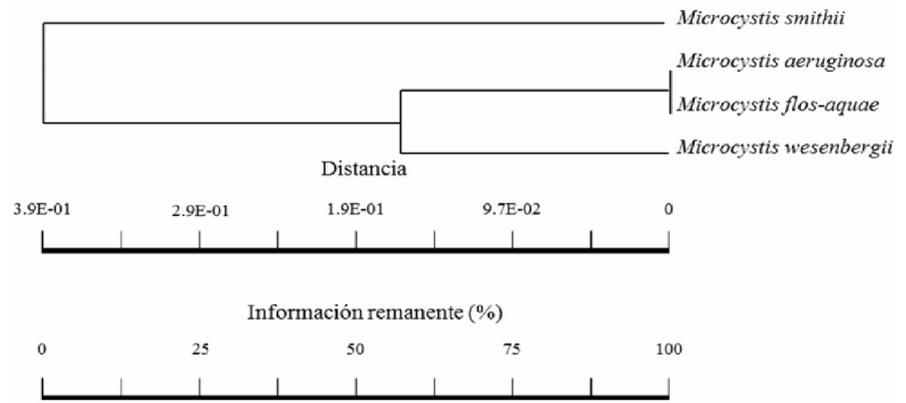
Algunas características ecológicas del género exhiben la preferencia por aguas con un cociente de Redfield menor a diez (Arzate-Cárdenas *et al.*, 2010), aunque esta condición esté presente en el cuerpo de agua, la temperatura es un factor determinante para los procesos metabólicos de *Microcystis*, requiriendo temperaturas por encima a los 20 °C (Alcocer *et al.*, 2001; Vázquez *et al.*, 2005; Arzate-Cárdenas *et al.*, 2010; Valadez

Tabla 2. Intervalos de parámetros fisicoquímicos en el análisis de ordenación (DCA).

Parámetro	Símbolo	Intervalo
Temperatura del agua (°C)	T1	13.7 ≤ 19.4
Oxígeno Disuelto (mg/L)	O1	0 ≤ 2.93
	O3	5.87 ≤ 8.81
	O4	8.81 ≤ 11.75
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	TDS1	10.8 ≤ 55.75
	TDS4	145.65 ≤ 190.6
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	DBO1	3.31 ≤ 5.14
	DBO2	5.14 ≤ 6.98
	DBO3	6.98 ≤ 8.81
	DBO4	8.81 ≤ 10.65
Profundidad (m)	P1	0 ≤ 6.5
	P3	13 ≤ 19.5
Sulfatos (mg/L)	S01	0 ≤ 6
	S03	12 ≤ 18
	S04	18 ≤ 24
Sólidos Suspendidos (mg/L)	SS1	2 ≤ 15.73
	SS2	15.73 ≤ 29.4
	SS4	43.21 ≤ 56.95
Nitritos (mg/L)	Ni1	0.4 ≤ 2.2
	Ni4	5.8 ≤ 7.6
Conductividad eléctrica (µS/cm)	C1	116 ≤ 148.25
	C3	180.5 ≤ 212.75
	C4	212.75 ≤ 190.6

et al. 2013).

Con respecto a la contribución de este taxón a la abundancia de Cyanobacteria en la columna del agua, cabe mencionar que pocos autores exhiben cual es la proporción existente entre *Microcystis* y otros gremios algales. Valadez *et al.*, (2013), menciona que *M. panniformis* contribuye con el 36 % del biovolumen total de la densidad fitoplanctónica en un ecosistema de agua dulce en Yucatán, prevaleciendo una temperatura de 25.5 a 29 °C con una salinidad de 8.1 a 10.4 psu y una relación N:P mayor a 17, factor que permite dilucidar que el género presenta florecimientos en ambientes tropicales con un cociente nutrimental mayor en sistemas de origen cársico, mientras que en Suecia desarrolla floraciones que contribuyen con el 80 % de la densidad algal (Eiler y Bertilsson, 2004), contribuyendo en Uganda con el 20% de la población algal total (Okello *et al.*, 2010).

**Figura 8. Análisis de similitud.**

En sistemas de origen volcánico, se ha determinado que la presencia del género *Microcystis* es recurrente en un ciclo anual, tal y como lo exhibe Berry *et al.*, (2011) en el lago de Pátzcuaro, donde encuentra que este taxón presenta floraciones durante todo el año, con natas en la superficie del agua en condiciones meteorológicas tranquilas, mientras que en los Tuxtlas, Vázquez *et al.*, (2005), menciona que éste género es dominante en el periodo de estratificación en una temperatura que oscila de 22 a 32 °C y un cociente nutrimental de N:P cercano a 0.4.

En lagos tropicales profundos la presencia de *Microcystis* está ligada a los procesos físicos y químicos que tienen lugar durante la estratificación y mezcla de la columna del agua, ya que durante la estratificación, se desarrolla un epilimnio cálido con un cociente nutrimental que sugiere limitación de la productividad acuática (Vázquez *et al.*, 2005; Hernández-Morales *et al.*, 2008; Bravo-Inclán *et al.*, 2008, Figueroa-Sánchez *et al.*, 2014), estos factores dan lugar a la presencia de especies del género en primavera y verano, con un potencial para desarrollar florecimientos en ésta última estación, ya que la temperatura del agua registra su máximo, aunado a que las especies de este taxón tienen protección a la radiación ultravioleta, la cual las vuelve exitosas en capas con elevada radiación solar (Calvacante-Silva *et al.*, 2010).

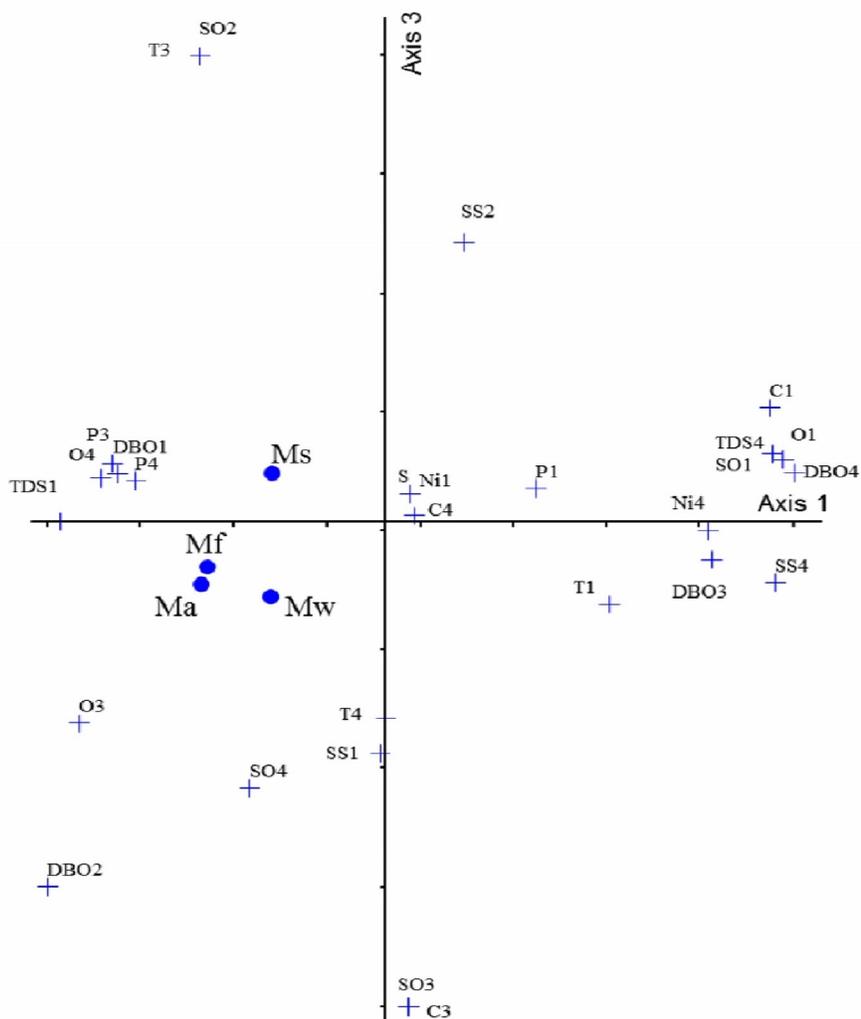
Por el contrario durante el evento de circulación, la temperatura del agua decrece, por efecto de las condiciones climatológicas estacionales (Wetzel, 2001). Éste parámetro es circunstancial para el desarrollo de las especies de *Microcystis* ya

que al presentarse temperaturas menores a 18 °C, se limita el desarrollo adecuado de los procesos metabólicos de este taxón y por lo tanto se restringe su desarrollo (Hernández-Morales *et al.*, 2008).

Aunado a la temperatura, la relación entre los nutrientes disponibles en la columna del agua, durante la circulación, no es la misma a la determinada durante eventos de floración de *Microcystis* ya que aumenta el cociente N:P, debido a que los nutrientes generados en la zona trofótica, así como aquellos liberados por la oxidación del material orgánico se encuentran bio disponibles de superficie a fondo, puesto que son transportados por la turbulencia ejercida por movimientos de convección, así como por el viento (Roldán y Ramírez, 2008). Lo cual aparentemente tiene un efecto negativo con la densidad de las especies del género.

En lo que respecta a *M. smithii*, cabe señalar que este taxón no es prolífico del verano, sino que es representante de eventos de transición entre la estación fría y el inicio de la estación cálida, por ello presenta importantes concentraciones en primavera y no en verano. Komárek y Anagnostidis, (1999), indica que es una especie que se encuentra en diferentes biotipos, habitando el plancton de aguas transparentes, por lo que se encontró en Tacámbaro cuando éste sistema lacustre presentó la máxima transparencia en el periodo de estudio (1.32 ± 0.06 m).

La presencia de las especies de *Microcystis* y su abundancia son variables que permiten conocer los daños que este grupo de cianoprocariontes pueden llegar a causar, ya que debido a su toxicidad pueden propiciar desde un



(Ma) *Microcystis aeruginosa*, (Mf) *M. flos-aquae*, (Mw) *M. wesenbergii*, (Ms) *M. smithii*, (T) Temperatura, (O) Oxígeno Disuelto, (TDS) Sólidos Disueltos Totales, (DBO) Demanda Bioquímica de Oxígeno, (P) Profundidad, (SO) Sulfatos, (SS) Sólidos Suspendidos, (Ni) Nitritos, (1) Intervalo menor, (2) Primer cuartil, (3) Segundo cuartil, (4) Intervalo mayor.

Figura 9. Análisis de ordenación variables vs especies.

decrecimiento poblacional de otras algas; para disminuir la competencia por recursos en la columna del agua, hasta la disminución poblacional de invertebrados y vertebrados (Margalef, 2005). Algunos estudios presentan evidencias de que la presencia de cianobacterias productoras de toxinas como las microcystinas pueden llegar a desplazar a los cladóceros, dentro de la comunidad del zooplankton, favoreciendo el desarrollo de individuos de tallas menores, los cuales deben ser menos sensibles a la toxina segregada por las algas verde azules (Arzate-Cárdenas *et*

al., 2010). La especie *M. aeruginosa* produce un conjunto de péptidos cíclicos conocidos como microcistinas (Orr y Jones, 1998), que son hepatotoxinas, las cuales proliferan y producen grandes florecimientos en embalses y lagos (Martín *et al.*, 2004). En la actualidad se han descifrado un poco más de 50 variantes de estas toxinas, las cuales son altamente dañinas ya que en vertebrados ocasiona la pérdida de la arquitectura del hígado dando lugar a un edema hepático (hepatomegalia) provocando además la anastomosis de

vasos sanguíneos (Roset *et al.*, 2001).

Otro tipo de toxina que puede ser producida por *M. aeruginosa*, es la Anatoxina-a, la cual es un alcaloide, catalogado como una amina secundaria, de la cual sólo se conoce una variedad (Roset *et al.*, 2001). Para el caso de *M. wesenbergii*, se ha determinado que es probablemente tóxica, ya que no se han encontrado toxinas asociadas a esta especie, sin embargo se tienen cepas en Japón que no producen ningún tipo de toxina (Komárek y Anagnostidis, 1999). Mientras que para *M. smithii* no se tienen toxinas registradas.

Debido a que el cráter de Tacámbaro es un sistema con advocación recreativa, en donde se desarrollan actividades de contacto primario, es relevante monitorear la densidad de estos cianoprocariontes, con énfasis en *M. aeruginosa*, además de cuantificar la cantidad de toxina presente en las capas superiores de la columna del agua, ya que la toxina se disemina fácilmente por las siguientes rutas de exposición: contacto con la piel, consumo de agua no potabilizada, inhalación, y consumo de alimentos que tuvieron contacto por riego o bioacumulación (Roset *et al.*, 2001).

Conclusiones

En la presente contribución se determinaron cuatro especies pertenecientes al género *Microcystis* Kützing ex Lemmermann, las cuales responden a los siguientes nombres: *Microcystis aeruginosa*, *M. flos aquae*, *M. wesenbergii* y *M. smithii*, siendo frecuente en el sistema acuático *M. aeruginosa*, con elevadas concentraciones en el epilimnio de verano.

Se determinó que los factores abióticos con mayor peso en la presencia y permanencia de *Microcystis* son: Temperatura del agua, cociente nutricional de nitrógeno y fósforo (N:P), demanda bioquímica de oxígeno, pH y sólidos suspendidos. Con respecto al nicho ecológico fundamental se reconoce que *M. aeruginosa* y *M. flos aquae* presentan la misma afinidad ecológica, siendo ésta similar a *M. wesenbergii*, las cuales se encuentran en un epilimnio básico, con moderadas concentraciones de sólidos suspendidos y material orgánico, en un cociente nutricional de 7.3 a 7.9. Mientras que *M. smithii* se encuentra

presente en el metalimnio e hipolimnio, con temperaturas mayores a 19 °C en un cociente nutrimental de 7.3 a 7.9, en capas con baja concentración de material orgánico degradable.

Los riesgos toxicológicos que presenta éste género en el lago cráter de Tacámbaro, están relacionados a la producción de microcystinas (hepatotoxinas), así como de anatoxinas-a, siendo la especie más tóxica *M aeruginosa*.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el soporte económico a través del programa de investigación 2012-2013, para la ejecución de la red de proyectos de análisis de cuerpos de agua continentales.

Referencias

- Alcocer J, Escobar EG, Lugo A, Lozano LM, Oseguera LA.** 2001. Benthos of a seasonally-astatic, saline, soda lake in Mexico. *Hydrobiologia*, 466: 291-297.
- Alcocer-Durand J, Escobar-Briones EG.** 1992. The aquatic biota of the now extinct lacustrine complex of the Mexico Basin. *Freshwater Forum* 2: 171-183.
- Alvarado VR.** 2003. *Dinámica estacional y circadiana del fitoplancton en el lago de Zirahuén, Michoacán, México.* Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 124 pp.
- APHA-AWWA-WPCF.** 1992. *Standard methods for the examination of water and Wastewater.* 19^a edition. American Public Health, Inc. New Cork. 1193 pp.
- Arzate-Cárdenas MA, Olivera Ramírez R, Martínez Jerónimo F.** 2010. *Microcystis* toxigenic strains in urban lakes: a case of study in Mexico City. *Ecotoxicology*, 19: 1157-1165.
- Banderas-Tarabay AG.** 1997. Phycoflora of the high-mountain lake El Sol, Central Mexico, and some biogeographical relationships. *Hydrobiologia*, 354: 17-40.
- Berry JP, Lee E, Walton K, Wilson AE, Bernal Brooks F.** 2011. Bioaccumulation of microcystins by fish associated with a persistent cyanobacterial bloom in Lago de Pátzcuaro (Michoacán, Mexico). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 7(30): 1621-1628.
- Bravo-Inclán LA, Saldaña-Fabela MP, Sánchez-Chávez JJ.** 2008. Long-term eutrophication diagnosis of a high altitude body of water, Zimapán Reservoir, Mexico. *Water Science & Technology WST*, 57(11): 1843-1849.
- Cavalcante-Silva E, Hereman TC, Arthur V, Oliveira RA, Bittencourt-Oliveira MC, Arruda-Neto JD.** 2010. Estudio de la radiosensibilidad a la radiación gama de *Microcystis panniformis* (cianobacteria). *Rev Latinoam Amb Algal*. 1(2): 135-142.
- Eiler A, Bertilsson S.** 2004. Composition of freshwater bacterial communities associated with cyanobacterial blooms in four Swedish lakes. *Environmental Microbiology*, 6(12): 1228-1243.
- Falconer IR.** 2007. Cyanobacterial toxins present in *Microcystis aeruginosa* extracts more than microcystins!. *Toxicon* 50(4): 585-588.
- Figuroa-Sánchez MA, Nandini S, Sarma SSS.** 2014. Zooplankton community structure in the presence of low levels of cyanotoxins: a case study in a high altitude tropical reservoir (Valle de Bravo, Mexico). *J. Limnol.*, 73(1): 141-150.
- García E.** 1988. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köpen para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana.* 4^a. Ed. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 243 pp.
- García RJ, Molina FIA, Díaz MV, Quiroz CH.** 2010. Componentes fitoplanctónicos y zoobentónicos en el lago Zempoala, Morelos, México. *Acta Universitaria* 2(20): 23-30.
- Garduño-Monroy VH, Corona-ChávezP, Issrade-Alcantara I, Mennella L, Arreygue E, Bigioggero B, Chiesa S.** 1999. *Carta Geológica de Michoacán.* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich. 111 pp.
- Guiry M D, Guiry G M.** 2014. *Algae Base.* World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Accesado el 18 de abril de 2014 En: <http://www.algaebase.org>
- Hernández-Morales R, Ortega-Murillo M R, Alvarado-Villanueva R, Sánchez-Heredia J. D, Medrano-Zarco F.** 2008. Variación anual del fitoplancton en el Lago Cráter La Alberca de Tacámbaro, Michoacán, México. *Biológicas* 10: 5-17
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.** 1978. *Carta Geológica 1:50000.* E14aA42. Tacámbaro.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.** 1983. *Carta Edafológica 1:50000.* E14aA42. Tacámbaro.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.** 2000. *Carta Topográfica 1:50000.* E14aA42. Tacámbaro.
- Joosten AMT.** 2006. Flora of the blue-green algae of the Netherlands I: The non-filamentous species of inland waters. *Utrecht: KNNV Publishing.* 5-237.
- Kim SG, Rhee SK, Ahn CY, Ko SR, Choi GG, Bae JW, Park YH, Oh HM.** 2006. Determination of cyanobacterial Diversity Turing algal blooms in Daechung Reservoir, Korea, on the basis of cpcBA intergenic spacer region analysis. *Appl Environ Microbiol* 72(5): 3252-3258.
- Kirchner O.** 1898. *Schizophyceae.* En: Engler A, Prantl K (Eds.), *Die natürlichen Pflanzenfamilien I.* Teil, Abt. 1a. 45-92.
- Komárek J, Anagnostidis K.** 1999. *Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales.* Editorial Gustav Fischer. Germany. 548 pp.
- Komárek J, Anagnostidis K.** 1995. Nomenclatural novelties in chroococcalean cyanoprokaryotes. *Preslia, Praha* 67: 15-23.
- Kützing FT.** 1846. *Tabulae phycologicae; oder, Abbildungen der Tange.* Vol. I, fasc. 1 pp. 1-8, pls 1-10.
- Margalef R.** 2005. *Ecología.* Omega. Barcelona, España. 679 pp.
- Martín A, Carrillo E, Costas E.** 2004. Variabilidad genética para la producción de toxina en poblaciones de *Microcystis aeruginosa* en dos embalses de abastecimiento de Andalucía. *Limnetica* 23(1-2): 153-158.
- Novelo E.** 2011. *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.* Fascículo 90. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 96 pp.
- Okello W, Ostermaier V, Portmann C, Gademann K, Kurmayer R.** 2010. Spatial isolation favours the divergence in microcystin net production by *Microcystis* in Ugandan freshwater lakes. *Water Research* 44: 2803-2814.

- Oliva-Martínez MG, Rodríguez RA, Lugo VA, Sánchez RMR.** 2008. Composición y Dinámica del Fitoplancton en un Lago Urbano Hipertrófico. *Hidrobiológica* 18(1): 1-13.
- Oliva-Martínez MG, Godínez-Ortega JL, Zuñiga-Ramos CA.** 2014. Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 54-61.
- Orr PT y Jones GJ.** 1998. Relationship between microcystin production and cell division rates in nitrogen-limited *Microcystis aeruginosa* cultures. *Limnol. Oceanogr*, 43(7): 1607-1614.
- Ortega-Murillo MR, Alvarado-Villanueva R, Sánchez-Heredia JD, Hernández-Morales R, Arredondo OM, Martínez SI.** 2011. Abundancia y distribución del fitoplancton en un lago hiposalino, Michoacán, México. *Biológicas* 2(13): 15-20.
- Otsuka S, Suda S, Li R, Matsumoto S, Watanabe MM.** 2000. Morphological variability of colonies of *Microcystis* morphospecies in culture. *J. Gen. Appl. Microbiol*, 46, 39-50.
- Reynolds CS.** 1991. Toxic blue-green algae: the “problem” in perspective. *Freshwater Forum* 1(1):29-38.
- Roldán PG, Ramírez JJ.** 2008. *Fundamentos de Limnología Neotropical*, Universidad de Medellín. 2ª edición. 440 pp.
- Roset J, Aguayo S, Muños MJ.** 2001. Detección de cianobacterias y sus toxinas. *Una Revisión. Rev. Toxicol* 18: 65-71.
- Schwoerbel J.** 1975. *Methoden der Hydrobiologie*. H. Blume Ediciones. España. 261 pp.
- Utermöhl H.** 1958. Zur Vervollkomung der quantitativen PhytoplanktonaMethodik. *Mitt. Int. Ver. Limnol.* 9: 1-38.
- Valadez F, Rosiles GG, Almazán Becerril A, Merino Ibarra M.** 2013. Planktonic Cyanobacteria of the tropical karstic lake Lagartos from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Rev. Biol. Trop.* 61 (2): 971-979.
- Vasconcelos V, Martins A, Vale M, Antúnez A, Azevedo J, Welker M, López O, Montejano G.** 2010. First report on the occurrence of microcystins in planktonic cyanobacteria from Central Mexico. *Toxicol*, 56: 425-431.
- Vázquez G, Favila ME, Madrigal R, Montes del Olmo C, Baltanás A, Ángel Bravo M.** 2004. Limnology of crater lakes in Los Tuxtlas, Mexico. *Hydrobiologia* 523: 59-70.
- Vázquez G, Jiménez S, Favila ME, Martínez A.** 2005. Seasonal dynamics of the phytoplankton community and cyanobacterial dominance in a eutrophic crater lake in Los Tuxtlas, Mexico. *Ecoscience*, 12(4): 485-93.
- Visser P, Ibelings B, Mur LR, Walsby A.** 2005. The ecophysiology of the harmful cyanobacterium *Microcystis*: features explaining its success and measures for its control. In: Huisma J, Matthijs HCP, Visser P (eds), *Harmful cyanobacteria*. Springer, Berlin, Germany, 109-142 pp.
- Walsby AE.** 1988. Buoyancy in relation to the ecology of freshwater phytoplankton. En Round FE (ed.), *Algae and the aquatic environment*. Biopress, Bristol. 125-137 pp.
- Wetzel RG.** 2001. *Limnology*. Third edition. Academic Press. San Diego California USA. 1006 pp.
- Wood SA, Crowe ALM, Ruck JG, Wear RG.** 2005. New records of planktonic cyanobacteria in New Zealand freshwaters, New Zealand. *Journal of Botany*, 43(2): 479-492.
- Zubieta RT, Criollo AC.** 2006. *Plan de Manejo del Área Natural Protegida “Cerro Hueco a La Alberca”*. Facultad de Biología UMSNH. Morelia, Michoacán, México.