



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE BIOLOGÍA
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA**

**IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS DE AGUA DULCE CON ÉNFASIS EN
IMPORTANCIA SANITARIA EN LA PRESA LA ESTANZUELA Y LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA ING. FERNANDO HIRIART BALDERRAMA, HGO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

LICENCIADA EN BIOLOGÍA

PRESENTA

MAYRA PICENO MUÑOZ

ASESORES: DRA. CLAUDIA CORONEL OLIVARES

DR. EBERTO NOVELO MALDONADO

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO

octubre 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Institute of Basic Sciences and Engineering
Área Académica de Biología
Biology Department

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR, UAEH

PRESENTE

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado a la pasante de Licenciatura en Biología **Mayra Piceno Muñoz**, con número de cuenta 262954, quien presenta el trabajo recepcional de tesis intitulado “Identificación de microorganismos de agua dulce con énfasis en importancia sanitaria en la Presa La Estanzuela y la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama, Hgo.”, después de revisarlo en reunión de sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE:	Biol. Ulises Iturbe Acosta	
SECRETARIO	Dra. Claudia Coronel Olivares	
PRIMER VOCAL:	Biol. Gregorio Rodríguez González	
SEGUNDO VOCAL:	Dra. Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez	
TERCER VOCAL:	Dr. Eberto Novelo Maldonado	
PRIMER SUPLENTE:	Biol. Jorge Valdiviezo Rodríguez	
SEGUNDO SUPLENTE:	Dra. Sylvia Martínez Hernández	

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi más atenta consideración.

ATENTAMENTE
“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”
Mineral de la Reforma, Hidalgo a 30 de septiembre de 2016

BIOL. ULISES ITURBE ACOSTA
COORDINADOR DE LA LICENCIATURA EN BIOLOGÍA



c.c.p. Archivo



Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5
 Colonia Carboneras
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
 Tel. +52 771 7172000 exts. 6640 y 6642, Fax 2112
 aab_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

Parte de este trabajo fue realizado en la Universidad Nacional Autónoma de México en la Facultad de Ciencias en el Laboratorio de Algas Continentales Ecología y Taxonomía (LACET), gracias por el apoyo e interés de todos los integrantes de este laboratorio. También se contó con la ayuda del Comité Acuícola Hidalguense de Sanidad, gracias a sus técnicos y personal.

DEDICATORIA

Donde haya un árbol que plantar, plántalo tú. Donde haya un error que enmendar, enmiéndalo tú. Donde haya un esfuerzo que todos esquivan, hazlo tú. Sé tú el que aparta la piedra del camino.

Gabriela Mistral

A mi mamá que ha sido mi mayor apoyo durante todo este tiempo asegurándose de que obtenga todo lo que quiero en la vida, a mi papá que siempre han sido base de mi formación, a toda mi familia y amigos que siempre ha estado al pendiente de mi formación profesional, así como a todos mis profesores que compartieron su tiempo y conocimiento conmigo. Gracias por poner su interés, atención, confianza y esperanzas en mí y me alegra haber cumplido con mis metas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por proporcionarme todo lo necesario para mi formación profesional y para llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por recibirme en sus instalaciones para poder llevar a cabo algunas partes de esta investigación.

Al CAHSAC y el Biol. Valdiviezo por su apoyo para realizar los muestreos, por el material proporcionado y el contacto con los pescadores y las comunidades.

A mis revisores de tesis y sinodales por su tiempo y sus sabios consejos que fueron tomados en cuenta para la edición final de este trabajo.

A al Dr. Eberto Novelo, la Dra. Rosa Luz Tavera y a la M. en C. Guadalupe Vidal y a todos los alumnos y personal del laboratorio de LACET en la UNAM por compartir todo su conocimiento y consejos, darme acceso al material, instrumental y literatura proporcionada del laboratorio y por el tiempo dedicado a mi investigación.

A la Dra. Claudia Coronel Olivares por aceptar tomar esta travesía conmigo y darme todo su apoyo además de guiarme en cada parte del camino y cuando tuve dificultades, aunque las dos nos adentramos en un campo no tan conocido, el esfuerzo y dedicación se ven plasmados en este trabajo. Así como también le agradezco al Biol. Ulises Acosta por el apoyo durante toda mi investigación.

A mi compañeros y amigos por su apoyo y compartir conmigo a lo largo de todo este camino sobre todo a Yesenia Galan por su apoyo y compañía incondicional, a Enrique Vázquez, Andrea Díaz y Dulce Olivares por acompañarme en este viaje y nunca dejarme sola.

A mis compañeras de laboratorio Axl, Aby, Claudia y Zaira, que me apoyaron y me hicieron compañía mientras realizaba esta investigación.

Por último, pero no menos importante agradezco a mi mamá y a toda mi familia porque a pesar de todos los obstáculos y dificultades gracias a ellos hoy estoy en donde estoy y son mi fuerza para cumplir con todas mis metas.

CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. ANTECEDENTES	5
3.1 <i>Microorganismos de agua dulce</i>	5
3.2 <i>Eutrofización y florecimientos algales</i>	6
3.3 <i>Cianobacterias</i>	10
3.3.1 Generalidades.....	10
3.3.2 Taxonomía.....	11
3.3.3 Morfología.....	13
3.3.4 Ecología.....	15
3.3.5 Cianotoxinas	16
3.3.6 Métodos de detección de cianotoxinas	19
3.3.7 Normatividad y calidad de agua (nacional e internacional)	21
3.3.8 Florecimientos y presencia de cianobacterias en México.....	24
4. JUSTIFICACIÓN	27
5. OBJETIVO GENERAL	29
6. OBJETIVOS PARTICULARES	29
7. MATERIALES Y MÉTODOS	30
7.1 <i>Área de estudio</i>	30
7.1.1 Presa La Estanzuela	30
7.1.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama	31
7.2 <i>Muestreo y medición de variables fisicoquímicas</i>	32
7.2.1 Presa La Estanzuela	32
7.2.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama	34
7.3 <i>Variables de calidad de agua</i>	35
7.4 <i>Análisis de clorofila</i>	35
7.5 <i>Aislamiento y cultivo de muestras</i>	36
7.6 <i>Observación e identificación</i>	38
7.7 <i>Catálogo de especies</i>	39
8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
8.1 <i>Variables fisicoquímicas</i>	40
8.1.1 Presa La Estanzuela	40
8.1.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama	41
8.2 <i>Variables de calidad de agua</i>	47
8.2.1 Presa La Estanzuela	47
8.1.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama	49

<i>8.3 Análisis de clorofila</i>	<i>53</i>
<i>8.4 Aislamiento y cultivo de muestras.....</i>	<i>55</i>
<i>8.5 Diversidad y abundancia de especies.....</i>	<i>57</i>
<i>8.6 Catálogo de especies</i>	<i>63</i>
<i>8.7 Recomendaciones.....</i>	<i>87</i>
9 CONCLUSIONES.....	89
10 LITERATURA CITADA.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1. Límites de los niveles tróficos resumidos de diversos autores.....	8
Cuadro 2. Sistema de clasificación trófica según la concentración de clorofila.....	9
Cuadro 3. Valores indicativos de los niveles tróficos.....	10
Cuadro 4. Clasificaciones de cianobacterias basadas en tres autores.....	12
Cuadro 5. Principales grupos de cianotoxinas.....	17
Cuadro 6. Variables fisicoquímicas medidos <i>in situ</i> en la Presa La Estanzuela.....	40
Cuadro 7. Muestreo 1 en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama. Variables fisicoquímicas medidos <i>in situ</i>	42
Cuadro 8. Muestreo 2 y 3 en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama. Variables fisicoquímicas medidos <i>in situ</i>	42
Cuadro 9. Datos obtenidos del análisis de calidad de agua en el embalse de Presa La Estanzuela.....	48
Cuadro 10. Datos del muestreo 1 obtenidos del análisis de calidad de agua en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.....	49
Cuadro 11. Datos de los muestreos 2 y 3 obtenidos del análisis de calidad de agua en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.....	50
Cuadro 12. Valores de clorofila del primer muestreo en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.....	54
Cuadro 13. Valores de clorofila del segundo y tercer muestreo en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.....	54
Cuadro 14. Datos de aislamiento de las especies encontradas en ambos cuerpos de agua.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vías de acceso a la Presa La Estanzuela desde Pachuca de Soto, Hidalgo.	30
Figura 2. Imagen tomada de SIATL-INEGI de la Presa La Estanzuela.	31
Figura 3. Mapa de la ubicación de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama y municipios aledaños	32
Figura 4. Toma de muestras en botes de plástico esterilizados previamente (fotografía de la izquierda) y Figura 5. Proceso de la concentración de la muestra mediante la red cónica de fitoplancton de poro pequeño (fotografía de la derecha).	33
Figura 6. Mapa de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama obtenido de SIATL-INEGI.	34
Figura 7. Sistema de filtración y la membrana para medir la clorofila.	36
Figura 8. Micropipetas y microscopio fotónico Marca Motic SMZ-143 utilizado para el aislamiento de las cianobacterias.	37
Figura 9. Contenedor con los focos de luz fría y los tubos donde se pusieron a incubar las cepas.	38
Figura 10. Fotografías de <i>Microcystis</i> en las muestras de agua de Presa La Estanzuela.	55
Figura 11. Ejemplos de tres cepas durante su aislamiento y cultivo.	56
Figura 12. Representación gráfica del porcentaje de cada especie encontrada por grupo taxonómico en la Presa La Estanzuela.	57
Figura 13. Representación gráfica del porcentaje de cada especie encontrada por grupo taxonómico en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.	58

1. RESUMEN

Una parte importante de los ecosistemas acuáticos son los microorganismos que los componen. El fitoplancton se considera como el conjunto de todos los organismos suspendidos en la columna de agua; incluye a cianobacterias, clorofitas, criptofitas, diatomeas, dinoflagelados, entre otros. En particular, las cianobacterias son un grupo de organismos en los que se debe de poner especial atención debido a que son productores de toxinas. En este trabajo se monitorearon dos cuerpos de agua presentes en el estado de Hidalgo, la Presa La Estanzuela ubicada en el municipio de Mineral del Chico y la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama en el municipio de Zimapán, con el objetivo de realizar un análisis de algunas variables fisicoquímicas y de clorofila *a*, así como de identificar los microorganismos de agua dulce en cada cuerpo de agua. En la Presa La Estanzuela la concentración de nutrientes es correspondiente a cuerpos de agua oligotróficos y se encontraron valores altos de clorofila *a*, mayores a 100 µg/L. En la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama también se encontraron valores altos de nutrientes así como concentraciones altas de clorofila *a*, mayores a 100 µg/L, lo que indica un florecimiento algal. En ambos cuerpos de agua se constató la presencia de organismos productores de toxinas como es el caso de *Microcystis*, entre otras especies, con un total de 28 especies diferentes pertenecientes a cinco grupos taxonómicos diferentes. El grupo de mayor diversidad de especies fue el de las clorofitas y el grupo más abundante fue el de las cianobacterias, con mayor número de organismos en cada uno de los muestreos. Se obtuvo un conocimiento general acerca de la calidad del agua de ambas presas. La diversidad de organismos encontrados representa un potencial riesgo sanitario debido a que el agua es para consumo humano en el caso de Presa La Estanzuela y para otras actividades productivas y recreativas en el caso de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

2. INTRODUCCIÓN

El término fitoplancton se utiliza para englobar a los grupos que se encuentran suspendidos en la columna de agua en cualquier sistema acuático. Incluye a grupos como las Bacillariophyta (diatomeas), Chlorophyceae (algas verdes), Dinophyceae (dinoflagelados), Chrysophyceae (algas doradas), Cryptophyceae (criptofitas) y Cyanophyceae (cianobacterias), entre otros (Hötzel y Croome, 1999). Debido a su corto ciclo de vida, estos organismos responden rápidamente a los cambios ambientales, por lo cual son valiosos como indicadores de la calidad de agua (Villafañe y Reid, 1995).

Algunos sistemas acuáticos pasan de forma natural por un proceso de eutrofización o envejecimiento, es decir, caracterizado por la acumulación de nutrientes e incremento en la actividad biológica (Ramírez y col. 2004). Sin embargo, dicho proceso se ve acelerado por el aporte de nutrientes de actividades antropogénicas tales como: la ganadería, la agricultura y las descargas domésticas e industriales. La eutrofización y el incremento en la temperatura del cuerpo de agua crean las condiciones óptimas para el aumento exponencial de la biomasa del fitoplancton (Mazzeo y col. 2002). Los microorganismos de cuerpos de agua dulce que crecen en exceso en dichas condiciones son las cianobacterias y las diatomeas (Creswell, 2010).

En especial, las cianobacterias se han convertido en un tema de relevancia a nivel mundial, ya que han causado diversos problemas en reservorios importantes en muchos países. Las cianobacterias son organismos procariontes capaces de realizar fotosíntesis oxigénica y por lo tanto, conforman un sólo grupo taxonómico que se encuentra dentro de las bacterias Gram negativas (Boone y Castenholz, 2001).

Se trata de un grupo que durante mucho tiempo se mantuvo en polémica debido a que comparten características con las algas y se consideraban parte de este grupo taxonómico.

Actualmente está confirmado, mediante técnicas de biología molecular y respaldado con otros estudios, que las cianobacterias pertenecen al Dominio Bacteria (Sarma, 2012).

Sus principales características son: contienen distintos pigmentos, principalmente clorofila *a*, ficobilinas, ficocianinas y carotenoides, entre otros. Se pueden encontrar de forma unicelular o en grupos que incluso pueden constituir filamentos o colonias; la morfología de los organismos unicelulares es de formas esféricas, ovoides y cilíndricas; su metabolismo primario consiste en la transformación de la luz solar en moléculas de alta energía, mediante sus pigmentos (Newcombe, 2009). Debido a sus características tan variadas, las cianobacterias se pueden encontrar en hábitats muy comunes como mares, ríos, lagos y presas hasta hábitats considerados inhóspitos como aguas termales, lagos hipersalinos, cuevas, regiones polares, entre otros (Aubriot y Bonilla, 2009).

El interés en su estudio se incrementó cuando se descubrió que son productoras de metabolitos secundarios considerados tóxicos para los seres vivos. Estos son conocidos como cianotoxinas y existen diversos tipos según la especie que la produzca, el daño que causan, su naturaleza química, pero principalmente se clasifican por el órgano diana al que afectan (Sarma y Sarma, 2012). Según O'Neil y col. (2012), la eutrofización de los cuerpos de agua se ha visto acelerada, lo que se refleja en un aumento desmedido en los nutrientes que contienen y en un aumento en la incidencia de florecimientos algales nocivos. Lo que da pie a que especies de cianobacterias que producen cianotoxinas proliferen y pongan en riesgo el equilibrio del ecosistema y la salud de los organismos que ahí habitan.

Es innegable que las cianobacterias, en conjunto con el fitoplancton, son parte del balance de la naturaleza al aportar numerosos servicios ecosistémicos (producción de oxígeno, fijación de nitrógeno, producción de biomasa, etcétera) (Metcalf y Codd, 2014). Por consiguiente, también es necesario conocer la diversidad de fitoplancton presente en los

cuerpos de agua, puesto que es la base productiva de estos ecosistemas y además sirve como una medida para identificar y prevenir posibles problemas en estos cuerpos de agua.

En este trabajo se pretende documentar la diversidad de microorganismos encontrada en dos cuerpos de agua ubicados en el estado de Hidalgo, donde son escasos los estudios referentes a las comunidades fitoplanctónicas debido a que cuenta con un gran número de cuerpos de agua. Asimismo, se busca detectar la presencia de microorganismos que puedan ser focos rojos en cuanto a su capacidad de dañar al ser humano o a otros organismos, y crear conciencia de la posible existencia de toxinas o microorganismos potencialmente productores de toxinas incluso en agua de consumo humano, asunto que no se encuentra regulado por ningún organismo gubernamental. Por último, se pretende generar información suficiente para continuar con este estudio en otros cuerpos de agua en el estado.

3. ANTECEDENTES

3.1 Microorganismos de agua dulce

Los ecosistemas acuáticos presentan una gran diversidad de microorganismos, entre los que se encuentran: Bacillariophyta (diatomeas), Chlorophyceae (algas verdes), Dinophyceae (dinoflagelados), Chrysophyceae (algas doradas), Cryptophyceae (criptofitas) y Cyanophyceae (cianobacterias) (Rivera-Baquero, 2008). Estos constituyen a los productores primarios autóctonos de los ecosistemas acuáticos y conforman la base de la red trófica en términos de intercambio energía-materia (Hötzel y Croome, 1999).

El estudio de las comunidades del fitoplancton, a través de las asociaciones de especies con la ayuda de variables fisicoquímicas y biológicas, constituye una de las líneas metodológicas a seguir para evaluar el estado ecológico de los diferentes tipos de lagos y embalses (CHE, 2005). El modo de identificar las asociaciones de especies consiste en generar inventarios o catálogos (especies o géneros) de los lagos o embalses, y analizar los patrones de variación de la composición de las especies por medio de técnicas estadísticas (por ejemplo, con análisis de componentes principales). Posteriormente, pueden elaborarse índices de comunidades para cada tipo de lago o embalse (Dimar-CIOH, 2011). Esto debe ir ligado a valores de las variables de calidad del agua, como temperatura, pH, conductividad, concentración de oxígeno disuelto, turbidez, entre otros y cantidad de nutrientes como fosfatos y nitratos (Hötzel y Croome, 1999).

Es importante conocer el estado de los cuerpos de agua, ya que pueden estar sucediendo procesos acelerados debido a la contaminación, lo que modifica el estado de salud del ecosistema acuático. En particular, los microorganismos presentes en los ecosistemas acuáticos tienen gran sensibilidad a la variación de los factores externos al sistema acuático, lo cual los convierte en buenos indicadores (Hötzel y Croome, 1999).

La forma más común de tener un estudio completo del fitoplancton es mediante programas de monitoreo, debido a que los grupos que conforman el fitoplancton son susceptibles a los cambios en las variables, así como a las condiciones climáticas y la carga de nutrientes dentro del cuerpo de agua. Esto significa que las poblaciones y la composición de las asociaciones fitoplanctónicas puede variar en cuestión de días o semanas o en cuanto estas variables cambien (Aubriot y Bonilla, 2009).

3.2 Eutrofización y florecimientos algales

La eutrofización es un proceso que se da naturalmente en cuerpos de agua conforme van envejeciendo y consiste en el aumento de nutrientes en el agua, principalmente nitrógeno y fósforo. Naturalmente ocurre a una tasa muy lenta, pero en los últimos años este proceso se ha visto acelerado debido a la intromisión de actividades realizadas por el ser humano (Olenina y col. 2006). La progresión natural en los lagos es unidireccional y va de la oligotrofia (pobreza de nutrimentos) a la eutrofia (riqueza de nutrimentos y por lo tanto alta productividad). La eutrofización cultural (producida por la actividad humana) se ha convertido en un factor significativo en el envejecimiento de los cuerpos de agua en el mundo (Ramírez y col. 2004); actividades como la agricultura, la minería, la urbanización y el desecho de aguas residuales contribuyen a la contaminación de cuerpos de agua y causan eutrofización acelerada, entre otras consecuencias (Briand y col. 2003).

La eutrofización no sólo conlleva a un enriquecimiento acelerado de los nutrimentos en el agua, sino que también contribuye a modificar toda la composición de especies del sistema acuático. Estos son eventos de multiplicación y acumulación por parte de las cianobacterias y de algunos otros organismos que conforman el fitoplancton presentes en la columna de agua, que no necesariamente se encuentran flotando en la superficie sino que están dispersos en la parte superior de la columna de agua, así que en un lago eutrófico las concentraciones de clorofila pueden alcanzar los $300 \mu\text{g-L}^{-1}$ y provocar fenómenos conocidos

como florecimientos algales nocivos (Rodgers, 2008). Han sido reportados en la literatura científica desde hace más de 130 años, más en épocas recientes se ha intensificado la incidencia de estos fenómenos y todo lo que conllevan: daños económicos, a la salud y a la integridad de los ecosistemas ya sean hábitats marinos o de agua dulce (Aubriot y Bonilla, 2009; O'Neil y col. 2012).

Dichos fenómenos han tomado más importancia gracias al descubrimiento de sustancias que afectan la salud humana o a organismos que habitan estos cuerpos de agua. No obstante, es importante resaltar que para que exista un cierto grado de toxicidad no es estrictamente necesario que exista la eutrofización ya que se han presentado florecimientos algales nocivos, en cuerpos de agua alpinos que son oligotróficos y con una alta capacidad toxigénica (Roset y col. 2001).

La diversidad del fitoplancton se modifica cuando existen procesos como los florecimientos algales favorecidos por la eutrofización de las aguas; la diversidad disminuye y favorece la prevalencia principalmente de las cianobacterias o de los organismos causantes de los florecimientos algales. Son ciertos factores, principalmente ambientales, los que contribuyen a que suceda este fenómeno, tales como temperaturas elevadas (mayores a 18°C), mayor cantidad de luz (condición que sucede normalmente entre la primavera y el otoño en zonas templadas), gran capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, un pH del agua de neutro a básico, con valores de 6.5 a 8.5, poca filtración por parte del zooplancton y la formación de aerotopos (Ramírez y col. 2004).

Las cianobacterias son resistentes a condiciones cambiantes y de desecación; las marinas son incluso resistentes a la hipersalinidad y las terrestres a la radiación UV. Especialmente en las formas planctónicas, su capacidad de realizar fotosíntesis en rangos de ondas de luz bastante bajas con poco flujo de protones las hace bastante exitosas. Según

Whitton y Potts (2012), el crecimiento de las cianobacterias en los ambientes naturales depende de ciertos elementos tales como la disponibilidad de fósforo y nitrógeno. Otro factor del que dependen es el pH; se ha encontrado que la diversidad y la abundancia aumentan en valores de pH más altos. Sin embargo, se afirma que las especies que presentan heterocitos son las que se pueden desarrollar en medios con pH bajo (Vela y col. 2007).

Hasta ahora los factores que han sido identificados que contribuyen a la expansión global de los florecimientos algales nocivos incluyen: el incremento de nutrientes y de sus fuentes, el transporte de los microorganismos a través de las actividades humanas y por último el incremento de las actividades de acuicultura y la sobrepesca, que lleva a la alteración de la red trófica y permite que las especies dañinas proliferen (O'Neil y col. 2012). En otras palabras, la intervención antropogénica en los ecosistemas naturales, ha propiciado entre otras cosas, el desarrollo de estos florecimientos nocivos.

Los cuerpos de agua pueden ser clasificados en distintas categorías: ultraoligotróficos, oligotróficos, mesotróficos, eutróficos o hipereutróficos. Estos se pueden evaluar con metodologías distintas, entre las que destacan la concentración de células (células/mL), el biovolumen (mm^3/L) (Cuadro 1) y la concentración de clorofila (Cuadro 2). La clasificación de los niveles tróficos ha sido resumida por Willen (2000) basada en siete autores. En cuanto a la concentración de clorofila, generalmente se analiza la concentración de la clorofila *a* y es una medida indirecta de la cantidad de células presentes en la columna de agua OCDE (1982).

Cuadro 1. Límites de los niveles tróficos resumidos de diversos autores tomado de Willen (2000).

	Biovolumen (mm^3/L)
Oligotrófico	< 1
Mesotrófico	1 - 2.5
Eutrófico	> 2.5

Cuadro 2. Sistema de clasificación trófica según la concentración de clorofila *a* de la OCDE (1982).

	Clorofila <i>a</i> µg/L	
	Promedio anual	Máximo anual
Ultra oligotrófico	< 1.0	< 2.5
Oligotrófico	< 2.5	< 8.0
Mesotrófico	2.5 - 8	8 - 25
Eutrófico	8 - 25	25 - 75
Hipereutrófico	> 25	> 75

El proceso de eutrofización indica aumento de nutrientes, principalmente del fósforo, lo que lleva al aumento en la cantidad de fitoplancton medido por las concentraciones de clorofila *a*, es un proceso que se da en miles de años (Olem y Flock, 1990). De la clasificación antes mencionada se puede definir la oligotrofia como baja concentración de nutrientes y productividad biológica; mesotrofia como niveles intermedios de nutrientes y productividad; y por último eutrofia que es una elevada concentración de nutrientes y alta productividad.

Otra clasificación basada en nutrientes, clorofila y profundidad (Cuadro 3) ha sido propuesta por Carlson y Simpson (1996).

Cuadro 3. Valores indicativos de los niveles tróficos. Tomado de Carlson y Simpson (1996).

Variable	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Fósforo total ($\mu\text{g/L}$) promedio	8.0	26.7	84.4	-
Intervalo	3.0-17.7	10.9-95.6	16-386	750-1200
Nitrógeno total ($\mu\text{g/L}$) promedio	661	753	1875	-
Intervalo	307-1630	361-1387	393-6100	-
Clorofila <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$) promedio	1.7	4.7	14.3	-
Intervalo	0.3-4.5	3-11	3-78	1-150
Profundidad con Disco de Secchi (m) promedio	9.9	4.2	2.45	-
Intervalo	5.4-28.3	1.5-8.1	0.8-0.7	0.4-0.5

3.3 Cianobacterias

3.3.1 Generalidades

Las cianobacterias son parte de un grupo de organismos que de acuerdo con los registros fósiles encontrados han existido por 3700 millones de años (Nutman y col. 2016). Son bacterias Gram negativas con capacidad fotoautótrofa, comprenden un sólo grupo filogenético. Además, comparten su ambiente con organismos de otros grupos taxonómicos como las algas y diatomeas, constituyendo así en su conjunto al llamado fitoplancton (Olenina y col. 2006). Su color representativo es el azul verdoso conferido por pigmentos como la clorofila y las ficocianinas (Briand y col. 2003).

Son un grupo de bacterias que se caracterizan por ser capaces de realizar fotosíntesis oxigénica lo que unifica al grupo; la fotosíntesis que llevan a cabo es bastante parecida a la de algas verdes y plantas, ya que presentan dos fotosistemas (PSII y PSI) y requieren del uso del agua como fotorreductor. Las cianobacterias son organismos fotosintéticos muy antiguos,

originados en el período Precámbrico durante el eón Proterozoico, edad determinada mediante evidencias del registro fósil, biomarcadores orgánicos y análisis de las secuencias génicas (Nutman y col. 2016).

Es precisamente esta característica fotosintética la que hoy en día es básica para los organismos que sobreviven gracias a la presencia del oxígeno en la atmósfera. Su mayor auge se calcula que fue hace aproximadamente 1500 millones de años, cuando proporcionaron al planeta una atmósfera con grandes cantidades de oxígeno (Boone y Castenholz, 2001).

Las cianobacterias le dieron la capacidad fotosintética de los organismos eucariontes como las algas, por ello presentan similitudes principalmente con las algas microscópicas, por lo que su relación es estrecha (Ramírez y col. 2004; Aubriot y Bonilla, 2009). Son un componente primario en la teoría endosimbiótica acerca del origen de los plástidos y por lo tanto de los organismos eucariontes fotosintéticos (Margulis y Bermudes, 1984). Presentan características adaptativas fisiológicas y ecológicas que les permiten ser superiores competitivamente a otros organismos habitantes de los cuerpos de agua, sobre todo dentro del mismo grupo del fitoplancton (Carvajal-Cruz, 2011).

3.3.2 Taxonomía

Surgieron distintas clasificaciones de las cianobacterias, entre las cuales destaca la de Boone y Castenholz con un enfoque bacteriano dentro del Bergey's Manual of Systematic Bacteriology (2001) que se basa únicamente en características bacteriológicas. Dicha clasificación retoma la realizada por Rippka y col. (1979) en la que se divide a las cianobacterias en cinco secciones. En publicaciones recientes las clasificaciones destacan el aspecto botánico como la de Komárek (2006). Una comparación de algunas clasificaciones se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificaciones de cianobacterias basadas en tres autores. Boone y Castenholz, 2001; Hoffman, Komárek y Kastovsky, 2005 y Komárek, 2006.

Boone y Castenholz (2001)	Hoffman y col. (2005)	Komárek (2006)
Subsección I: unicelulares o coloniales, con división celular por fisión binaria de uno a tres planos.	Gleobacterales: cocoides, faltantes de tilacoides.	Chroococcales: unicelulares o coloniales.
Subsección II: unicelulares o coloniales, división por fisión múltiple o en combinación con fisión binaria.	Synechococcales: tilacoides con un arreglo paralelo a la superficie de la célula, unicelulares o coloniales.	
	Subsección III: filamentosos sin formación de heterocitos.	Chroococcales: arreglo radial de los tilacoides, unicelulares o coloniales.
Oscillatoriales: arreglo radial de los tilacoides, largos filamentos		Oscillatoriales: filamentosas y sin formación de heterocitos
Pseudoanabaenales: tilacoides con arreglo paralelo a la superficie de la célula, filamentos delgados.		
Subsección IV: filamentosos, formación de heterocitos y sin ramificación.	Nostocales: cianobacterias filamentosas y formación de heterocitos.	Nostocales: filamentosos, con formación de heterocitos, acinetos y una ramificación falsa
Subsección V: filamentosas, heterocitos y con ramificaciones		Stigonematales: filamentosas, formación de heterocitos, acinetos y ramificación verdadera

En términos de géneros y especies es difícil determinar exactamente cuántas existen, ya que el concepto de especie en las cianobacterias (así como para muchos otros organismos) no tiene límites precisos (Chorus y Bartram, 1999). Así, por lo que dependiendo del sistema de clasificación el número de especies reconocidas varía en gran medida (Chorus y Bartram, 1999). Por ejemplo, Scott (1991) señala que existen más de 50 géneros; sin embargo, hay autores que consideran el Código Internacional de Nomenclatura para algas hongos y plantas en el que se propone 150 géneros y 2,000 especies para la clase Cyanophyceae (Hoek y col. 1995). Otros reconocen 25 familias con 124 géneros y 2776 especies en el mundo y la presencia en México de 18 familias, 105 géneros y 623 especies (Novelo, 2011).

3.3.3 Morfología

Las cianobacterias pertenecen al grupo de Gram negativas; sin embargo, presentan una capa de peptidoglucano más gruesa de lo normal debido a la presencia de una capa exterior a la membrana externa conocida como vaina, de consistencia mucilaginosa y responsable de mantener la estructura colonial (Boone y Castenholz, 2001). La presencia de esta vaina les permite a las cianobacterias sobrevivir a desecación. El citoplasma de las cianobacterias es heterogéneo y usualmente incorpora estructuras granulares, incluyen gránulos de glucógeno, glóbulos lipídicos, gránulos de cianoficina y cuerpos polifosfatosos (Hoek y col. 1995).

Sus tamaños van desde 0.5 μm y pueden llegar hasta varios milímetros de diámetro cuando llegan a formar colonias (Bonilla, 2009). Las cianobacterias son morfológicamente muy diversas ya que se pueden encontrar en forma unicelular ya sea cilíndrica, ovoide, o esférica o en grupos, mismos que pueden formar colonias o filamentos con ramificaciones (Komárek y Mares, 2012).

Las cianobacterias poseen diversas células especializadas que llevan a cabo distintas funciones esenciales. Los heterocitos se pueden distinguir de las células vegetativas por sus protoplastos hialinos comúnmente de color amarillento y por la ausencia de material de reserva y aerotopos; también se reconocen por los engrosamientos en su pared, particularmente en los extremos de la célula conocidos como nódulos polares. Sirven en la fijación de nitrógeno atmosférico, dentro de estas células se encuentra un ambiente anóxico en donde el nitrógeno puede ser fijado mediante una enzima conocida como nitrogenasa. Los acinetos son células que actúan como estructuras de resistencia donde se acumulan sustancias de reserva por lo cual aumentan su tamaño y engrosan sus paredes celulares; se desarrollan de células vegetativas y surgen cuando existe estrés parecidas a las endosporas. Los acinetos son comúnmente producidos en gran número en los florecimientos algales en las poblaciones ya

envejecidas para asegurar su supervivencia (Hoek y col. 1995). Los aerotopos son estructuras importantes que presentan y les ayudan a la flotación a lo largo de la columna de agua.

La mayoría de las cianobacterias unicelulares y algunas filamentosas realizan su división celular por fisión binaria, donde sucede una constricción de la pared celular y su envoltura hasta formar otra célula. En algunos grupos, principalmente Oscillatoriales, sólo se crea una invaginación de la membrana del citoplasma y posteriormente se sintetiza una nueva capa de peptidoglicano (Carrasco-Gata, 2007). En algunas especies unicelulares se da la reproducción por múltiples divisiones internas, y las células resultantes son parecidas a las endosporas, llamadas baeocitos. La fisión binaria puede alternar entre uno, dos o tres planos dimensionales y estas células pueden quedar unidas por la envoltura mucilaginosa, esto da como resultado la formación de colonias. Cuando la fisión se da en un sólo plano y la separación es incompleta se forman los filamentos; cuando el plano de división se llega a desviar cerca de 90° ocurren las ramificaciones (Boone y Castenholz, 2001). La reproducción de los filamentos es mediante la fragmentación debido a la debilidad o muerte de una célula llamada necridio, con la consecuente formación de fragmentos conocidos como hormogonios que posteriormente realizan fisión binaria, y da lugar a un nuevo filamento (Stainer y Villanueva, 1996; Bonilla, 2009).

En cuanto a los pigmentos que les permiten a las cianobacterias llevar a cabo el proceso fotosintético, el pigmento principal es la clorofila *a*, otros pigmentos accesorios a los que se debe la coloración verde-azulada son las ficobiliproteínas: aloficocianina, ficocianina y ficoeritrina. Además, tienen carotenoides y algunos son exclusivos de las bacterias como los carotenoides glicosídicos (Carvajal-Cruz, 2011). Los pigmentos accesorios, además de contribuir a la fotosíntesis, cumplen otras funciones como proteger las células a las bajas temperaturas (Whitton y Potts, 2012).

3.3.4 Ecología

El ciclo de vida de las cianobacterias requiere de agua, dióxido de carbono, sustancias inorgánicas (como fósforo y nitrógeno) y luz solar (Echenique y Aguilera, 2011). Su metabolismo celular es primario a través de la fotosíntesis donde la luz solar y el dióxido de carbono se usan para producir moléculas de alta energía y oxígeno. No obstante, algunas especies pueden sobrevivir en la completa oscuridad, mientras otras tienen habilidades heterotróficas (Whitton, 2000). Por esto no es sorprendente cuando se afirma que las cianobacterias pueden habitar cualquier parte del planeta; existen especies de cianobacterias muy resistentes que pueden sobrevivir a condiciones difíciles en diversas regiones afectadas por el cambio climático (Newcombe, 2009).

Las cianobacterias se han caracterizado por colonizar y presentarse en los ambientes más comunes como mares y aguas continentales naturales y artificiales (ríos, lagos, presas, entre otros), así como en ambientes considerados inhabitables como géiseres, lagos hipersalinos, volcanes, casquetes polares, etcétera (Bonilla, 2009). En mayor cantidad, las cianobacterias se encuentran en los sistemas de aguas continentales (límnicos), ya sea a lo largo de la columna de agua o sólo en el bentos de los cuerpos de agua; sin embargo, existen unas cuantas especies de ambientes costeros salobres (Whitton y Potts, 2012).

Las cianobacterias tienen la capacidad de desarrollarse en distintos rangos de profundidad; esta habilidad se ve influenciada por la cantidad de luz y la disponibilidad de nutrientes (Boone y Castenholz, 2001). Una compleja interacción entre los factores ambientales es necesaria para contribuir al crecimiento de las cianobacterias. Estos factores incluyen intensidad luminosa, temperatura del agua, pH, concentración de dióxido de carbono, disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo, hierro, molibdeno y otros), características físicas del cuerpo de agua (forma y profundidad), la estabilidad de la columna de agua, el flujo de agua, el movimiento horizontal causado por el viento, así como la

estructura y función de los ecosistemas acuáticos (Newcombe, 2009). Al darse las condiciones óptimas de cada uno de estos factores el crecimiento cianobacteriano se favorece y podría potencialmente convertirse en un florecimiento descontrolado.

3.3.5 *Cianotoxinas*

Las cianobacterias son organismos beneficiosos para el ambiente ya que, entre sus múltiples funciones, sirven como fijadoras de nitrógeno atmosférico, fertilizan los suelos, proporcionan oxígeno a la atmósfera, entre otras. No obstante, su papel es ambiguo puesto que en ocasiones suelen ser responsables en la disminución de la calidad del agua (Briand y col. 2003).

Son seres que presentan un metabolismo secundario muy activo; esto quiere decir, tienen reacciones además de las del ciclo de Krebs y la glucólisis, entre otras vitales (Falconer, 1998), en las cuales se generan metabolitos secundarios también conocidos como toxinas o sustancias bioactivas que en ocasiones pueden ser nocivos para los seres humanos y otros animales (Sivonen y Jones, 1999). Es importante resaltar que esta capacidad de producir compuestos nocivos no la tienen todas las cianobacterias, sino sólo ciertas especies que se encuentran ampliamente distribuidas en el mundo (Carrasco-Gata, 2007). Se estima que cerca de un 50% de los florecimientos algales son tóxicos (Roset y col. 2001).

Las toxinas se definen como compuestos que puede causar algún daño a la salud de animales o humanos. En contraste, un componente o sustancia bioactiva es aquel que puede servir como un antimicrobiano o tiene propiedades citotóxicas que son de interés farmacéutico o como herramientas de investigación. Actualmente se conoce que diversas especies de cianobacterias producen toxinas potentes que pueden tener efectos agudos en animales, vegetales e incluso el hombre conocidas como cianotoxinas (Codd y col. 1992).

Las primeras intoxicaciones por cianotoxinas que se describieron en poblaciones humanas por el consumo de agua contaminada se dieron en Australia, Inglaterra, China y África del Sur; pero el peor caso reportado fue en América Latina, en Caruaru, Brasil en 1996, donde hubo cerca de 50 muertos (Roset y col. 2001). Debido a este tipo de emergencias, diversos investigadores se han enfocado al estudio de los genes que desencadenan la producción de las cianotoxinas, de los cuales ya están identificados varios.

Dentro de las toxinas hay variación en su modo de acción, en su estructura química (Cuadro 5) y en sus efectos fisiológicos. Según su modo de acción se presentan cinco tipos de toxinas: hepatoxinas, neurotoxinas, citotoxinas, dermatotoxinas y endotoxinas (Carrasco-Gata, 2007). Otra característica de las cianotoxinas es que son bioacumulables a través de la red trófica y esto también puede llevar a una biomagnificación de los efectos de las cianotoxinas (Sarma y Sarma, 2012).

Cuadro 5. Principales grupos de cianotoxinas. Modificada de O'Neil (2012), Newcombe (2009) y Roset y col. (2001).

Toxina	Géneros productores	Estructura molecular	Órgano afectado en mamíferos	Número de variantes
Microcistina	<i>Microcystis, Anabaena, Planktothrix, Oscillatoria, Nostoc, Hapalosiphon, Anabenopsis, Trichodesmium, Synechococcus, Snowella</i>	Heptapéptido cíclico	Hígado	>50
Nodularina	<i>Nodularia</i>	Péptido cíclico	Hígado	6
Cilindrospermosina	<i>Cylindrospermopsis, Umezakia, Aphanizomenon, Lyngbya, Raphidiopsis, Anabaena</i>	Alcaloide cíclico guanidina	Hígado	1
Anatoxina-a	<i>Anabaena, Planktothrix, Oscillatoria, Aphanizomenon, Phormidium, Raphidiopsis</i>	Alcaloide Amina secundaria	Sinapsis nerviosa	1
Anatoxina-a(S)	<i>Anabaena</i>	Éster de guanidina metil	Sinapsis nerviosa	1

Toxina	Géneros productores	Estructura molecular	Órgano afectado en mamíferos	Número de variantes
Microcistina	<i>Microcystis, Anabaena, Planktothrix, Oscillatoria, Nostoc, Hapalosiphon, Anabenspis, Trichodesmium, Synechococcus, Snowella</i>	Heptapéptido cíclico	Hígado	>50
Nodularina	<i>Nodularia</i>	Péptido cíclico	Hígado	6
Cilindrospermosina	<i>Cylindrospermopsis, Umezakia, Aphanizomenon, Lyngbya, Raphidiopsis, Anabaena</i>	Alcaloide cíclico guanidina	Hígado	1
		fosfato		
Saxitoxina	<i>Anabaena, Planktothrix, Oscillatoria, Aphanizomenon, Lyngbya, Cylindrospermopsis, Scytonema</i>	Alcaloides	Axones nerviosos	Al menos 8
Palitoxina	<i>Trichodesmium</i>	Alcaloide	Axones nerviosos	-
Aplisiatoxina	<i>Lyngbya, Schizothrix, Planktothrix, Oscillatoria</i>	Alcaloide	Piel	-
Lyngbyatoxina-a	<i>Lyngbya</i>	Alcaloide	Piel, tracto gastro-intestinal	-
Lipopolisacáridos	Todos	Lipopolisacárido	Irritante; afecta los tejidos expuestos	>3
Beta-Metilamino-L-Alanina	Todos	-	Sinapsis nerviosa	-

Los efectos de estas toxinas son variados, dependiendo de su naturaleza química y los órganos que estas afectan. Las hepatotoxinas provocan en mamíferos el retraimiento de los hepatocitos y por lo tanto producen hemorragias hepáticas varias horas después de una exposición a dosis agudas, que puede conducir a la muerte por choque hipovolémico (Falconer, 1993). Los efectos biológicos de las neurotoxinas son variados, polarizando o

despolarizando las células nerviosas, evitando la correcta transmisión del impulso nervioso provocando finalmente la muerte por fallo cardiovascular o respiratorio. Las dermatotoxinas son normalmente alcaloides que producen dermatitis severa con el simple contacto cutáneo (Ressom y col. 1994).

Al ser un problema que frecuentemente ocurre en los cuerpos de agua utilizados para uso doméstico, recreativo e industrial, se ha vuelto un tema muy estudiado, sobre todo por el potencial tóxico que algunas cianobacterias y sus metabolitos representan. A pesar de esto se conoce cierta individualidad en cada florecimiento y se pueden subestimar sus consecuencias.

3.3.6 Métodos de detección de cianotoxinas

La existencia de un florecimiento se puede identificar de distintas maneras: en el lugar por la turbidez o la falta de transparencia en el cuerpo de agua, es decir, si presenta una tonalidad verdosa; la disminución en el oxígeno disponible; aumento en algunos nutrientes como fósforo o nitrógeno, la formación de una biopelícula en la superficie, muerte inexplicable de algunos seres vivos que habitan en el cuerpo de agua, entre otros. Una vez detectada la existencia, real o potencial de algún florecimiento, se pueden llevar a cabo técnicas tales como la identificación taxonómica de especies y géneros, el análisis cuantitativo mediante el uso de cámaras de Uthermöl o microscopios invertidos, análisis de clorofila *a* (Bonilla, 2009) e incluso hacer uso de técnicas de detección de cianotoxinas (Hart y col. 1998).

El enfoque de los estudios y la disponibilidad de los recursos necesarios serán factores clave en la elección de un método como los bioensayos con ratones y actualmente con especies de *Elodea* y *Daphnia* o mediante pruebas fisicoquímicas o moleculares (Carvajal, 2011).

Algunos métodos requieren que las células se lisen previamente para extraer la toxina intracelular por medio de congelación-descongelación, liofilización o sonicación (Lucena, 2008).

La amplificación de genes por medio de la reacción en cadena de polimerasa (PCR) permite identificar cepas tóxicas y no tóxicas. Por otro lado, están las pruebas que detectan las toxinas directamente, como ELISA y la inmunocromatografía, mientras que existen otras para la identificación y cuantificación de toxinas como la espectrofotometría de masas y la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), que son pruebas más costosas (Rivera-Barquero, 2008). Los métodos se explican a continuación:

- Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Es un método de cromatografía común donde se utiliza una columna para separar las toxinas mediante una fase estacionaria y una móvil. Una vez separadas se procede a la detección que puede ser mediante un detector foto diodo (PDA) que va a responder al espectro típico de la toxina. También se puede utilizar un espectrofotómetro de masas (Carvajal, 2011).
- Ensayo por inmunoadsorción ligado a enzimas (ELISA). Esta prueba es de alta sensibilidad y además existen kits comerciales especializados al tipo de toxina (Rivera-Barquero, 2008). Con fundamento en la inmunodetección donde los anticuerpos pueden reconocer específicamente cualquier estructura química. Los anticuerpos detectan el antígeno en una fase sólida coloreándolo y esto es medible por espectrofotometría (Ressom y col. 1994).
- Bioensayos. Son técnicas más laboriosas y evalúan la toxicidad *in vitro* en organismos vivos. El ensayo más tradicional es la inoculación intraperitoneal de los extractos de cianobacterias a ratones, posteriormente se dejan en observación por 24 horas. Después realiza un estudio *post mortem* (Rivera-Barquero, 2008).

3.3.7 Normatividad y calidad de agua (nacional e internacional)

Estos crecimientos desmedidos de cianobacterias aparte de su capacidad tóxica, tienen otras consecuencias que afectan a las variables de calidad del agua, como la modificación en el pH y la cantidad de oxígeno disuelto que conllevan a muchas otras alteraciones (Roset y col. 2001). Es por esto que en diferentes países, e incluso organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), han puesto cierta atención en estos florecimientos tóxicos y el daño a la salud que pueden causar y se han implementado ciertas variables en cuanto a las cantidades permitidas de toxinas en los cuerpos de agua dependiendo su uso, ya sea consumo, recreativo, de riego, entre otros. Incluso existen estudios no sólo sobre el daño que causan a la salud humana, sino también el daño ecológico y a otros grupos de animales que pueden afectar.

Para el agua de consumo existen ciertos rangos que se sugieren para evitar así riesgos a la salud. Debido a la poca información en torno a la toxicidad de las cianotoxinas, la OMS sólo ha implementado una guía para la regulación de una cianotoxina, microcistina-LR, para la cual se estableció un valor máximo de 1 µg/L. Esta cianotoxina es la variante más tóxica de las microcistinas (Newcombe, 2009). La OMS (1998) sólo adoptó valores guías provisionales para esta toxina en particular, ya que no existen estudios o evidencias suficientes que indiquen niveles dañinos estándares en otros tipos de cianotoxinas.

En otros países del mundo existen reglamentaciones en reservorios de agua acerca de otros tipos de cianotoxinas; por ejemplo, en Australia, Brasil o Canadá hay reglamentaciones en el agua de consumo y además de considerar a las microcistinas existen valores máximos en otras cianotoxinas como nodularinas, saxitoxinas y anatoxinas (Pérez y col. 2008). Sin embargo, en México existen pocos estudios y no existe un inventario de florecimientos de

cianobacterias de especies toxigénicas. Sin embargo, existen propuestas para incluir el valor guía de microcistina LR propuesto por la OMS (Galindo-Alcázar y col. 2012).

En E.U.A las cianobacterias y algunas cianotoxinas se encuentran en las listas de candidatos a contaminantes del agua de consumo (CCL) de la USEPA (USEPA, 2005). Los valores guía para el consumo y para el uso recreativo de los cuerpos de agua van de 100,000 células cianobacterianas/mL o 50 µg/L de clorofila *a* como valores máximos a 20,000 cianobacterias/mL o 10 µg/L de clorofila *a* como valores de alerta de un posible florecimiento (Chorus y Cavalieri, 2000). Existen casos particulares como el que se reportó en Oregon, donde ocurrió un incidente de intoxicación por cianotoxinas debido al consumo de suplementos alimenticios hechos a base de cianobacterias y debido a esto se estableció un valor reglamentario de 1 ppm de microcistina y además el gobierno propuso un método estandarizado para su detección (Metcalf y Codd, 2014).

En Francia sí se toman en cuenta los valores propuestos por la OMS. Incluso en Canadá y en Gran Bretaña se desarrollaron guías para la detección y la alerta de florecimientos (Backer, 2002). En Australia el valor guía es para microcistina LR de 1-1.3 µg/L (Chorus y Cavalieri, 2000).

A las cianobacterias, a pesar de ser muy estudiadas alrededor del mundo se les ha dado poca importancia en los países latinoamericanos y por lo tanto los reportes son escasos y el interés por la producción de toxinas y el riesgo sanitario es aún menor (Ramírez y col. 2004). Brasil tiene normativas más completas con respecto a los otros países latinoamericanos con valores obligatorios para microcistinas, saxitoxinas y cilindrospermopsinas en agua de consumo; también en Uruguay se han incluido los valores guía impuestos por la OMS en sus normativas (Bonilla, 2009).

En materia de acciones para el tratamiento de agua contaminada con cianotoxinas, se han realizado diversas pruebas de remoción tanto de microorganismos como de las toxinas que producen. Hart y col. (1998) probaron los distintos métodos convencionales en el tratamiento de aguas (floculación, coagulación, sedimentación y filtración) y llegaron a la conclusión de que el uso de estos tratamientos no son efectivos en la eliminación de las cianotoxinas disueltas, aunque algunos son efectivos en la remoción de células.

Los métodos que convencionalmente se emplean para la remoción de organismos algales como el permanganato de potasio y el sulfato de cobre pueden dañar las células y provocar su lisis aumentando los niveles de cianotoxinas (Lam y col. 1995). Rositano y col. (1998) investigaron la eficacia de la cloración, el peróxido de hidrógeno, el permanganato de potasio y el ozono para la degradación de microcistina-LR y encontraron que el ozono era el más efectivo, ya que removió el 99% de dicha toxina en 15 segundos. La combinación de ozono con peróxido de hidrogeno es aún más efectivo.

No obstante, mientras ciertas medidas han sido tomadas en algunos países, todavía no existen valores estrictamente regulados ni una metodología establecida para su estudio y medición y es claro que a nivel mundial falta mucho por hacer. Hasta el momento existen diversos estudios nacionales y guías extranjeras que permiten a México tomar conciencia acerca de los tres pasos a seguir para tener bajo control este tipo de problemáticas (Pica-Granados y Ramírez-Romero, 2012). El primero consiste en el monitoreo continuo y sistemático de las redes de abastecimiento y los cuerpos de agua, mismo que incluya un inventario acerca de la diversidad y distribución de las especies, este paso será como una medida preventiva y debe de incluir también métodos estandarizados de detección y tratamiento y este trabajo contribuye a dar este primer paso. El segundo paso consiste en la reglamentación con valores y métodos establecidos como es el caso de otros microorganismos. Por último, debe proporcionarse la información al público acerca de cómo

detectar en su fuente de agua cercana la presencia de cianobacterias y qué cuidados tener en caso de la sospecha de presencia de cianotoxinas (Metcalf y Codd, 2014).

3.3.8 Florecimientos y presencia de cianobacterias en México

En México, las cianobacterias se han abordado desde distintos aspectos como su composición química y sus estructuras. En la investigación realizada por DeMott y Mueller-Navarra (1997), compararon los ácidos grasos de una clorofita y una cianobacteria, usaron a *Synechococcus elongatus* y *Scenedesmus acutus*, concluyeron que las cianobacterias necesitan menos variedad y cantidad de ácidos grasos que las clorofitas. Berry y Lind (2010) se enfocaron en el estudio de la bioacumulación de cianotoxinas a lo largo de la red trófica en consecuencia de la proliferación de especies productoras de toxinas como *Cylindrospermopsis raciborskii* en el lago de Catemaco, Veracruz, principalmente en caracoles de la especie *Pomacea patula catamacensis*.

También se han realizado estudios basados en las aplicaciones comerciales de las cianobacterias. En México existen cultivos extensivos de *Spirulina* en Texcoco, los cuales fueron utilizados como suplemento alimenticio desde la época de los aztecas; se conoce que la primera producción comercial de cianobacterias en los tiempos modernos se originó en México (Durand-Chastel, 1980).

Muchos de los estudios en México se han enfocado en cuestiones evolutivas en sitios específicos como las salinas de Guerrero Negro en Baja California Sur y Cuatro Ciénegas en Coahuila (Stolz y Margulis, 1984; García-Pichel y col. 2002). Algunos otros han desarrollado aspectos taxonómicos acerca de la diversidad de cianobacterias de agua dulce y marinas (Tavera y Komárek, 1996; León-Tejera y Montejano, 2000). Principalmente Komárek y Komarkova-Legnerová (2002) hicieron una lista de las cianobacterias del centro de México, donde se registran más de 50 especies. También han sobresalido en algunos estudios

limnológicos sobre todo en lagos y embalses del país (Oliva y col. 2001; Ramírez-García y col. 2002).

Diversos lagos importantes en México han sido estudiados. En el lago de Pátzcuaro en Michoacán (Tomasini-Ortiz y col. 2012), durante un periodo de tres años, se determinaron las concentraciones de microcistina-LR, clorofila *a* y se cuantificaron cianobacterias, se encontró que el lago contiene niveles que representan un riesgo a la salud muy alta, según el límite de 1 µg/L impuesto por la OMS. Pineda-Mendoza y col. (2012) confirmaron la presencia de 17 cepas de cianobacterias filamentosas productoras de toxinas en los lagos urbanos de la Ciudad de México tales como el lago de Chapultepec, en la primera sección, los estanques en el parque ecológico de la Alameda Oriente y la pista de canotaje y remo “Virgilio Uribe” en Cuemanco.

A pesar de todas estas publicaciones, los datos indican que de los 17,500 artículos publicados acerca de cianobacterias, del 2000 al 2010, sólo 75 tienen como sitio de estudio a México, según una encuesta en la base de datos de la ASFA (Ciencias Acuáticas y Pesca, resúmenes), esto a pesar de ser un país con climas variados desde templados hasta tropicales y áridos (Pica-Granados y Ramírez-Romero, 2012). De los pocos trabajos publicados en México, es un número reducido el que se ha concentrado en los efectos ambientales de las cianobacterias y sus cianotoxinas y son muchos menos los referentes a los riesgos a la salud humana (Pica-Granados y Ramírez-Romero, 2012). Esto ocurre a pesar de que en México existen grandes problemas de eutrofización y contaminación de cuerpos de agua por detergentes y escorrentía agrícola (Galindo-Alcázar y col. 2012). Se han registrado en la literatura algunos florecimientos tóxicos en sistemas de abastecimiento humano muy importantes como en el Valle de Bravo en el Estado de México y en el lago de Chapala en Jalisco (Ramírez y col. 2004).

Según Bates (1997) las ventajas que conlleva el tener un programa de monitoreo y que puede ayudar a sentar las bases de una vigilancia más estricta de nuestros cuerpos de agua se pueden resumir de la siguiente manera:

- Provee información científica acerca del comienzo y declive de un florecimiento algal con una frecuencia de muestreo adecuada, así como los factores causantes pueden ser identificados y el desarrollo de modelos predictivos.
- Permite hacer una correlación entre la presencia de algas y microorganismos dañinos con las mediciones de las ficotoxinas o la mortalidad de otros organismos que habitan en los cuerpos de agua.
- Puede proveer de una advertencia temprana para que se puedan desarrollar programas de manejo preventivos a lo que se pueda esperar
- Identificación de nuevas especies de microorganismos tóxicos.
- Estructurar una base de datos acerca del fitoplancton que pueda usarse con propósitos científicos y también para la industria.

4. JUSTIFICACIÓN

Los ecosistemas acuáticos son tan complejos como los terrestres, ya que están constituidos por una red trófica. Su base está representada por pequeños microorganismos que se encuentran suspendidos en la columna de agua; estos pueden ser importantes como productores primarios y parte de los ciclos biogeoquímicos. También son relevantes en cuestiones del estado de los cuerpos de agua, cuyas implicaciones son ecológicas y sanitarias.

Cabe resaltar que existe poco conocimiento en este tema a nivel nacional y casi nulo a nivel estatal, a pesar de que la eutrofización de los cuerpos de agua es un problema creciente causado por factores antropogénicos que conllevan a un crecimiento desmedido de cianobacterias o algas nocivas, fenómeno conocido como florecimiento algal. Estos crecimientos en exceso traen graves consecuencias tanto al ecosistema, como a la salud humana y a la misma calidad de agua sea cual sea el uso que se le confiera. Son aún más preocupantes cuando existen especies potencialmente productoras de toxinas ya que los daños que pueden causar van de simples irritaciones en la piel que entra en contacto con ellas hasta graves intoxicaciones con efectos en órganos como el hígado o el sistema nervioso y en el peor caso causan la muerte.

Por esto, es necesario generar información y crear conciencia en relación a la identificación temprana de organismos que puedan representar un problema de índole sanitario además de conocer la diversidad existente en los cuerpos de agua del estado de Hidalgo donde existen actividades como pesca, acuacultura y actividades recreativas, además de las de consumo humano y riego agrícola.

En diversas regulaciones internacionales se han considerado a las cianobacterias como indicadores en distintos aspectos, como de calidad del agua, ya sea de consumo, de uso recreativo o industrial, entre otros. Por lo tanto, este trabajo aportará conocimientos básicos

sobre estos organismos de agua dulce, permitirá identificar organismos de las especies presentes en dos cuerpos de agua (Presa La Estanzuela y Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama) y si estas especies son importantes en cuestiones de calidad de agua, presentan implicaciones sanitarias o incluso dañinas, no sólo para el ser humano sino también para muchos otros seres vivos. Así mismo, se busca generar un catálogo que recopile a los taxones encontrados en estos cuerpos de agua y que sirva como registro para estudios posteriores.

5. OBJETIVO GENERAL

Identificar microorganismos de cuerpos de agua dulce con potencial de riesgo sanitario en la Presa La Estanzuela y en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama, Hidalgo.

6. OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar la calidad de agua en la Presa La Estanzuela y en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama, Hidalgo, mediante la determinación *in situ* de variables fisicoquímicas, medición fotométrica *ex situ*, así como la determinación de clorofila.
- Identificar morfológicamente y determinar las abundancias relativas, por medio de la observación al microscopio, los microorganismos presentes en las muestras fijadas de ambos cuerpos de agua para asignar el grupo taxonómico al que pertenecen y pronosticar su posible riesgo sanitario.
- Elaborar un catálogo fotográfico que contenga la descripción bibliográfica, clasificación, abundancia relativa, sitio y datos del muestreo de los microorganismos encontrados en ambos cuerpos de agua dulce.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Área de estudio

7.1.1 Presa La Estanzuela

La Presa La Estanzuela es un reservorio de agua construido con propósitos de almacenamiento (Fig. 2). Se encuentra en el municipio del Mineral del Chico, Hidalgo, dentro de la región hidrológica del Pánuco y en la región de Aguas del Valle de México. Se ubica en una latitud decimal de 20.1643888889 grados y una longitud decimal de -98.7577500000 grados, y su volumen útil es de 0.3500 Hm³. La vía de acceso a la Presa La Estanzuela es una carretera pequeña de nominada “A Camelia” que se encuentra al norte de la ciudad de Pachuca que se toma desde una colonia conocida como “Nueva Estrella 2da Sección”. Se sigue esta carretera hasta llegar al poblado La Estanzuela, donde se verá la presa (Fig.1). Parte del agua de esta presa es conducida a una planta de la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM), a la cual aporta cerca de 16 L/s para su potabilización, aunque también se usa para diversos fines por los pobladores que habitan los alrededores de la presa (Tovar-Escorza, 2007).

NOMBRE: LA ESTANZUELA.
UBICACIÓN: MINERAL DEL CHICO, HIDALGO.

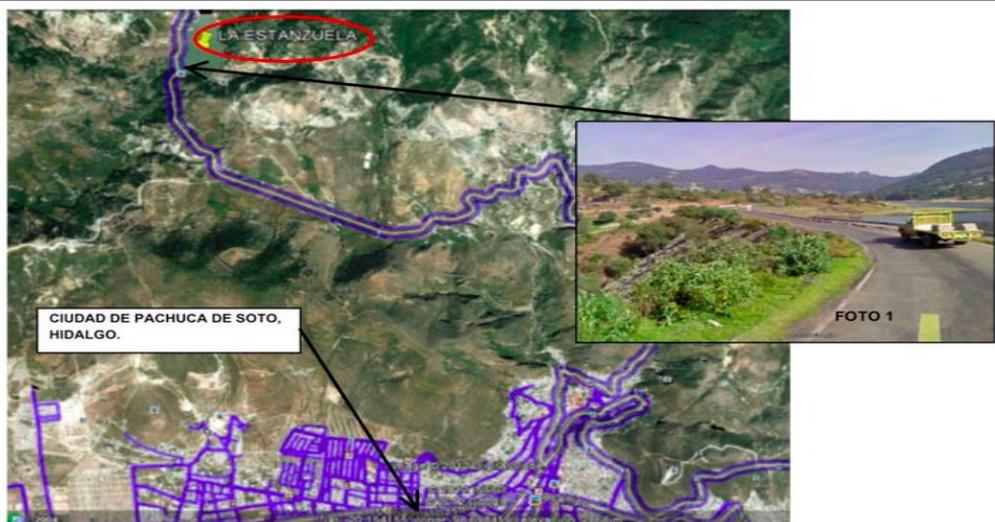


Figura 1. Vías de acceso a la Presa La Estanzuela desde la ciudad Pachuca de Soto, Hidalgo.

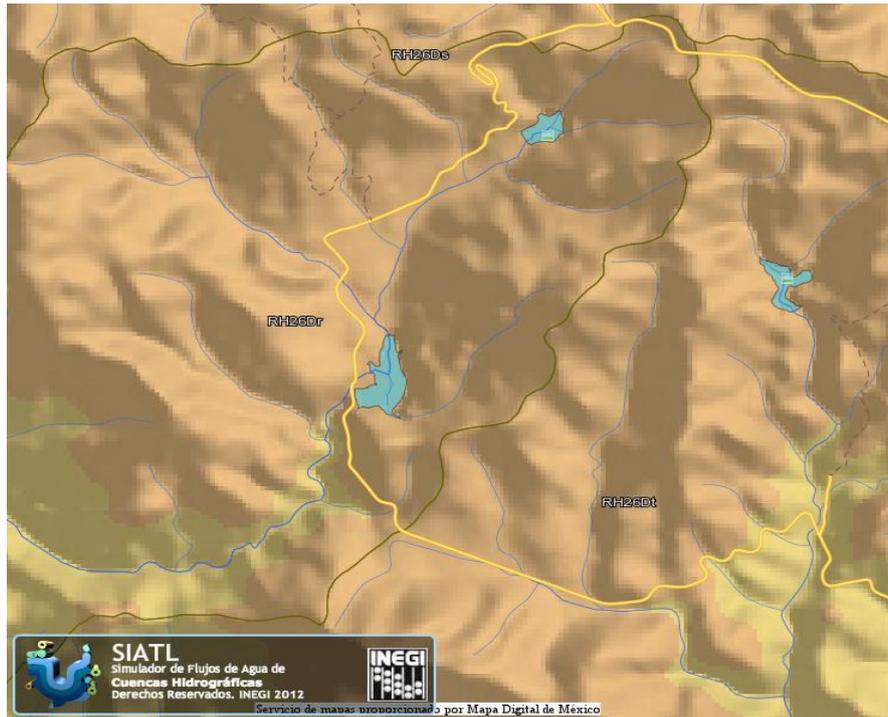


Figura 2. Imagen tomada de SIATL-INEGI de la extensión de la Presa La Estanzuela.

7.1.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama

También conocida como presa Zimapán, está ubicada en una longitud decimal de -98.7577500000 grados y una latitud decimal de 20.1643888889 grados, se encuentra en la parte central de México, en los límites de los estados de Hidalgo, municipio de Zimapán, y de Querétaro, municipios de Cadereyta y Tecozautla (Figura 3). Recibe los afluentes de los ríos San Juan (aguas residuales locales e industriales en el ramo textil, papelerero, químico y artesanal) y Tula (aguas residuales provenientes de la Ciudad de México y aguas de retorno agrícola del estado de Hidalgo) dentro de la región hidrológica del Pánuco. Tiene un volumen medio de 1460 Hm³ y presenta una profundidad media de 52.40 m. Su principal propósito es el almacenamiento y la generación de energía eléctrica; sin embargo, también se destina a otras actividades productivas como la pesca. En el año 2013 se reportó un total de 843 pescadores y 2000 redes. Su pesca se basa principalmente en especies de tilapia, carpa, lobina y bagre. La producción pesquera es de 300 toneladas por año, por lo que el rendimiento (130

Kg/Ha) es adecuado tomando en cuenta lo reciente de la pesquería. Sin embargo, la captura por pescador es baja, de aproximadamente 354 kg por pescador por año (Bravo-Inclán y col. 2012).



Figura 3. Mapa de la ubicación de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama y municipios aledaños. Tomada del catálogo de presas, Sistema de Seguridad de Presas de la CONAGUA.

7.2 Muestreo y medición de variables fisicoquímicas

En cada una de las áreas de estudio se realizaron tres muestreos. En Presa La Estanzuela se llevaron a cabo en los meses de febrero, marzo y abril de 2014 y en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama en los meses de agosto, septiembre y octubre de 2015.

7.2.1 Presa La Estanzuela

En cada muestreo se tomaron tres tipos de muestras. Para el primer tipo de muestra, utilizada en el análisis de calidad de agua, se emplearon contenedores de polipropileno con

capacidad de un litro que fueron previamente esterilizados, los cuales fueron llenados a tres cuartas partes de su capacidad para tomar una muestra puntual y representativa de la columna de agua (Fig. 4).

El segundo tipo de muestra fue recolectado para el estudio de la biodiversidad para lo cual se filtraron 10 L de agua en una red de arrastre cónica de fitoplancton con diámetro de poro de 53 μm y se colocaron en frascos estériles (Fig. 5) siguiendo la metodología de Rice y col. (2012). Para el análisis de clorofila se colectaron 500 mL en botes opacos (Arar y Collins, 1997).



Figura 4. Toma de muestras en botes de plástico esterilizados previamente (fotografía de la izquierda) y **Figura 5.** Proceso de la concentración de la muestra mediante la red cónica de fitoplancton de poro pequeño (fotografía de la derecha).

Mediante el medidor multiparamétrico Hanna modelo HI 9828 se realizaron mediciones *in situ* de las siguientes variables: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto en mg/L, conductividad en microSiemens/centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales en mg/L y salinidad en UPS (escala práctica de salinidad ampliada) (Infoagro, 2016).

Las muestras se transportaron en una hielera al laboratorio 9 del Centro de Investigaciones Químicas, UAEH, para su análisis dentro de las 24 horas inmediatas a su

colecta. Las muestras se observaron al microscopio fotónico Marca Motic SMZ-143, con un aumento de 100X para corroborar la presencia de cianobacterias.

7.2.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama

En esta presa se realizaron tres muestreos en los meses de agosto, septiembre y octubre. Las muestras se tomaron en tres puntos distintos del lado del municipio de Zimapán en el primer muestreo y otros tres puntos distintos del lado del municipio de Tecozautla para el segundo y tercer muestreo. Los puntos se seleccionaron de acuerdo con la metodología reportada por Bravo-Inclán y col. (2012) (Fig. 6). Además, se consideró la profundidad: 30 cm, 3 m y 5 m. En el primer muestreo se colectó en los siguientes puntos: El Epazote, Entrada de Río Tula y la Cortina. En el segundo y tercer muestreo se realizó en los siguientes puntos: Río San Juan, Las Ánimas y Los Limones.



Figura 6. Mapa de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama obtenido de SIATL-INEGI. Los indicadores rojos representan los seis puntos de muestreo en todo el embalse.

Para el análisis de calidad de agua, se tomó una muestra compuesta que consistió en mezclar un litro de cada una de las tres profundidades y una vez mezcladas se tomó un litro de la muestra compuesta para su posterior análisis en el laboratorio. Para el análisis de diversidad se trabajó con una botella de Van Dorn para colectar muestras a las profundidades anteriormente señaladas en cada uno de los puntos; del mismo modo esta muestra se concentró por medio de una red de fitoplancton. Por último, para el análisis de clorofila se tomó un litro de cada una de las tres profundidades antes mencionadas. Las variables fisicoquímicas fueron medidas *in situ* del mismo modo indicado anteriormente.

7.3 Variables de calidad de agua

Debido a que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), organismo regulador encargado de vigilar la calidad y uso del agua, no cuenta con información de los sitios, se realizó un análisis de la calidad del agua de 16 variables fisicoquímicas: sulfatos, cloro libre, cloro total, amonio, cromo, cobre, molibdeno, fosfatos, nitratos, nitritos, sílice, oxígeno disuelto, color del agua, manganeso y fósforo mediante un fotómetro multiparamétrico marca Hanna modelo HI 83206.

7.4 Análisis de clorofila

El análisis de clorofila se realizó mediante el método de Arar y Collins (1997). Se utilizaron filtros de fibra de vidrio GF-C 47 mm por los cuales se pasó un volumen de agua de 250 a 500 mL, dependiendo la saturación de la muestra, en un sistema de filtración al vacío (Fig. 9). La técnica recomienda que el filtro debe quedar totalmente seco. Posteriormente, el filtro se conservó en congelación envuelto en papel de aluminio para evitar la degradación de la clorofila por la luz y realizar su posterior extracción.

Para la extracción se utilizó acetona al 90% de la cual se agregaron 5 mL al filtro en un mortero para su maceración. La medición se llevó a cabo en un fluorímetro TURNER 10-AU-005 en el laboratorio de Algas Continentales, Ecología y Taxonomía de la UNAM.



Figura 7. Sistema de filtración y la membrana resultante del proceso que posteriormente se utilizará para medir la clorofila.

7.5 Aislamiento y cultivo de muestras

Para el aislamiento de las cianobacterias se utilizó el método recomendado por Andersen y Kawachi (2005) aplicado para microalgas. Se realizó la observación en el microscopio fotónico y con la ayuda de micropipetas estériles se capturó una célula previamente ubicada en el campo del microscopio (Fig. 7). Se buscó en el agua a algunos organismos con la morfología de las cianobacterias (por variada que resulte), en especial de los géneros de cianobacterias productoras de cianotoxinas. Las cianobacterias encontradas fueron pasadas varias veces a distintas gotas de medio estéril colocado en un portaobjetos y recapturadas en el microscopio, para así asegurar que quedaran completamente aisladas. Por último, cada una se colocó en un tubo de vidrio con tapón de rosca de 13x100 mm para su cultivo.

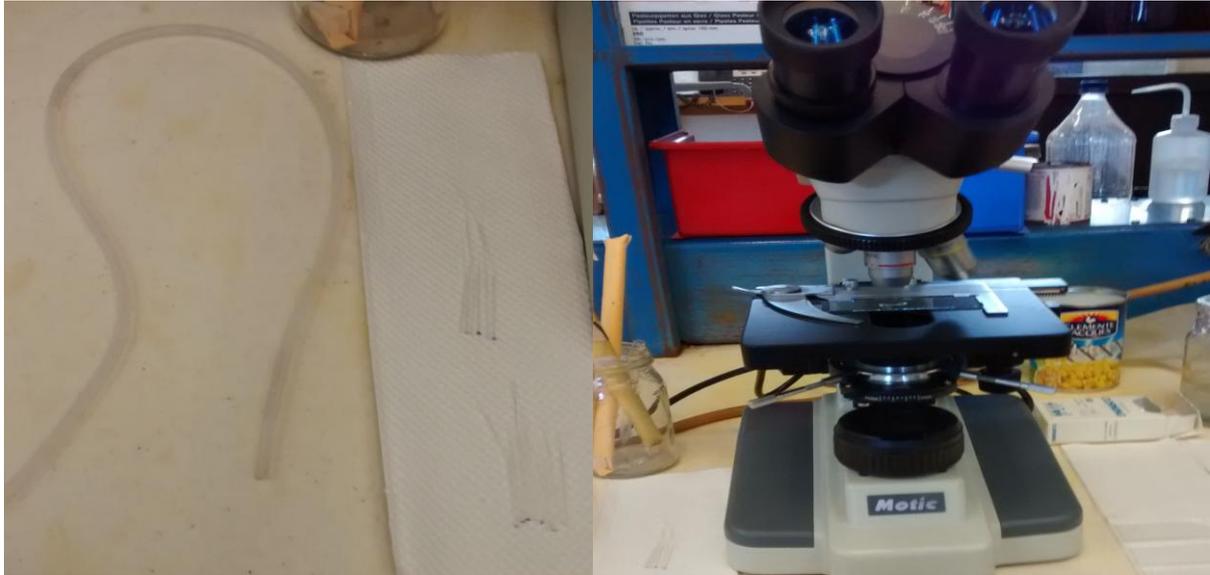


Figura 8. Micropipetas y microscopio fotónico marca Motic SMZ-143 utilizado para el aislamiento de las cianobacterias.

Se utilizó el medio líquido BG-11 50x marca SIGMA, recomendado para el cultivo de cianobacterias de agua dulce (Rippka y col. 1979; Boone y Castenholz, 2001). Se realizó la dilución 20 mL del medio con agua destilada para obtener una concentración 1x; posteriormente en tubos de ensaye se colocaron 4 mL del medio preparado en un ambiente completamente estéril.

Los tubos se incubaron a 26°C con iluminación proporcionada con focos de luz blanca de 40 watts a una distancia aproximada de 15 cm con periodos de 16/8, es decir, 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad siguiendo el procedimiento de Rippka y col. (1979) (Fig. 8). Así, se mantuvieron durante aproximadamente dos semanas hasta observar crecimiento, es decir la observación de turbidez del medio, acumulación de una película en la superficie de medio, presentación de color verdoso y en algunos casos con sedimentos.



Figura 9. Contenedor con los focos de luz fría y los tubos donde se pusieron a incubar las cepas.

7.6 Observación e identificación

Se fijaron muestras de agua en formol 3% para conservarlas y trabajar con ellas el tiempo necesario. Con el mismo material se realizaron preparaciones fijas utilizando gelatina glicerinada mismas que fueron selladas con barniz transparente. Dichas preparaciones se observaron con un microscopio con contraste diferencial de interferencias modelo Nikon Optiphot. De cada microorganismo que se encontró se tomaron fotografías, se realizaron esquemas, se midieron y se anotaron características.

La identificación de los ejemplares y su asignación taxonómica se realizó mediante el apoyo de claves y guías especializadas en cada grupo. Es importante comprobar las descripciones de las especies y no sólo comparar con dibujos en fotos y tener en cuenta la información ecológica, es decir, su distribución, hábitat o requerimientos. Se recomienda realizar dibujos y fotografías, mismas que son de utilidad como colección de referencia.

También, se determinó la abundancia relativa por campo visual estableciendo una escala que va de raro (1-10 organismos), frecuente (11-30 organismos), abundante (31-60 organismos) y muy abundante (61-100 organismos).

7.7 Catálogo de especies

Para elaborar el catálogo se incluyó una de las imágenes tomadas, la descripción bibliográfica resumida de varias fuentes, así como la clasificación. También se incluyó el sitio de donde fue tomada la muestra, la profundidad, el mes y la abundancia relativa, además un mapa con los puntos de muestreo de ambos cuerpos de agua.

8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Variables fisicoquímicas

8.1.1 Presa La Estanzuela

En el Cuadro 6 se reporta los valores obtenidos de las variables fisicoquímicas para los muestreos realizados. Los valores de pH y sólidos disueltos totales se encuentran dentro de los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos que debe someterse el agua para su potabilización”.

Cuadro 6. Variables fisicoquímicas medidos *in situ* en la Presa La Estanzuela.

Variable	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Clasificación según Xiao-e y col. (2008)	Clasificación según la CONAMA, Chile (2004)	Clasificación según la CONAMA, Brasil (2005)
Temperatura (°C)	12.58	14.23 ±0.007	19.21 ±0.021			
pH	7.56	7.36 ±0.056	7.99 ±0.035	6-9	6.5-8.5	6-9
Oxígeno disuelto (mg/L)	8.36	5.70 ±0.070	4.03 ±0.021	4-10 Clase I-II	5.5.-7.5 Clase I	>6 Clase I
Conductividad (µS/cm)	266	158.00 ±0	164.00 ±0		<600 Clase I	
Sólidos disueltos totales (mg/L)	133	79.00 ±0	82.00 ±0		<400 Clase I	<500 Clase I
Salinidad (UPS)	0.13	0.07 ±0	0.08 ±0			

La CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) de Chile (2004) y el CONAMA (Consejo Nacional de Medio Ambiente) de Brasil (2005) clasifican el agua como: Clase I Muy buena calidad; Clase II Buena calidad; Clase III Regular calidad y Clase IV Mala Calidad. Xiao-e y col. (2008) clasifican la calidad del agua en cinco clases siendo la Clase I la de mejor calidad y la Clase V la de menor calidad.

Lo más importante a resaltar entre todos los valores que varían es la considerable disminución en la cantidad de oxígeno disuelto cuyos valores son muy bajos (4.03 mg/L), casi

la mitad de lo registrado en el primer muestreo. El pH se mantuvo constante, en un valor cercano al neutro entre 7.36 y 7.99.

8.1.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama

A continuación, se presentan los datos de las variables fisicoquímicas obtenidos (Cuadros 7 y 8) en los distintos muestreos comparados también con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas de bienes nacionales.

Cuadro 7. Muestreo 1 en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama. Variables fisicoquímicas medidos *in situ*, comparados con datos de otras publicaciones.

Variable	El Epazote	Entrada Río Tula	Cortina	NOM-001	Clasificación de Xiao-e y col. (2008)	Clasificación según la CONAMA, Chile (2004)	Clasificación según la CONAMA, Brasil (2005)
Temperatura (°C)	24.49	24.38	24.51	40			
pH	7.73	8.3	8.59	-	6-9	6.5-8.5	6-9
Oxígeno disuelto (mg/L)	1.39	3.64	5.35	-	4-10 (Clase I-II)	<5.5 (Clase III)	<4 (Clase III)
Conductividad (µS/cm)	1336	1183	1480	-		<1500 (Clase II)	
SDT (mg/L)	668	591	740	125		500-100 (Clase II)	>500 (Case III)
Salinidad (UPS)	0.67	0.59	0.74	-			

La CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente), Chile (2004) y el CONAMA (Consejo Nacional de Medio Ambiente), Brasil (2005) clasifican el agua como: Clase I Muy buena calidad; Clase II Buena calidad; Clase III Regular calidad y Clase IV Mala Calidad. Xiao-e y col. (2008) clasifican la calidad del agua en cinco clases siendo la Clase I la de mejor calidad y la Clase V la de menor calidad.

Cuadro 8. Muestreo 2 y 3 en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama. Variables fisicoquímicas medidos *in situ*, comparados con datos de otras publicaciones.

Variable	Río San Juan		Las Ánimas		Los Limones		NOM-001	Clasificación de Xiao-e y col. (2008)	Clasificación según la CONAMA, Chile (2004)	Clasificación según la CONAMA, Brasil (2005)
Temperatura (°C)	25.77	25.51	26.28	23.96	25.72	23.98	40			
pH	8.14	9.38	9.42	9.84	9.08	9.64	-	6-9	6.5-8.5	6-9
Oxígeno Disuelto (mg/L)	8.42	2.55	7.12	5.41	5.86	5.53	-	4-10 (Clase I-II)	5.5 (Clase II)	>4 (Clase II)
Conductividad (µS/cm)	992	971	1272	1083	1385	1162	-		<1500 (Clase II)	
SDT (mg/L)	496	485	636	541	693	581	125		500-1000 (Clase II)	>500 (Case III)
Salinidad (UPS)	0.49	0.48	0.63	0.54	0.69	0.58	-			

La CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) de Chile (2004) y el CONAMA (Consejo Nacional de Medio Ambiente) de Brasil (2005) clasifican el agua como: Clase I Muy buena calidad; Clase II Buena calidad; Clase III Regular calidad y Clase IV Mala Calidad. Xiao-e y col. (2008) clasifican la calidad del agua en 5 clases siendo la Clase I la de mejor calidad y la Clase V la de menor calidad.

Las variables medidas *in situ* pueden proporcionar una idea de las condiciones ambientales encontradas en el área de estudio y a su vez pueden estar estrechamente ligadas a la variación del fitoplancton en el cuerpo de agua. Los factores fisicoquímicos como el pH, alcalinidad, conductividad, dureza del agua, entre otros, pueden determinar las especies o grupos que se establecen en el sistema acuático (Sipaúba-Tavares y col. 2010). Por ejemplo, factores como la temperatura son importantes a considerar ya que la variación de la misma corresponde a la cantidad de radiación solar, lo cual está ligado con la variación de especies del fitoplancton (Naselli-Flores, 2000).

Según el Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) de Brasil (Resolución No. 357, 2005) y la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) de Chile (CONAMA, 2004) existen cuatro clases en las que se pueden clasificar los cuerpos de agua:

- Clase I: Muy buena calidad de agua. Indica agua adecuada para la protección y conservación de las comunidades acuáticas.
- Clase II: Buena calidad. Agua adecuada para el desarrollo de la acuicultura, pesca deportiva y recreativa.
- Clase III: Calidad regular. Indica agua adecuada para bebida de animales y para riego restringido
- Clase IV: Mala calidad. No adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas. El agua de menor calidad y hasta riesgosa si se usa o consume.

Ambos organismos gubernamentales establecen valores máximos de cada clase para las siguientes variables fisicoquímicas: conductividad, oxígeno disuelto, pH y sólidos disueltos totales mismos que coinciden con las variables fisicoquímicas medidas en este estudio (Cuadros 7, 8 y 9). En general, la Presa La Estanzuela en la mayoría de las variables medidas e incluidas en estas normativas se encuentra clasificada entre las clases I y II. En cuanto a la Central Hidroeléctrica Ing.

Fernando Hiriart Balderrama se encuentra dentro de las clases III y IV con base en la mayoría de las variables medidas.

Temperatura

Las temperaturas del agua entre 20 y 30°C son las más favorecedoras para generar los crecimientos masivos del fitoplancton. El efecto de la temperatura es notable ya que se produce un aumento en la concentración de clorofila *a*, pues además del cambio en el tipo de especies dominantes, las densidades de fitoplancton se incrementan (Oliva y col. 2008). La Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama tiene las temperaturas más cercanas a las óptimas para generar los florecimientos algales. Por el contrario, en la Presa La Estanzuela se registraron temperaturas por debajo de las óptimas para estos crecimientos masivos, al ser un lugar de clima más frío.

En la investigación conducida en Brasil por Schmidt (1973) se demuestra una relación inversa entre el nivel de agua en el embalse y la concentración de clorofila *a*. Esto, aunado a otros estudios en Brasil (Fisher, 1978; Schmidt 1982, Brito y col. 2014) demuestran que existe mayor biomasa de fitoplancton en las temporadas de secas que en las temporadas de lluvias. Lo cual también se encontró en este trabajo ya que en los meses colectados en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama, según el Sistema Meteorológico Nacional y su Programa de Monitoreo de Sequia en México, Zimapán se encontraba en condiciones anormalmente secas, obteniendo resultados de concentraciones de clorofilas más altas que las encontradas en Presa La Estanzuela. En contraste, en las fechas de las colectas en la Presa La Estanzuela se reportaron condiciones de humedad normales, incluso con algunas lluvias que registraron hasta 24 mm de precipitación durante esos meses. Esto también se ve reflejado en las condiciones climatológicas de cada uno de los sitios, ya que mientras el municipio de Zimapán y alrededores cuentan con un clima seco a semi-seco en el municipio de Mineral del Chico se presenta un clima templado subhúmedo, por eso se observan temperaturas más bajas en la Presa La Estanzuela (SMN, 2016).

Oxígeno Disuelto

La concentración mínima de oxígeno disuelto especificado en el criterio nacional de calidad de agua de los E.E.U.U. por la Environmental Protection Agency (EPA) para las primeras etapas de la vida acuática es de 5 mg/L (USEPA, 1986). En el caso de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama se encontraron variaciones en el oxígeno disuelto, que llegan a ser menores a 5 mg/L, incluso característicos de anoxia, es decir, ausencia de oxígeno disuelto en el agua. La anoxia en el hipolimnion es común en cuerpos de agua eutrofizados y estratificados (USEPA, 1986). En el caso de Presa La Estanzuela sólo en el tercer muestreo los niveles de oxígeno disuelto fueron bajos, en los demás muestreos se registraron niveles normales de oxígeno disuelto. El crecimiento masivo de fitoplancton en un cuerpo de agua puede llevar a variaciones grandes en la cantidad de oxígeno disuelto, ya que en las primeras etapas del ciclo de crecimiento masivo de fitoplancton existe una sobre producción de oxígeno resultando en niveles altos, sin embargo, en las etapas finales, al empezar la muerte y degradación de toda esa materia orgánica, los niveles de oxígeno bajan y generan afectaciones en el sistema acuático (Ramírez y col. 2004)

pH

El pH también influye en la formación de las proliferaciones; se considera que los valores de pH neutros o básicos son los más propicios (Bwala y Omoregie, 2009). En la Presa La Estanzuela los valores de pH son bastante estables además de que son valores neutros. En la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama el pH se mantuvo estable en todos los puntos de muestreo, aunque la mayoría de los valores fueron altos, entre 7.73-9.84, lo que denota un grado de alcalinidad en el agua. Estos rangos se encuentran fuera o en el límite del rango óptimo para el desarrollo de actividades biológicas, cuyos valores oscilan entre 6 y 7 (Chia y col. 2011). De hecho, las cianobacterias son los únicos componentes del fitoplancton que desarrollan biomasa de manera importante en ambientes naturalmente alcalinos y salinos (Pizzolon, 1996). Una correlación positiva entre el pH y el fitoplancton se ha encontrado en estudios como el de Fernandes y col. (2009), que

muestran que el agua alcalina (8.0-9.5) favorece el crecimiento de cianobacterias. De acuerdo con estos autores la preferencia de las cianobacterias por ambientes de neutros a alcalinos es debido a su habilidad de usar el bicarbonato como una forma de asimilar el carbono inorgánico y su habilidad limitada para regular y mantener el pH interno en un valor neutral en ambientes ácidos. Lo que concuerda con los valores obtenidos en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama, donde se observó mayor cantidad de clorofila *a* y gran abundancia de cianobacterias del género *Microcystis*.

Conductividad

Existen estudios que demuestran que valores mayores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indican la eutrofización del ecosistema (Margalef, 1983; Tundisi y col. 2008, Gemelgo y col. 2009, Silva y col. 2011), dado el alto grado de descomposición de materia orgánica, con la cual se libera gran cantidad de iones en la columna de agua (Matsukazi y col. 2004). En ambos sitios de estudio se observan conductividades mayores a los 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica aguas eutróficas.

Profundidad

La disponibilidad de luz solar es importante para los componentes del fitoplancton, por lo que la posición y movimiento a lo largo de la columna de agua es un aspecto determinante de la diversidad encontrada. La mayor diversidad se encuentra en la superficie o a pocos centímetros de profundidad (Ramírez y col. 2004) como podemos observar en los resultados de este trabajo, con 17 de las especies encontradas en la muestra superficial o a 30 cm de profundidad.

Especies de los géneros *Monoraphidium* y *Microcystis* se consideran indicadores de la presencia de capas de agua mezcladas y someras (Reynolds y col. 2002). Otro numeroso grupo de géneros de fitoplancton son indicadores de condiciones de baja profundidad de la columna de agua y de elevadas concentraciones de nutrientes. Entre los más importantes se pueden mencionar a *Monoraphidium*, *Pandorina*, *Eudorina*, *Coelastrum*, *Golenkinia*, *Pediastrum*, *Scenedesmus* y *Cryptomonas* (Reynolds y col. 2002). En el caso de ambos cuerpos de agua estudiados en este

trabajo encontramos la presencia de *Microcystis* en gran abundancia lo cual indica aguas mezcladas y con altas cantidades de nutrientes. En el caso de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama también se encontraron microorganismos de los géneros *Coelastrum* y *Eudorina* aunque en menor abundancia. No podemos afirmar que las aguas de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama sean someras, ya que se trata de un embalse de muchos metros de profundidad pero las demás características sí pueden ser ligadas a la presencia de individuos de ciertas especies. Reynolds y col. (2002) abordan la caracterización de los ambientes de acuerdo al conjunto de ciertas especies, por lo cual la presencia individual no es determinante para esta caracterización, aunque nos puede dar algunos indicios.

Las especies más abundantes y la mayor diversidad de especies se encuentran en profundidades superficiales entre las muestras tomadas superficialmente en Presa La Estanzuela y los 30 cm a 3 metros en Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama, lo que concuerda con los requerimientos de luz solar que necesitan para llevar a cabo la fotosíntesis.

8.2 Variables de calidad de agua

8.2.1 Presa La Estanzuela

Los resultados obtenidos mediante el fotómetro se observan en la Cuadro 9 y así como su comparación con otros trabajos reportados. Se pueden observar valores altos en nitratos y fosfatos que son nutrientes importantes para las cianobacterias e indicadores de niveles de eutrofización.

Cuadro 9. Datos obtenidos del análisis de calidad de agua en el embalse de Presa La Estanzuela.

Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2	NOM-127	Bravo-Inclán y col. (2012)	Clases de Xiao-e y col. (2008)	Clases según la CONAMA Chile (2004)	Clases según el CONAMA Brasil (2005)
Sulfato mg /L	15	13	400	-		<150 (Clase I)	
Amonio MR (NH ₃ -N) (mg/L)	0.57	0.26	0.50	0.81	<0.15 Clase I	<1 (Clase I)	
Cloro libre (mg/L)	0.05	0.06	0.2-1.50	-	-		
Cloro total (mg/L)	0.09	0.09	-	-	-		<250 (Clase I)
Cromo VI RB (Cr ⁶⁺) (mg/L)	0.04	0	0.05	-		0.01-0.1 Clase II-	<0.05 (Clase III)
Cobre RB (Cu ²⁺) (mg/L)	0.426	0.214	2.00	-	-	0.2-1 (Clase III)	>0.5 (Clase IV)
Níquel RB (Ni) (mg/L)	0.224	0.042	-	-	-	<0.2 (Clase II)	>0.025 (Clase IV)
Nitrato (NO ₃ -N) (mg/L)	4.9	4.6	10.00	5.977			<10 (Clase III)
Nitrito RA (NO ₂ -N) (mg/L)	0.02	0.02	0.05	-	<0.06 Clase I	<0.06 (Clase I)	<1 (Clase I)
Oxígeno disuelto OD (mg/L)	8.7	5.9	-	-			
Fosfato RA (PO ₄ ³⁻) (mg/L)	7	5.3	-	-			
Sílice (SiO ₂) (mg/L)	2	0					
Molibdeno (Mo ⁶⁺) (mg/L)	0.7	0.1				0.15-0.5 (Clase III)	
Manganeso (mg/L)	0.13	0	0.15			0.05-0.2 (Clase II)	<0.1 (Clase I)
Color aparente (PCU)	26	12					
Color real (PCU)	43	17	20				

La CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) de Chile (2004) y el CONAMA (Consejo Nacional de Medio Ambiente) de Brasil (2005) clasifican el agua como: Clase I Muy buena calidad; Clase II Buena calidad; Clase III Regular calidad y Clase IV Mala Calidad. Xiao-e y col. (2008) clasifican la calidad del agua en cinco clases siendo la Clase I la de mejor calidad y la Clase V la de menor calidad. Bravo y col (2012) estudio realizado acerca de la calidad de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

Se puede observar que, de todos los valores reportados, el color real no se encuentra dentro de los límites reglamentados por la NOM-127-SSA1-1994, ya que sobrepasa por diez unidades. Los demás valores cumplen con los valores aceptados por la norma.

8.1.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama

Los datos obtenidos de calidad de agua del primer muestreo se muestran en el Cuadro 10 y del segundo y tercer muestreo en el Cuadro 11.

Cuadro 10. Datos del muestreo 1 obtenidos del análisis de calidad de agua en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

Parámetro	El Epazote	Entrada Rio Tula	Cortina	NOM-127	NOM-001	Bravo-Inclán y col. (2012)	Clases de Xiao y col. (2008)	Clases según la CONAMA Chile (2004)	Clases según el CONAMA Brasil (2005)
Sulfato (mg/L)	147	116	117	400		-		150-500 Clase II	
Amonio MR (NH ₃ -N) (mg/L)	2.58	1.74	1.35	0.50		0.81	<1.5 Clase IV	1.5-2.5 Clase III	
Cloro libre (mg/L)	0.10	0.07	0.05	0.2-1.50		-			
Cloro total (mg/L)	0.74	0.18	0.18	-		-			<250 (Clase I)
Cromo VI RB (Cr ⁶⁺) (mg/L)	0.031	0.064	0.011	0.05		-		0.01-0.1 (Clase II)	<0.05 (Clase III)
Cobre RB (Cu ²⁺) (mg/L)	0.238	0.12	0.059	2.00		-		0.2-1 (Clase III)	>0.05 (Clase IV)
Níquel RB (Ni) (mg/L)	0.454	1.86	0.398	-		-		>0.2 (Clase III)	
Nitrato (NO ₃ -N) (mg/L)	0	4.5	7.7	10.00	60	5.977			<5 (Clase I)
Nitrito RA (NO ₂ -N) (mg/L)	0	1	0	0.05		-	<1 (Clase IV)	>0.06 (Clase III)	<1 (Clase I)
Fosfato RA (PO ₄ ³⁻) (mg/L)	6.6	4	4.4	-	30	-			
Sílice (SiO ₂) (mg/L)	2	2	2	-		-			
Molibdeno (Mo ⁶⁺) (mg/L)	0.9	0.9	0.4					>0.5 (Clase IV)	
Manganeso (mg/L)	0.3	0.038	0.3	0.15				>0.2 (Clase III)	<0.5 (Clase III)
Color real (PCU)	65	27	19	20 PCU					

La CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) de Chile (2004) y el CONAMA (Consejo Nacional de Medio Ambiente) de Brasil (2005) clasifican el agua como: Clase I Muy buena calidad; Clase II Buena calidad; Clase III Regular calidad y Clase IV Mala Calidad. Xiao-e y col. (2008) clasifican la calidad del agua en cinco clases siendo la Clase I la de mejor calidad y la Clase V la de menor calidad. Bravo y col. (2012) estudio realizado acerca de la calidad de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

Cuadro 11. Datos de los muestreos 2 y 3 obtenidos del análisis de calidad de agua en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama

Variables	Rio San Juan		Las Animas		Los limones		NOM-127	NOM-001	Bravo-Inclán y col. (2012)	Clases de Xiao-e y col. (2008)	Clases según la CONAMA Chile (2004)	Clases según el CONAMA Brasil (2005)
	95	114	103	119	129	122						
Sulfato (mg /L)	95	114	103	119	129	122	400				120-150 (Clase I)	
Amonio MR (NH ₃ -N) (mg/L)	2.59	0.65	2.12	0.52	2.38	0.71	0.50		0.81	<1.5 (Clase IV)	1.5-2.5 (Clase III)	
Cloro libre (mg/L)	0.15	-	0.19	-	0.26	-	0.2-1.50		-	-		
Cloro total (mg/L)	0.12	0.13	0.19	0.20	0.41	0.09	-		-	-		<250 (Clase I)
Cromo VI RB (Cr ⁶⁺) (mg/L)	0.024	0.001	0.061	0.005	0.006	0.004	0.05		-	-	0.01- 0.1 (Clase II)	<0.05 (Clase III)
Cobre RB (Cu ²⁺) (mg/L)	0.14	0.16	0.43	0.12	1.56	0.11	2.00 mg/L		-	-	<200 (Clase II)	>0.013 (Clase IV)
Níquel RB (Ni) (mg/L)	0	0.09	0.08	0.64	0.09	0.59	-		-	-	<52 (Clase I)	
Nitrato (NO ₃ -N) (mg/L)	0	2	2	0	2.8	30	10.00	60	5.977	-		<5 (Clase I)
Nitrito RA (NO ₂ -N) (mg/L)	2	3	1	3	1	0	0.05			<1 (Clase IV)	>0.06 (Clase IV)	>1 (Clase IV)
Fosfato RA (PO ₄ ³⁻) (mg/L)	6.3	5.6	4.4	5	5	5.4	-	30	-	-		
Sílice (SiO ₂) (mg/L)	2	2	2	2	2	2	-		-	-		
Molibdeno (Mo ⁶⁺) (mg/L)	0	0.9	0	0	0	0.2	-		-	-	<0.008 (Clase I)	
Manganeso (mg/L)	0.011	0.3	0.085	0.3	0.014	0.3	0.15		-	-	<0.04 (Clase I)	<0.5 (Clase III)
Color real (PCU)	33	24	36	28	31	28	20 PCU		-	-		

La CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) de Chile (2004) y el CONAMA (Consejo Nacional de Medio Ambiente) de Brasil (2005) clasifican el agua como: Clase I Muy buena calidad; Clase II Buena calidad; Clase III Regular calidad y Clase IV Mala Calidad. Xiao-e y col. clasifican la calidad del agua en cinco clases siendo la Clase I la de mejor calidad y la Clase V la de menor calidad. Bravo y col. estudio realizado acerca de la calidad de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

Nitritos y Nitratos

Al contrastar los resultados con otras normativas, especialmente de países donde se han suscitado incidentes de intoxicaciones con cianotoxinas como en Brasil (Ramírez y col. 2004), podemos observar que en cuanto a la cantidad de nutrientes. la clasificación de los cuerpos de agua varía. Así, algunas variables permiten clasificar el cuerpo como Clase I, lo que quiere decir que es un cuerpo con agua de muy buena calidad, pero otras variables como los nitritos y nitratos son más altas y sobrepasan los valores impuestos para las clases I y II.

En el caso de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama los valores de nitritos son tan altos que se puede clasificar dentro de las Clases III y IV según Xiao-e y col. (2008), CONAMA Chile (2004) y CONAMA Brasil (2005). A la Presa La Estanzuela en su mayoría los valores lo clasifican como un cuerpo de agua Clase I, aunque también algunos valores son elevados como es el caso del cobre y el molibdeno. En especial los valores de nitritos y nitratos pueden verse aumentados por actividades de pesca, industria textil y de invernaderos que se llevan a cabo en los alrededores (Valdiviezo, com. Pers.).

En general, los valores encontrados en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama son cercanos a los obtenidos por Bravo-Inclán y col. (2012), pero en la mayoría de los casos más altos que los reportados en ese trabajo correspondiente al año 2012, lo cual puede indicar un incremento reciente en los niveles de contaminación en dicho embalse. Por otra en la Presa La Estanzuela los niveles de nitritos menores a 0.06 mg/L y oxígeno disuelto entre 4-10, así como el pH comprendido entre 6 y 9 se encuentran dentro de las clases I y II según lo establecido por Xiao-e y col. (2008), por lo que se clasifica como un cuerpo de agua oligotrófico.

Amonio

En el caso del amonio, en ambos casos se puede observar que los valores obtenidos superan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994. Esto es preocupante en

el caso de Presa La Estanzuela ya que se esperaban por debajo de los límites máximos permisibles al ser agua de consumo humano. Comparado con el estudio de Xiao-e y col. (2008) los resultados de la calidad en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama de amonio le otorgan una clasificación de embalse Clase IV; esto quiere decir que son valores altos de amonio, aunque esto era de esperarse al recibir agua de afluentes muy contaminados y al no ocuparse como agua de consumo humano.

Oliva y col. (2001) relacionan la presencia de *Microcystis* con valores de amonio menores a 1 mg/L; en este estudio podemos observar que la abundancia o presencia de *Microcystis* con sus diferentes especies no se encuentra limitada por la cantidad de amonio, al ser una de la especie más abundante en ambos cuerpos agua.

Fosfatos

Los valores de fosfato superan los 0.025 mg/L en ambos cuerpos de agua estudiados en este trabajo, lo que nos habla de altas concentraciones. Esta alta disponibilidad de fosfato puede llevar al crecimiento masivo de fitoplancton en ambos embalses, lo cual se manifiesta en las altas concentraciones de clorofila registradas. El fósforo es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, sin embargo, cuando las concentraciones exceden los 0.025 mg/L los cuerpos de agua pueden experimentar el exceso en el crecimiento de algas y plantas acuáticas y, por lo tanto, aumentar la productividad del cuerpo de agua, conocida como eutrofización. En el agua, el ortofosfato disuelto es parte del fósforo total que se encuentra más fácilmente disponible para ser consumido por algas (U. S. Environmental Protection Agency, 1986). Según Xiao-e y col. señalan que valores de nitrógeno mayores a 0.3 mg/L y 0.02 µg/L de fosfato podrían indicar que se trata de un cuerpo de agua eutrófico.

Metales y otros elementos

La distribución del fitoplancton puede estar controlada por diversos factores biológicos, físicos y químicos (Chia y col. 2011). El crecimiento del fitoplancton depende no sólo de la cantidad de macronutrientes esenciales proporcionados en el agua sino también algunos micronutrientes que limitan este crecimiento (Sunda y col. 2001). Entre estos micronutrientes podemos mencionar al hierro, cobre, molibdeno, manganeso, zinc, entre otros (Chia y col. 2011). Especies como *Stichococcus bacillaris*, *Staurastrum rotula* y *Spaeroplea* sp. tienen una relación positiva con los niveles de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el manganeso y el molibdeno. Incluso estas especies son sensibles a las variaciones en las concentraciones de fosfato y a la alcalinidad (Chia y col. 2011). En el presente estudio se puede observar que en los puntos y meses donde *Staurastrum* se presentó con más frecuencia los valores de manganeso y molibdeno fueron relativamente altos.

Con respecto a los metales, hay trabajos como los de Paerl (2008) y el de Willame y col. (2008), quienes hacen asociaciones con el cobre y el hierro respectivamente, sin embargo, la literatura científica carece de estudios en esta área.

8.3 Análisis de clorofila

El valor de clorofila para Presa La Estanzuela fue de 508 µg/L, mientras que para la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama los valores se presentan en las Cuadros 12 y 13.

Cuadro 12. Valores de clorofila del primer muestreo en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

Lugar	Profundidad	Clorofila $\mu\text{g/L}$
Epazote	30 cm	215.5
	3 m	220
	5 m	196
Río Tula	30 cm	219.5
	3 m	195.5
	5 m	162
Cortina	30 cm	120
	3 m	188
	5 m	176

Cuadro 13. Valores de clorofila del segundo y tercer muestreo en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

Lugar	Profundidad	Clorofila $\mu\text{g/L}$	
Río San Juan	30 cm	201.5	252
	3 m	2368	373
	5 m	2508	663
Las Ánimas	30 cm	370	882
	3 m	1288	944
	5 m	1602	1244
Los Limones	30 cm	851	923
	3 m	858	1860
	5 m	530	1160

Referente a los niveles de clorofila *a* existen opiniones variadas acerca de los valores y lo que indican. Para Rodgers (2008), en un lago eutrófico las concentraciones de clorofila pueden incluso alcanzar 300 $\mu\text{g/L}$. De Hoyos y col. (2008) consideran que existe un florecimiento cuando las concentraciones celulares son del orden de 20,000 células/mL que corresponde a 10 $\mu\text{g/L}$ de

clorofila. También Steffen y col. (2014) reportan que un cuerpo eutrófico supera los valores de 25 $\mu\text{g/L}$.

Según la USEPA (2005) y su clasificación de estado trófico de los cuerpos de agua, los valores de clorofila mayores a 155 $\mu\text{g/L}$ y de fosfatos mayores a 0.38 mg/L indican que ambos cuerpos de agua presentan un estado eutrófico e incluso se pueden considerar como hipereutrófico.

En ambos cuerpos de agua de este estudio se presentan valores mayores a 100 $\mu\text{g/L}$ lo que indica gran cantidad de biomasa fotosintética presente en el agua.

8.4 Aislamiento y cultivo de muestras

De las preparaciones observadas se pudo identificar la presencia de *Microcystis* en las muestras de agua de la Presa La Estanzuela (Fig. 10).

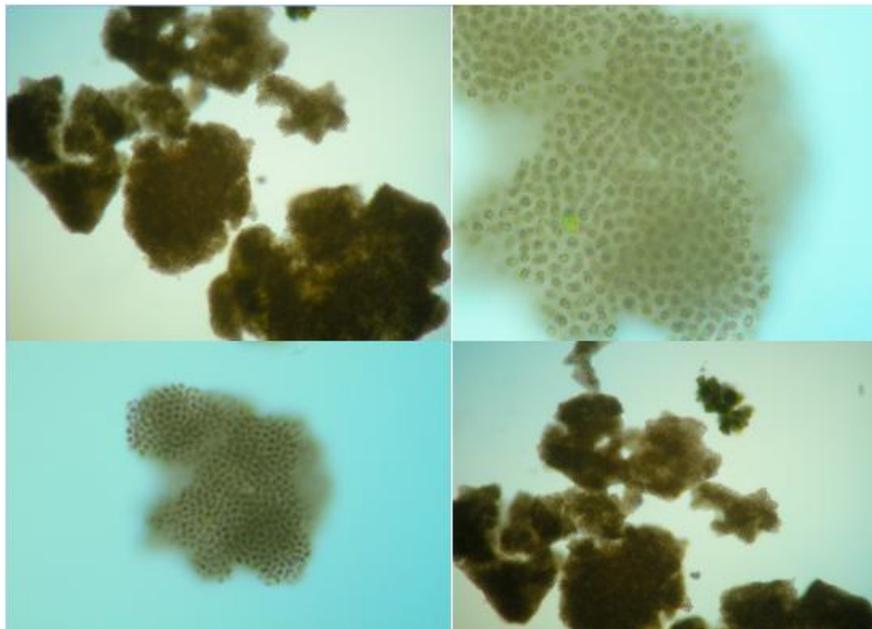


Figura 10. Fotografías de *Microcystis* en las muestras de agua de Presa La Estanzuela.

En el primer muestreo se aislaron cuatro cepas que se mantuvieron en las condiciones de crecimiento antes mencionadas. Para el segundo muestreo se aislaron diez cepas, pero al modificarse las condiciones de incubación no se mostró crecimiento. Por esta razón, se decidió resembrar las cepas del primer muestreo. Se resembraron, por duplicado, tres de ellas que

presentaban mejor crecimiento (Fig. 11), quedando seis cepas resembradas. En el último muestreo se aislaron diez cepas de las cuales todas presentaron crecimiento, excepto un tubo que se contaminó. En total se contó con 15 cepas que mostraron un buen crecimiento.

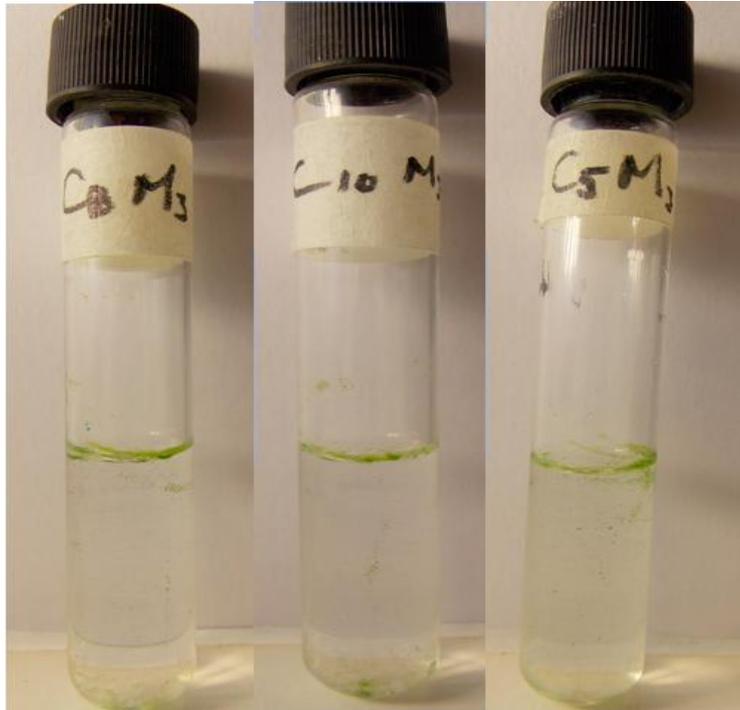


Figura 11. Ejemplos de tres cepas durante su aislamiento y cultivo.

De todos los cultivos aislados no se logró obtener una cepa pura, ni lograron crecer lo suficiente por lo cual no se pudo llevar a cabo la identificación de los organismos que ahí crecieron y no se continuó trabajando con los cultivos aislados.

8.5 Diversidad y abundancia de especies

8.5.1 Presa La Estanzuela

En Presa La Estanzuela se encontraron un total de nueve especies, pertenecientes a cinco grupos taxonómicos. La proporción del número de especies por cada grupo está representada en la siguiente gráfica

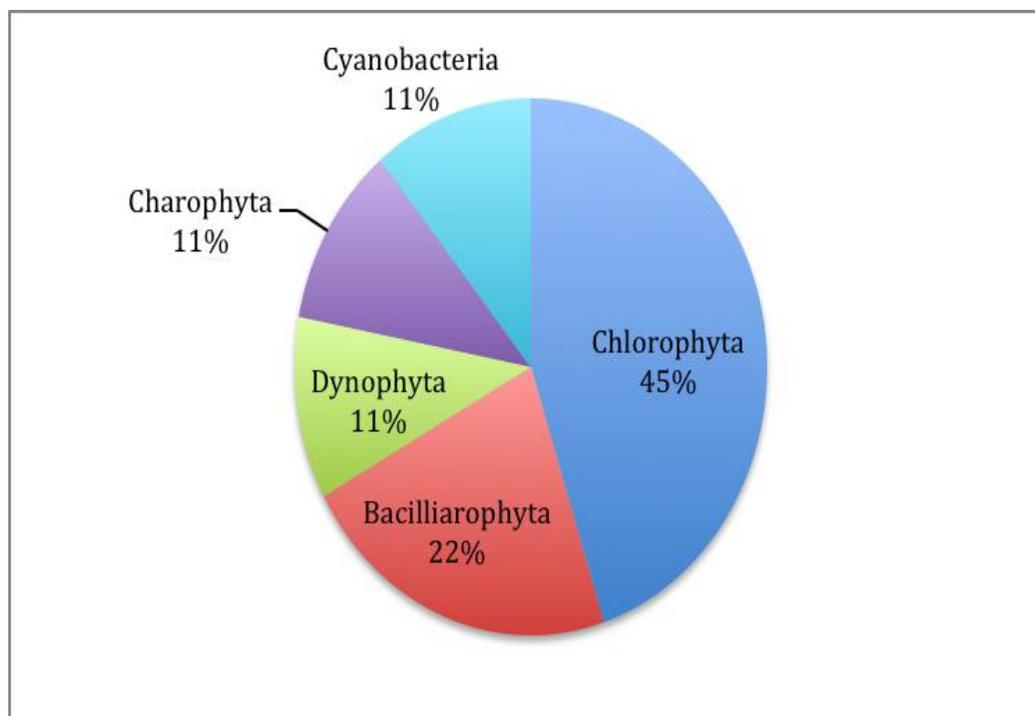


Figura 12. Representación gráfica del porcentaje de cada especie encontrada por grupo taxonómico en la Presa La Estanzuela.

8.5.2 Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama

Se encontraron un total de doce especies pertenecientes a cuatro grupos taxonómicos. Se presenta la siguiente gráfica con la distribución de la diversidad de especies en estos cuatro grupos:

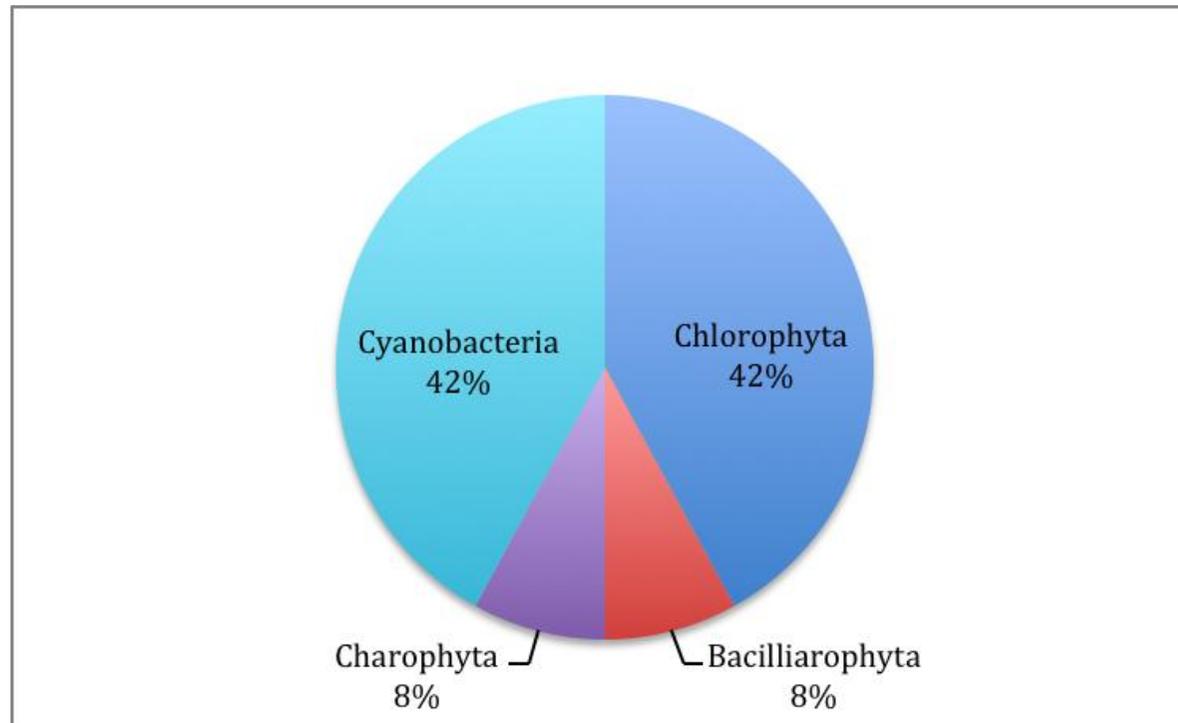


Figura 13. Representación gráfica del porcentaje de cada especie encontrada por grupo taxonómico en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama.

A continuación, se resume la clasificación, lugares de registro, meses de colecta y profundidad (Cuadro 14) a la que fueron aislados los microorganismos de las diferentes especies en ambos sitios de estudio.

Cuadro 14. Datos de aislamiento de las especies encontradas en ambos cuerpos de agua.

Especie	Clasificación	Lugares de registro	Meses que se registró	Profundidades en las que se registró
<i>Cymbella mexicana</i>	Dominio Eucarya Reino Chromista Phylum Bacillariophyta Clase Bacillariophyceae Orden Cymbellales Familia Cymbellaceae	Cortina (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Agosto	30 cm
<i>Fragilaria crotonensis</i>	Dominio Eucarya Reino Chromista Phylum Bacillariophyta Clase Bacillariophyceae Orden Fragilariales Familia Fragilariaceae	Presa La Estanzuela	Marzo	Superficial
<i>Asterionella formosa</i>	Dominio Eucarya Reino Chromista Phylum Bacillariophyta Clase Bacillariophyceae Orden Tabellariales Familia Tabellariaceae	Presa La Estanzuela	Marzo	Superficial
<i>Staurastrum gracile</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Charophyta Clase Conjugatophyceae (Zygnematophyceae) Orden Desmidiiales Familia Desmidiaceae	Epazote, Cortina, Río San Juan (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama) y Presa La Estanzuela	Febrero Marzo Abril Agosto Octubre	Superficial, 30 cm, 3m.
<i>Eudorina elegans</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Clase Chlorophyceae Orden Chlamydomonadales Familia Volvocaceae	Presa La Estanzuela	Febrero Marzo	Superficial
<i>Planctococcus sphaerocystiformis</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Clase Chlorophyceae	Presa La Estanzuela	Marzo Abril	Superficial

Espece	Clasificación	Lugares de registro	Meses que se registró	Profundidades en las que se registró
	Orden Chlamydomonadales Familia Sphaerocystidaceae			
<i>Coenochloris hindakii</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Clase Chlorophyceae Orden Sphaeropleales Familia Radiococcaceae	Epazote, Río Tula, Cortina, Los Limones, Río San Juan (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Agosto Septiembre Octubre	30 cm, 3m y 5m
<i>Coenochloris piscinalis</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Clase Chlorophyceae Orden Sphaeropleales Familia Radiococcaceae	Río Tula y Cortina (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Agosto	30 cm, 3m y 5 m,
<i>Coelastrum microporum</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Subphylum Chlorophytina Clase Chlorophyceae Orden Sphaeropleales Familia Scenedesmaceae	Epazote, Río Tula, Los Limones, Río San Juan (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Agosto Septiembre	30 cm, 3m y 5 m.
<i>Oocystis lacustris</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Clase Trebouxiophyceae Orden Chlorellales Familia Oocystaceae	Las Animas, Los Limones, Río San Juan (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Septiembre Octubre	30 cm, 3m y 5 m.
<i>Oocystis marssonii</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Clase Trebouxiophyceae Orden Chlorellales Familia Oocystaceae	Presa La Estanzuela	Marzo	Superficial
<i>Botryococcus protuberans</i>	Dominio Eucarya Reino Plantae Subreino Viridiplantae Phylum Chlorophyta Clase Trebouxiophyceae Orden Trebouxiales Familia Botryococcaceae	Río San Juan y Presa La Estanzuela	Febrero Septiembre	Superficial y 30 cm.
<i>Ceratium hirundinella</i>	Dominio Eucarya Reino Chromista Phylum Miozoa	Presa La Estanzuela	Marzo	Superficial

Especie	Clasificación	Lugares de registro	Meses que se registró	Profundidades en las que se registró
	Subphylum Myzozoa Infraphylum Dinozoa Superclase Dinoflagellata Clase Dinophyceae Orden Gonyaulacales Familia Ceratiaceae			
<i>Planktothrix compressa</i>	Dominio Bacteria Reino Eubacteria Subreino Negibacteria Phylum Cyanobacteria Clase Cyanophyceae Orden Oscillatoriales Familia Microcoleaceae	Río San Juan (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Septiembre Octubre	3m y 5 m.
<i>Microcystis ichthyoblabe</i>	Dominio Bacteria Reino Eubacteria Subreino Negibacteria Phylum Cyanobacteria Clase Cyanophyceae Orden Chroococcales Familia Microcystaceae	Río Tula, Los Limones, Cortina, Las Ánimas (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Agosto Septiembre Octubre	30 cm, 3m y 5 m.
<i>Microcystis novacekii</i>	Dominio Bacteria Reino Eubacteria Subreino Negibacteria Phylum Cyanobacteria Clase Cyanophyceae Orden Chroococcales Familia Microcystaceae	Epazote, Los Limones, Río San Juan, Las Ánimas (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Agosto Septiembre Octubre	30 cm, 3m y 5 m.
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Dominio Bacteria Reino Eubacteria Subreino Negibacteria Phylum Cyanobacteria Clase Cyanophyceae Orden Chroococcales Familia Microcystaceae	Cortina, Los Limones, Río San Juan, Las Ánimas (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama) y Presa La Estanzuela	Febrero Marzo Abril Agosto Septiembre Octubre	Superficial, 30 cm, 3m y 5 m.
<i>Microcystis wesenbergii</i>	Dominio Bacteria Reino Eubacteria Subreino Negibacteria Phylum Cyanobacteria Clase Cyanophyceae Orden Chroococcales Familia Microcystaceae	Los Limones, Río San Juan, Las Ánimas (Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama)	Agosto Septiembre Octubre	30 cm, 3m y 5 m.

En cuanto a la diversidad, Mazzeo y col. (2002) consideran que en las aguas oligotróficas dominan clorofitas pequeñas y fitoflagelados, mientras que en los sistemas eutróficos e hipereutróficos se presentan monocultivos de grandes cianobacterias coloniales. Las etapas intermedias (mesotrofia) registran un mayor desarrollo de diatomeas. Esto es consistente con la diversidad encontrada en Presa La Estanzuela y el grado de nutrientes resultantes del análisis de calidad de agua, ya que se encontró más diversidad de clorofitas y de diatomeas, aunque las especies más abundantes fueron *Microcystis* y *Staurastrum*.

En el caso de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama la mayor diversidad está entre las clorofitas y las cianobacterias por el número de especies, aunque en abundancia podemos decir que varía dependiendo del mes de muestreo, ya que al principio fueron más abundantes las clorofitas y al final las más abundantes fueron las cianobacterias. Lo anterior indica que probablemente había condiciones de eutrofia en ese cuerpo de agua, consistente con los datos tomados acerca de calidad de agua.

La presencia de *Microcystis* en los embalses así como el análisis de la comunidad fitoplanctónica de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama fue similar a lo reportado por Bravo-Inclán y col. (2012). Dichos autores detectaron florecimientos de cianobacterias que son identificadas como potencialmente generadoras de toxinas (microcistinas, anatoxinas, entre otras). En este trabajo los géneros identificados fueron *Microcystis* y *Planktothrix*; estos géneros producen toxinas que pueden ser bioacumuladas en los organismos acuáticos y dañar, por ejemplo, el hepatopáncreas de los peces y mamíferos (Chorus, 1999).

Cuando los lagos se tornan eutróficos, la diversidad del fitoplancton disminuye, lo que conduce a que las cianobacterias sean las especies dominantes (Ramírez y col. 2004). En la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama se observó esta tendencia a pesar de los pocos meses de estudio; es decir, la diversidad de otros grupos disminuye mientras que la abundancia de cianobacterias aumenta. Esto es contrario a lo encontrado en Presa La Estanzuela, en donde se

mantuvo la misma diversidad de organismos y la abundancia siempre se vio dominada por las dos mismas especies: *Staurastrum* y *Microcystis*.

Microcystis produce microcistinas, las cuales son siempre toxigénicas (Rosas y col. 2004). De acuerdo con Rivera-Barquero (2008), existen aproximadamente 70 variantes de microcistinas, y una misma cepa puede producir más de una variante, lo cual la hace difícil de detectar y aún más peligrosa.

El estudio integral del fitoplancton nocivo ha cobrado gran interés debido al impacto que llegan a ocasionar en la salud pública, en los ecosistemas acuáticos, la pesca, la acuicultura y el turismo, ya que ponen en riesgo la salud pública en caso de que se trate de un sistema de distribución de aguas, la calidad de los productos pesqueros y los centros de recreación y turismo. El riesgo difícilmente podrá erradicarse, ya que los florecimientos son procesos naturales y no se conocen aún medios para prevenir o eliminar estos fenómenos (Roset y col. 2001). alguna de las pocas acciones que se pueden hacer en estos casos es tener un conocimiento más completo de cómo está compuesto el ecosistema acuático, tanto en factores bióticos como abióticos.

La importancia de estudiar estos organismos radica en conocer cuáles microorganismos producen toxinas y su impacto negativo. Además, es necesario evaluar estos microorganismos y conocer cómo se desarrollan y bajo qué condiciones ambientales, dado que algunas variables de la calidad del agua son similares y se puede denominar como patrón. Se busca encontrar precisamente estos patrones en las comunidades fitoplanctónicas y en los ambientes en los que se desenvuelven y de esta manera establecer con tiempo las medidas preventivas y adecuadas para evitar una sobrepoblación (Olenina y col. 2006).

8.6 Catálogo de especies

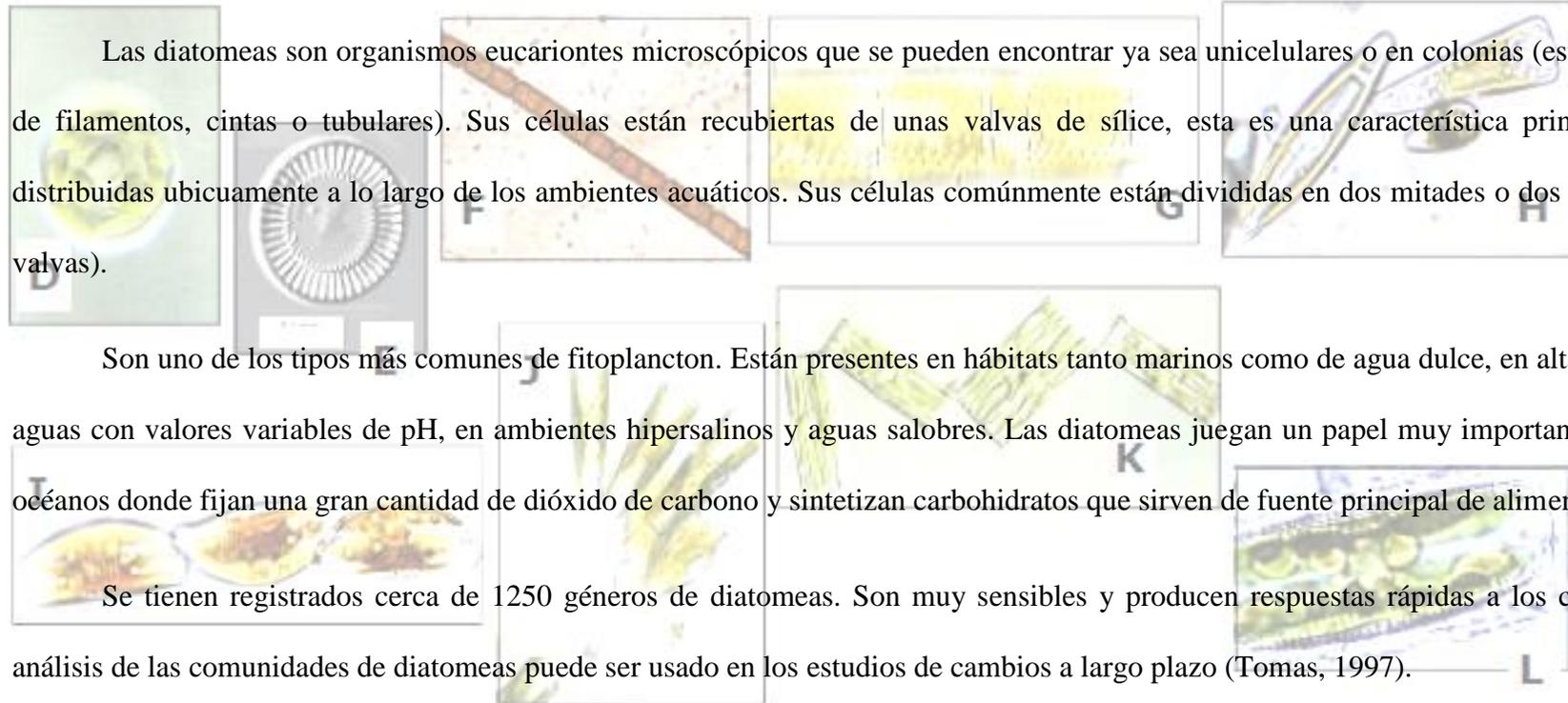
A continuación, se presentan las fichas descriptivas de cada especie encontrada en los dos sitios de estudio.

8.6.1 Phylum Bacillariophyta

Las diatomeas son organismos eucariontes microscópicos que se pueden encontrar ya sea unicelulares o en colonias (estas pueden ser en forma de filamentos, cintas o tubulares). Sus células están recubiertas de unas valvas de sílice, esta es una característica principal del grupo. Están distribuidas ubicuamente a lo largo de los ambientes acuáticos. Sus células comúnmente están divididas en dos mitades o dos partes (conocidas como valvas).

Son uno de los tipos más comunes de fitoplancton. Están presentes en hábitats tanto marinos como de agua dulce, en altas o bajas temperaturas, aguas con valores variables de pH, en ambientes hipersalinos y aguas salobres. Las diatomeas juegan un papel muy importante especialmente en los océanos donde fijan una gran cantidad de dióxido de carbono y sintetizan carbohidratos que sirven de fuente principal de alimento del zooplancton.

Se tienen registrados cerca de 1250 géneros de diatomeas. Son muy sensibles y producen respuestas rápidas a los cambios ambientales, el análisis de las comunidades de diatomeas puede ser usado en los estudios de cambios a largo plazo (Tomas, 1997).



Phylum: Bacillariophyta
Clase: Bacillariophyceae
Orden: Cymbellales
Familia: Cymbellaceae
Género: *Cymbella*

Cymbella mexicana (Ehrenberg) Cleve 1894



Ocurrencia: Ambientes de agua dulce, bentónicas

Descripción bibliográfica: Las valvas son de moderadas a fuertemente dorso-ventrales, con ápices redondeados. El contorno de la valva es cymbelliforme-lanceolado a ampliamente semi-lanceolado. El margen dorsal esta fuertemente arqueado, mientras que el margen ventral es ligeramente cóncavo. La porción central del margen ventral es ligeramente convexo. La pequeña área central es de forma circular a oval. Un único y largo estigma está presente entre los extremos proximales del rafe. Los extremos proximales del rafe tienen poros centrales que se curvan hacia el margen ventral. El rafe es lateral cerca de la mitad de la valva, convirtiéndose en forma de hilo cerca del extremo distal. Las fisuras terminales del rafe están desviadas dorsalmente casi 90°. Campos de poros apicales presentes en ambos ápices. Las estrías se radian cerca del centro de la valva, volviéndose paralelas hacia los extremos. Las areolas parecen ser de forma rectangular a circular. Areolas adyacentes al rafe se alargan en una forma triangular (Krammer, 1982).

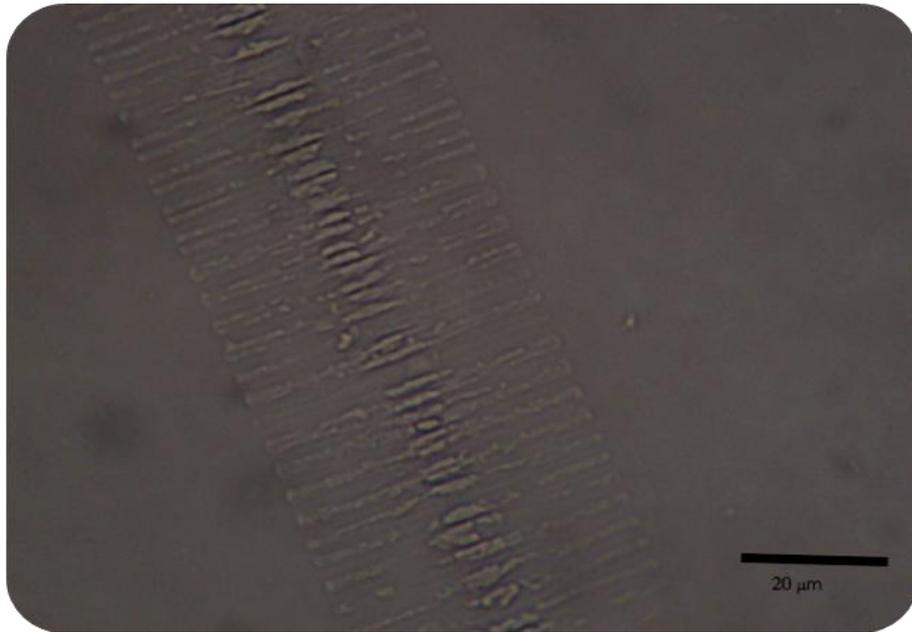
Dimensiones: 84 µm de largo y 26 µm de ancho (Fuente: directa).

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Cortina	30 cm	Agosto	Rara



Phylum: Bacillariophyta
Clase: Fragilariophyceae
Orden: Fragilariales
Familia: Fragilariaceae
Género: *Fragilaria*

Fragilaria crotonensis Kitton 1869

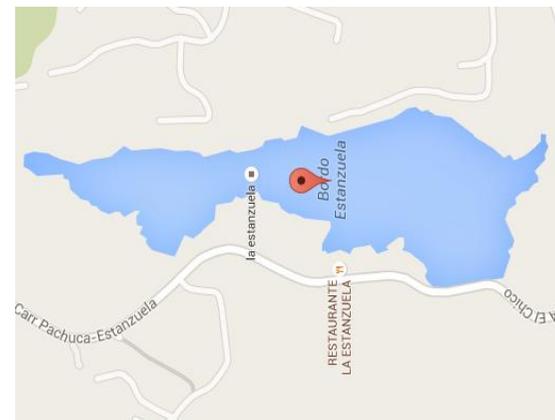


Ocurrencia: Es un componente importante de los florecimientos de la primavera, sobre todo en los lagos eutróficos, típicamente en declive cuando el lago se estratifica. El tamaño de la colonia, se ve afectada por el suministro de nutrientes y, a su vez, pueden influir en la velocidad a la que las diatomeas son pastoreadas por el zooplancton.

Descripción bibliográfica: Frústulas lineales, infladas en la parte central, donde se cohesionan y forma un filamento como el de una cinta; valva estrecha, acicular; estrías débiles, moniliforme (Krammer y Lange-Bertalot 1991).

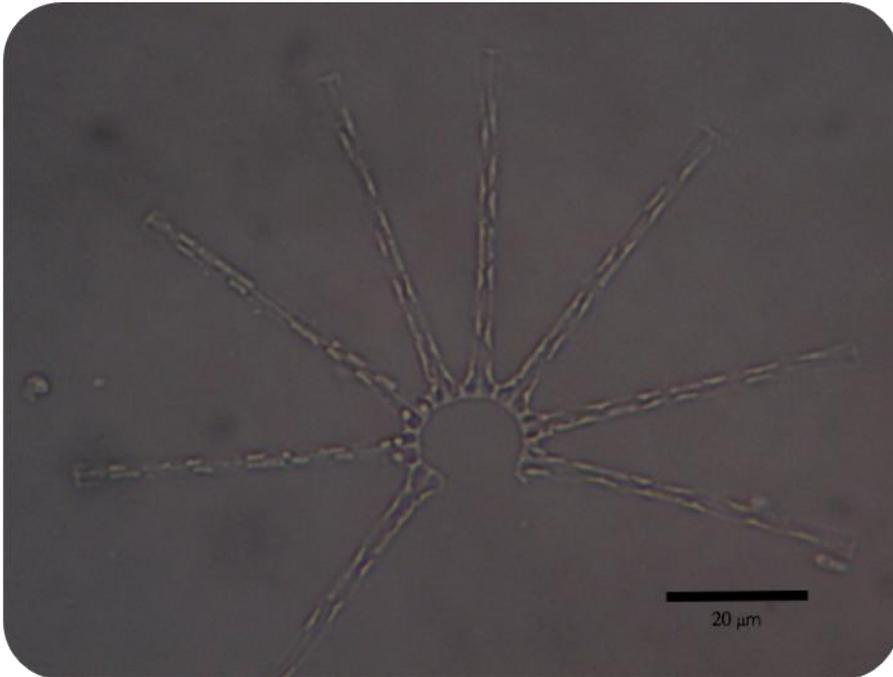
Dimensiones: 60 μm de largo y 13 μm de ancho.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Presa La Estanzuela	Superficial	Marzo	Frecuente



Phylum: Bacillariophyta
Clase: Fragilariophyceae
Orden: Tabellariales
Familia: Tabellariaceae
Género: *Asterionella*

Asterionella formosa Hassall 1850



Ocurrencia: Tal vez la diatomea más ubicua durante los florecimientos primaverales en lagos de agua dulce templada.

Descripción bibliográfica: Las valvas son largas y estrechas, con ápices capitados. Las valvas son claramente heteropolares, o pueden tener márgenes asimétricos, variables dentro de una población. El esternón central es muy estrecho y puede no ser distinguible. Las estrías son uniseriadas e irregularmente espaciadas. Las estrías están un poco fuera de lugar con relación de una con la otra en el esternón central. Espinas marginales pueden o no estar presentes. Una sola rimoportula está presente en el polo del pie (vértice más grande). Las espinas también pueden estar irregularmente espaciadas (Krammer y Lange-Bertalot 1991).

Dimensiones: 68 μm de largo y 4 μm de ancho.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Presa La Estanzuela	Superficial	Marzo	Rara

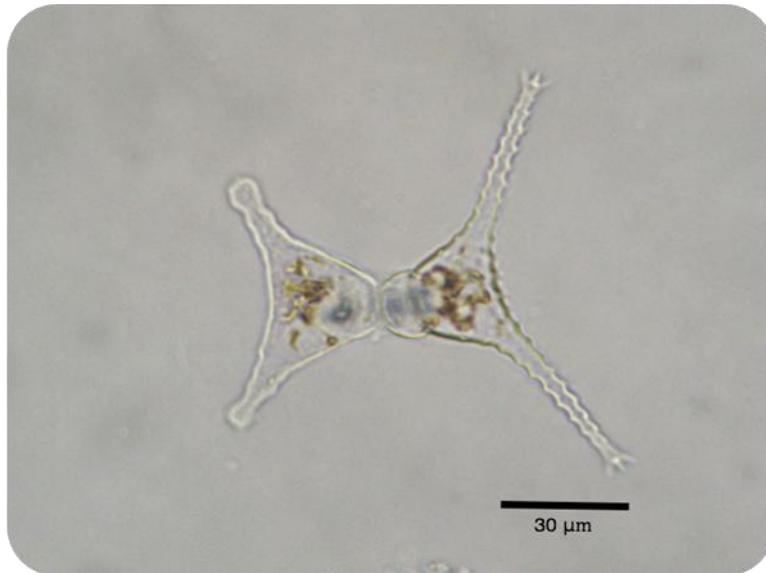


8.6.2 Phylum Charophyta

El phylum Charophyta es un grupo de algas verdes que forman un grupo hermano de Chlorophyta y del cual el Phylum Embryophyta emergió. Al unir estos tres grupos se forma un súper grupo conocido como Viridiplantae que tienen en común características como la ausencia de ficobilinas y la presencia de clorofila a y clorofila b, pared celular de celulosa y el almidón como material de almacenamiento. En especial la familia Desmidiaceae presenta coloraciones verdes herbáceas y todo el grupo en su gran mayoría habita en agua dulce a excepción de unas cuantas especies de agua salada. Cada célula o parte de las desmidias consiste en dos valvas o segmentos completamente simétricos y la zona de unión o sutura está bien marcada (Hall y McCourt, 2015).

Phylum Charophyta
Clase: Conjugatophyceae (Zygnematophyceae)
Orden: Desmidiales
Familia: Desmidiaceae
Género: *Staurastrum*

Staurastrum gracile Ralfs ex Ralfs 1848



Ocurrencia: Ambientes de agua dulce

Descripción bibliográfica: Células de tamaño pequeño a mediano, cerca de 1.5 veces más larga que ancha sin tomar en cuenta las prolongaciones; una ligera constricción en la parte media; el seno en forma de U cerca del vértice de la invaginación; el istmo relativamente amplio; las semi-células en forma de cuenco o transversalmente elípticas, los márgenes basales ligeramente convexos, divergiendo directamente hacia los ángulos apicales que son producidos para formar relativamente cortas y estrechas prolongaciones, con dirección horizontal o algunas ocasiones dirigidas ligeramente hacia arriba; las prolongaciones terminadas en puntas de cuatro dientes; margen apical amplio y solamente un poco convexo a casi recto, márgenes denticulados, las prolongaciones de cinco a siete series concéntricas de gránulos alrededor de ellas, el margen apical con crenulaciones biespinadas. En la vista vertical célula triangular con los márgenes laterales rectos o ligeramente convexos entre las prolongaciones; los ángulos producidos para adelgazarse en las prolongaciones llegando a la terminación de cuatro dientes en el ápice; con gránulos intramarginales en pares o en tríos a lo largo de cada lado de las células; la región media de la célula (Prescott y col. 1975).

Dimensiones: cuerpo celular 28-47 µm de largo, 39 a 77 µm de ancho (incluyendo brazos), istmo 8,4 a 11 µm.

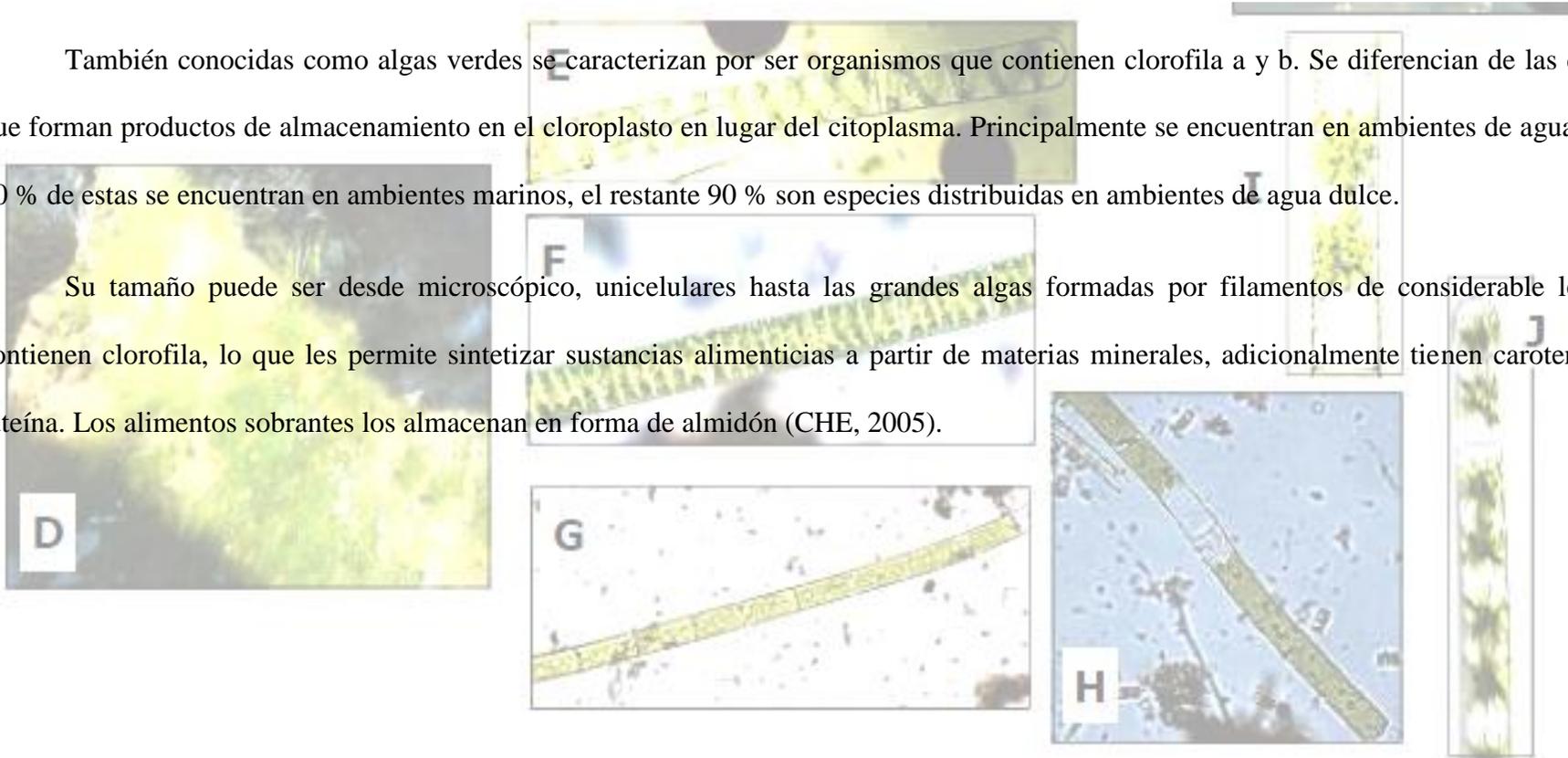
Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Epazote	30 cm	Agosto	Frecuente
	3 m	Agosto	Rara
Cortina	30 cm	Agosto	Abundante
	3 m	Agosto	Frecuente
Río San Juan	30 cm	Octubre	Rara
Presa La Estanzuela	Superficial	Febrero, Marzo y Abril	Abundante



8.6.3 Phylum Chlorophyta

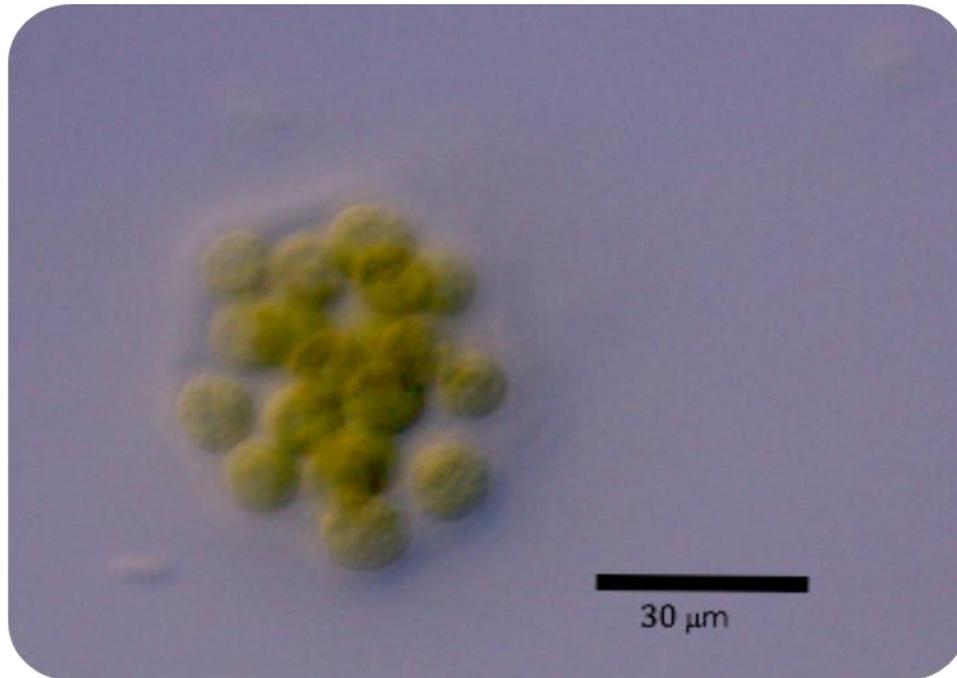
También conocidas como algas verdes se caracterizan por ser organismos que contienen clorofila a y b. Se diferencian de las demás algas ya que forman productos de almacenamiento en el cloroplasto en lugar del citoplasma. Principalmente se encuentran en ambientes de agua dulce, sólo un 10 % de estas se encuentran en ambientes marinos, el restante 90 % son especies distribuidas en ambientes de agua dulce.

Su tamaño puede ser desde microscópico, unicelulares hasta las grandes algas formadas por filamentos de considerable longitud. Todas contienen clorofila, lo que les permite sintetizar sustancias alimenticias a partir de materias minerales, adicionalmente tienen carotenoides como la luteína. Los alimentos sobrantes los almacenan en forma de almidón (CHE, 2005).



Phylum: Chlorophyta
Clase: Chlorophyceae
Orden: Chlamydomonadales
Familia: Volvocaceae
Género: *Eudorina*

Eudorina elegans Erhenberg 1832

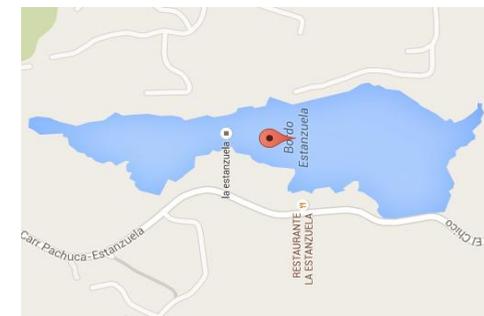


Ocurrencia: Sistemas acuáticos de agua dulce

Descripción bibliográfica: Colonia elipsoidal (a veces casi esférica), 60-200 micrómetros de longitud, consta de 16, 32 ó 64 células. Compuesta por un apilamiento de cinco secciones (4 + 8 + 8 + 8 + 4); células vegetativas esféricas o casi esféricas, con tamaños iguales, 12-24 μm de diámetro; cloroplasto en forma de copa, a veces estriado radialmente. Número de pirenoides hasta cinco (células jóvenes con sólo uno); estigma visible (Komárek y Fott, 1961).

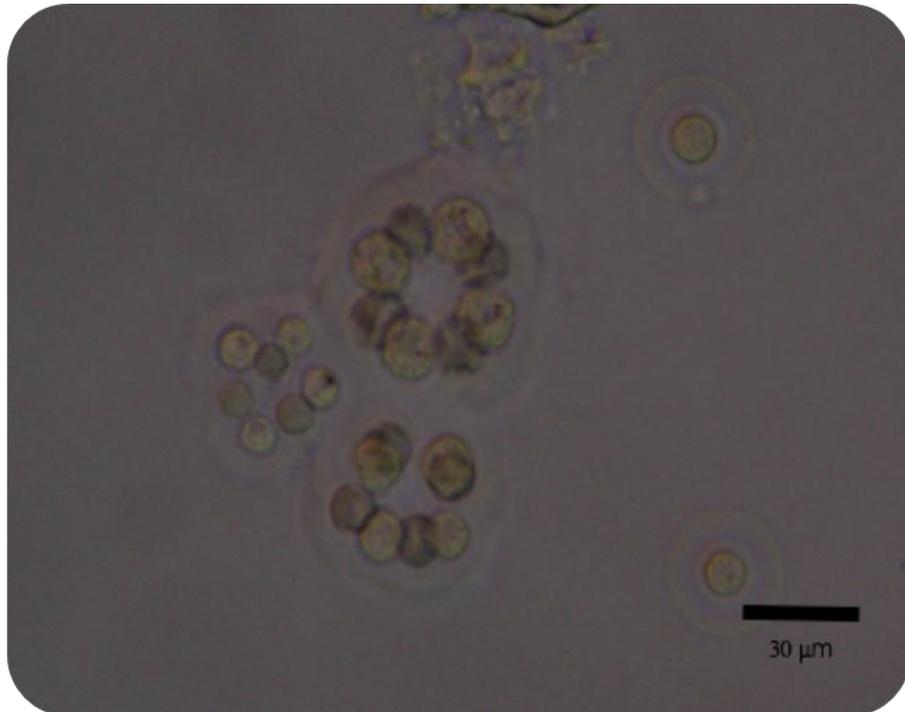
Dimensiones: 52 μm ancho de la colonia y 12 μm diámetro de la célula.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Presa La Estanzuela	Superficial	Febrero, Marzo	Frecuente



Phylum: Chlorophyta
Clase: Chlorophyceae
Orden: Chlamydomonadales
Familia: Sphaerocystidaceae
Género: *Planctococcus*

Planctococcus sphaerocystiformis Korshikov 1953

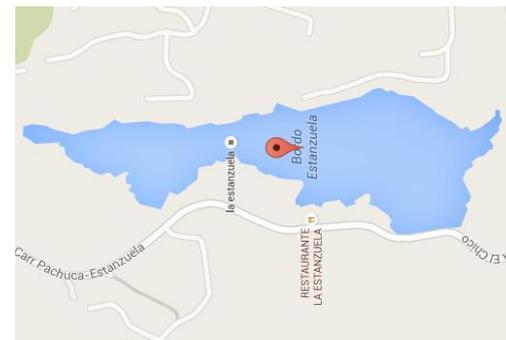


Ocurrencia: Planctónica en estanques y lagos más puros.

Descripción bibliográfica: Colonias esféricas, con una capa gelatinosa, incolora y sin estructura, a veces con restos de la célula madre. Las células globosas con cloroplasto parietal, plagado de huecos estrechos reticulados o en trozos, cerca de los pirenoides. Propagación por autoesporas y 2-4 zoosporas, más o menos ovadas a oval. El tamaño de las células es de 10-20 μm , las colonias de 70 μm de diámetro, y las zoosporas miden 13 μm de largo (Komárek y Fott, 1983).

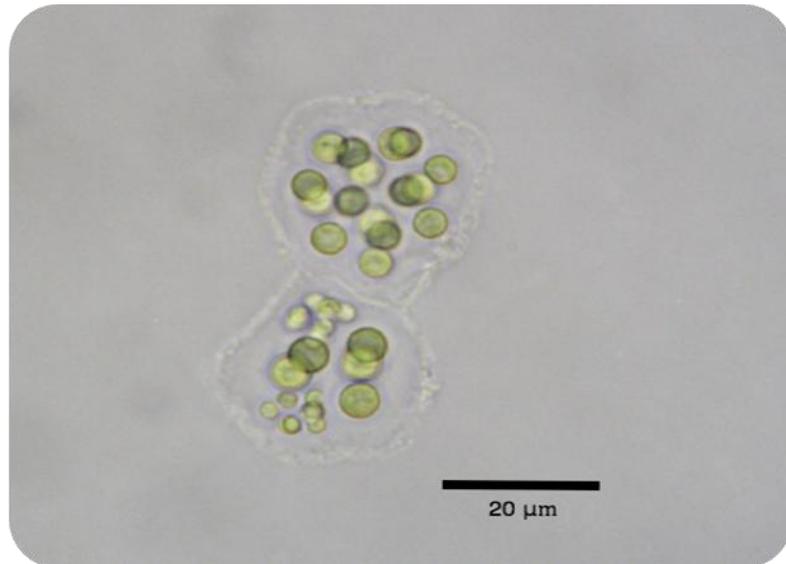
Dimensiones: 60 μm ancho de la colonia y 10 μm diámetro de la célula.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Presa La Estanzuela	Superficial	Marzo y Abril	Rara



Phylum: Chlorophyta
Clase: Chlorophyceae
Orden: Sphaeropleales
Familia: Radiococcaceae
Género: *Coenochloris*

Coenochloris hindakii Komárek 1979

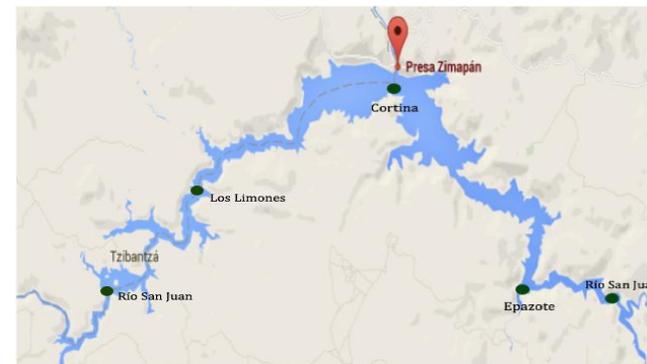


Ocurrencia: plancton de ríos y estanques eutróficos.

Descripción bibliográfica: Colonias de 2-8-64 células, esféricas a lobuladas irregularmente, sin estructura, mucílago incoloro. En grupos de ocho células. Células esféricas con cloroplasto en forma de copa con un pirenoide. Propagación por autoesporas de 2-8-16, liberadas de la pared celular madre. Restos de la pared madre en el mucílago. Tamaño de las células de 2-7 μm . Esporangios de 10 μm y las colonias de 60 μm de diámetro (Komárek y Fott, 1983).

Dimensiones: células de 5 μm y colonia de 30 μm .

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Epazote	30 cm	Agosto	Frecuente
	3 m	Agosto	Abundante
	5 m	Agosto	Abundante
Río Tula	30 cm	Agosto	Abundante
	3m	Agosto	Frecuente
	5m	Agosto	Frecuente
Cortina	30 cm	Agosto	Rara
	5m	Agosto	Rara
Los Limones	5m	Octubre	Rara
Río San Juan	30 cm	Septiembre y Octubre	Rara



Phylum: Chlorophyta
Clase: Chlorophyceae
Orden: Sphaeropleales
Familia: Radiococcaceae
Género: *Coenochloris*

Coenochloris piscinalis Fott 1974 etc.



Ocurrencia: En el plancton de los pequeños estanques.

Descripción bibliográfica: Colonias más o menos esféricas con un mucílago indistinto, gelatinoso y delicuescente, con células de 4 ú 8 en grupos tetraédricos u octaédricos. Las células completamente esféricas, cubiertas con un cloroplasto, la pared celular del conjunto, con un pirenoide que se divide antes de la próxima autoesporulación en 2 a 8 nuevos pirenoides. Propagación por 2, 4 ú 8 autoesporas. La pared celular madre se rompe en dos fragmentos, en forma de cuencos poco profundos o discos que son paralelos y adyacentes (Komárek y Fott, 1983).

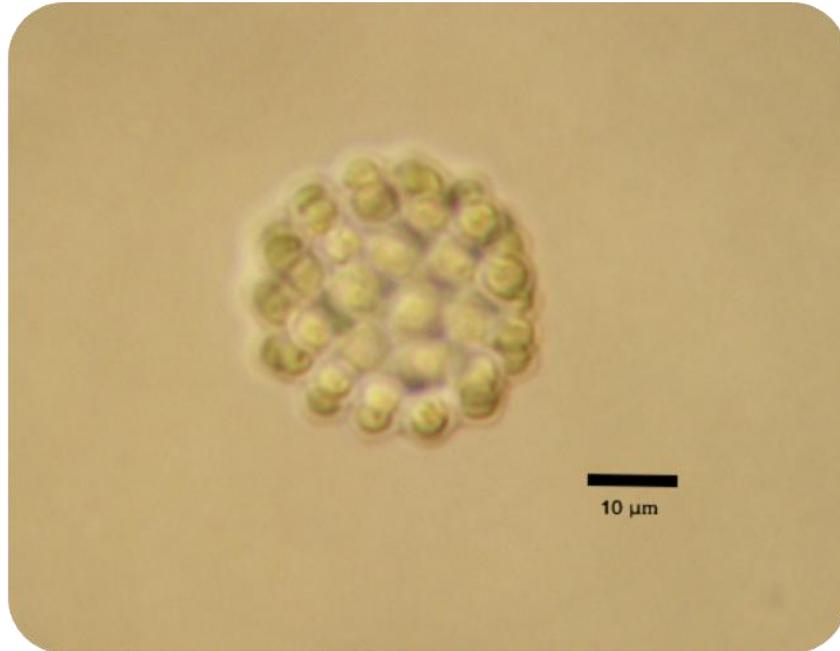
Dimensiones: 7-10 μm células.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Río Tula	30 cm	Agosto	Rara
	5 m	Agosto	Rara
Cortina	30 cm	Agosto	Rara
	3 m	Agosto	Rara



Phylum: Chlorophyta
Clase: Chlorophyceae
Orden: Sphaeropleales
Familia: Scenedesmaceae
Género: *Coelastrum*

Coelastrum microporum Nägeli 1855



Ocurrencia: Planctónicas muy extendidas en aguas eutróficas.

Descripción bibliográfica: Cenobio esférico o cúbico, con 4, 8, 12 ó 32 células. Cenobio formado por dos grupos de cuatro capas celulares en dos ya sea montados directamente uno encima del otro o desplazados por 45°. Las células esféricas, con una pared celular lisa y delgada, sin engrosamiento y extensiones de conexión. Un cloroplasto parietal con un pirenóide (Komárek y Fott, 1983).

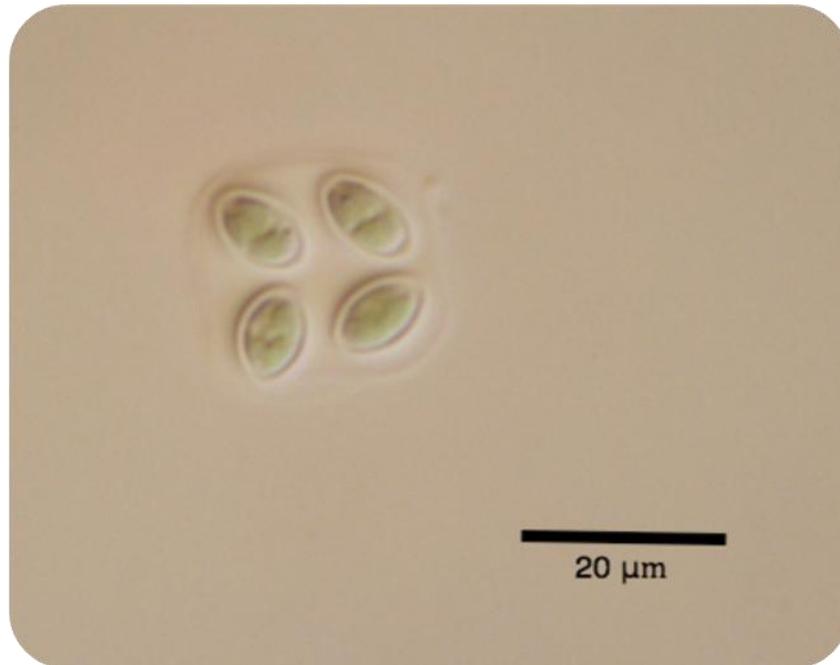
Dimensiones: de 3,5 µm a 18 µm las células, cenobio hasta 42 µm de diámetro.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Epazote	3 m	Agosto	Rara
Río Tula	30 cm	Agosto	Rara
Los Limones	5m	Septiembre	Rara
Río San Juan	30 cm	Septiembre	Rara



Phylum: Chlorophyta
Clase: Trebouxiophyceae
Orden: Chlorellales
Familia: Oocystaceae
Género: *Oocystis*

Oocystis lacustris Chodat 1887



Ocurrencia: generalizada, pero dispersos en el plancton de aguas puras o ligeramente eutróficas, principalmente en depósitos como lagos y estanques, algunas veces también se encuentran en hábitats de agua salada.

Descripción bibliográfica: Células rara vez solitarias, sobre todo en colonias, estrechas a ampliamente elipsoidal, rara vez ligeramente asimétrica, con la punta más o menos redondeada a veces con un engrosamiento indistinto. Las colonias de dos a ocho células ocasionalmente hasta 24 células, simples, a veces se componen hasta de tres generaciones. La pared de las células en las colonias jóvenes es apretada y en colonias viejas es ancha e inflada. Las células en las colonias antiguas se encuentran a una distancia significativa. Un cloroplasto parietal, en secciones posteriores más o menos en forma de canal dividido en 2 ó 4, cada uno con su propio pirenoide. Reproducción por autoesporas de 2 a 8 con un cloroplasto (Komárek y Fott, 1983).

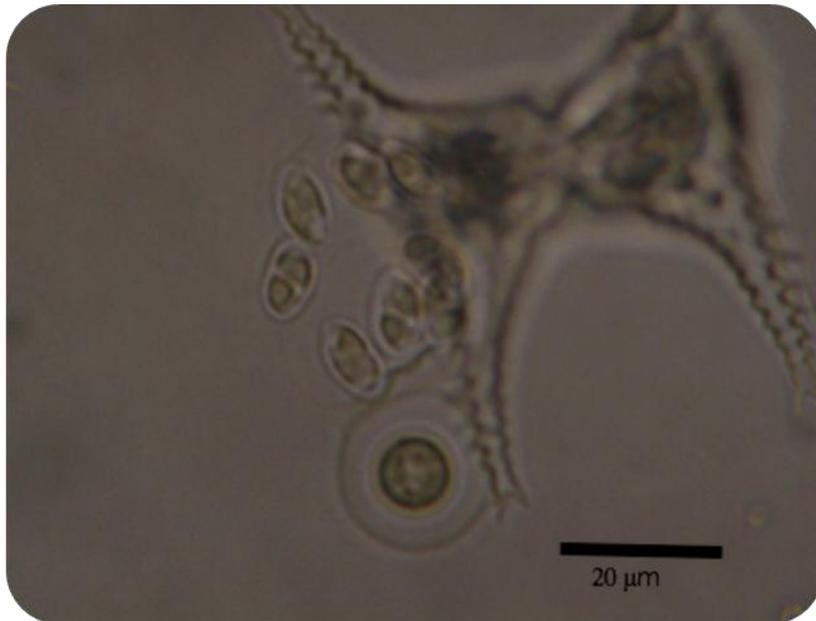
Dimensiones: células 6.4 a 11.3x 3.2 a 6.4 µm.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Río San Juan	30 cm	Septiembre y Octubre	Frecuente
Las Ánimas	3 m	Septiembre	Rara
Los Limones	5m	Septiembre	Frecuente



Phylum: Chlorophyta
Clase: Trebouxiophyceae
Orden: Chlorellales
Familia: Oocystaceae
Género: *Oocystis*

Oocystis marssonii Lemmermann 1898

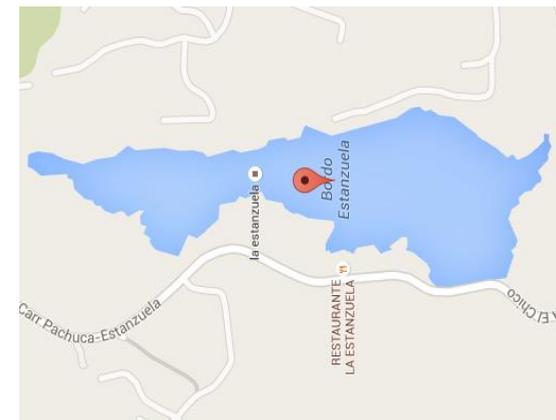


Ocurrencia: Ampliamente distribuido en el plancton de agua dulce y en diferentes aguas litorales.

Descripción bibliográfica: Cuerpo celular elipsoide, engrosamiento de la pared celular en ambos extremos (12-18 μm de largo, 8-16 μm de ancho); 2, 4, u 8 autosporas encerradas dentro de una pared celular madre; cloroplastos 1-4, parietal laminado, cada una con un pirenoide (Komárek y Fott, 1983).

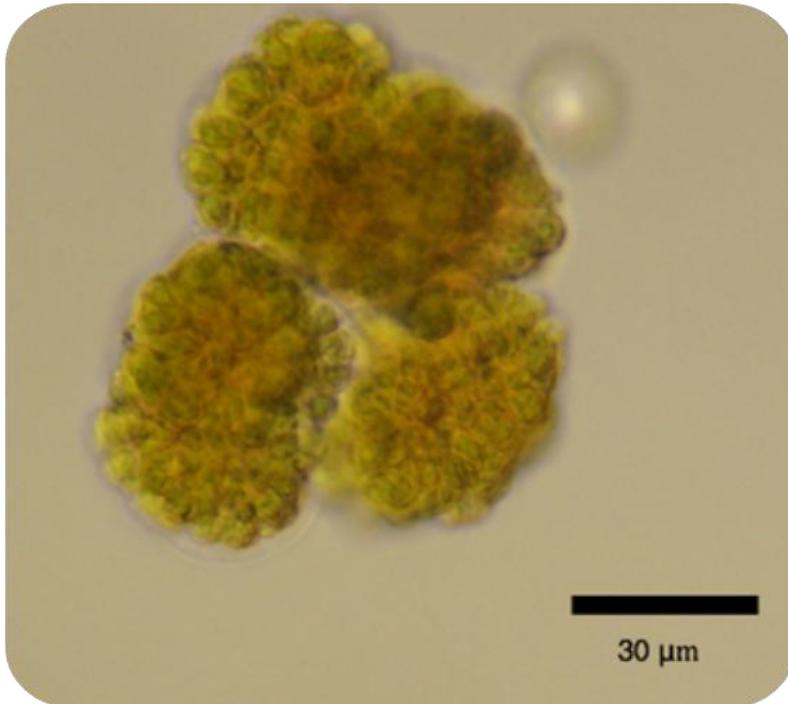
Dimensiones: células ocho μm ancho y 12 μm largo.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Presa La Estanzuela	Superficial	Marzo	Rara



Phylum: Chlorophyta
Clase: Trebouxiophyceae
Orden: Trebouxiales
Familia: Botryococcaceae
Género: *Botryococcus*

Botryococcus protuberans W. & G.S. West 1905



Ocurrencia: Se ha encontrado que es capaz de coexistir con *Microcystis*.

Descripción bibliográfica: Colonias irregularmente esféricas, elipsoidales irregularmente o más o menos alargada en una dirección, de 35-157 μm de diámetro, formado por grupos parciales de células más o menos orientados radialmente, que están por lo general completamente ocultas dentro de mucílago colonial, a veces emergentes por sus partes apicales. Colonias a veces compuestas por las subcolonias unidas por hilos mucilaginosos. Mucílago firme, incoloro, verde, naranja o marrón, homogéneo o irregularmente en capas. Dentro de las colonias a veces vesículas huecas rodeadas de paredes firmes. Márgenes coloniales a veces cubiertos por prolongaciones gelatinosas simples o diversificadas. Células en vista lateral básicamente ovoide, más o menos redondeada en vista polar, sin capas mucilaginosas apicales; células por lo general con un sólo cloroplasto parietal, lateral o apical (nunca basal), con un pirenoide desnudo o cubierto por almidón, generalmente atravesado por 1-2 tilacoides gruesos, muy a menudo juntos, pirenoides de uno a pocos cuerpos como pirenoides (intra plastidios de granos de almidón). La reproducción por 2-4 autosporas dispuestas en paralelo en la célula madre (Komárek y Fott, 1983).

Dimensiones: Las células de ocho a diez μm de largo y de cinco a nueve μm de ancho.

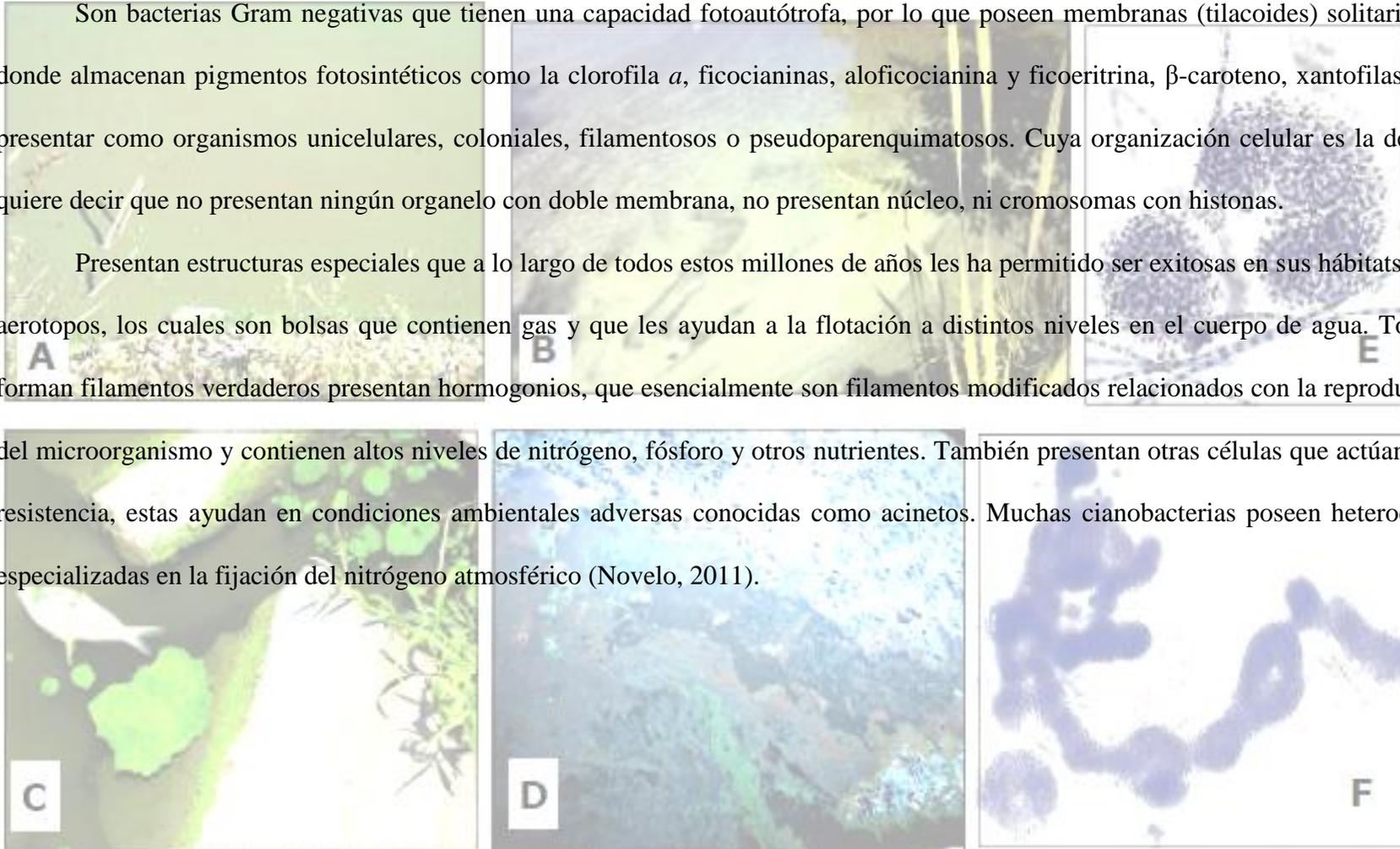
Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Río San Juan	30 cm	Septiembre	Rara
Presa La Estanzuela	Superficial	Febrero	Frecuente



8.6.4 Phylum Cyanobacteria

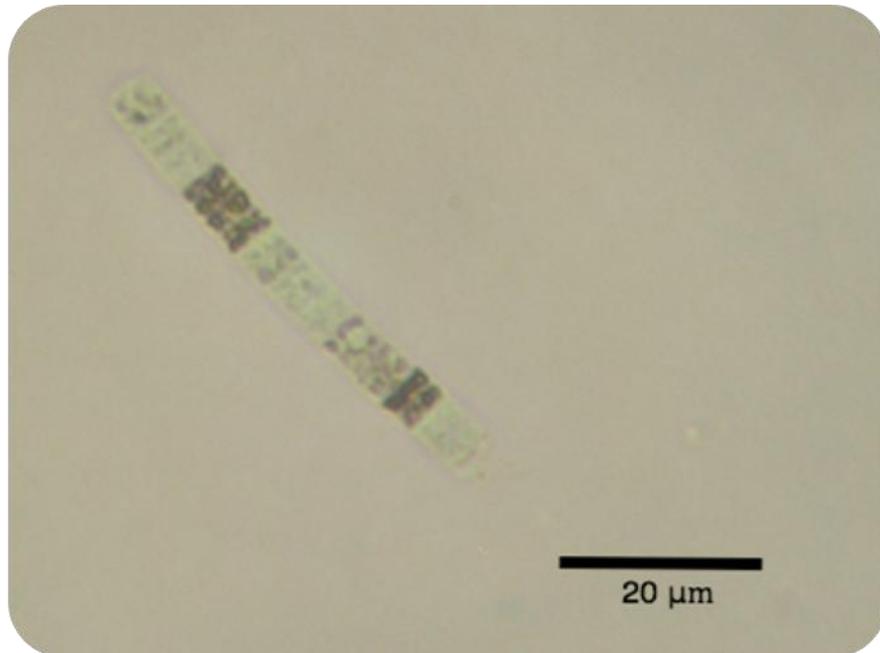
Son bacterias Gram negativas que tienen una capacidad fotoautótrofa, por lo que poseen membranas (tilacoides) solitarias y equidistantes en donde almacenan pigmentos fotosintéticos como la clorofila *a*, ficocianinas, aloficocianina y ficoeritrina, β -caroteno, xantofilas, etcétera. Se pueden presentar como organismos unicelulares, coloniales, filamentosos o pseudoparenquimatosos. Cuya organización celular es la de un procarionte esto quiere decir que no presentan ningún organelo con doble membrana, no presentan núcleo, ni cromosomas con histonas.

Presentan estructuras especiales que a lo largo de todos estos millones de años les ha permitido ser exitosas en sus hábitats. Una de ellas son los aerotopos, los cuales son bolsas que contienen gas y que les ayudan a la flotación a distintos niveles en el cuerpo de agua. Todas las especies que forman filamentos verdaderos presentan hormogonios, que esencialmente son filamentos modificados relacionados con la reproducción y la dispersión del microorganismo y contienen altos niveles de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes. También presentan otras células que actúan como estructuras de resistencia, estas ayudan en condiciones ambientales adversas conocidas como acinetos. Muchas cianobacterias poseen heterocitos que son células especializadas en la fijación del nitrógeno atmosférico (Novelo, 2011).



Phylum: Cyanobacteria
Clase: Cyanophyceae
Orden: Oscillatoriales
Familia: Microcoleaceae
Género: *Planktothrix*

Planktothrix compressa (Utermöhl) Anagnostidis & Komárek 1988



Ocurrencia: agua dulce, planctónicos en los lagos.

Descripción bibliográfica: Filamentos solitarios, de libre flotación, muy raramente con vainas finas y ligeramente visibles, que se desarrollan bien sólo en cultivos. Tricomas cilíndricos, a veces un poco aplanados desde los lados, azul-verdoso, tamaño común de (5) 6.5 a 7.5 (9.5) µm de ancho, constreñido ligeramente en la parte transversal de las paredes, no atenuado hacia los extremos. Las células generalmente más cortas que anchas, con numerosos aerotopos. Células apicales ampliamente redondeadas (Komárek y Anagnostidis, 2005).

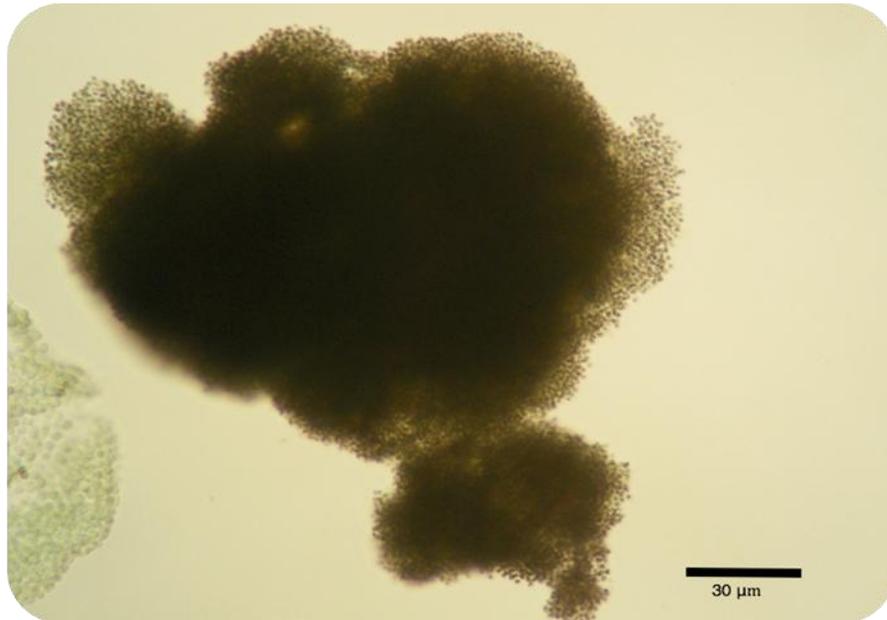
Dimensiones: 6 µm de ancho y cada célula 4.98 µm de largo.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Río San Juan	3 m	Septiembre y Octubre	Rara
	5 m	Septiembre	Rara



Phylum: Cyanobacteria
Clase: Cyanophyceae
Orden: Chroococcales
Familia: Microcystaceae
Género: *Microcystis*

Microcystis ichthyoblabe Kützing 1843



Ocurrencia: agua dulce, planctónicos en lagos mesotróficos o ligeramente eutróficos pero no contaminadas, a veces formando florecimientos; más en las regiones septentrionales de la zona templada, probablemente no se producen en los países tropicales.

Descripción bibliográfica: Colonias más o menos irregulares-esféricas, generalmente compuestas de pequeños grupos de células agrupadas (subcolonias), incrustados en vainas o sobres gelatinosos, homogéneos e incoloros, a veces unidos entre sí; en etapas viejas las subcolonias se desintegran en una masa homogénea y amorfa de células, en los que a veces permanecen pequeños grupos de células agregadas. Cepas tóxicas conocidas (Komárek y Anagnostidis, 1999).

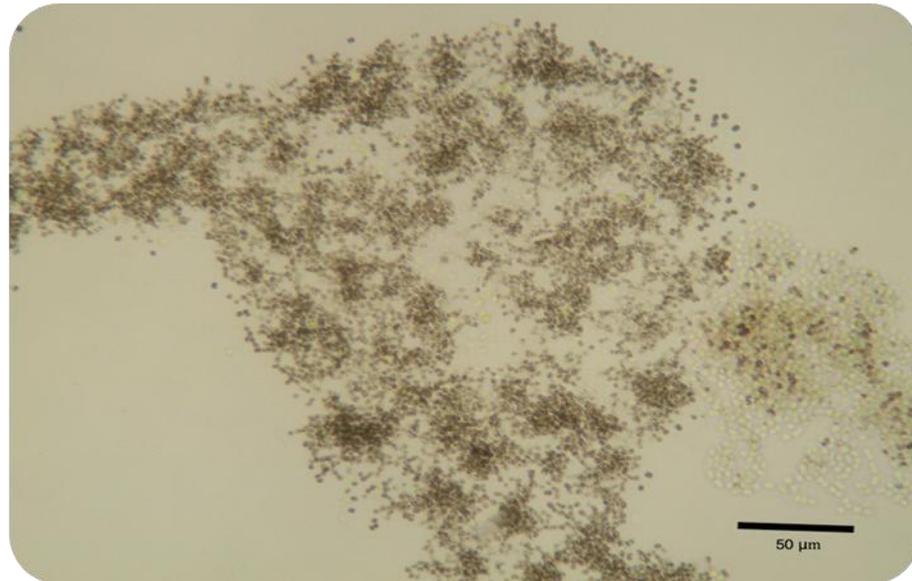
Dimensiones: Células esféricas de 2-3.2 μm de diámetro.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Río Tula	30 cm	Agosto	Abundante
	3m	Agosto	Frecuente
	5m	Agosto	Frecuente
Cortina	30 cm	Agosto	Rara
	5m	Agosto	Frecuente
Los Limones	30 cm	Septiembre	Frecuente
		Octubre	Abundante
	3 m	Septiembre y Octubre	Frecuente
Las Ánimas	30 cm	Octubre	Rara



Phylum: Cyanobacteria
Clase: Cyanophyceae
Orden: Chroococcales
Familia: Microcystaceae
Género: *Microcystis*

Microcystis novacekii (Komárek) Compère 1974



Ocurrencia: Agua dulce, planctónicos en cuerpos de agua mesotróficas y eutróficas (lagos, estanques, reservorios), a veces forma o participa en floraciones; común en toda la zona tropical, ocasional (especialmente en temporadas de verano) en la zona templada.

Descripción bibliográfica: Colonias microscópicas, en colonias viejas alcanzan raramente tamaños macroscópicos (compuesta de subcolonias), lenticulares o casi esféricas, irregularmente esférica o ligeramente alargada o con contorno ondulado, compacta, con células empaquetadas, sin agujeros, no lobuladas, en etapas antiguas compuestas de varias subcolonias agrupadas, con un gran número de células densamente agregadas; varias células solitarias alrededor de los grupos de células. El mucílago incoloro o amarillento pálido, a veces irregular y ligeramente concéntricamente estratificado, delimitado en el margen que se distingue por refracción; los amplios márgenes alrededor de los racimos de células centrales alcanzan 15 μm de ancho (Komárek y Anagnostidis, 1999).

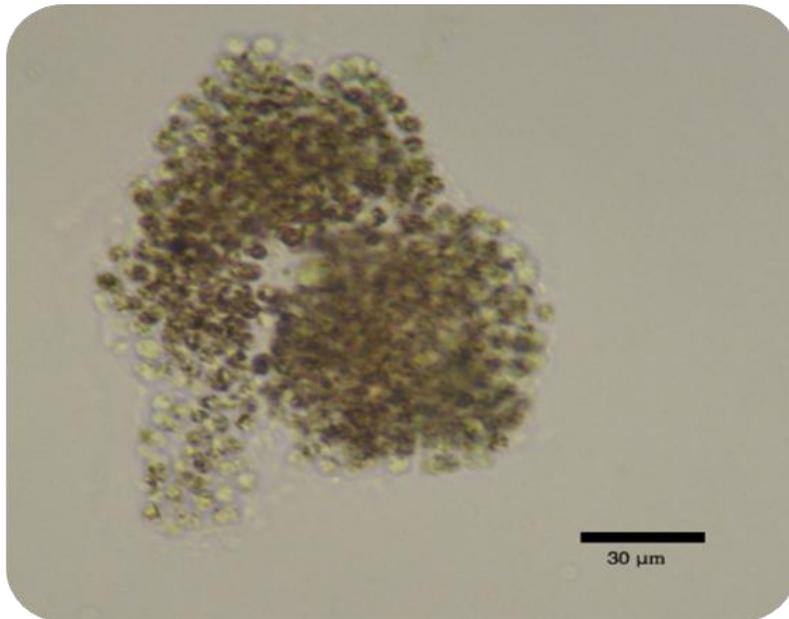
Dimensiones: Las células esféricas, con aerotopos, (2,4) 3-5.5 (6) μm de diámetro.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Epazote	30 cm	Agosto	Rara
Los Limones	30 cm	Septiembre	Frecuente
		Octubre	Rara
	3 m	Septiembre y Octubre	Frecuente
	5 m	Septiembre y Octubre	Frecuente
Río San Juan	30 cm	Septiembre y Octubre	Frecuente
	3 m	Septiembre	Frecuente
	5 m	Septiembre	Frecuente
		Octubre	Rara
Las Ánimas	30 cm	Septiembre y Octubre	Abundante
	3 m	Octubre	Frecuente
	5 m	Septiembre	Rara



Phylum: Cyanobacteria
Clase: Cyanophyceae
Orden: Chroococcales
Familia: Microcystaceae
Género: *Microcystis*

Microcystis aeruginosa (Kützing) Kützing 1846



Ocurrencia: aguas dulces y salobres, planctónicos en los cuerpos de agua eutróficos (lagos, estanques, reservorios), a veces forma florecimientos densos; distribución cosmopolita, con excepción de las regiones polares y subpolares.

Descripción bibliográfica: Colonias mucilaginosas, microscópicas, más o menos esféricas, lenticulares o débilmente alargadas, más tarde macroscópicas, irregulares, lobuladas, claramente alargadas, generalmente de (40) 600-900 (1000) μm , rara vez hasta 8 mm de largo, por lo general en forma de red o clatrato con distintos agujeros, o compuestos por subcolonias, con contorno irregular y con un gran número de células irregularmente dispuestas y más o menos densamente empaquetadas. Mucílago incoloro, sin estructura, difluente, a veces formando un margen distinto, pero no muy amplio alrededor de las células (generalmente 5-8 μm). Las células esféricas, a veces alargadas ligeramente antes de la división, pálidas azul-verdosas, con numerosos aerotopos. Raramente formación de nanocitos. Especie muy polimórfica, que ocurre en numerosas modificaciones y estado de temporada; la diversidad genética sigue también a partir del análisis de isoenzimas. Poblaciones y cepas tóxicas (Komárek y Anagnostidis, 1999).

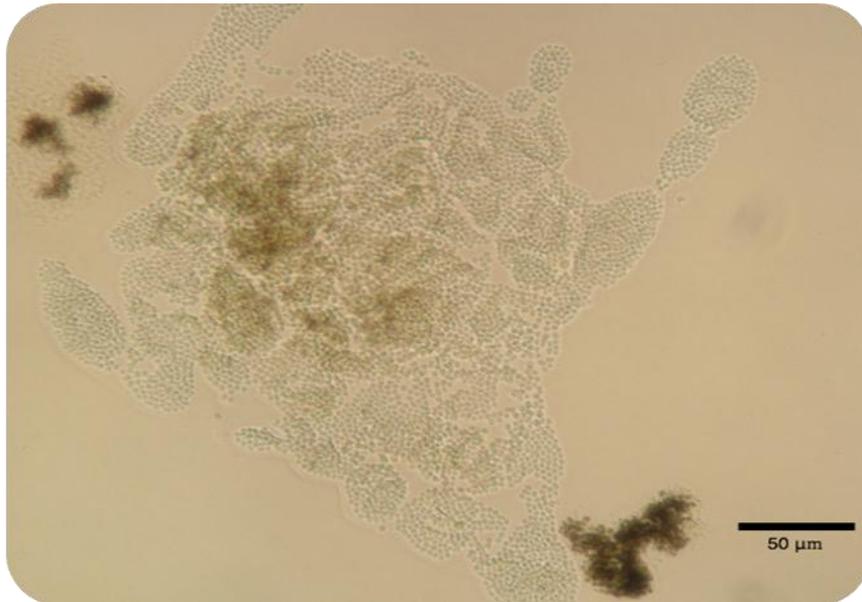
Dimensiones: Células (3) 4-6 (9.4) μm de diámetro.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Cortina	30 cm	Agosto	Frecuente
	30 cm	Septiembre y octubre	Abundante
Los Limones	3 m	Octubre	Frecuente
	5 m	Septiembre	Frecuente
		Octubre	Abundante
Río San Juan	30 cm	Septiembre y octubre	Frecuente
	3 m	Septiembre y octubre	Frecuente
	5 m	Septiembre	Frecuente
Las Ánimas	30 cm	Septiembre y octubre	Abundante
	3 m	Octubre	Abundante
	5 m	Septiembre	Rara
		Octubre	Frecuente
Presa La Estanzuela	Superficial	Febrero, marzo, abril	Abundante



Phylum: Cyanobacteria
Clase: Cyanophyceae
Orden: Chroococcales
Familia: Microcystaceae
Género: *Microcystis*

Microcystis wesenbergii (Komárek) Komárek 1968



Ocurrencia: Agua dulce, comúnmente planctónicos en lagos y estanques eutróficos, mezclados con otros cianoprocariontes planctónicos, raramente dominante en floraciones; con distribución cosmopolita con la excepción de las regiones subpolares, en diferentes morfotipos (existen posiblemente otras especies similares, que pertenecen a diversos géneros).

Descripción bibliográfica: Las colonias jóvenes son esféricas, después alargadas y ricamente lobulada y con clatratos, con agujeros distintos, a veces compuestas de subcolonias, alcanzando tamaño macroscópico (de 6 mm de largo); células dispuestas al azar, rara vez densamente, en las colonias jóvenes más cerca de la superficie colonial, pero también sobre todo el contenido colonial. El mucílago incoloro, sin estructura, con margen delimitado claramente, suave, firme, continuo, no diferente, pero con el esquema de refracción; el margen gelatinoso se extiende 3-6 micras más allá de las agregaciones de células. Se produce en varios tamaños y modificaciones morfológicas, el valor taxonómico necesita aclaración. Posiblemente se producen las poblaciones tóxicas, pero en Japón sólo se han registrado cepas no tóxicas (Komárek y Anagnostidis, 1999).

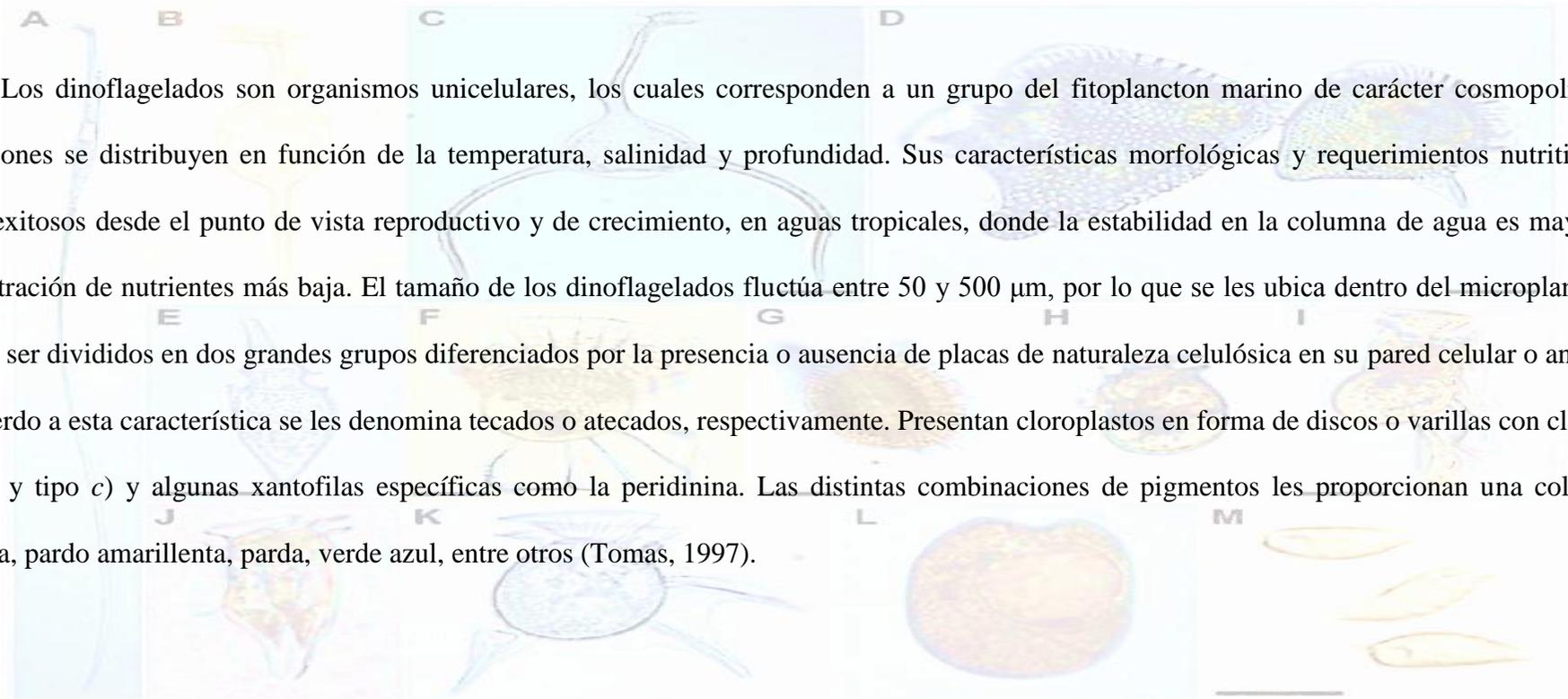
Dimensiones: Las células esféricas, a veces se alargan un poco antes de la división, 4-7 (8,5-10) µm de diámetro.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Los Limones	30 cm	Septiembre y Octubre	Abundante
	3 m	Septiembre	Abundante
	5 m	Septiembre	Frecuente
Octubre		Rara	
Río San Juan	30 cm	Septiembre y Octubre	Abundante
	3 m	Septiembre	Frecuente
		Octubre	Rara
		Octubre	Abundante
Las Ánimas	30 cm	Septiembre y Octubre	Abundante
	3 m	Octubre	Abundante
	5 m	Septiembre	Frecuente



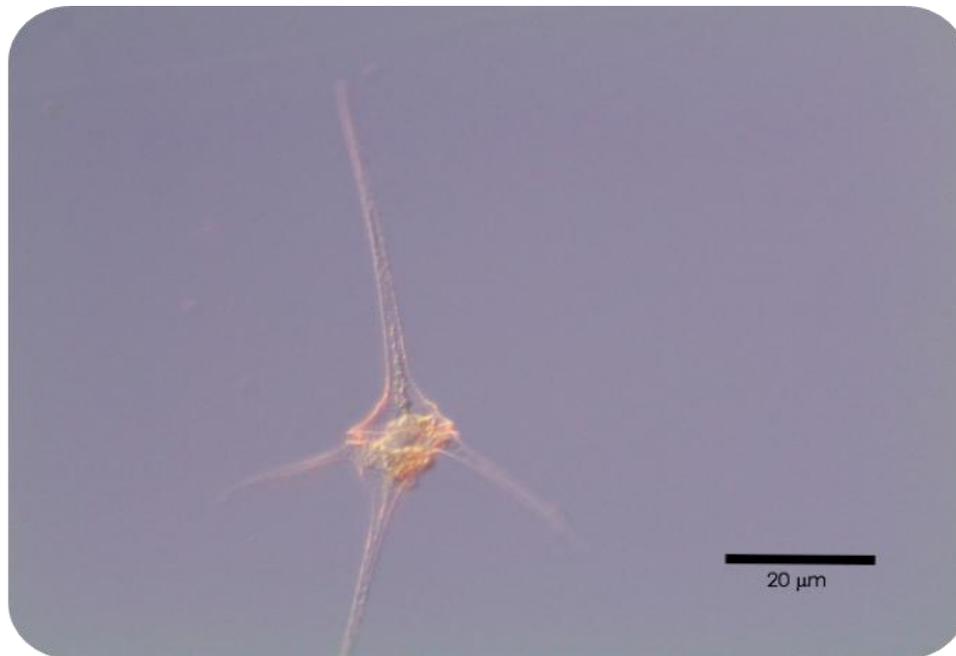
8.6.5 Phylum *Dinophyceae*

Los dinoflagelados son organismos unicelulares, los cuales corresponden a un grupo del fitoplancton marino de carácter cosmopolita. Sus poblaciones se distribuyen en función de la temperatura, salinidad y profundidad. Sus características morfológicas y requerimientos nutritivos los hacen exitosos desde el punto de vista reproductivo y de crecimiento, en aguas tropicales, donde la estabilidad en la columna de agua es mayor y la concentración de nutrientes más baja. El tamaño de los dinoflagelados fluctúa entre 50 y 500 μm , por lo que se les ubica dentro del microplancton, y pueden ser divididos en dos grandes grupos diferenciados por la presencia o ausencia de placas de naturaleza celulósica en su pared celular o anphiesma, de acuerdo a esta característica se les denomina tecados o atecados, respectivamente. Presentan cloroplastos en forma de discos o varillas con clorofilas (tipo *a* y tipo *c*) y algunas xantofilas específicas como la peridininina. Las distintas combinaciones de pigmentos les proporcionan una coloración amarilla, pardo amarillenta, parda, verde azul, entre otros (Tomas, 1997).



Phylum Miozoa
Clase Dinophyceae
Orden Gonyaulacales
Familia Ceratiaceae
Género *Ceratium*

Ceratium hirundinella (O.F. Müller) Dujardin 1841



Ocurrencia: Común en estanques y lagos de la zona templada, cuerpos de agua de oligotróficos a eutróficos.

Descripción bibliográfica: Células cortas y largas con cuatro cuernos en condiciones óptimas. Las células de más de 45 µm de ancho. La epivalva en forma de casco es más corta que en los otros tipos. Sin cuernos antapicales o sólo ligeramente divergentes. Las células largas y no estrechas; el lado dorsal de la epivalva es convexo. Las placas son fuertes o robustas; ornamentación distinta y a menudo irregular (Comas, 2009).

Dimensiones: 45 µm en su parte más ancha y 102 µm en su parte más larga.

Sitio	Profundidad	Mes	Abundancia relativa
Presa La Estanzuela	Superficial	Marzo	Rara



8.7 Recomendaciones

Presa La Estanzuela

En el plan de manejo del Parque Nacional del Chico se presenta en el Diario Oficial de la Federación como “AVISO por el que se informa al público en general que ha concluido la elaboración del Programa de Manejo del Parque Nacional El Chico, localizado en la Sierra de Pachuca, Estado de Hidalgo.” se especifica que tanto en el poblado de La Estanzuela como las zonas que lo rodean, sin entrar en detalles de la presa, está permitido que se lleven a cabo actividades humanas diversas, ya que es una de las zonas con mayor cantidad de pobladores y por lo tanto, no está tan protegido como el resto del parque. Contrario a las especificaciones para otras dos presas que son cercanas a la Presa La Estanzuela, como la Presa El Cedral y la Presa Jaramillo en donde las actividades son limitadas, son áreas realmente protegidas debido procesos acelerados por las actividades como la erosión y la eutrofización, a pesar de esto los ejidatarios cuentan con permisos especiales para poder realizar actividades recreativas alrededor de la Presa El Cedral debido a que es una zona turística.

La Presa La Estanzuela es un caso especial ya que en el pasado se han suscitado percances como la muerte masiva de fauna acuática (Rico y Perales, 2012), lo cual es preocupante ya que es agua que se usa para consumo humano, por lo cual debería ser un cuerpo de agua que esté constantemente monitoreado, midiendo las variables que pueden dar un diagnóstico de su estado actual y prevenir algún percance.

Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama

En el caso de la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama sus estatutos han cambiado en varias ocasiones, al inicio la obra se instauró con la finalidad de la producción de energía eléctrica; sin embargo, las poblaciones aledañas a la presa encontraron otras formas de aprovechamiento permitidas por el gobierno como la pesca de tilapia, lobina, bagre entre otros,

incluso la introducción de crías y debido a la sobreexplotación hubo una veda de varios años (CFE, 1992). El uso del agua no es para consumo humano sino para actividades productivas, obtención de energía eléctrica y actividades recreativas. Aunque el agua no es consumida directamente algunos organismos que crecen en ella sí son consumidos, por lo cual es recomendable la vigilancia del embalse, además de que este recibe aguas de afluentes que se consideran altamente contaminados y con gran cantidad de materia orgánica lo cual afecta la calidad del agua del embalse en general. Un monitoreo de las variables básicas constante y algunas otras mediciones periódicas pueden coadyuvar al buen mantenimiento de este cuerpo de agua.

9 CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad del agua de la Presa La Estanzuela al considerar las variables fisicoquímicas pH, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos suspendidos, sulfato, amonio y nitrito medidos *in situ* y *ex situ* y su comparación con trabajos previamente reportados, encuentra que es buena y permiten clasificar a este cuerpo de agua como tipo I y II, según autoridades ambientales la CONAMA de Chile y el CONAMA de Brasil. Por el contrario, los valores encontrados de la calidad de agua de La Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama: oxígeno disuelto, conductividad, sólidos suspendidos, amonio, cromo, cobre, níquel, nitritos y manganeso fueron más altos, lo que indica que su calidad no es tan buena y así se puede clasificar como clase II, III e incluso IV.

La baja cantidad de nutrientes como fosfatos y nitratos en Presa La Estanzuela permite clasificar a este cuerpo de agua como oligotrófico. Mientras que la cantidad de nutrientes reportados y confirmados en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama indican que es un cuerpo eutrófico y posiblemente hipereutrófico, probablemente debido a la contaminación de los afluentes que alimentan este cuerpo de agua. Los valores de amonio superan lo establecido como valores máximos permisibles en la NOM-127-SSA1.

La cantidad de clorofila *a* en Presa La Estanzuela fue alta y sobrepasa los niveles de un cuerpo eutrófico e incluso hipereutrófico, lo que indica la posible presencia de un florecimiento algal en el momento en que se midió. Se requieren más estudios para establecer qué factores son los causantes de las grandes cantidades de biomasa. En la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama los valores de clorofila *a* fueron mayores a los reportados previamente, por lo que también permiten clasificar al cuerpo de agua como eutrófico e incluso hipereutrófico.

Se realizó la identificación de especies de distintos grupos taxonómicos, mismas que se incluyen en un catálogo que cuenta con 18 especies distintas con su respectiva descripción

bibliográfica, fotografía correspondiente, clasificación, abundancia relativa, sitio y fecha de colecta y profundidad a la que se encontraron los organismos observados en las muestras.

En cuanto a los microorganismos encontrados el grupo más diverso fue el de las clorofitas y el grupo más abundante en la mayoría de los muestreos fueron las cianobacterias. Se observaron especies recurrentes en otros trabajos ya publicados en la Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama. El dominio de las cianobacterias refleja un cuerpo de agua eutrófico.

La gran abundancia de *Microcystis* en la Presa La Estanzuela representa un riesgo sanitario y ecológico, para lo cual se requiere de un plan de monitoreo de la calidad del agua. Para la disminución de posible exposición de la población a las sustancias tóxicas son necesarias políticas públicas de prevención y control de la eutrofización, así como un monitoreo constante con registros sistemáticos de la calidad del agua de los cuerpos de agua, de sus tratamientos según su uso y de su distribución.

10 LITERATURA CITADA

- Andersen, R. A. y Kawachi, M. (2005). Traditional Microalgae Isolation Techniques. En: Andersen, R. A. (Ed.). *Algal Culturing Techniques*. Elsevier, San Diego. 83-100 pp
- Arar, E. J. y Collins, G. B. (1997). Method 445.0. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. Revision, 1. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Backer, L. C. (2002). Cyanobacterial Harmful Algal Blooms (Cyano HABs) developing a public health response. *Lake and Reservoir Management* 18 (1): 20-31.
- Bates, S. S. (1997). Toxic phytoplankton on the Canadian east coast: implications for aquaculture. *Bulletin Aquaculture Association of Canada* 97: 9-18.
- Berry, J. P. y Lind, O. (2010). First evidence of “paralytic shellfish toxins” and cylindrospermopsin in a Mexican freshwater system, Lago Catemaco, and apparent bioaccumulation of the toxins in “tegogolo” snails (*Pomacea patula catemacensis*). *Toxicon* 55: 930-938.
- Bonilla, S. (2009). Cianobacterias Planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. *Documento Técnico PHI-LAC, N° 16*. UNESCO, Montevideo.
- Boone, D. R. y Castenholz, R. W. (2001). The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria. In G.M. Garrity (Ed.), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology Vol. 1*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Bravo-Inclán L., Saldaña-Fabela, M. P. y Sánchez-Chávez, J. J. (2012). Evaluación ambiental del estado trófico y toxicidad en el embalse Zimapán, México. En: Pica-Granados Y. y Ramírez-Romero, P. (Eds.). *Contribuciones al conocimiento de la ecotoxicología y química ambiental en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec.
- Briand, J. F., Jacquet, S., Bernard, C. y Humbert, J. F. (2003). Health hazards for terrestrial vertebrates from toxic cyanobacteria in surface water ecosystems. *Veterinary Research* 34: 361-377.
- Brito, J., Alves, L.F. y Espirito-Santo H.M.V. (2014). Seasonal and spatial variations in limnological conditions of a floodplain lake (Lake Catalão), connected to both the Solimões and Negro Rivers, Central Amazonia. *Acta Amazonica* 44 (1): 121-134.

-
- Bwala, R.L. y Omoregie, E. (2009). Organic enrichment of fish ponds: application of pig dung vs tilapia yield. *Pakistan Journal. of Nutrition* 8: 1373-1379.
- Carlson R.E. y Simpson, J. (1996). A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. North American Lake Management Society, Madison.
- Carrasco-Gata, D. C. (2007). Cianobacterias planctónicas y cianotoxinas en embalses españoles Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias.
- Carvajal Cruz, G. E. (2011). Ocurrencia de floraciones de cianobacterias tóxicas en cuerpos de agua dulce, Argentina. Tesis para obtener el grado de Doctor, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad. (1992). Proyecto Hidroeléctrico Zimapán Hgo. Comisión Nacional de Electricidad, México.
- Chia, A., Bako, P., Alonge, S. y Kasim, A. (2011). Green algal interactions with physicochemical parameters of some manmade ponds in Zaria, northern Nigeria. *Revista Brasileira de Botanica* 34(3): 285-295 pp.
- Chorus, I. y Bartram, J. (1999). Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring, and management. World Health Organization, New York.
- Chorus, I. y Cavalieri, M. (2000). Cyanobacteria and algae. En: Batram, J. y Rees, G. (Eds.). *Monitoring bathing waters a practical guide to the design and implementation of assessments and monitoring programmes*. World Health Organization, Londres.
- Codd, G.A., Edwards, C., Beattie, K.A., Barr, W.M., y Gunn, G. (1992). Fatal attraction to cyanobacteria? *Nature* 359: 110-111.
- CONAMA, Consejo Nacional de Medio Ambiente Brasil. (2005). Resolución No. 357. Brasil.
- CONAMA, Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2004). Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas. Chile.
- Comas, A. (2009). Catálogo de las algas y cianoprocariontes dulceacuícolas de Cuba. Ed. Universo Sur, Universidad Cienfuegos.

-
- CHE, Confederación Hidrográfica de Ebro. (2005). Protocolo de muestreo y análisis para fitoplancton. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Creswell, L. (2010). Phytoplankton culture for aquaculture feed. Southern Regional Aquaculture Center, Mississippi.
- De Hoyos, A. C., Villén, F. L., Martínez, P. D., Conde-Bueno, L., Alonso-García, A. M., González-Ramos, M. E., Verdugo-Althofer, M. y Avilés- García, J. (2008). Problemas de las cianobacterias en aguas de recreo y aguas de consumo. *Ingeniería Civil* 151: 63-69.
- DeMott, W. R. y Müller-Navarra, D. C. (1997). The importance of highly unsaturated fatty acids in zooplankton nutrition: evidence from experiments with *Daphnia*, a cyanobacterium and lipid emulsions. *Freshwater Biology* 38: 649-664.
- Dimar-CIOH. (2011). Catálogo de Fitoplancton de la Bahía de Cartagena, Bahía Portete y Agua de Lastre. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Ed. Dimar, Cartagena de Indias.
- Durand-Chastel, H. (1980). Production and use of *Spirulina* in Mexico. En: Shelef, G., Soeder, C.J. (Eds.). *Algae Biomass*. Elsevier, Amsterdam.
- Echenique, R., y Aguilera, A. (2011). Consideraciones generales de cianobacterias: aspectos ecológicos y taxonómicos. En: Giannuzzi, L. (Ed.). *Cianobacterias como determinantes ambientales de la salud*. Ministerio de Salud de la Nación, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Falconer, I. R. (1998). Algal toxins and human health. En: Hrubec, J. (Ed.). *The handbook of environmental chemistry Vol. 5 Part C Quality and Treatment of drinking water II*. Springer Verlag, Berlin.
- Fernandes, V.O., Cavati, B., Oliveira, L.B. y Souza, B.D. (2009). Ecología de cianobacterias: factores promotores e consecuencias das florações. *Oecologia Brasiliensis* 13(2): 247-258.
- Fisher, T. R. (1978). Plâncton e produção primária em sistemas aquáticos da bacia da Amazônia Central. *Acta Amazoniana* 8(4):43-54.
- Galindo-Alcázar, O., Martínez-Jerónimo, F. y Olvera-Ramírez, R. (2012). Evaluación de la toxicidad de extractos acuosos de cianobacterias mediante el ensayo con semillas de lechuga. En: Pica-Granados Y. y Ramírez-Romero, P. (Eds.). *Contribuciones al*

- García-Pichel, F., Wade, B.D. y Farmer, J.D. (2002). Jet-suspended calcite-ballasted Cyanobacterial waterwarts in a desert spring. *Journal of Phycology* 38: 420-428.
- Gemelgo, M. C. P., Mucci, L. J. N. y Navas-Pereira, D. (2009). Population dynamics: seasonal variation of phytoplankton functional groups in Brazilian reservoirs (Billings and Guarapiranga, São Paulo). *Brazilian Journal Biology* 69(4): 1001-1013.
- Hall, D. J. y McCourt, M. R. (2015). Conjugating Green Algae Including Desmids. En: Wehr, J., Sheath, R. y Kociolek, P. *Fresh Algae of North America. Ecology and Clasification*. Elsevier, New York.
- Hart J, Fawell, J. K. y Croll, B. (1998). The fate of both intra- and extracellular toxins during drinking water treatment. *Water Supply* 16: 611-616.
- Hoffmann, L., Komárek, J., y Kaštovský, J. (2005). System of cyanoprokaryotes (cyanobacteria) state in 2004. *Algal Studies* 117(1): 95-115.
- Hoek, C., Mann, D., y Jahns, H. M. (1995). *Algae: an introduction to Phycology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hötzel, G. y Croome, R. (1999). *A phytoplankton methods manual for Australian freshwaters*. Land and Water Resources Research and Development Corporation, Canberra.
- Infoagro. (2016). Manual de Instrucciones. HI 9828 Medidor Multiparamétrico para Calidad de Agua. Disponible en: www.infoAgro.com
- Komárek, J. (2006). Cyanobacterial taxonomy: current problems and prospects for the integration of traditional and molecular approaches. *Algae* 21(4): 349-375.
- Komárek, J. y Anagnostidis, K. (1999). Süßwasserflora von Mitteleuropa Band 19/1: Cyanophyta 1. Teil: Chroococcales. Gustav Fischer, Stuttgart.
- Komárek, J. y Anagnostidis, K. (2005). Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/2. Cyanoprokaryota 2. Teil: Oscillatoriales, Gustav Fischer, Stuttgart.
- Komárek J. y Komárková-Legnerová, J. (2002). Contribution to the knowledge of planktic cyanoprokaryotes from central Mexico. *Preslia, Praha*, 74: 207–233.

-
- Komárek, J. y Fott, B. (1961). Das Phytoplankton des Süßwassers. 5. Teil, Chlorophyceae (Grünalgen). Ordnung: Volvocales. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- Komárek, J. y Fott, B. (1983). Das Phytoplankton des süßwassers: systematik und biologie. 5. Teil, Chlorophyceae (Grünalgen). Ordnung: Chlorococcales. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- Komárek, J. y Mareš, J. (2012). An update to modern taxonomy of freshwater planktic heterocytous cyanobacteria. *Hydrobiology* 698(1): 327-351.
- Krammer, K. (1982). Valve morphology and taxonomy in the genus *Cymbella* C.A. Agardh. En Helmcke, J. G. y Krammer, K. (Eds.). *Micromorphology of diatom valves*. J. Cramer, Vaduz.
- Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1991). Bacillariophyceae. Teil 3: Centrales, Fragillariaceae, Eunotiaceae. Süßwasser ora von Mitteleuropa Band 2/3. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Lam, A. K., Prepas, E. E., Spink, D., y Hrudey, S. E. (1995). Chemical control of hepatotoxic phycoplankton blooms: Implications for human health. *Water Resources* 29 (8): 1845-1854.
- León-Tejera, H. y Montejano, G. (2000). Taxonomy and diversity of Dermocarpella (Cyanoprokaryota/Cyanophyceae/Cyanobacteria) from the Pacific coast of Mexico. *Cryptogamie Algologie* 21: 259-272.
- Lucena, E. (2008). Aspectos sanitarios de las cianotoxinas. *Higiene y Sanidad Ambiental* 8: 291-302.
- Margalef, R. (1983). Limnología. Omega, Barcelona.
- Margulis, L. y Bermudes, D. (1984). Symbiosis as a mechanism of evolution: status of cell symbiosis theory. *Symbiosis* 1: 101-124.
- Matsukazi, M., Mucc, J. L. N. y Rocha, A. A. (2004). Comunidade toplanctônica de um pesqueiro na cidade de São Paulo. *Revista de Saúde Pública* 38(5): 679-686.
- Mazzeo, N., Clemente, J., García-Rodríguez, F., Kruk, C., Larrea, D., Meerhoff, M., y Scasso, F. (2002). Eutrofización: causas, consecuencias y manejo. *Perfil Ambiental del Uruguay* 1: 39-56.
- Metcalf, J. S. y Codd, G. A. (2014). Cyanobacterial Toxins (Cyanotoxins) in Water. Foundation for Water Research, Londres.

-
- Sarma, N. y Sarma, S. S. (2012). Cianobacterias y cianotoxinas dulceacuáticas en ambientes tropicales: una revisión de la problemática. En: Pica-Granados, Y., y Ramírez-Romero, P (Eds). *Contribuciones al conocimiento de la ecotoxicología y química ambiental en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec.
- Naselli-Flores, L. (2000). Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors. *Hydrobiology* 424: 1-11.
- Newcombe, G. (2009). International guidance manual for the management of toxic cyanobacteria. Global Water Research Coalition, Nueva York.
- Novelo, E. (2011). Cyanoprokaryota. En: Medina, R. (Ed.). *Fascículo 90 Serie: Flora del Valle Tehuacán-Cuicatlán*. Instituto de Biología, UNAM, México, D.F.
- Nutman, A. P., Bennett, V. C., Friend, C. R., Van Kranendonk, M. J., & Chivas, A. R. (2016). Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. *Nature*.
- OCDE. (1982). Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. OCDE, Paris.
- Olem, H. y Flock, G. (1990). Lake and reservoir restoration guidance manual (No. PB-93-207926/XAB; EPA--440/4-90/006). North American Lake Management Society, Merrifield.
- Olenina, I., Hajdu, S., Edler, L., Andersson, A., Wasmund, N., Busch, S., Göbel, J., Gromisz, S., Huseby, S., Huttunen, M., Jaanus, A., Kokkonen, P., Ledaine, I. and Niemkiewicz, E. (2006). Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings* 106: 144-150 pp.
- Oliva, M., Lugo, A., Alcocer, J., Peralta L. y Sánchez, R. (2001). Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiology* 466: 299-306
- OMS. (1998). Guidelines for Drinking Water Quality. Addendum to Vol 2, Health Criteria and other supporting information. World Health Organization, Geneva.
- O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., y Gobler, C. J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harm. Algae* 14: 313-334.

-
- Paerl, H. W. (2008). Nutrient and Other Environmental Controls of Harmful Cyanobacterial. En: Hudnell, H. K. *Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs*. Springer New York.
- Pérez D, Soraci A. y Tapia M. (2008). Cianobacterias y cianotoxinas: rol de las microcistinas en la salud humana y animal y su detección en muestras de agua. *Analecta Veterinaria* 28 (1): 48-56.
- Pica-Granados Y. y Ramírez-Romero, P. (2012). Contribuciones al conocimiento de la ecotoxicología y química ambiental en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Juitepec.
- Pineda-Mendoza, R. M., Olvera-Ramírez, R., y Martínez-Jerónimo, F. (2012). Microcistinas producidas por cianobacterias filamentosas en lagos urbanos. Un estudio de caso en la Ciudad de México. *Hidrobiología* 22(3): 290-298.
- Pizzolon, L. (1996). Importancia de las cianobacterias como factor de toxicidad en las aguas continentales. *Interciencia* 21 (6): 239-245.
- Prescott, G. W., Croasdale, H. T., Vinyard, W. C., y Mattos-Bicudo, C. E. (1975). A synopsis of North American desmids. University of Nebraska Press, Nebraska.
- Ramírez-García, P., Nandini, S., y Sarma, S.S.S., Robles-Valderrama, E., Cuesta, I. y Hurtado-Maria, D. (2002). Seasonal variations of zooplankton abundance in the freshwater reservoir Valle de Bravo (Mexico). *Hydrobiologia* 467: 99-108.
- Ramírez, P., Martínez, E., Martínez, M. D. y Eslava, C. (2004). Cianobacterias, microorganismos del fitoplancton y su relación con la salud humana. En: Rosas, I., Cravioto A. y Ezcurra, E. (Eds.). *Microbiología ambiental*. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.
- Ressom, R., Soong, F.S., Fitzgerald, J., Turczynowicz, L., Saadi, O., Roder, D., Maynard, T. y Halconero, I. (1994). Health effects of toxic cyanobacteria (blue-green algae). National Health and Medical Research Council, Sidney.
- Reynolds, C. S., Huszar, V., Kurk, C., Naselli-Flores, L. y Melo, S. (2002). Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* 24: 417-428.
- Rice E. W., Baird, R., Eaton, A. y Clesceri, L. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington.

-
- Rico J. L. y Perales, R. (24 octubre de 2012). Raro caso en la presa La Estanzuela. El Sol de Hidalgo. Recuperado de: <http://www.oem.com.mx/elsoldehidalgo.htm>.
- Rippka, R., Deruelles, J., Waterbury, J. B., Herdman, M. y Stanier E. Y. (1979). Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of Cyanobacteria. *Journal of General Microbiology* 111: 1-61
- Rivera-Barquero, Á. (2008). Impacto de las cianotoxinas en la ecología acuática y la calidad del agua de consumo humano: estado actual de investigación en Costa Rica y México. Tesis de Licenciatura en Microbiología y Química Clínica. Universidad de Costa Rica.
- Rodgers, J. H. (2008). Algal toxins in pond aquaculture. Southern Regional Aquaculture Center, Mississippi.
- Rosas, I., Cravioto, A. y Ezcurra, E. (2004). Cianobacterias, microorganismos del fitoplancton y su relación con la salud humana. En: Ramírez, P., Martínez, E., Dolores, M. y Eslava, C. (Eds.). *Microbiología ambiental*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto de Ecología. UNAM.
- Roset, J., Aguayo, S., y Muñoz, M. J. (2001). Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. *Revista de Toxicología* 18: 65-71.
- Rositano, J., Nicholson, B. C. y Pieronne, P. (1998). Destruction of cyanobacterial toxins by ozone. *Ozone Science Engineering* 10 (3): 393-394.
- Sarma, T. A. (2012). Handbook of Cyanobacteria. Taylor and Francis group, New York.
- Schmidt, G. W. (1973). Primary Production of phytoplankton in the three types of Amazonian Waters, III. Primary Production of phytoplankton in a tropical flood plain lake of central Amazonia, Lago Castanho, Amazonas, Brasil. *Amazoniana* 4: 379-404.
- Schmidt, G. W. (1982). Primary production of phytoplankton in the three types of Amazonian waters. V. Some investigations on the phytoplankton and its primary productivity in the clear water of the lower rio Tapajós (Pará, Braz). *Amazoniana* 7(3): 335-348.
- Scott, W.E. (1991). Occurrence and significance of toxic cyanobacteria in Southern Africa. *Water Science Technology* 23: 175-180.
- Silva, K. P. B., Costa, M. M. S. y Guedes, E. A. C. (2011). Variação temporal do toplâncton de um lago pertencente à Área de Proteção Permanente no estado de Alagoas, nordeste do Brasil. *Acta Botânica Brasileira* 25(4): 890-898

-
- Sipaúba-Tavares, L.H., Millan, R.N. y Amaral, A.A. (2010). Influence of management on plankton community of fishponds during the dry and rainy seasons. *Acta Limnologica Brasilense* 22: 70-79.
- Sivonen, K. y Jones, G. (1999). Cyanobacterial toxins. In: Chorus, I. y Bartram, J (ed.), Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management, E & FN Spon, London.
- SMN, Sistema Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx/es/>. Consultado en septiembre del 2016.
- Stanier, R. Y. y Villanueva, J. (1996). Microbiología. Editorial Reverté, Madrid.
- Steffen, M., Zhu, Z., McKay, R., Wilhelm, S. y Bullerjahn, G. (2014). Taxonomic assessment of a toxic cyanobacteria shift in hypereutrophic Grand Lake St. Marys (Ohio, USA). *Harmful Algae* 33: 12-18.
- Stolz, J. y Margulis, L. (1984). The stratified microbial community at Laguna Figueroa, Baja California, Mexico: A possible model for prephanerozoic laminated microbial communities preserved in cherts. *Origin of Life* 14: 671-679.
- Sunda, W.G. (2001). Bioavailability and bioaccumulation of iron in the sea. En. Turner, R. y Hunter, K. (Eds.). *The Biogeochemistry of iron in seawater*. John Wiley and Sons, New York.
- Tavera, R. y Komarek, J. (1996). Cyanoprokaryotes in the volcanic lake of Alchichica, Puebla State, Mexico. *Algological Studies* 83: 511-538.
- Tomas, C. (1997). Identifying marine phytoplankton. Academic Press, New York.
- Tomasini-Ortiz, A., Moeller-Chávez, G., Sánchez Chávez, J., y Bravo-Inclán, L. (2012). Cianobacterias y cianotoxinas en el lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica* 5(2): 93-101.
- Tovar-Escorza, L. (2007). Propuesta para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales. Tesis para obtener el título de Ingeniero Industrial. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Pachuca.

-
- Tundisi, J., Matsumura-Tundisi, T. y Abe, D. (2008). The ecological dynamics of Barra Bonita (Tietê River, SP, Brazil) reservoir: implications for its biodiversity. *Brazilian Journal of Biology* 68(4): 1079-1098.
- USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. (1986). Quality criteria for water 1986: U.S. Environmental Protection Agency, EPA 440/5-86-001, Washington, D.C.
- USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. (2005). "Fact sheet: The drinking water contaminant candidate list. The source of priority contaminants for the drinking water program." EPA 815-F-05-001, Office of Water, USEPA, Washington, D.C.
- Vela L., Sevilla, E., Martín, B., Pellicer, S., Bes, M., Fillat, M. y Peleato, M. (2007). Las microcistinas. *Revista de la Real Academia de las Ciencias*. 62: 135-146.
- Villafañe, V., y Reid, F. (1995). Métodos de microscopía para la cuantificación del fitoplancton. Manual de métodos ficológicos. Universidad de Concepción, Concepción.
- Wacklin, P. (2006). Biodiversity and phylogeny of planktic cyanobacteria in temperate freshwater lakes. Tesis para obtener el grado de Doctor, Universidad de Helsinki, Facultad de Agricultura y Forestal. Helsinki.
- Whitton, B. A. (2000). Soils and rice-fields. En Whitton, B. (Ed.) *The ecology of cyanobacteria*. Springer, Rotterdam.
- Whitton B.A. y Potts, M. (2012). Introduction to the Cyanobacteria. En: Whitton, B. (Ed.). *The Ecology of Cyanobacteria. Their Diversity in Time and Space*. Springer, Nueva York.
- Willame, R., Thys, I., Jacquet, V., Verbanck, M. Cauchie, H. y Hoffmann, L. (2008). Environmental variables involved in the development of bloom-forming cyanobacteria in a meso-to-eutrophic reservoir. *Algological Studies* 126: 229-249.
- Willén, E. (2000). Phytoplankton water quality assessment an indicator concept. En: Heinonen, G. Ziglio y Van der Beken, A. (Eds). *Hydrological and limnological aspects of lake monitoring* Wiley y Sons, California. 58-80 pp.
- Xiao-e, Y., Wu, X., Hu-lin, H. y Zhen-li. (2008). Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal Zhejiang University Science* 9(3): 197-209.