

UNIVERSIDAD EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE BIOLOGÍA



**ABUNDANCIA Y DISTRIBUCIÓN DE CIANOBACTERIAS (*Microcystis sp*,  
*Anabaena sp*, *Oscillatoria sp*) EN EL LAGO DE ILOPANGO, EL  
SALVADOR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO POR:  
ALBERTO PATRICIO OLIVARES PAVEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE:  
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR OCTUBRE 2013

UNIVERSIDAD EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE BIOLOGÍA



**ABUNDANCIA Y DISTRIBUCIÓN DE CIANOBACTERIAS (*Microcystis sp*,  
*Anabaena sp*, *Oscillatoria sp*) EN EL LAGO DE ILOPANGO, EL  
SALVADOR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO POR:  
ALBERTO PATRICIO OLIVARES PAVEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE:  
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

ASESOR DE INVESTIGACIÓN: \_\_\_\_\_

Lic. ÁNGELA GUDELIA PORTILLO ZELAYA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR OCTUBRE 2013

UNIVERSIDAD EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE BIOLOGÍA



**ABUNDANCIA Y DISTRIBUCIÓN DE CIANOBACTERIAS (*Microcystis sp*,  
*Anabaena sp*, *Oscillatoria sp*) EN EL LAGO DE ILOPANGO, EL  
SALVADOR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO POR:  
ALBERTO PATRICIO OLIVARES PAVEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE:  
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

JURADO EVALUADOR: \_\_\_\_\_

Lic. RODOLFO FERNANDO MENJÍVAR

JURADO EVALUADOR: \_\_\_\_\_

M Sc. BEGONIA MARÍA VIEYTEZ BASAGOITIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR OCTUBRE 2013

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

**RECTOR:**

**Ing. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIA GENERAL:**

**Dra. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FISCAL**

**Lic. FRANCISCO CRUZ LETONA**

**DECANO**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**

**M.Sc. MARTIN ENRIQUE GUERRA CÁCERES**

**SECRETARIO**

**Lic. CARLOS ANTONIO QUITANILLA APARICIO**

**DIRECTOR DE LA ESCUELA DE BIOLOGIA**

**Lic. RODOLFO FERNANDO MENJÍVAR**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR OCTUBRE 2013**

*Ya sea que comáis, que bebáis, o que hagáis cualquier otra cosa, hacedlo todo para la gloria de Dios.*

1 Corintios 10:31

Quiero dedicar esta tesis a Dios:

Señor, Gracias porque hasta aquí me has ayudado.  
Tu misericordia, oh SEÑOR, se extiende hasta los cielos,  
tu fidelidad, hasta el firmamento.

Alberto Olivares Pavez

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo agradezco a Dios, mi Señor y Salvador, porque por su gracia he llegado hasta aquí, habiéndome acompañado y guiado a lo largo de la carrera, enseñándome a depender de Él en todo momento y mostrándome su bondad, amor y grandeza durante todo este recorrido.

A mi asesora de tesis, Licenciada Ángela Gudelia Portillo por el apoyo, orientación y dirección en el desarrollo de este trabajo.

Al Jurado Calificador, por la atinada orientación y atención al desarrollo del trabajo.

Así también, por el gran apoyo financiero como por la constante preocupación y asistencia, quiero agradecer al Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de El Salvador (LABTOX-UES) en especial a los Licenciados Oscar Amaya y Jaime Espinoza por la ayuda y pronta asistencia desde antes de comenzar esta investigación hasta su finalización. A la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), en especial a la M.Sc Begonia Vieytez, durante su estancia en dicha institución, por la constante ayuda con la logística y coordinación con todo el equipo de ANDA y a todo el personal de la Planta de Guluchapa que me apoyó en el transporte para la recolección de datos.

Sin duda agradecer a mis padres, Alberto Olivares Menay y Gladys Pavez Contreras quienes me brindaron su apoyo incondicional, sus consejos en momentos de desánimo y paciencia durante todo este proceso.

Por último pero no menos importante a todas las personas que me han ayudado a lo largo de este recorrido: compañeros, licenciados y hermanos en Cristo quienes me han apoyado ya sea en muestreos previos, con ideas y/o sus oraciones.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>Contenido</b>	<b>Nº de página</b>
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	3
ÍNDICE DE CUADROS .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE ANEXOS.....	7
I. RESUMEN.....	9
II. INTRODUCCIÓN.....	10
III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	12
3.1. Cianobacterias.....	12
3.1.1. Generalidades de las cianobacterias.....	12
3.1.2. Estructura y organización celular de las cianobacterias .....	13
3.1.3. Taxonomía y Clasificación de las cianobacterias .....	14
3.1.4. Distribución y hábitat de las cianobacterias.....	16
3.1.5. Ecoestrategia de las cianobacterias .....	17
3.1.6. Factores que regulan el crecimiento o proliferación de las cianobacterias .....	18
3.1.7. Toxicidad .....	23
IV. OBJETIVOS.....	28
V. METODOLOGÍA .....	29
5.1. Descripción del área de estudio .....	29
5.1.1. Ubicación geográfica.....	29
5.1.2. Aspectos físicos.....	29
5.1.3. Aspectos biológicos.....	30
5.1.4. Aspectos sociales .....	31
5.2. Metodología de campo.....	31
5.2.1. Plan de recolección de datos.....	31
5.2.2. Diseño muestral.....	32
5.2.3. Recolección de datos .....	35
5.2.4. Metodología de laboratorio .....	36
5.3. Análisis de datos.....	38

VI.	RESULTADOS .....	40
6.1.	Abundancia de las cianobacterias .....	40
6.2.	Distribución y variación de las cianobacterias .....	42
6.3.	Correlación entre abundancia y parámetros físico-químicos .....	47
6.4.	Correlación entre abundancia y nutrientes .....	48
VII.	DISCUSIÓN .....	52
VIII.	CONCLUSIONES .....	61
IX.	RECOMENDACIONES .....	62
X.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
XI.	ANEXOS.....	68

## ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Nº de página
Cuadro 1. Abundancia de <i>Microcystis sp</i> en la columna de agua en los siete puntos de muestreo entre los meses de noviembre de 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango .....	41
Cuadro 2. Prueba de Rangos Múltiples (LSD de Fisher, 95% de confianza) para cel/ml por meses de muestreo. ....	43
Cuadro 3. Prueba de Rangos Múltiples (LSD de Fisher, 95% de confianza) para cel/ml por meses de muestreo. ....	43
Cuadro 4. Valores de temperatura superficial (°C), pH superficial y penetración de la luz (m.) registrados en el lago de Ilopango, desde noviembre de 2012 a febrero de 2013. ....	47
Cuadro 5. Correlación entre la abundancia y los parámetros fisicoquímicos durante noviembre de 2012 y febrero de 2013 .....	48
Cuadro 6. Valores de fósforo (mg/L), nitrógeno total (mg/L) y relación N:P registrados en el lago de Ilopango, de noviembre 2012 a febrero 2013 .....	49
Cuadro 7. Correlación entre abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de noviembre de 2012 .....	50
Cuadro 8. Correlación entre abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de diciembre de 2012 .....	50
Cuadro 9. Correlación entre abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de enero 2013 .....	50
Cuadro 10. Correlación entre abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de febrero 2013 .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Contenido</b>	<b>Nº de página</b>
Fig. 1. Mapa del lago de Ilopango y coordenadas de los sitios de muestreo .....	34
Fig. 2. Abundancia promedio de <i>Microcystis sp</i> en la columna de agua en los siete puntos de muestreo entre los meses de noviembre de 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango .....	41
Fig.3. Comparación de valores medios de cel/mL para los tres diferentes niveles de profundidad. A) noviembre 2012, B) diciembre 2012, C) enero 2013 y D) febrero 2013.....	44
Fig.4. Comparación de valores medios de cel/mL para los siete puntos de muestreo. A) noviembre 2012, B) diciembre 2012, C) enero 2013 y D) febrero 2013 .....	45
Fig.5. Comparación de valores medios de cel/mL para los cuatro meses de muestreo. A) superficie (0 metros), B) 8 metros, C) 15 metros.....	46

## ÍNDICE DE ANEXOS

Contenido	Nº de página
Anexo 1. Géneros de cianobacterias estudiados .....	69
Anexo 2. Muestreo cuantitativo de cianobacterias con una botella limnológica Niskin en el lago de Ilopango.....	70
Anexo 3. Cámara de recuento celular Sedwick-Rafter.....	70
Anexo 4. Reticulación de una cámara Sedwick-Rafter.....	71
Anexo 5. Abundancia de <i>Microcystis sp</i> , <i>Anabaena sp</i> y <i>Oscillatoria sp</i> en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre y octubre del 2012 en el lago de Ilopango.....	72
Anexo 6. Abundancia promedio de <i>Microcystis sp</i> en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre de 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.	73
Anexo 7. Abundancia promedio de <i>Anabaena sp</i> en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre de 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango	73
Anexo 8. Abundancia promedio de <i>Oscillatoria sp</i> en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre de 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.	74
Anexo 9. Promedios mensuales de temperatura, humedad relativa y precipitación de enero de 2000 a mayo de 2013, obtenidos de la estación aeropuerto de Ilopango ubicada en el departamento de San Salvador entre las coordenadas 13°42'latitud Norte y 89° 07'longitud Oeste a una elevación de 615 msnm .....	75
Anexo 10. Relación entre abundancia de cianobacterias y precipitación promedio entre los meses de septiembre del 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango .....	79
Anexo 11. Promedios mensuales de dirección del viento y velocidad del viento (nudos) de 2010 a mayo de 2013, obtenidos de la estación aeropuerto de Ilopango ubicada en el departamento de San Salvador entre las coordenadas 13°42'latitud Norte y 89° 07'longitud Oeste a una elevación de 615 msnm.....	80
Anexo 12. Análisis de Varianza para abundancia de <i>Microcystis sp</i> - Suma de cuadrados tipo III	81
Anexo 13. Análisis de Varianza para abundancia de <i>Anabaena sp</i> - Suma de cuadrados tipo III..	81

Anexo 14. Análisis de Varianza para abundancia de <i>Oscillatoria sp</i> - Suma de cuadrados tipo III	81
Anexo 15. Valores de temperatura (°C) y penetración de la luz (m) registrados en el lago de Ilopango, de septiembre y octubre de 2012 .....	82

## I. RESUMEN

Las cianobacterias, organismos procariotas fotosintéticos, pueden formar parte del fitoplancton de lagos y embalses y que en algunas ocasiones, si las condiciones de temperatura, pH y disponibilidad de luz son favorables y abundan los nutrientes, principalmente el fósforo y el nitrógeno, pueden dar lugar a proliferaciones (“blooms”). Los efectos negativos que se producen como consecuencia del crecimiento masivo de estas poblaciones, entre estas la producción de potentes toxinas por parte de algunas especies y teniendo en cuenta la extraordinaria importancia ecológica del lago de Ilopango, la realización de estudios que permitan conocer la abundancia, distribución y variación de cianobacterias potencialmente tóxicas (*Anabaena sp*, *Oscillatoria sp* y *Microcystis sp*), así como su relación con diversos parámetros físico-químicos como temperatura, pH, disponibilidad de luz, fósforo y nitrógeno, no sólo estaría plenamente justificada, sino que se revela como un instrumento totalmente imprescindible, debido a las diversas actividades que se desarrollan o están próximas a desarrollarse en el lago, entre estas la potabilización del agua. Con este fin se realizaron muestreos mensuales de cianobacterias (*Anabaena sp*, *Microcystis sp* y *Oscillatoria sp*), nitrógeno, fósforo, pH superficial, temperatura superficial del agua y penetración de la luz en los meses de noviembre de 2012 a febrero de 2013 a diferentes profundidades de la columna de agua en 7 puntos de muestreo previamente establecidos. Para determinar las diferencias significativas entre los puntos de muestreo y los meses muestreados se utilizó una Anova, asimismo se utilizó una correlación de Pearson para determinar la relación existente entre la abundancia de las cianobacterias y los parámetros muestreados. Los datos encontrados sugieren que la proliferación de cianobacterias en el lago de Ilopango es un fenómeno que no se presenta en época seca, probablemente por las bajas concentraciones de nitrógeno durante los meses muestreados, claramente relacionado con, la escasa precipitación que evita la llegada de nutrientes al lago por escorrentía; mientras que la influencia de los demás parámetros físico-químicos por sí solos, no constituyen un factor determinante en la proliferación de estos microorganismos.

## II. INTRODUCCIÓN

Las cianobacterias, son microorganismos que poseen características comunes con otras bacterias y también con algas eucariotas, lo que las hace únicas en cuanto a su fisiología, tolerancia a condiciones extremas y flexibilidad adaptativa. Estos microorganismos han colonizado exitosamente los ecosistemas acuáticos y actualmente se encuentran ampliamente distribuidas en las aguas de todo el mundo contribuyendo significativamente a la producción primaria acuática.

Este estudio se realizó porque las cianobacterias planctónicas son un tema de preocupación tanto para la calidad del agua como la salud humana, durante fenómenos en los que proliferan descontroladamente especialmente en los ecosistemas límnicos, debido a que la mayoría de sus especies son capaces de producir peligrosas toxinas que pueden generar un impacto negativo en la salud de diversos seres vivos y una cascada de efectos que pueden modificar de manera importante la estructura global del ecosistema (Reynolds 2006 citado por Bonilla y Aubriot 2009, Bonilla 2009).

Hasta el momento, los datos sobre la abundancia de las cianobacterias potencialmente tóxicas en los lagos de El Salvador son muy escasos. Es por ello que la investigación de esta problemática se realizó con el interés de generar una línea base de interpretación de la tendencia de los parámetros fisicoquímicos y las conductas de las densidades poblacionales de cianobacterias en el lago de Ilopango, para que posteriormente se puedan generar y organizar estrategias de acción y control sobre las floraciones que ocurren en este cuerpo de agua, de modo que sirva de referencia a futuros estudios o como punto de partida a un posible procedimiento de monitorización de los demás cuerpos de aguas en el país. Además proporcionar bases conceptuales y científicas, así como un valioso conocimiento sobre el fenómeno de proliferación de cianobacterias en el lago y su interposición en actividades como: el “Proyecto de Agua Potable para el Lago de Ilopango” (PAPLI), realizado por La Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), y actividades productivas como la pesca y la acuicultura, dando

así, un respaldo que les permita adoptar medidas para la mejora de las condiciones en su labor productiva.

Durante el estudio se realizaron cuatro muestreos entre los meses de noviembre del 2012 a febrero del 2013 en el lago de Ilopango, comprendiendo la época seca. Este consistió en la recolección de muestras a diferentes profundidades de la columna de agua en 7 puntos de muestreo previamente establecidos, para determinar la abundancia de *Anabaena sp*, *Oscillatoria sp* y *Microcystis sp*, géneros potencialmente tóxicos y de los cuales se han reportado proliferaciones, y su relación con los parámetros fisicoquímicos (relación N:P, pH superficial, temperatura superficial y penetración de la luz), que tienen una mayor relación en la dinámica de las comunidades de fitoplancton. Con el fin de conseguir dichos objetivos se colectaron y analizaron cualitativa y cuantitativamente muestras fitoplanctónicas y se utilizaron pruebas estadísticas como la Anova para determinar la existencia o no de diferencias significativas entre los puntos, profundidades y meses muestreados, una prueba de rango múltiples que evidenciara donde había diferencias significativas, asimismo se utilizó una correlación de Pearson que permitiera probar si existía relación o no entre las variables estudiadas.

Los resultados de la investigación muestran poca abundancia de *Microcystis sp* y *Anabaena sp*, así como la ausencia de *Oscillatoria sp* durante la época seca. Asimismo revelan una distribución homogénea de *Microcystis sp* en toda la columna de agua muestreada. Además; las bajas correlaciones obtenidas por los estadísticos utilizados dejan ver que por sí mismos que los parámetros físico-químicos no son determinantes para el desarrollo de una floración, reflejando que la interacción conjunta de todos los parámetros muestreados serían determinantes para la proliferación de las cianobacterias.

### III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 3.1. Cianobacterias

##### 3.1.1. Generalidades de las cianobacterias

Las cianobacterias comprenden un grupo morfológicamente heterogéneo de bacterias fototróficas. Estas difieren en características clave de las bacterias rojas y verdes anoxifototróficas (Madigan *et al.* 2006).

Las Cyanobacterias, son organismos procariontes, autótrofos, que realizan fotosíntesis con liberación de oxígeno al igual que las plantas superiores; su coloración azulada, que puede ser rojiza o púrpura, viene dada por pigmentos fotosintéticos llamados ficobiliproteínas. Estos pigmentos les permiten aprovechar radiaciones de longitudes de onda que muy pocos organismos pueden utilizar en agua dulce (Quesada y Cirés 2006). Se encuentran entre los seres vivos más primitivos. Se originaron en el período Pre-cámbrico, hace aproximadamente 2700 millones de años y dominaron la biota del planeta por más de 1500 millones de años (Bonilla y Aubriot 2009, Meichtry *et al.* 2009).

Precisamente, por su ancestral origen evolutivo y por presentar características compartidas entre los demás grupos de procariontes, de algas eucariontes o incluso de plantas; las cianobacterias representan uno de los grupos más controvertidos en los ecosistemas acuáticos. Aún en la actualidad se clasifican según dos sistemas taxonómicos distintos: la *clasificación botánica* y la *nomenclatura microbiológica*. Su carácter procarionte ha hecho que las cianobacterias, que tradicionalmente se han considerado algas, ahora se consideren bacterias, y de ahí los dos sistemas de clasificación paralelos. Incluso su nombre ha sufrido numerosas variaciones en las últimas décadas, pasando de llamarse cianofíceas (algas verdeazuladas) a llamarse cianobacterias o la denominación recientemente propuesta de cianoprocariontes (Cirés y Quesada 2011).

Las Cyanobacterias forman parte del fitoplancton y son productores primarios de la comunidad planctónica, el carbono orgánico y la energía producida por ellas durante la fotosíntesis son transferidas a otros organismos a través de las cadenas alimentarias (Meichtry *et al.* 2009).

En cuanto a la reproducción, es asexual, generalmente por fisión binaria (Bonilla y Aubriot 2009).

### **3.1.2. Estructura y organización celular de las cianobacterias**

La célula vegetativa se caracteriza por presentar un protoplasto rodeado por una cubierta similar a la que presentan las bacterias Gram-negativas. En ocasiones, la pared celular se rodea de una cápsula o vaina mucilaginosa que facilita la agregación de las células y puede servirles de protección contra la desecación. En la parte central se encuentra el material genético, formado por un cromosoma circular de ADN (Makino y Tsuzaki 1971 citado por Carrasco 2007) y los ribosomas (Makino y Tsuzaki 1971 citado por Carrasco 2007).

Se incluyen dentro de las Cyanobacterias aproximadamente 2400 especies, comprende formas unicelulares, coloniales o filamentosas, provistas o no de una vaina mucilaginosa, muchas de ellas presentan vesículas de gas o aerótopos, que son también inclusiones citoplasmáticas de forma cilíndrica que pueden llenarse de gas, permitiendo a las cianobacterias modificar su densidad celular. Estas vesículas confieren a las cianobacterias planctónicas una importante ventaja ecológica sobre otros elementos de la población fitoplanctónica, ya que les permite modificar su posición vertical en la columna de agua (Madigan *et al.* 2006, Carrasco 2007, Meichtry *et al.* 2009).

En las Cyanobacterias, la fotosíntesis es el principal modo de obtención de energía para su metabolismo y los pigmentos presentes son clorofila a y b, xantofilas, c-

ficocianina, responsable del color azul verdoso de estos microorganismos, c-ficoeritrina, responsable de que algunas especies sean rojizas y carotenos. (Echenique y Aguilera 2009).

En los organismos filamentosos heterocistinos pueden encontrarse células modificadas: los heterocistos y/o los acinetos. Los heterocistos son células modificadas de colores refringentes y morfología variada, poseen un engrosamiento polar en el extremo celular que se encuentra en contacto con la célula contigua, pueden o no tener vaina y están relacionados con la fijación de nitrógeno atmosférico. Por otra parte los acinetos son células modificadas de formas y tamaños variados y de contenido granular, pueden o no poseer vaina y su función principal es la de asimilar sustancias de reserva, actuando como estructura de resistencia ante situaciones de estrés. Ante condiciones favorables, germinan dando origen a una nueva población (Madigan *et al.* 2006, Echenique y Aguilera 2009).

### **3.1.3. Taxonomía y Clasificación de las cianobacterias**

Las Cyanobacterias son divididas en dos grandes grupos: formas no filamentosas y filamentosas. El primero incluye a los organismos cocales, unicelulares o coloniales en el orden de las Chroococcales y el segundo contiene a las formas filamentosas, distribuidas en tres Ordenes: Oscillatoriales, Nostocales y Stigonematales (Meichtry *et al.* 2009). Aunque según Vidal y Pérez (2009), actualmente la clasificación ha sido modificada de acuerdo a los avances científicos y la incorporación de técnicas moleculares para la distinción filogenética de los grupos. Estudios moleculares recientes han demostrado que la presencia o ausencia de ramificaciones verdaderas no es una característica relevante para separar Ordenes (Hoffmann *et al.* 2005 citado por Vidal y Pérez 2009). Debido a esto se ha propuesto una nueva clasificación que agrupa todos los talos filamentosos heterocitados con ramificaciones falsas y verdaderas o sin ramificaciones en un mismo Orden (Nostocales), eliminando el Orden Stigonematales (con ramificaciones verdaderas).

**3.1.3.1. Descripción de los órdenes (Hoffmann et al. 2005 citado por Acevedo 2012)**

a) Chroococcales: Comprende organismos cocoides, unicelulares o coloniales, con escasas o numerosas células incluidas en vainas mucilaginosas. Colonias de forma definida o indefinida, libres, flotantes o fijas, tabulares, compactas o huecas, en general sin polaridad. División celular simple, principalmente por fisión binaria, en 2, 3 o más planos, formación facultativa de exocistos y nanocistos (endosporas). A este orden corresponden los géneros: *Aphanocapsa*, *Chroococcus*, *Coelosphaerium*, *Merismopedia*, *Microcystis*, *Snowella*, *Woronichinia*.

El género *Microcystis* se caracteriza por presentarse en colonias microscópicas o, en ocasiones, macroscópicas, flotantes, con formas de esféricas a irregulares. Las células son esféricas o semiesféricas después de la división, sin envueltas individuales y presentan vesículas de gas visibles al microscopio (Cirés y Quesada 2011).

b) Oscillatoriales: Formas filamentosas, uniseriadas, con o sin vaina, talos homocistineos (sin heterocistos o acinetos), sin ramificaciones verdaderas; células de longitud uniforme a lo largo de todo el filamento, a excepción de las células terminales que son redondeadas en el ápice. Reproducción por hormogonios, los cuales se liberan de su vaina cuando las condiciones de crecimiento son óptimas. Algunos géneros representativos son: *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Planktolyngbya*, *Planktothrix*, *Pseudanabaena*, *Spirulina*.

El género *Oscillatoria* se encuentra en tricomas solitarios o más comúnmente formando talos macroscópicos con diversos aspectos. Tricomas cilíndricos, rectos o ligeramente curvos, vaina mucilaginosa ausente. Células dos veces más anchas que largas, discoides. Contenido celular verde azulado, castaño o violeta, homogéneo granulado, sin aerótopos. (Meichtry et al. 2009).

c) Nostocales: Talos filamentosos, heterocistíneos (presencia de acinetos y/o heterocistos) sin ramificaciones verdaderas, pueden poseer ramificaciones falsas; las células se dividen siempre perpendicularmente al eje del tricoma, sólo en una dirección. Reproducción principalmente por hormogonios u hormocistos. Sus géneros representativos son: *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Nodularia*, *Nostoc*, *Raphidiopsis*.

El género *Anabaena* comprende tanto especies bentónicas como planctónicas. Presenta filamentos solitarios, en ocasiones formando agregados. Las células tienen formas variadas, desde subesféricas a cilíndricas, siendo las células terminales muy similares al resto de células vegetativas del filamento. Es habitual la presencia de vesículas de gas (Cirés y Quesada 2011).

#### **3.1.4. Distribución y hábitat de las cianobacterias**

Las cianobacterias son ubicuas, se han encontrado desde los polos, hasta los desiertos más cálidos, se distribuyen en los más variados hábitats, agua dulce, salobre o marina; en ambientes como: aguas termales, nieve o desiertos, siendo capaces de prosperar en ambientes extremos (Mur *et al.* 1999, Meichtry *et al.* 2009). Junto con estos ecosistemas acuáticos, también es posible encontrar cianobacterias adaptadas a ambientes terrestres, llegando a ser muy abundantes en suelos tropicales y en suelos saturados de agua por ejemplo en zonas de los jardines donde se estanque el agua. Asombrosamente, el rango de crecimiento de las cianobacterias es normalmente mucho más bajo que el de muchas especies de algas con las que compite por el ecotopo (Mur *et al.* 1999, Carrasco 2007).

Las cianobacterias que viven en el medio acuático se pueden clasificar ecológicamente en dos grupos: planctónicas y bentónicas. Las primeras se caracterizan por vivir libremente en la superficie o en la columna de agua, mientras que las segundas viven en el fondo o asociadas a un sustrato (Carrasco 2007).

### 3.1.5. Ecoestrategia de las cianobacterias

Ciertas cianobacterias poseen vesículas de gas, capaces de ajustar su flotabilidad de forma cíclica, mediante la sustitución de constituyentes celulares más pesados, como las sustancias de reserva, por las mencionadas vesículas, cuyo gas tiene una densidad de aproximadamente la décima parte de la contenida en el agua. Estas vesículas de gas se hacen más abundantes cuando se reduce la luz con el fin de regular su flotabilidad, permitiéndoles mantenerse en zonas con luz óptima para su crecimiento. Por otra parte, el aumento en la presión de turgencia de las células, como resultado de la acumulación de productos de la fotosíntesis, causa una disminución en las vesículas de gas existente y por lo tanto una reducción de la flotabilidad (Mur *et al.* 1999, Lanzarot 2007). También se ha constatado, que la capacidad de las colonias de cianobacterias para regular su flotabilidad les permite mantenerse en las zonas con luz óptimas para su crecimiento pero, para ello, es necesario que el cuerpo de agua no presente una turbulencia excesiva (Lanzarot 2007).

Las cianobacterias que presentan vesículas de gas usan diferentes estímulos ambientales, como: la luz, la gravedad, la composición química del medio y la temperatura, disponiendo así de un mecanismo ecológico importante que les permite ajustar su posición en la columna de agua como pistas para optimizar su posición y por ello para encontrar un nicho adecuado para sobrevivir y crecer (Mur *et al.* 1999, Lanzarot 2007). Por otro lado, a pesar de tener una tasa de crecimiento baja, son capaces de captar eficientemente la luz en una amplia banda de longitud de onda y, en condiciones de baja intensidad lumínica, su crecimiento se ve favorecido obteniendo, así, una ventaja competitiva en los lagos que presentan turbidez o cuando hay densas poblaciones de algas (Lanzarot 2007).

La presencia de cianobacterias mantiene una correlación positiva con la temperatura del agua, siendo dominantes a 24°C en todas las proporciones de Nitrógeno: Fósforo (N:P) inferiores a 20µM/L. También se ha establecido que, en general, estos organismos

consiguen una mayor tasa de crecimiento con temperaturas más altas que las diatomeas y clorofíceas, (Domingues *et al.* 2005 citado por Lanzarot 2007).

Las cianobacterias también pueden crecer bruscamente bajo determinadas condiciones ambientales aumentando su biomasa en valores significativos con respecto a la concentración original, fenómeno conocido como floración. Los factores que desencadenan las floraciones de las cianobacterias planctónicas son diversos y actúan en forma combinada. Cada floración está formada por una o pocas especies. El fenómeno puede generarse en períodos que van desde pocas horas a varios días y desaparecer en un plazo similar. Sin embargo, algunas floraciones de cianobacterias pueden permanecer por períodos más largos como todo el verano, durante todo el año o incluso en forma permanente (Bonilla y Aubriot 2009).

#### **3.1.6. Factores que regulan el crecimiento o proliferación de las cianobacterias**

El crecimiento de las cianobacterias fitoplanctónicas en los ambientes naturales depende de su capacidad de optimizar la utilización de los recursos (luz y nutrientes) y minimizar las pérdidas (depredación, sedimentación hacia zonas afóticas donde no se realiza fotosíntesis y el lavado por arrastre de las corrientes de agua) de biomasa así como también de las interacciones tróficas. (Aubriot *et al.* 2009).

La flexibilidad fisiológica y morfológica de las cianobacterias generalmente incide en la modificación de su ambiente y en el establecimiento de las poblaciones (Aubriot *et al.*, 2009). Entre las características fisiológicas y ecológicas que facilitan la dominancia de las cianobacterias en los ecosistemas acuáticos están:

### **3.1.6.1. Disponibilidad de la luz y la zona de mezcla**

La luz que recibe el fitoplancton (microalgas y cianobacterias) en un cuerpo de agua depende de la profundidad de la zona iluminada, y esta puede causar diferencias en el contenido de toxina de dos o tres órdenes de magnitud. La capa superior iluminada de la columna de agua se conoce como zona eufótica y el límite ( $Z_{eu}$ ) está definido como la profundidad a la que llega el 1% (valor convencional y de referencia del punto de compensación) de la luz subsuperficial (Kirk 1994 citado por Aubriot *et al.* 2009). De igual manera la luz recibida depende también de la profundidad hasta donde se produce la mezcla hidrológica de la columna de agua. Esta profundidad de la zona de mezcla ( $Z_m$ ) es la capa de agua por arriba de la termoclina que puede ser mezclada por la acción del viento. En los lagos que no están estratificados, la zona de mezcla abarca toda la columna de agua ( $Z_m = Z$ ) (Aubriot *et al.* 2009, García s.a.). Si el cociente  $Z_{eu}/Z_m$  es  $\geq 1$ , los organismos estarán circulando en la zona iluminada del lago, mientras que los valores menores a 1 son indicadores de condiciones de luz potencialmente limitantes para el crecimiento (Kirk 1994 citado por Aubriot *et al.* 2009).

Gracias a su adaptabilidad a intensidades de luz bajas o extremadamente altas, las cianobacterias pueden crecer en condiciones no óptimas para el fitoplancton en general. Asimismo, pueden acceder a condiciones favorables para el crecimiento por su capacidad de regular su posición en la columna de agua alterando la proporción de pigmentos accesorios (ficobilinas) para aumentar la absorción de la luz en el espectro visible (400 a 700 nm) (Aubriot *et al.* 2009, Meichtry 2009).

### **3.1.6.2. Distribución en la columna de agua**

Un requerimiento esencial para lograr el crecimiento continuo del fitoplancton es minimizar la tasa de hundimiento para prolongar su permanencia en la zona eufótica (Aubriot *et al.* 2009). Las cianobacterias regulan la flotación por medio de mecanismos de

regulación, mediante la sustitución de constituyentes celulares más pesados, como las sustancias de reserva, lo que les permite a las cianobacterias alcanzar profundidades de 2 a 4 m en horas. Cuando se encuentran en la profundidad de la columna de agua, estas consumen las partículas almacenadas que actuaban como lastre y las vesículas de gas se vuelven a formar, cerrando en ciclo de flotabilidad (Paerl 1983, Porat *et al.* 1999 citados por Lanzarot 2007, Aubriot *et al.* 2009, Meichtry 2009).

Según Aubriot *et al.* (2009) de acuerdo a las condiciones de mezcla y estabilidad de la columna de agua y la frecuencia de la estratificación y mezcla de la misma, podemos encontrar tres grupos de cianobacterias planctónicas formadoras de floraciones:

- a) Acumulativas: crecen en superficie formando grumos o acúmulos visibles en condiciones de estratificación y estabilidad de la columna de agua por períodos prolongados.
- b) Dispersivas: forman floraciones en condiciones de mezcla continua de toda la columna de agua
- c) Semi-acumulativas: aparecen en ambientes donde ocurre estratificación por períodos de días a semanas.

### **3.1.6.3. Temperatura**

El aumento de la temperatura del agua por sobre los 20 °C favorece el desarrollo de las cianobacterias (tasa máxima de crecimiento entre 25 y 30°C), ya que incrementa las tasas de reproducción celular y de crecimiento (Reynolds 2006 citado por Aubriot *et al.* 2009, De León 2002, Roset *et al.* 2001). Entre el 0 °C y el valor óptimo para cada organismo, se produce un incremento de la tasa de crecimiento en función de la temperatura. Por encima del rango de temperatura óptima ocurre una disminución abrupta de la tasa de crecimiento (Aubriot *et al.* 2009).

#### **3.1.6.4. Disponibilidad de nutrientes**

El protoplasma celular de las cianobacterias, requiere de aproximadamente 20 elementos químicos para la formación de la nueva biomasa, algunos de ellos son necesarios en grandes cantidades (H, C, O y N) y otros en cantidades relativamente pequeñas (P, S, K, Na, Ca, Mg y Cl). Un conjunto de nutrientes que intervienen en el metabolismo (ej.: estructura de enzimas) son requeridos en concentraciones traza (Si, Fe, Mn, Mo, Cu, Co, Zn, etc.) (Aubriot *et al.* 2009). A pesar de esto, los nutrientes claves son dos: el Nitrógeno (N), que es un elemento esencial en la composición de aminoácidos y las reservas celulares se restringen a proteínas ricas en N, y el Fósforo (P) que es un componente esencial del metabolismo celular debido a que sus enlaces actúan como acumuladores y liberadores de energía para las reacciones enzimáticas (ATP, Adenosín Trifosfato); además, de ser esencial en estructura del ADN y las membranas celulares (De León 2002, Aubriot *et al.* 2009). Los altos requerimientos de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) por el fitoplancton combinado con un suministro ambiental restringido en relación a los otros nutrientes, determina que normalmente el P sea el principal elemento limitante del crecimiento fitoplanctónico en ambientes límnicos (Schindler 1977, Hudson *et al.* 2000 citados por Aubriot *et al.* 2009).

El crecimiento de fitoplancton, requiere de la incorporación de una cuota de nutrientes inorgánicos del medio (proporciones de Nitrógeno: Fósforo (N: P) inferiores a  $20\mu\text{M/L}$ ), en similar proporción a la que contiene la célula. Los requerimientos celulares están relacionados con su composición atómica (Domingues *et al.* 2005 citado por Lanzarot 2007, Aubriot *et al.* 2009). La relación estequiométrica es C:N:P = 106:16:1, conocida como la relación de Redfield (1958). Cuando el suministro de nutrientes desde el ambiente se desvía de esta proporción se produce la deficiencia y posterior limitación del crecimiento celular. Relaciones bajas (ej.: N/P < 10) indican limitación potencial por Nitrógeno, mientras que relaciones altas (ej.: N/P > 20) indican limitación potencial por Fósforo. Cuando estas condiciones no ocurren, la floración desaparece y da lugar a otros organismos (De León 2002, Aubriot *et al.* 2009).

#### **3.1.6.5. pH**

De León L. (2002) destaca las aguas duras (pH alcalino) como una de las causas que favorecen y controlan el desarrollo de las floraciones de cianobacterias. Al igual Roset *et al.* (2001) mencionan que las cianobacterias tienen una mayor facilidad del crecimiento en ambientes dulceacuícolas, cuando las aguas son alcalinas o neutras con pH entre 6 y 9.

#### **3.1.6.6. Depredación**

Según Aubriot *et al.* (2009) la depredación o herbivoría por parte del zooplancton y algunos moluscos bivalvos es uno de los factores más importantes que modifican la biomasa y la composición de la comunidad del fitoplancton (microalgas y cianobacterias). Cuando la biomasa de las cianobacterias es baja, o cuando las cianobacterias dominantes son de pequeño tamaño (menor a 50  $\mu\text{m}$ ), el control de los depredadores puede ser eficaz para disminuir dicha biomasa. Otro tipo de control biológico que provoca la disminución de las poblaciones de cianobacterias son los virus. Las cianobacterias son infectadas por virus cianófagos y cuyo origen es tan antiguo como el de las mismas cianobacterias.

#### **3.1.6.7. Turbulencia**

Generalmente la turbulencia se asocia a la presencia del viento y determina una disminución de la transparencia del agua por aumento de la turbidez en ambientes someros (resuspensión), actuando como un factor controlador de las floraciones, ya que ocasiona una disminución de la tasa de fotosíntesis y de la biomasa algal (De León 2002).

#### **3.1.6.8. Eutrofización**

En ecología el término eutrofización o eutrofización (del griego eú = abundante, y tropho = alimento) define el progresivo enriquecimiento de un ecosistema en sales

nutrientes a un ritmo tal que no puede ser compensado por sus formas de eliminación natural (Jaquenod de Zsögön 2004). En el proceso de fertilización del ecosistema acuático, los términos oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipertrófico son utilizados para describir los posibles estados a lo largo del proceso, delineando un gradiente, desde aquellos pobres en nutrientes biológicamente disponibles y con escasa biomasa fitoplanctónica o vegetal (oligotrófico), hasta aquellos con alta concentración de nutrientes y elevada biomasa (eutrófico o hipertrófico) (Conde 2009).

El proceso de eutrofización tiene consecuencias, una de estas es que conduce gradualmente al incremento de la productividad general del ecosistema acuático. A su vez, esto provoca la reducción de la biodiversidad, crecimiento desmedido de plantas acuáticas, malos olores por falta de oxígeno, mortandad de peces y un deterioro general de la calidad de agua y la dominancia progresiva de ciertas especies oportunistas, incluyendo cianobacterias, que pueden utilizarse como indicadores de eutrofización. Se considera entonces que un efecto indeseado importante es la aparición de floraciones de cianobacterias tóxicas, con el consiguiente riesgo sanitario y la necesidad de implementar tratamientos correctivos costosos (Conde 2009, De León 2002).

### **3.1.7. Toxicidad**

Un aspecto muy importante sobre las cianobacterias es la presencia de metabolitos secundarios en muchos de los taxones que, en algunas ocasiones, pueden ser tóxicos para los otros organismos de los ecosistemas, incluyendo los humanos. Estos metabolitos secundarios tóxicos se denominan genéricamente cianotoxinas y se clasifican por los efectos que producen en los organismos como: inhibición de las proteínas-fosfatasa hepáticas (hepatotoxinas) y la transmisión nerviosa (neurotoxinas) (Leflaive y Ten-Hage 2007 citados por Brena y Bonilla 2009, Cirés y Quesada 2011). Graham y Wilcox (2000) citados por Lanzarot (2007) consideran que entre el 50% y el 75% de las proliferaciones

que se producen son tóxicas. Además, una misma especie puede tener cepas productoras y no productoras de toxinas (Roset *et al.* 2001 citado por Lanzarot 2007).

Estudios han comprobado que la producción de toxinas varía con el ciclo de vida del organismo: poblaciones senescentes (ej.: con 30 días de cultivo) producen entre 8 y 15 veces más toxinas que las poblaciones de un día (Dyble *et al.* 2006 citado por Brena y Bonilla 2009). En muchos casos, condiciones ambientales de estrés pueden estimular la producción de toxinas (Ross *et al.* 2006 citado por Brena y Bonilla 2009).

Las cianotoxinas están presentes en el interior de la célula, siendo liberadas al medio en situaciones de lisis o ruptura celular, lo que ocurre en el proceso de senescencia natural o por acción de factores ambientales (Chorus y Bartram 1999 citados por Brena y Bonilla 2009, Roset *et al.* 2001).

#### **3.1.7.1. Clasificación de las cianotoxinas**

En términos de estructura química, las cianotoxinas se dividen en: péptidos cíclicos, alcaloides y lipopolisacáridos. Por otra parte los mecanismos de toxicidad son muy diversos y varían desde efectos hepatotóxicos, neurotóxicos y dermatotóxicos hasta la inhibición general de la síntesis proteica (Roset *et al.* 2001, Sivonen y Jones 1999, Lee 1999, Graham y Wilcox 2000 citados por Lanzarot 2007, Sivonen y Jones 1999 citados por Brena y Bonilla 2009).

#### **3.1.7.2. Cianobacterias y su relación con sabor y olor en el agua y algunos organismos**

La mayoría de los episodios en los que se reporta la presencia de sabor y olor en agua potable, se deben a la generación microbiana de compuestos volátiles, fundamentalmente geosmina y 2-metilisoborneol (2MIB), que tienen olor similar a “tierra

mojada” o humedad. Estos son producidos por cianobacterias, bacterias filamentosas y actinomicetes. Se les considera de muy baja toxicidad para los seres humanos (Höckelmann *et al.* 2009 citado por Brena y Bonilla 2009).

Geosmina y 2MIB son alcoholes terciarios que presentan diversos isómeros con diferente potencia, lo que agrega complejidad a su estudio y al desarrollo de capacidades analíticas. Se ha propuesto que la detección de sabor y olor podría ser usada como indicador de la presencia de cianotoxinas en agua potable, aunque la ausencia de sabor y olor no implica en absoluto la presencia o la ausencia de cianobacterias (Brena y Bonilla 2009). Estos metabolitos volátiles son identificados como los responsables de la mayoría de episodios nocivos de presencia de olores y sabores desagradables en cuerpos de agua, fundamentalmente en aquellos utilizados para abastecimiento de agua potable y en estanques para piscicultura (Meichtry *et al.* 2009, Busso 2009).

### ***3.1.7.3. Efectos sobre la salud humana y animal***

En el hombre las cianotoxinas pueden causar desde ligeros malestares digestivos hasta muerte por asfixia y deshidratación. Algunas de estas toxinas, son promotoras de tumores o probables carcinogénicos y de hecho existe una fuerte correlación entre cáncer primario de hígado y la contaminación con cianobacterias de las fuentes de agua dulce que utiliza la población.

Principales rutas de exposición a cianobacterias y sus toxinas (Andrinolo y Caneo 2009):

- a.- Contacto directo con las partes expuestas del cuerpo, incluyendo partes sensibles como oídos, ojos, mucosas, etc.
- b.- Ingesta de agua.

c.- Inhalación de agua y aerosoles. En áreas recreacionales donde se practican deportes náuticos, durante el baño recreativo, agravado por el contacto directo con las células de cianobacterias.

d.- Ingesta de alimentos contaminados como peces obtenidos de lagos y lagunas con presencia de cianobacterias y más raramente vegetales regados con agua contaminadas, pastillas dietéticas a base de cianobacterias tales como *Aphanizomenon sp* o *Spirulina sp* contaminadas con cianotoxinas.

#### **3.1.7.4. Niveles de alerta**

Debido a la gran preponderancia a nivel mundial de las floraciones de cianobacterias y a que afecta un recurso vital como el agua, la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha desarrollado documentos como “Toxic Cyanobacteria in Water: a guide to their public health consequences, monitoring and management” donde se proponen, entre otras cosas, acciones tendientes al manejo de los Niveles de Alerta (Andrinolo y Caneo 2009).

Los mismos autores (Andrinolo y Caneo 2009), establecen que la OMS ha sugerido un límite de seguridad de 1 µg/litro de microcistina-LR (MC-LR) en agua potable. Considerando que el consumo de agua con MC-LR por debajo de este límite, aun por largos periodos no tendría consecuencia para la salud. Asimismo, advierte que los datos son insuficientes para la derivación de niveles de seguridad para las demás toxinas cianobacterianas. Por esto diversos métodos se han estudiado e implementado para evitar que las cianotoxinas lleguen al agua potable, esto se consigue en principio, evitando la lisis celular con una captación adecuada, una buena coagulación seguida de filtración y cloración. Aunque este tipo de tratamiento es claramente insuficiente cuando los florecimientos son intensos.

Igualmente la OMS ha establecido unos niveles de vigilancia y alerta para la presencia de cianobacterias en aguas de consumo, y niveles guía en aguas de baño. En aguas de

consumo, la Alerta de Nivel 1 se alcanza con 2000 cél/ml ó 1 ug/l de clorofila a, la Alerta de Nivel 2 se alcanza cuando ya la captación está eutrofizada y con toda seguridad se da una presencia confirmada de cianotoxinas (Forján *et al.* 2008).

## IV. OBJETIVOS

### Objetivo General

- Describir la abundancia y distribución de cianobacterias de los géneros *Microcystis sp*, *Anabaena sp* y *Oscillatoria sp*, y su relación con los parámetros fisicoquímicos en el lago de Ilopango, El Salvador durante los meses de noviembre del 2012 a febrero del 2013.

### Objetivos Específicos

- Determinar la abundancia de los géneros *Microcystis sp*, *Anabaena sp*, *Oscillatoria sp* presentes en el lago de Ilopango, durante los meses de noviembre del 2012 a febrero del 2013.
- Describir la distribución y variación de los géneros *Microcystis sp*, *Anabaena sp*, *Oscillatoria sp* presentes en el lago de Ilopango, durante los meses de noviembre del 2012 a febrero del 2013.
- Determinar la relación entre las concentraciones de cianobacterias y los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y penetración de la luz) estudiados en el lago de Ilopango.
- Determinar la correlación entre las concentraciones de los nutrientes N:P y la concentración de cianobacterias estudiadas en el lago de Ilopango.

## V. METODOLOGÍA

### 5.1. Descripción del área de estudio

#### 5.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca del lago de Ilopango está ubicada en la zona central del país, entre los Departamentos de La Paz, San Salvador y Cuscatlán, los cuales integran un total de 13 municipios, alrededor de los cuales se albergan más de 600 mil habitantes (Figura 1). El lago está ubicado a una distancia de 10 Km. de la capital San Salvador y se localiza entre las coordenadas 13°37'50" - 13°42'37" de latitud Norte y 88° 50'20" – 89° 05'47" de longitud Oeste. (FUNDALAGO, 1998 citado por Molina, 2004, DIGESTYC 2008).

#### 5.1.2. Aspectos físicos

El nombre oficial es Lago de Ilopango (MARN 2000 citado por Fernández s.a.). Su nombre autóctono es Xilopango, cuyo significado en lengua Nahuatl es “valle de los jilotes” o “lugar de los setos de jilotes”, proviene de las voces: xilot (elote); pango (valle) (Geoffroy Rivas 1961 citado por Fernández s.a.).

El lago constituye uno de los cuerpos de agua natural más grande de El Salvador, con un área de espejo de 72 km<sup>2</sup> y con una profundidad entre los 240 a 260 metros, siendo el más profundo de El Salvador. Éste lago posee un drenaje principal de tipo radial con aproximadamente 285 km<sup>2</sup>, es uno de los cuerpos de agua de mayor superficie en El Salvador, su principal afluente (tributario) es el río Chagüite, y su efluente (desagüe) el río Desagüe el cual lo comunica con la cuenca del río Jiboa. El lago es de origen volcánico y esto le ha provisto de un largo historial de erupciones, registrándose la última en enero de 1880. (Ortiz *et al.* 1990, González 1995, FUNDALAGO 1998 citado por Molina 2004).

Este lago de origen volcánico se ubica en la Zona de Vida Bosque Húmedo Sub-Tropical, la cual constituye el 85.6% de la superficie del territorio, que se extiende desde la cadena volcánica hasta las planicies costeras donde hay predominio de suelos aluviales; en cambio en la cadena volcánica, meseta central y valles interiores, se pueden encontrar suelos regosoles y litosoles formados con biotemperaturas mayores de 24°C y con una elevación entre los 430 a más de 600 msnm. Los primeros son suelos de ceniza volcánica, francos a francos arenosos finos, de color gris claro, de estructura masiva variable, no plásticos, no pegajosos; el espesor varía de muy superficial a profundo sobre graba de pómez endurecida. (Molina 2004, Reyna *et al.* 1996 citado por Fernández s.a.).

### 5.1.3. Aspectos biológicos

Algunas especies vegetales típicas de esta Zona de Vida son: ceiba (*Ceiba pentandra*), maquilishuat (*Tabebuia rosea*), cedro real (*Cedrela fissilis*), sálamo (*Calycophyllum candidissimum*), pacún (*Sapindus saponaria*), laurel (*Cordia alliodora*), chilamate (*Sapium pedicellatum*), madrecaao (*Gliricidia sepium*), aceituno (*Simaruba glauca*), conacaste (*Enterolobium cyclocarpum*), conacaste blanco (*Albizzia caribea*), guarumo (*Cecropia peltata*) y almendro de río (*Andira inermis*) entre otros (Reyna *et al.* 1996 citado por Fernández s.a.).

Las especies hidrobiológicas de mayor importancia comercial son: tilapia (*Oreochromis niloticus*), mojarra negra (*Amphilophus macracanthus*), guapote tigre (*Parachromis managuensis*), istatagua (*Cichlasoma trimaculatum*), bagre común (*Arius guatemalensis*), juilín (*Rhamdia guatemalensis*), sardina plateada (*Astyanax fasciatus*), carpa común (*Cyprinus carpio*), ejote (*Melaniris guija*), cuatro ojos (*Anableps dowi*) (Fernández s.a.).

#### **5.1.4. Aspectos sociales**

Según el VI censo de población y V de vivienda del año 2007, la población total de los trece municipios (Soyapango, San Martín, Ilopango, San Marcos, Santo Tomas, Santiago Texacuangos, Cojutepeque, San Pedro Perulapán, Santa Cruz Michapa, Santa Cruz Analquito, San Emigdio, San Francisco Chinameca y San Miguel Tepezontes) que integran la cuenca del lago de Ilopango, era de 649,259 habitantes.

Algunas comunidades cuentan con los servicios de agua potable, luz eléctrica, carretera asfaltada, teléfono, unidad de salud y escuela. El ingreso promedio de la población en la zona es inferior a los \$ 100 mensuales. La tarifa de salario mínimo el salario mínimo es de \$ 54.9 mensuales (CSJ 1995 citado por Fernández S.A.), que equivale a un ingreso promedio menor a cien dólares por persona.

La actividad pesquera en el lago es soportada por tres grupos de especies: tilapia, guapote tigre y mojarra negra (CENDEPESCA 2003 citado por Fernández S.A.); el mismo autor menciona que existe un total de trece proyectos acuícolas, con 70 jaulas en general, que reportan una producción estimada de 45,322.06 Kg/año.

## **5.2. Metodología de campo**

### **5.2.1. Plan de recolección de datos**

El estudio se realizó durante los meses de noviembre del 2012 a febrero del 2013, comprendiendo los meses que conforman la época transicional lluviosa-seca y seca. Este consistió en la recolección de muestras a diferentes profundidades de la columna de agua en 7 puntos de muestreo previamente establecidos, para determinar la abundancia de *Anabaena sp*, *Oscillatoria sp* y *Microcystis sp*, géneros potencialmente tóxicos y de los cuales se han reportado, según Rodríguez (1993), proliferaciones en 1957 por Utermoehl, De Georges y López en 1973, Rubio (1983) en 1982 y Rodríguez (1993) en 1991, y su

relación con los parámetros fisicoquímicos tomados en cuenta: Fósforo, Nitrógeno, pH superficial, temperatura superficial y penetración de la luz por ser aquellos que tienen una mayor relación en la dinámica de las comunidades de fitoplancton.

Las muestras se recolectaron en la mañana, y en similares horas en todos los muestreos, para evitar en lo posible variaciones en los parámetros a evaluar debido a diferencias de horario en colecta de datos.

### **5.2.2. Diseño muestral**

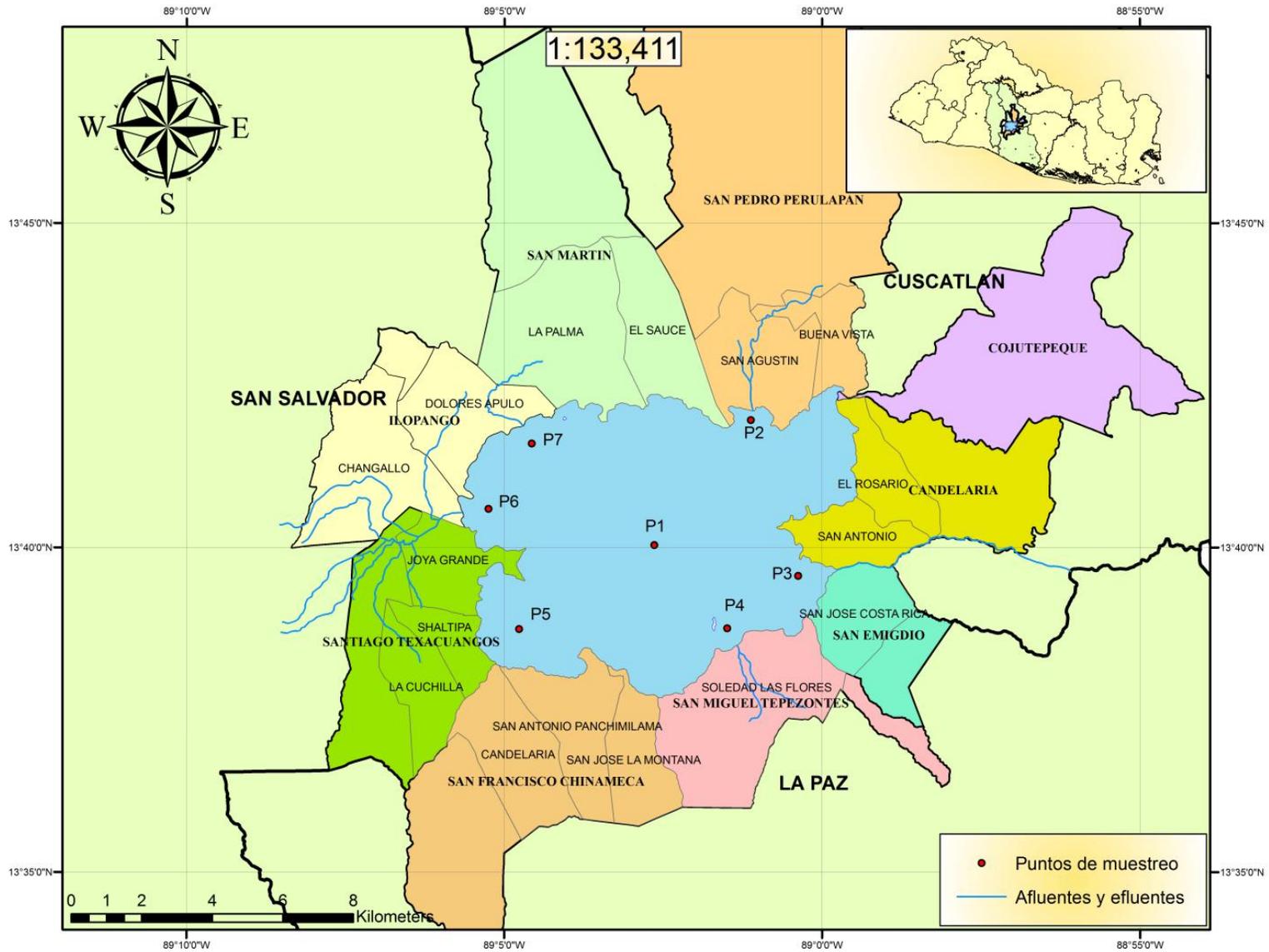
La elección de la ubicación de los siete puntos estudiados, el número de puntos de muestreo, y el número de muestras en el perfil vertical en la columna de agua se hizo en función de las características del cuerpo en estudio (morfometría, vertidos puntuales) y algunos criterios de gestión (uso del agua), tomando en cuenta la representatividad del conjunto a muestrear.

#### ❖ Ubicación de las estaciones de muestreo (ver Figura 1):

- Punto 1. Centro del lago. Este punto es parte del servicio hidrológico de la Dirección de Recursos Naturales Renovables, para referenciar una caracterización de las concentraciones físico-químicas y biológicas para el lago de Ilopango se toma como punto representativo un lugar en el centro del lago (Ortíz *et al.* 1990).
- Punto 2. Cantón San Agustín, Municipio San Pedro Perulapán. Sitio en el que se ubica el proyecto en estudio de ANDA para extracción y potabilización del agua.
- Punto 3. Aprox. a 600 m. del río el Desagüe (referenciando la salida del lago), cantón San Antonio, municipio de Candelaria.
- Punto 4. Cercano a desembocadura de los ríos Quebradona y El Chorro, cantón Soledad Las Flores, municipio San Miguel Tepezontes.

- Punto 5. Área de Cutenama, cantón de Shaltipa, municipio de Santiago Texacuangos, área alejada del sector agroindustrial. Punto de comparación por estar exento de vertidos hacia el lago.
- Punto 6. A 600 m. del río Chagüite, cantón Chagallo, municipio de Ilopango. Principal afluente del lago de Ilopango. Según Utermoehl (1957) citado por Rodríguez (1993), en época lluviosa los ríos tributarios aumentan su caudal (principalmente el Chagüite) y como consecuencia ocurre mayor arrastre de tierra y fertilizantes al lago propiciando condiciones nutritivas favorables para el desarrollo de cianobacterias.
- Punto 7. A 600 m. del río Guilapa, cantón Dolores de Apulo del municipio de Ilopango. En época lluviosa los ríos tributarios aumentan su caudal y está cercano al turicentro de Apulo.

Con base a la profundidad que alcanza la zona fótica (aquella donde se recibe el 1% de la luz incidente) obtenida en muestreos previos a comenzar esta investigación se seleccionó el punto a los 15 metros, como punto intermedio de la columna se seleccionó el de 8 metros y se optó por el superficial debido a que los géneros muestreados generalmente proliferan en la superficie donde se recibe mayor incidencia de luz.



**Fig. 1.** Mapa del lago de Ilopango y coordenadas de los sitios de muestreo. 1: 13°40'2.39"N, 89°2'38.49"O; 2: 13°41'58.00"N, 89°1'07.23"O; 3: 13°39'33.92"N, 89°0'22.65"O; 4: 13°38'45.38"N, 89° 1'29.61"O; 5: 13°38'44.76"N, 89°4'46.17"O; 6: 13°40'35.94"N, 89° 5'14.91"O; 7: 13°41'36.33"N, 89° 4'34.13"O.

### **5.2.3. Recolección de datos**

#### ***5.2.3.1. Características generales del sistema acuático en cada punto de muestreo***

Se observó el aspecto general del sistema acuático considerando la presencia de olor, color, aspecto y distribución de los organismos a simple vista, llevándose así un cuidadoso registro de las características y parámetros determinados “in situ” en cada punto de muestreo. En una hoja de recolección de datos que contiene fecha, hora, localización del lugar de muestreo y las características antes mencionadas se registraron las observaciones.

#### ***5.2.3.2. Toma de parámetros fisicoquímicos***

Antes de la extracción de la muestra, se realizó la medición de parámetros “in situ” como temperatura y pH, utilizando un peachimetro con termómetro incorporado, y la transparencia del agua con un disco de Secchi. Posteriormente se procedió a la recolección de las muestras de tipo cualitativa y cuantitativa.

#### ***5.2.3.3. Recolección de muestras cualitativas de cianobacterias***

Se utilizó una red de fitoplancton de 20  $\mu\text{m}$ , realizando barridos diagonales, sin considerar la profundidad, hasta obtener la cantidad de material suficiente. Para cada uno de los puntos de muestreo se obtuvo una muestra de 250 ml, luego se almacenó en un frasco plástico y se guardó dentro de una nevera con el fin de mantener una temperatura constante para su posterior observación. Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de El Salvador (LABTOX-UES) para el análisis.

#### **5.2.3.4. *Recolección de muestras cuantitativas de cianobacterias***

Para este estudio se utilizó una botella limnológica Niskin para determinar la densidad celular (anexo 2), relación porcentual de las distintas especies en la muestra y nutrientes (N y P). En cada punto de muestreo se obtuvieron tres muestras correspondientes a las tres profundidades muestreadas (superficial, 8 y 15 metros). Posteriormente las muestras de cianobacterias se almacenaron, en recipientes con un total de 250 ml, se fijaron con formol comercial (37-40%) a una concentración final de 4% (v/v) para su posterior transporte al laboratorio (LABTOX-UES) en una nevera para la realización del conteo (Vicente *et al.* 2007).

#### **5.2.3.5. *Recolección de muestras cuantitativas de nutrientes***

En todos los puntos de muestreo, de la muestra obtenida con la botella Niskin, se colocó 1 litro de agua y se almacenó en otro recipiente debidamente etiquetado. Luego fueron guardadas en una nevera a 4°C y estos fueron referidos por ANDA para ser analizados en el laboratorio de servicios analíticos de la Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café – PROCAFE.

### **5.2.4. Metodología de laboratorio**

#### **5.2.4.1. *Análisis cualitativo de las muestras de cianobacterias***

De cada una de las muestras se homogenizó y se procedió a extraer 1 gota para colocarla en un portaobjeto y se procedió a observarla en un microscopio óptico de contraste de fase, para tener una visión panorámica de la biodiversidad del punto muestreado antes de su análisis cuantitativo. Esto se realizó una vez por muestra comenzando así la observación con el menor aumento, para identificar los caracteres diagnósticos. Luego se realizó la observación a mayores aumentos con el fin de definir las

características más significativas que llevaron a una mayor confiabilidad de la identificación y se tomaron microfotografías. Para identificar a los organismos se utilizaron claves dicotómicas y también se recurrió a la bibliografía adecuada (Manual on aquatic cyanobacteria, Cianobacterias planctónicas del Uruguay, Cianobacterias y cianotoxinas, Catálogo de cianobacterias planctónicas potencialmente tóxicas de las aguas continentales españolas).

#### **5.2.4.2. Análisis cuantitativo de las muestras de cianobacterias**

Para analizar la muestra de agua, se procedió a homogeneizarla bien, moviendo o agitando suavemente el recipiente de forma que no se rompieran las cadenas o colonias y que no se formaran burbujas; luego se tomó con un gotero una alícuota de la muestra de 1 cm<sup>3</sup> de agua colectada por punto, y se colocó el cubre objeto en diagonal de forma que quedaran descubiertos un pequeño triángulo en la esquina superior izquierda y otro en la esquina inferior derecha procediendo así a verter la alícuota en la cámara de conteo de Sedgwick-Rafter (anexo 3), cuya capacidad es de 1 cm<sup>3</sup>, para posteriormente colocarla al microscopio invertido a 20X para su respectivo conteo.

Este procedimiento se realizó por triplicado para evitar sesgo estadístico y solo se tomaron en cuenta los géneros de cianobacterias a estudiar. Se eligieron 3 filas dispuestas simétricamente (2ª, 10ª y 18ª) (anexo 4). Al contarlas se siguió la norma de contar todas las células que tocan la línea inferior y ninguna de las que tocan la línea superior (Reguera *et al.* 2011). La estimación de densidad se hizo según la ecuación:

$$D \text{ (cel/mL)} = \frac{\text{n}^\circ \text{ cel. contadas}}{\text{n}^\circ \text{ de cuadrillos barridos}} \times \frac{1000 \text{ cuadrillos}}{1 \text{ mL}}$$

Donde D = densidad celular (cel/mL)

#### **5.2.4.3. Análisis cuantitativo para las muestras de fósforo y nitrógeno**

Los respectivos análisis de nutrientes se realizaron en el laboratorio de servicios analíticos de la Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café – PROCAFE.

El análisis de nitrógeno total se realizó utilizando el método Macro-Kjeldahl (volumetría). Este se basa en la digestión de la muestra en ácido sulfúrico concentrado a ebullición, con la adición de un catalizador. La muestra se digiere hasta disolución y oxidación de la misma. Los resultados se expresan en mgN/L.

Se utilizó la colorimetría (método amarillo del ácido vanadomolibdofosfórico) para determinar la concentración de fósforo biológicamente disponible. Se basa en una solución diluida de ortofosfato, el molibdato amónico reacciona en condiciones ácidas para formar un heteropoliácido, ácido molibdofosfórico. En presencia de vanadio forma ácido vanadomolibdofosfórico amarillo. La intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de fosfatos.

### **5.3. Análisis de datos**

Los datos obtenidos en cada conteo, de parámetros físico-químicos y nutrientes fueron introducidos en una base de datos en Excel para su posterior análisis con el software estadístico Statgraphics Centurion XVI.II. Con los datos recolectados y sistematizados se realizaron las siguientes pruebas estadísticas:

- a) Análisis de Varianza Simple (o de un criterio de clasificación), para determinar si existen o no diferencias significativas entre la abundancia de cianobacterias y los tres niveles de profundidad, los siete puntos de muestreo y en los cuatro meses de muestreo.

- b) Prueba de Rangos Múltiples de LSD de Fisher para determinar que medias muestrales son significativamente diferente entre sí.
- c) Correlación de Pearson ( $r$ ), para establecer el grado de asociación entre las variables de concentración de cianobacterias (abundancia), los parámetros fisicoquímicos en estudio y la relación de N:P. Este análisis puede interpretarse como representativo o positivo si se obtiene un valor mayor a 0.5, una correlación menor no será tomada como representativa, siempre y cuando la probabilidad ( $p$ ) sea menor a un valor de alpha igual a 0.05 (Cabrera 2011).

$$r = \frac{1/n * \sum (x_i - \bar{x}_m) * (y_i - \bar{y}_m)}{\left( (1/n * \sum (x_i - \bar{x}_m)^2) * (1/n * \sum (y_i - \bar{y}_m)^2) \right)^{1/2}}$$

## VI. RESULTADOS

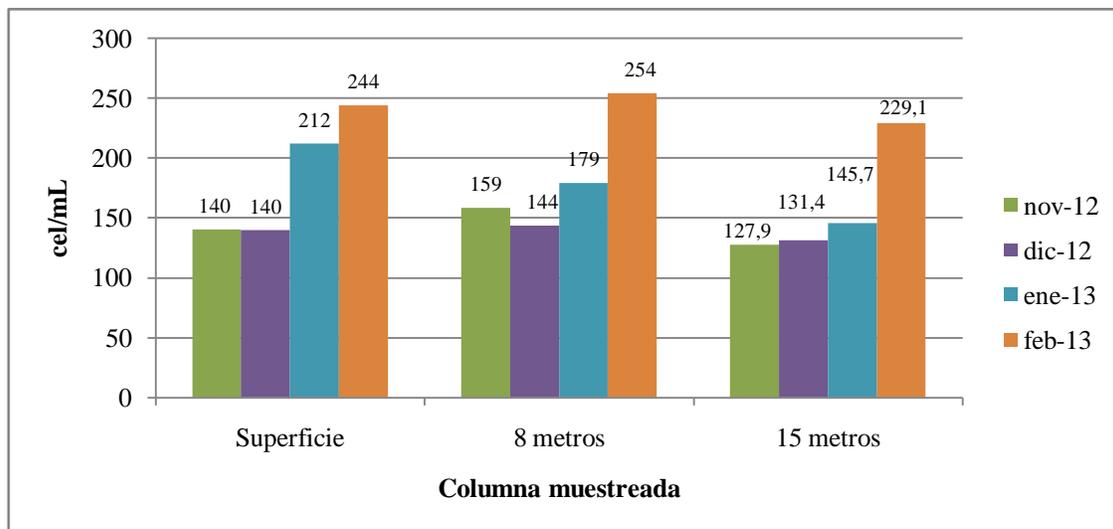
Se analizaron 112 muestras de cianobacterias durante todo el estudio, equivalentes a 28 muestras cualitativas y 84 cuantitativas colectadas de noviembre de 2012 a febrero de 2013, así también se obtuvieron los datos de temperatura, pH, turbidez, fósforo y nitrógeno total.

### 6.1. Abundancia de las cianobacterias

En el análisis cualitativo y cuantitativo solo se determinó la presencia de 2 géneros (*Microcystis sp* y *Anabaena sp*) de los 3 que eran objeto de estudio, no observando la presencia de *Oscillatoria sp* en ninguno de los conteos realizados.

Durante el mes de noviembre *Anabaena sp* se reporta en un número 40 cel/mL en el punto 3, en la superficie de la columna, alcanzando un promedio de 5.7 cel/mL en los siete puntos muestreados; y no registrándose presencia en ninguno de los meses subsiguientes. En el caso de *Microcystis sp*, este se reporta durante los cuatro meses en toda la columna de cada uno de los puntos muestreados en el ámbito de 87-413 cel/mL, hallándose las mayores cantidades promedio en el mes de febrero y menores en el mes de diciembre (figura 2 y cuadro 1).

Debido al escaso registro de *Anabaena sp* y la ausencia de *Oscillatoria sp* no se hicieron análisis estadísticos con dichos géneros.



**Fig.2.** Abundancia promedio de *Microcystis sp.* en la columna de agua en los siete puntos de entre los meses de noviembre de 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.

**Cuadro 1.** Abundancia de *Microcystis sp* en la columna de agua en los siete puntos de muestreo entre los meses de noviembre de 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.

Puntos	Profundidad	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13
P1	Superficie	164	129	113	216
	8 metros	171	93	191	336
	15 metros	144	116	178	238
P2	Superficie	122	133	164	302
	8 metros	153	136	169	253
	15 metros	118	107	138	318
P3	Superficie	187	93	413	264
	8 metros	207	133	247	249
	15 metros	173	113	147	247
P4	Superficie	133	102	180	220
	8 metros	173	136	213	291
	15 metros	136	111	153	216
P5	Superficie	153	207	353	262
	8 metros	158	176	167	262
	15 metros	87	193	131	129
P6	Superficie	107	180	93	213
	8 metros	129	164	144	216
	15 metros	124	158	160	238
P7	Superficie	116	136	169	231
	8 metros	120	167	124	171
	15 metros	113	122	113	218
Promedios	Superficie	140	140	212	244
	8 metros	159	144	179	254
	15 metros	128	131	146	229

## 6.2. Distribución y variación de las cianobacterias

*Microcystis sp* durante los meses de estudio revela una distribución homogénea en toda la columna muestreada, registrando valores-P de 0.1514, 0.7932, 0.2827 y 0.6315 ( $\geq$  que 0.05) entre los meses de noviembre de 2012 y febrero 2012 respectivamente, por tanto no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de cel/mL y los niveles de profundidad, con un nivel del 95% de confianza (figura 3).

En la distribución de *Microcystis sp* en los distintos puntos de muestreo se observó que existe diferencia estadísticamente significativa durante los meses de noviembre (valor-P = 0.0101 menor a 0.05) y diciembre (valor-P = 0.0004 menor a 0.05) de 2012 con un nivel de confianza del 95% (figura 4). En el cuadro 2, se observa que existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos puntos que no comparten una misma columna de X's. Sin embargo durante los meses de enero y febrero de 2013 no se registra diferencia significativa, con valores-P de 0.2972 y 0.3247 ( $\geq$  que 0.05) respectivamente.

En cuanto a la distribución temporal de *Microcystis sp* se distingue que hay diferencias estadísticamente significativa entre la media de cel/mL y los meses de muestreo, tanto en la superficie como a los 8 y 15 metros de profundidad (figura 5) con valores-P de 0.0166, 0.0001 y 0.0001 (menor que 0.05) respectivamente, registrándose diferencias a nivel superficial entre nov-12 - feb-13 y dic-12 - feb-13 y también a los 8 y 15 metros entre feb-13 y los otros meses (cuadro 3).

**Cuadro 2.** Prueba de Rangos Múltiples (LSD de Fisher, 95% de confianza) para cel/mL por punto de muestreo. A) noviembre de 2012 y B) diciembre de 2012.

**A**

<i>Punto</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
P7	3	116.333	X
P6	3	120.0	X
P2	3	131.0	XX
P5	3	132.667	XX
P4	3	147.333	XX
P1	3	159.667	XX
P3	3	189.0	X

**B**

<i>Punto</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
P1	3	112.667	X
P3	3	113.0	X
P4	3	116.333	X
P2	3	125.333	X
P7	3	141.667	XX
P6	3	167.333	XX
P5	3	192.0	X

**Cuadro 3.** Prueba de Rangos Múltiples (LSD de Fisher, 95% de confianza) para cel/mL por meses de muestreo. A) Superficial (0 metros), B) 8 metros y C) 15 metros.

**A**

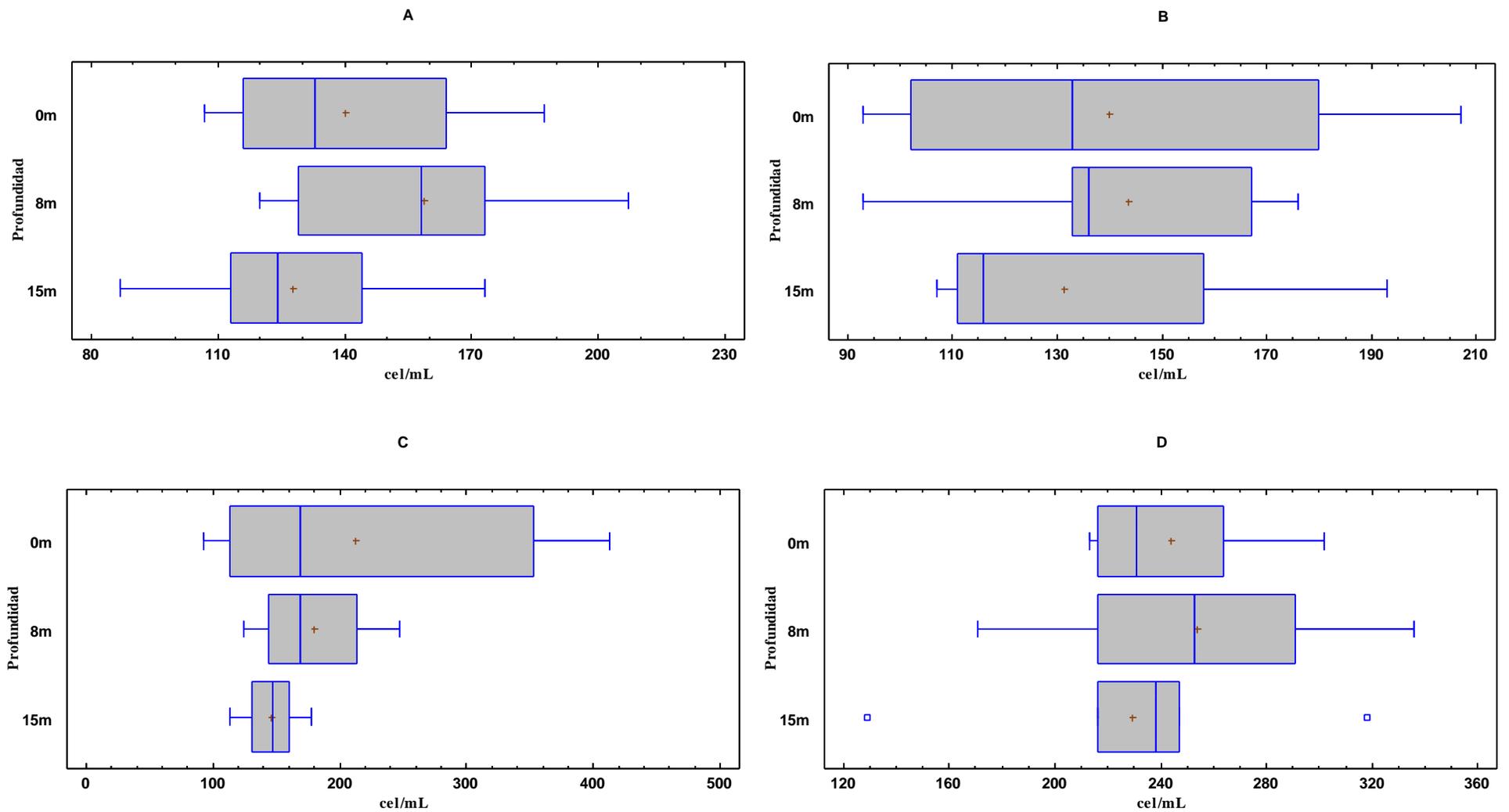
<i>Meses</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
dic-12	7	140.0	X
nov-12	7	140.286	X
ene-13	7	212.143	XX
feb-13	7	244.0	X

**B**

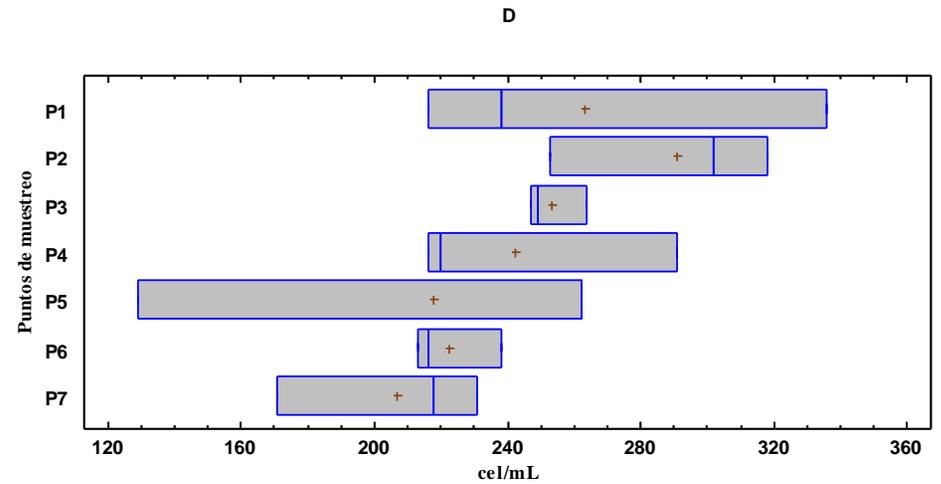
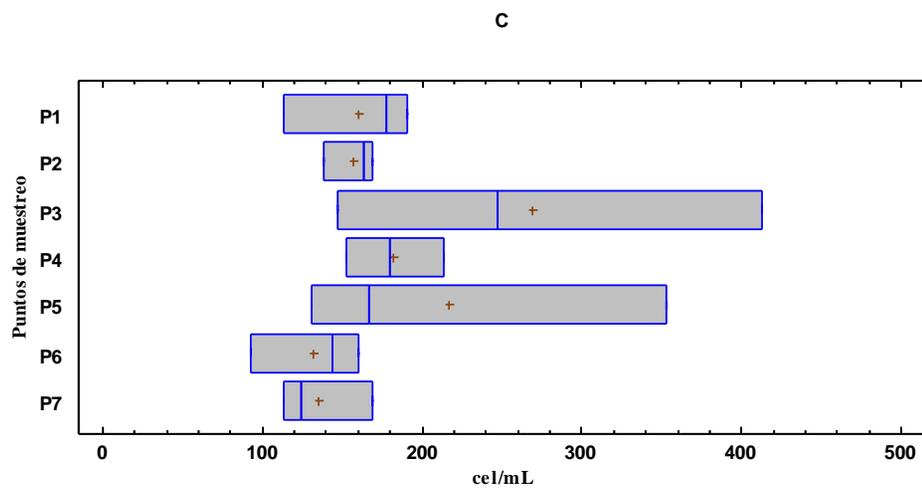
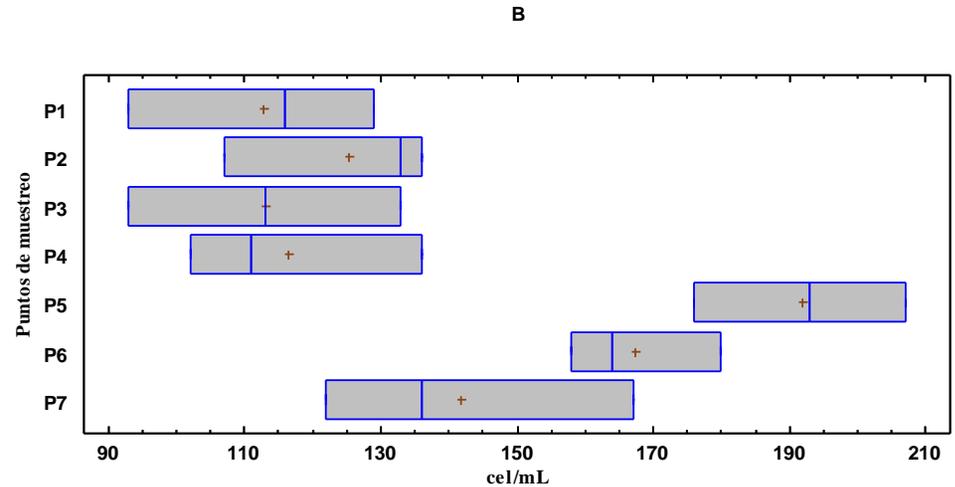
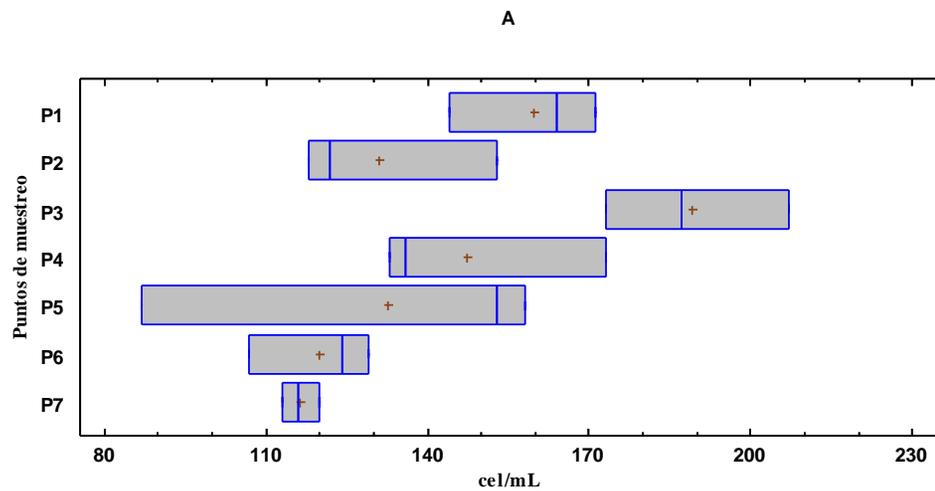
<i>Meses</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
dic-12	7	143.571	X
nov-12	7	158.714	X
ene-13	7	179.286	X
feb-13	7	254.0	X

**C**

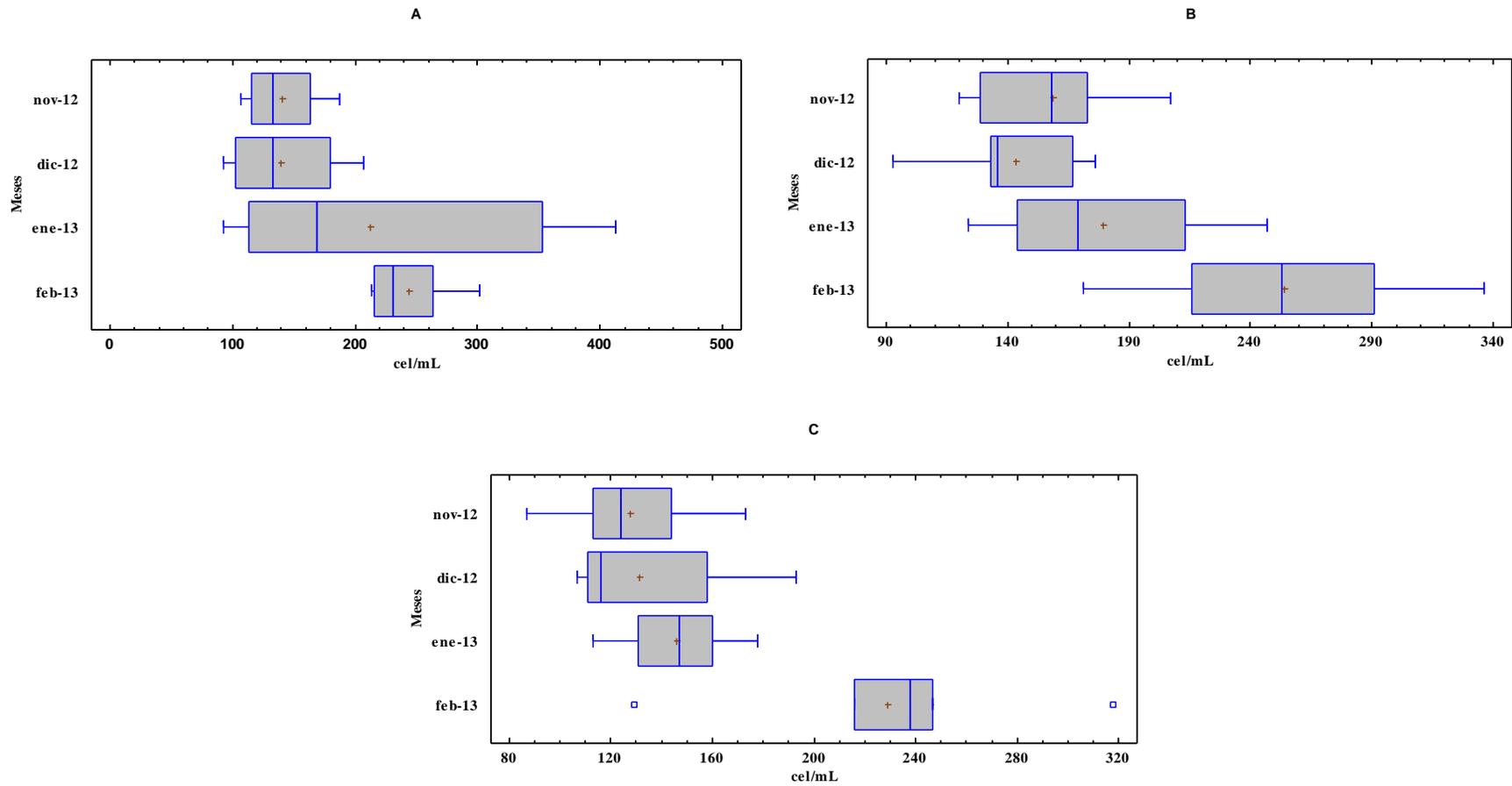
<i>Meses</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
nov-12	7	127.857	X
dic-12	7	131.429	X
ene-13	7	145.714	X
feb-13	7	229.143	X



**Fig.3.** Comparación de valores medios de cel/mL para los tres diferentes niveles de profundidad. A) noviembre 2012, B) diciembre 2012, C) enero 2013 y D) febrero 2013. La línea vertical indica la mediana y un signo más se coloca en el lugar de la media muestral.



**Fig.4.** Comparación de valores medios de cel/mL para los siete puntos de muestreo. A) noviembre 2012, B) diciembre 2012, C) enero 2013 y D) febrero 2013. La línea vertical indica la mediana y un signo más se coloca en el lugar de la media muestral.



**Fig.5.** Comparación de valores medios de cel/mL para los cuatro meses de muestreo. A) superficie (0 m), B) 8 metros y C) 15 metros. La línea vertical indica la mediana y un signo más se coloca en el lugar de la media muestral.

### 6.3. Correlación entre abundancia y parámetros físico-químicos

Debido a que los valores-P son mayores o iguales a 0.05, no existe una relación estadísticamente significativa entre abundancia de *Microcystis sp* y la temperatura durante los cuatro meses de muestreo, de igual manera ocurre con el pH, mientras que con la variable penetración de la luz en nov-12 y ene-13 los datos indican una relación estadísticamente significativa con un valor- P de 0.0415 y 0.0392 (menores a 0.05) respectivamente.

Los coeficientes de correlación indican una relación moderadamente fuerte entre las variables abundancia y temperatura durante los meses de nov-12 y ene-13, abundancia y pH en el mes de nov-12 y abundancia y penetración de la luz en nov-12 y ene-13 (cuadro 5). El rango de estos coeficientes de correlación (coeficiente de correlación de Pearson  $r$ ) va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables.

**Cuadro 4.** Valores de temperatura superficial (°C), pH superficial y penetración de la luz (m.) registrados en el lago de Ilopango, desde noviembre de 2012 a febrero de 2013.

	nov-12			dic-12			ene-13			feb-13		
	T° (°C)	pH	P.L.									
<b>P1</b>	26,6	8,15	3,8	27,4	8,14	4,55	28,1	7,71	6,73	28,7	8,16	4,13
<b>P2</b>	26,7	8,14	5,14	27,3	8,18	3,27	27,3	7,78	11,95	28,5	8,16	4,25
<b>P3</b>	28,3	8,26	3,26	27,7	8,07	4,85	27,9	7,81	3,35	28,7	8,08	3,47
<b>P4</b>	27,5	8,2	4,06	27,9	8,17	4,5	28	7,71	4,48	28,7	8,14	4,31
<b>P5</b>	26,6	8,25	3,7	27,7	8,11	4,44	28,4	7,77	7	28,7	8,13	4,24
<b>P6</b>	26,3	8,16	4,39	27,7	8,22	3,8	27	7,9	10,34	28	8,37	4
<b>P7</b>	26,1	8,03	4,87	27,6	8,15	4,9	27,4	7,75	10,28	28,5	8,25	4,29
<b>Prom.</b>	<b>26,9</b>	<b>8,2</b>	<b>4,2</b>	<b>27,6</b>	<b>8,1</b>	<b>4,3</b>	<b>27,7</b>	<b>7,8</b>	<b>7,7</b>	<b>28,5</b>	<b>8,2</b>	<b>4,1</b>
<b>Desv.</b>	<b>0,77</b>	<b>0,08</b>	<b>0,67</b>	<b>0,20</b>	<b>0,05</b>	<b>0,59</b>	<b>0,50</b>	<b>0,07</b>	<b>3,22</b>	<b>0,26</b>	<b>0,10</b>	<b>0,30</b>

T° = Temperatura, P.L = Penetración de la luz, Prom. = Promedio, Desv. = Desviación Estándar

**Cuadro 5.** Correlación entre la abundancia y los parámetros fisicoquímicos durante noviembre de 2012 y febrero de 2013.

Mes	Temperatura agua (°C)	pH	Penetración de la luz
nov-12	0.7014	0.6536	*-0.7731
dic-12	-0.0221	0.2536	-0.1499
ene-13	0.5573	0.0167	*-0.7784
feb-13	0.2485	-0.4876	-0.1375

\* indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%.

#### 6.4. Correlación entre abundancia y nutrientes

Los valores-P obtenidos de cada una de las correlaciones estimadas en los cuatro meses de muestreo se encuentran por arriba de 0.05 descartando que dichas correlaciones sean significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95%. De igual manera se puede observar que los coeficientes de correlación no muestran ningún patrón o tendencia en los meses de muestreo, indicando relaciones relativamente débiles entre las variables, aunque con algunas excepciones (cuadros 7, 8, 9 y 10). El rango de estos coeficientes de correlación (coeficiente de correlación de Pearson  $r$ ) va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables.

**Cuadro 6.** Valores de fósforo (mg/L), nitrógeno total (mg/L) y relación N:P registrados en el lago de Ilopango, de noviembre 2012 a febrero 2013.

Puntos de Muestreo	P y N Prof.	NOVIEMBRE (2012)			DICIEMBRE (2012)			ENERO (2013)			FEBRERO (2013)		
		Fósforo (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L)	Relación N:P	Fósforo (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L)	Relación N:P	Fósforo (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L)	Relación N:P	Fósforo (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L)	Relación N:P
P1	Superficial	0,5	0,7	1,40	0,75	0,79	1,05	1,09	0,35	0,32	0,92	0,35	0,38
	8 metros	0,42	0,68	1,62	0,71	0,87	1,23	0,65	0,49	0,75	0,62	0,42	0,68
	15 metros	0,67	1,03	1,54	0,62	0,78	1,26	0,94	0,42	0,45	0,46	0,35	0,76
P2	Superficial	0,27	0,56	2,07	0,71	0,9	1,27	0,72	0,56	0,78	0,77	0,49	0,64
	8 metros	0,27	0,35	1,30	0,66	0,92	1,39	0,8	0,35	0,44	0,62	0,42	0,68
	15 metros	0,42	0,62	1,48	0,53	0,71	1,34	0,8	0,49	0,61	0,69	0,35	0,51
P3	Superficial	0,33	0,42	1,27	0,71	1,03	1,45	0,72	0,84	1,17	0,54	0,7	1,30
	8 metros	0,42	1,13	2,69	0,53	0,69	1,30	1,01	0,35	0,35	0,54	0,35	0,65
	15 metros	0,46	0,62	1,35	0,62	0,88	1,42	1,01	0,42	0,42	0,62	0,49	0,79
P4	Superficial	0,42	0,53	1,26	0,62	0,75	1,21	0,72	0,35	0,49	0,46	0,35	0,76
	8 metros	0,29	0,42	1,45	0,66	0,85	1,29	0,65	0,42	0,65	0,62	0,56	0,90
	15 metros	0,58	0,78	1,34	0,58	0,71	1,22	0,87	0,84	0,97	0,85	0,56	0,66
P5	Superficial	0,46	0,49	1,07	0,71	0,92	1,30	0,72	0,63	0,88	0,62	0,42	0,68
	8 metros	0,46	0,63	1,37	0,71	0,88	1,24	—	—	—	0,77	0,7	0,91
	15 metros	0,54	0,92	1,70	0,62	0,84	1,35	—	—	—	0,46	0,42	0,91
P6	Superficial	0,23	0,56	2,43	0,62	0,92	1,48	0,94	0,77	0,82	0,72	0,42	0,58
	8 metros	0,18	0,5	2,78	0,58	0,85	1,47	0,72	0,7	0,97	0,46	0,35	0,76
	15 metros	0,18	0,63	3,50	0,62	0,78	1,26	1,01	0,35	0,35	0,54	0,35	0,65
P7	Superficial	0,14	0,42	3,00	0,4	0,63	1,58	1,3	0,42	0,32	0,38	0,49	1,29
	8 metros	0,32	0,49	1,53	0,84	1,08	1,29	1,38	1,41	1,02	0,46	0,7	1,52
	15 metros	0,23	0,25	1,09	0,8	1,1	1,38	1,01	0,59	0,58	0,54	0,35	0,65
<b>PROMEDIO</b>		0,37	0,61	1,63	0,65	0,85	1,31	0,90	0,57	0,63	0,60	0,46	0,76
<b>DESVIACIÓN</b>		0,14	0,22	1,52	0,10	0,12	1,25	0,21	0,26	1,26	0,14	0,12	0,86

**Cuadro 7.** Correlación entre la abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de noviembre de 2012.

Columna muestreada		Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Relación N:P
Superficial	Abundancia (cel/mL)	-0,0293	0,6194	-0,7519
8 metros		0,7179	0,5676	0,1826
15 metros		0,0274	0,2053	0,1456

**Cuadro 8.** Correlación entre la abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de diciembre de 2012.

Columna muestreada		Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Relación N:P
Superficial	Abundancia (cel/mL)	0,1235	0,0213	0,1225
8 metros		0,3332	0,1797	0,2909
15 metros		0,076	-0,1507	0,023

**Cuadro 9.** Correlación entre la abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de enero de 2013.

Columna muestreada		Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Relación N:P
Superficial	Abundancia (cel/mL)	0,515	-0,5148	0,6984
8 metros		-0,7607	-0,3526	-0,8006
15 metros		-0,283	-0,065	-0,1988

**Cuadro 10.** Correlación entre la abundancia y nitrógeno total, fósforo y relación N:P en el mes de febrero de 2013.

Columna muestreada		Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Relación N:P
Superficial		0,5185	0,0686	0,1663
8 metros	Abundancia (cel/mL)	-0,2651	0,6113	0,5813
15 metros		-0,2552	0,3843	-0,8192

## VII. DISCUSIÓN

### Abundancia de cianobacterias

La ausencia de *Oscillatoria sp* en los conteos realizados durante los cuatro meses de muestreo, la de *Anabaena sp* en los meses de dic-12 a feb-13 con la poca presencia en nov-12 (40 cel/mL) y la poca abundancia de *Microcystis sp* en los meses de nov-12, dic-12, ene-13 y feb-13, con un promedio de 142, 138, 179 y 242 cel/mL respectivamente, probablemente se deba a la influencia de la época seca, dado que la precipitación es muy escasa disminuyendo de manera considerable el arrastre y posterior aporte de nutrientes al ecosistema.

Esto concuerda con lo aludido por Utermoehl (1957), citado por Rodríguez (1993) quien menciona que en época lluviosa los ríos tributarios (principalmente el río Chagüite) aumentan su caudal y como consecuencia ocurre mayor arrastre, al lago de Ilopango, de tierra y fertilizantes provenientes de los terrenos de cultivos próximos propiciando entonces condiciones nutritivas y favorables para el desarrollo y afloramiento de cianobacterias. El mismo autor considera que los afloramientos no ocurren en época seca dado el escaso o nulo caudal de los ríos tributarios del lago y por ende de la poca aportación energética del medio ambiente exterior hacia el interior de este.

Así también Sánchez (2001), menciona que las lluvias también contribuyen con una cantidad importante del fósforo total presente en las aguas superficiales, el cual como sugieren García s.a., Lanzarot (2007), De Hoyos *et al.* (2008) y Aubriot (2009), es un nutriente clave e influyente para la proliferación de las cianobacterias. Si bien los autores recalcan la importancia de la lluvia para el crecimiento de las cianobacterias, los datos encontrados en esta investigación también apoyan lo antes dicho.

Ortiz *et al.* (1990) y Molina (2004), resaltan que la adición de fertilizantes (agroquímicos organoclorados y organofosforados) empleados en actividades agrícolas

realizadas alrededor del lago, así como la suma de desechos industriales, desechos domésticos y animales, arrastrados a través de sus afluentes y la escorrentía, y la utilización de detergentes por la población del lugar en actividades como: lavado de ropa y utensilios domésticos, contribuyen al proceso de eutroficación del lago, que según Conde (2009), conlleva a la dominancia progresiva de ciertas especies oportunistas, incluyendo cianobacterias y De León (2002), concluye que estos procesos asociados a actividades humanas determinan las proliferaciones de las cianobacterias.

Este fenómeno se pudo observar en un estudio realizado por Olivares (s.a.), quien reporta que en los meses de septiembre (época lluviosa) y octubre (transición época lluviosa-seca) de 2012, la presencia de *Anabaena sp* se encuentra en un ámbito de 0-20,600 y 0-8,680 cel/mL respectivamente, en el caso de *Oscillatoria sp* se observa de 0-138 y 0-276 cel/mL y *Microcystis sp* de 6,509-14,951 y 2,320-6,831 cel/mL (anexo 5, 6, 7 y 8), meses en los cuales se reportan altas precipitaciones en relación a los meses posteriores correspondientes a noviembre y diciembre de 2012 y enero y febrero de 2013 (anexo 9). Al comparar estos datos revelan que existe alta correlación entre la abundancia de cianobacterias y la precipitación en el lago de Ilopango (anexo 10).

## **Distribución y variación de las cianobacterias**

### **- Distribución vertical de cianobacterias en el cuerpo de agua del Lago Ilopango.**

En los resultados obtenidos podemos ver que *Microcystis sp* presenta una clara distribución homogénea en toda la columna de agua muestreada, durante todos los meses que duró el monitoreo, no encontrándose diferencias significativas entre las diferentes profundidades muestreadas. En relación a esto Aubriot *et al.* (2009), sugieren que los mecanismos que regulan la flotación presentes en algunas cianobacterias les permiten alcanzar profundidades de 2 a 4 metros en horas. Cuando acceden a zonas de intensidad de luz intermedia se logra la flotación neutra y la posterior formación de nuevas vesículas que llevan a los organismos a las superficie nuevamente, y un ejemplo

claro de esto son las colonias de *Microcystis sp* que pueden realizar migraciones diarias en la columna de agua y recuperar la posición vertical luego de eventos de turbulencia. Asimismo Chorus y Bartram (1999); Reynolds (2006); Graham *et al.* (2009); J. Padisák *com. pers.* y datos no publicados citados por Aubriot *et al.* (2009) destacan a los géneros *Microcystis sp* y *Anabaena sp* como cianobacterias planctónicas formadoras de floraciones acumulativas que crecen en la superficie formando grumos o acúmulos visibles en condiciones de estratificación y estabilidad de la columna de agua por periodos prolongados.

Por otra parte, debido a la ausencia y cantidades no significativas de los géneros *Anabaena sp* y *Oscillatoria sp* no se logró verificar su distribución. Probablemente en el caso de *Oscillatoria sp* la ausencia de aerótopos en su estructura puede ser un factor contribuyente para que durante este estudio no se observara en toda la columna muestreada. Asimismo Reynolds *et al.* (1983), citado por De León (2002), plantea que las floraciones de cianobacterias como *Planktothrix sp* y *Oscillatoria sp* no se acumulan en la superficie sino en niveles más profundos y menos iluminados.

Sin embargo, en el estudio de Olivares (s.a.) los géneros *Anabaena sp* y *Oscillatoria sp*, presentan abundancias significativas en los meses de septiembre y octubre del 2012, con una distribución significativamente heterogénea mientras que el género *Microcystis sp* mantiene una distribución significativamente homogénea, lo que concuerda con lo encontrado en el presente estudio. En parte esto puede ser consecuencia de que los factores asociados a la profundidad en la zona eufótica, parece no ejercer un efecto estadísticamente significativo sobre la abundancia de este género pero si muy probablemente en los otros géneros que en época seca estuvieron ausentes (anexos 12, 13 y 14).

- **Distribución espacial y temporal de cianobacterias en el cuerpo de agua del Lago Ilopango.**

*Microcystis sp* presentó, en los distintos puntos muestreados del cuerpo de agua, una distribución heterogénea durante los meses de noviembre y diciembre 2012, posiblemente esto se deba a la influencia de los afluentes y efluentes del lago de Ilopango, ya que gran parte de la heterogeneidad se observa en puntos con ausencia o presencia de estos, aunque es poco probable debido a que la época en la que se realizó la investigación las precipitaciones son muy escasas y por ende las escorrentías o aportes provenientes de los ríos es casi nula. Sin embargo; esto sumado a lo aludido por De León (2002), quien explica que la distribución y ubicación de una floración en un cuerpo de agua, tienen relación también con la dirección del viento antes y/o durante el acontecimiento; lo cual coincide con las alzas en la velocidad del viento presentado en los meses de noviembre y diciembre de 2012 (anexo 11), permitiendo la mezcla en el perfil vertical.

En los meses de enero y febrero del 2013 *Microcystis sp* cambió a una distribución homogénea, que concuerda con Olivares (s.a.), quien registra una distribución homogénea de *Microcystis sp* en todo el cuerpo de agua en los meses de septiembre y octubre de 2012 en los múltiples puntos monitoreados.

Por otra parte los resultados de una Anova multifactorial, considerando los datos de abundancia de *Microcystis sp* contra distribución espacial (puntos de muestreo) de los meses de septiembre 2012 a febrero del 2013, reflejan una predominancia de distribución homogénea comprendiendo que probablemente este factor por sí solo no ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre la abundancia de *Microcystis sp* en el lago Ilopango (anexo 12).

En los tres géneros de cianobacterias, se registran diferencias significativas si comparamos los resultados obtenidos en abundancia durante la época seca (noviembre de 2012 a febrero de 2013) contra los datos no publicados de Olivares en la época lluviosa

(septiembre y octubre de 2012), encontrándose las mayores abundancias en época de lluvia y menores en época seca (anexo 6, 7 y 8). Esto concuerda con lo considerado por Utermoehl (1957), citado por Rodríguez (1993), quien manifiesta que las proliferaciones de cianobacterias no ocurren en época seca mientras que en época lluviosa se dan las condiciones propicias y favorables para el crecimiento y proliferación de estas.

DeGeorges y López (1973), citado por Rodríguez (1993), informan que, en el lago de Ilopango durante la época lluviosa, ocurrieron afloramientos en la magnitud de  $10^6$ -  $10^7$  cel/L de *Oscillatoria sp*, *Anabaena sp* y *Microcystis sp*. También el estudio de Rubio (1983), citado por Rodríguez (1993), reporta para las época lluviosa de 1982 afloramientos de *Oscillatoria sp*, *Anabaena sp* y *Microcystis sp* por lo general en el orden de  $10^7$ -  $10^8$  cel/L. Asimismo otro importante estudio del lago realizado por Gutiérrez y Rubio (1986), citado por Rodríguez (1993), afirma que durante el periodo de diciembre-febrero (época seca), el lago presentó bajas poblacionales de cianobacterias pero en marzo con las primeras lluvias ya se pudieron observar proliferaciones de estas, datos que apoyan los resultados obtenidos en este estudio.

En el caso de *Anabaena sp* y *Oscillatoria sp* no se pudo determinar el tipo de distribución espacial en el cuerpo de agua, debido a la ausencia y presencia de estos, que no es significativa durante el muestreo según los resultados obtenidos. Sin embargo, Olivares (s.a.), reporta que *Anabaena sp* presenta una distribución heterogénea (por parches) (anexo 5), a nivel superficial en el cuerpo de agua, manifestando una alta dinámica de desplazamiento de los parches de cianobacterias, influenciado por los vientos predominantes de la zona, ya que como establece De León (2002), la distribución y ubicación de una floración en un cuerpo de agua tiene relación también con la dirección del viento antes y/o durante el acontecimiento.

## ✚ **Correlación entre abundancia de cianobacterias y parámetros fisicoquímicos**

### - **Temperatura**

En el presente estudio no se descubrió relación estadísticamente significativa entre la abundancia de *Microcystis sp* y la temperatura del cuerpo de agua del lago de Ilopango, a pesar de que las temperaturas que se encontraron durante los meses de muestreo estaban en un rango de 25 a 30° C, en el que generalmente se produce la tasa máxima de crecimiento según Reynolds (2006), citado por Aubriot *et al.* (2009). No obstante, en la actualidad no hay evidencias que soporten la hipótesis que las cianobacterias capaces de formar afloramientos prefieran temperaturas superiores a otras micro-algas (Oliver y Ganf 2000 citado por Carrasco 2007), de hecho en la Comunidad de Madrid se han descrito afloramientos durante momentos en que la temperatura del agua era inferior a 25°C (Sanchis y col. 2002 citado por Carrasco 2007).

Por otra parte Oliver & Ganf (2000); Paerl & Huisman (2009), citado por Aubriot *et al.* (2009), aclaran que la alta temperatura no sería la causa por si misma de una floración, sino que las altas temperaturas estarían asociadas con otros fenómenos como la estratificación térmica y cambios en la profundidad de la zona de mezcla, lo que puede favorecer el desarrollo de cianobacterias con vesículas de gas. En relación a esto Lanzarot (2007), propone que la presencia de cianobacterias mantiene una correlación positiva con la temperatura del agua, siendo dominantes a 24°C en todas las proporciones de nitrógeno: fósforo (N:P) inferiores a 20µM/L, lo que vendría a ser una posible explicación al porqué la escasa presencia de cianobacterias durante los meses de estudio a pesar de existir el rango óptimo de temperatura para la proliferación de estas.

## - pH

Los resultados encontrados de pH durante el estudio fueron en un ámbito de 7.7 y 8.3, que se hallan dentro del rango recomendable para el crecimiento de las cianobacterias según lo plantean investigadores como Roset *et al.* (2001), quienes establecen que debido a la facilidad de crecimiento de las cianobacterias se desarrollan preferentemente en los ambientes dulceacuícolas de aguas alcalinas o neutras con pH entre 6 y 9. Sin embargo, los resultados obtenidos no presentan correlación estadísticamente significativa con la abundancia de *Microcystis sp.*

## - Penetración de la luz

La penetración promedio de la luz en los meses de muestreo, se registra en un ámbito de 4.1 a 7.7 metros. Rodríguez (1993), en su estudio registró que la penetración de la luz en el lago de Ilopango es de 5 a 8 metros en época seca, donde también encontró poca o nula presencia de cianobacterias, estos datos muestran gran similitud con los obtenidos en este estudio, reflejando una pequeña disminución en la penetración de la luz en el transcurso de los años, posiblemente producto del proceso de eutroficación del lago.

En cuanto a los resultados obtenidos también se presenta una relación estadísticamente significativa, en los meses de noviembre de 2012 y enero de 2013, con la abundancia de *Microcystis sp* coincidentemente en estos meses es donde SNET (2013), registra mayor velocidad del viento, que puede hallar explicación en lo mencionado por Aubriot *et al.* (2009), quienes señalan que la luz que reciben las cianobacterias en un cuerpo de agua depende de la profundidad de la zona iluminada, pero también de la profundidad hasta donde se produce la mezcla hidrológica de la columna de agua.

Por otra parte Aubriot *et al.* (2009), mencionan que uno de los recursos necesarios para el crecimiento de las cianobacterias es la luz, ya que la intensidad y la composición

espectral de la luz que penetra la columna de agua tiene un efecto marcado sobre la actividad metabólica de los microorganismos que se desarrollan en todo el cuerpo de agua. Además los mismos autores recalcan la capacidad de las cianobacterias para explotar intensidades de luz muy bajas o altas y optimizar la fotosíntesis mediante la flotación en la columna de agua, pero a la vez enfatizan que la luz por sí sola no es suficiente, sino que también los nutrientes son recursos necesarios para el crecimiento de las cianobacterias, lo que probablemente explicaría la poca presencia de estas en el lago durante los meses de estudio a pesar de que existieran condiciones óptimas de luz.

### **Correlación entre abundancia de cianobacterias y nutrientes**

Los resultados de los nutrientes que se monitorearon durante el periodo de estudio (nitrógeno, fósforo y la relación entre estos) exhiben la más alta relación N:P en el mes de noviembre de 2012 correspondiente a 3.5, mientras que la menor correspondiente a 0.32 se registra en el mes de enero de 2013, indicando limitación potencial de nitrógeno en el cuerpo de agua del lago de Ilopango; según Aubriot *et al.* (2009), establecen que cuando el suministro de nutrientes desde el ambiente se desvía de la relación de Redfield (1958), se produce la deficiencia y posterior limitación del crecimiento celular. Relaciones bajas (ej.: N/P < 10) indican limitación potencial por Nitrógeno, mientras que relaciones altas (ej.: N/P > 20) indican limitación potencial por Fósforo. Así también Vollenweider (1983) citado por Salas y Martino (2001) propuso que para los lagos tropicales, como es el caso del lago de Ilopango, la relación nitrógeno total a fósforo total para el fitoplancton es de 9:1. De esta forma, los lagos/embalses con relaciones de nitrógeno a fósforo superiores a un valor de 9 son considerados potencialmente limitados por fósforo, mientras que aquellos cuya razón era inferior a 9 eran limitados por nitrógeno. Igualmente De León (2002), propone que la carga excesiva de nutrientes en el agua, principalmente de nitrógeno (N) y fósforo (P), son elementos fundamentales para la vida de los organismos y son incorporados en una proporción molecular de 7N:1P. El exceso de alguno de ellos transforma al otro en un nutriente limitante para el crecimiento algal, de modo que solo aquellas especies capaces de desarrollar determinadas estrategias podrán superar esa

carencia y alcanzar densidades muy altas estableciendo que cuando estas condiciones no ocurren, la floración desaparece y da lugar a otros organismos.

A pesar de que los autores anteriormente citados reflejan una pequeña diferencia con referencia a las proporciones y/o relaciones en las que deberían encontrarse los nutrientes, los datos obtenidos en el presente estudio se encuentran por debajo de todos los mencionados. Con base en lo antes mencionado y considerando que el concepto de nutriente limitante se basa en la premisa que, dada una determinada estequiometría celular, el nutriente que controlará la máxima cantidad de biomasa es aquél que primero se consume o que alcanza un mínimo antes que los otros nutrientes relativos a tal estequiometría, podemos decir que el poco nitrógeno total encontrado en la época seca explique el porqué la poca abundancia de *Microcystis sp* y *Anabaena sp* así como la ausencia de *Oscillatoria sp* durante los meses de muestreo.

## VIII. CONCLUSIONES

- Durante la época seca los ríos tributarios disminuyen su caudal y como consecuencia ocurre menor arrastre de nutrientes por escorrentías pluviales, al lago de Ilopango, induciendo una disminución significativa de abundancia de cianobacterias.
- *Microcystis sp* presenta una distribución homogénea en la columna de agua muestreada y a nivel espacial durante la época seca probablemente como consecuencia de las migraciones diarias que realiza en la columna de agua mediante el uso de vesículas de gas. Mientras que *Anabaena sp* y *Oscillatoria sp* se encuentran ausentes o escasamente presentes en época seca en este estudio.
- Posiblemente la velocidad y dirección del viento, así como la influencia de los afluentes y efluentes del lago de Ilopango favorecen la distribución heterogénea de *Microcystis sp* en algunos puntos de muestreo.
- El rango óptimo de los parámetros físico-químicos (temperatura del agua superficial, pH superficial y penetración de la luz) y la relación de los nutrientes necesarios para el crecimiento de las cianobacterias no son determinantes por sí solos para la proliferación de estas, sino que probablemente el efecto promotor involucraría que esta multitud de variables interactúe entre sí para promover la aparición de un afloramiento.

## IX. RECOMENDACIONES

- Es imprescindible realizar un estudio en la época lluviosa con el fin de obtener una perspectiva completa del comportamiento de las cianobacterias y los nutrientes claves para el crecimiento de estas en el lago de Ilopango, en ambas épocas.
- Es necesario hacer estudios de cianotoxinas como microcistinas y anatoxinas producidas comúnmente por los géneros estudiados, para determinar la presencia de estas en el lago, sus concentraciones, sus grados de toxicidad y su relación con la abundancia encontrada en el lago de Ilopango.
- Es preciso realizar monitoreos continuos de las concentraciones de cianobacterias para evitar posibles problemas de toxicidad, teniendo en cuenta que existen actividades recreativas, acuícolas, pesqueras y la posible potabilización del agua.
- Se recomienda utilizar como bioindicadores de floración de cianobacterias a *Anabaena sp* y *Microcystis sp* de manera simultánea, ya que *Microcystis sp* es habitante permanente en el tiempo y en la columna, variando solamente su abundancia cuando se presentan los factores promotores mientras que *Anabaena sp* aparece cuando se le proporcionan las condiciones ideal para su crecimiento. Esto tomando en cuenta los niveles de vigilancia y alerta establecidos por la OMS.
- Se sugiere que para la potabilización del agua se tomen en cuenta los niveles de vigilancia y alerta temprana para la presencia de cianobacterias en aguas de consumo, establecidos por la Organización Mundial de Salud, ya que la norma salvadoreña en los requisitos de calidad microbiológicos no toman en cuenta a las cianobacterias.

## X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO V. 2012. Floraciones de cianobacterias en el Uruguay: Niveles guía y Descriptores ambientales. Pasantía en Ecología, Licenciatura en Ciencias Biológicas Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. P 8.
- ANDRINOLO D y CANEO M. 2009. Efectos sobre la salud humana y animal. Mecanismos de acción tóxica, en Cianobacterias y cianotoxinas: identificación, toxicología monitoreo y evaluación de riesgo. Editor Giannuzzi, L. p. 67-78.
- AUBRIOT L, BONILLA S y KRUK C. 2009. Cianobacterias: factores que regulan su crecimiento, en Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Editor Bonilla, S. p. 5-11.
- BONILLA S. 2009 (ed.). Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Documento Técnico PHI-LAC Nº 16. UNESCO. Montevideo. 97 p.
- BONILLA S y AUBRIOT L. 2009. Biología, floraciones y distribución de las cianobacterias, en Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Bonilla, S. (ed.) p. 1-4.
- BRENA B y BONILLA S. 2009. Producción de toxinas y otros metabolitos, en Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Editor Bonilla, S. pág. 16-18.
- BUSSO F. 2009. Olores y sabores en agua, en Cianobacterias y cianotoxinas: identificación, toxicología monitoreo y evaluación de riesgo. Editor Giannuzzi, L. p.79-90.

- CABRERA D.E. 2011 Evaluación de la relación entre las densidades poblacionales de cianobacterias (*Microcystis sp*, *Anabaena sp*, *Oscillatoria sp*) y las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos: nitratos y fosfatos en el lago de Amatitlán, Guatemala durante los meses de mayo a octubre 2009. Informe final de tesis para optar al título de biólogo. Guatemala. 63 p.
- CARRASCO D. 2007. Cianobacterias planctónicas y cianotoxinas en embalses españoles. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en ciencias biológicas. Madrid. 300 p.
- CIRÉS S y QUESADA A. 2011. Catálogo de cianobacterias planctónicas potencialmente tóxicas de las aguas continentales españolas. Editorial Mº Medio Ambiente y Mº Rural y Marino, 1ª Ed. 85 p.
- CONDE D. 2009. Eutrofización, cambio climático y cianobacterias, en Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Editor Bonilla, S. p. 12-15.
- DE HOYOS C, VILLÉN L, MARTÍN D, CONDE L, ALONSO A M, GONZÁLEZ M E, VERDUGO M y AVILÉS J. 2008. Problemas de cianobacterias en aguas de recreo y aguas de consumo. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. p. 63-69.
- DE LEÓN L. 2002. Floraciones de cianobacterias en aguas continentales del Uruguay: causas y consecuencias. En: DOMÍNGUEZ, A. Y R. PRIETO (2002) (eds.). Perfil Ambiental del Uruguay. Editorial Nordan-Comunidad. Montevideo. p.28-37
- DIGESTYC, MINEC. 2008. VI Censo de población y vivienda 2007. El Salvador. 576 p.

- ECHENIQUE R O y AGUILERA A. 2009. Cyanobacteria toxígenas. Aspectos generales para su identificación taxonómica en Cianobacterias y cianotoxinas: identificación, toxicología monitoreo y evaluación de riesgo. Editor Giannuzzi, L. p.37-52.
- E FORJÁN, DOMÍNGUEZ M J, VILCHEZ C, MIGUEL R, COSTA C y REIS M P. 2008. Cianoalerta: estrategia para predecir el desarrollo de cianobacterias tóxicas en embalses. Ecosistemas 17 (1): 37-45.
- FERNÁNDEZ F. s.a. Descripción de los lagos de El Salvador. 34 p. [Internet]. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2012. disponible en:  
<http://www.oirsa.org/aplicaciones/subidoarchivos/bibliotecavirtual/lagoselsalvador.pdf>
- GARCÍA S. s.a. Cianobacterias y cianotoxinas. Impacto sobre la salud humana. 34 p.
- GIANNUZZI L. (ed.). 2009. Cianobacterias y cianotoxinas: identificación, toxicología monitoreo y evaluación de riesgo. 1ª Edición. Buenos Aires, Argentina. 238 p.
- JAQUENOD DE ZSÖGÖN S. 2004. Derecho ambiental. Ed. DYKINSON, S.L. Madrid, España. 684 p.
- LANZAROT M. 2007. Cianobacterias tóxicas y mortandades en masa de fauna salvaje en las marismas de Doñana. Memoria para optar al grado de doctor. Madrid. 159 p.
- MADIGAN M T, MARTINKO J M y PARKER J. 2006. Brock biología de los microorganismos. 10ª Edición. Ed. Pearson-Prentice-Hall. Madrid. p. 418-420.
- MEICHTRY N, MARTENS I y LLANO V. 2009. Cyanobacteria planctónicas: su impacto en ambientes acuáticos continentales. Descripción de los géneros más frecuentes,

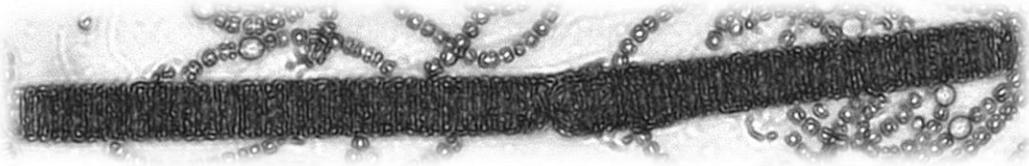
en Cianobacterias y cianotoxinas: identificación, toxicología monitoreo y evaluación de riesgo. Editor Giannuzzi, L. p. 17-36.

- MOLINA N E. 2004. Contaminación del agua y evaluación económica, en el lago de Ilopango, El Salvador. Tesis sometida para optar por el grado de: maestra en gestión ambiental. 98 p.
- MUR L R, SKULBERG O M, y UTKILEN H. 1999. Cyanobacteria in the environment en Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. I. Editors Chorus and J. Bartram. London, E. & F. N. Spon, p. 15-40.
- OLIVARES A. datos no publicados. Abundancia y distribución de cianobacterias en el lago de Ilopango durante la época lluviosa en los meses de septiembre y octubre de 2012. ANDA y LABTOX-UES, San Salvador, El Salvador, 24 p.
- ORTIZ R E, POSADA J A, y GALDÁMEZ R E. 1990. Evaluación del estado de eutroficación del lago de Ilopango. Trabajo de graduación para optar por el título de: ingeniero civil. 200 p.
- QUESADA D y CIRÉS S. 2006. Cianobacterias en aguas de consumo y recreo: un problema de todos. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- REGUERA B, ALONSO S, MOREIRA A Y MÉNDEZ S. 2011. Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. COI de UNESCO y OIEA, Paris y Viena 2011, Manuales y Guías de la COI, p 34-35.

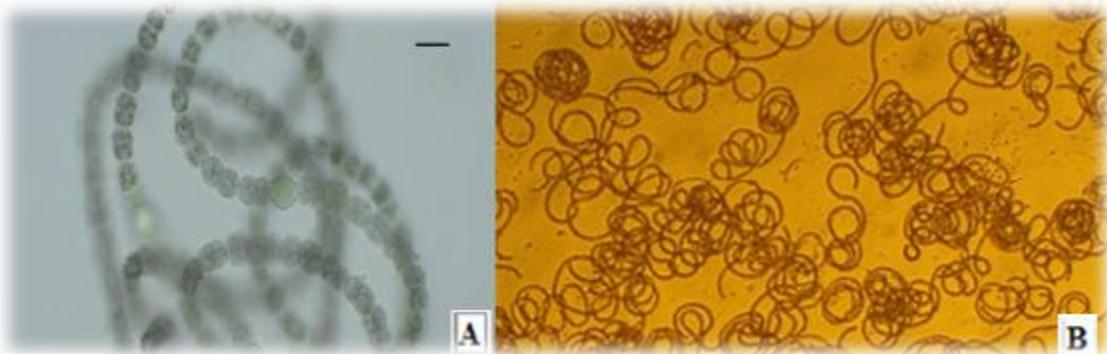
- RODRIGUEZ J A. 1993. Dinámica poblacional de cyanochlorontas en las áreas de Cutenama y Asino del lago de Ilopango. Tesis para optar al grado de licenciado en biología. 81 p.
- ROSET J, AGUAYO S y MUÑOZ M J. 2001. Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. Madrid. Rev. Toxicol. (2001) 18: 65-71.
- SALAS H J y Martino P. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). p. 7
- SÁNCHEZ J. 2001. V-100 El fósforo, parámetro crítico de calidad de agua técnicas analíticas y de muestreo. ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. p. 2
- SNET. Datos no publicados. Informe de promedios mensuales de temperatura y precipitación en la estación aeropuerto de Ilopango, San Salvador en el periodo del 2000 a 2013. Ministerio de medio ambiente y recursos naturales.
- VICENTE E, DE HOYOS C, SÁNCHEZ P y CAMBRA J. 2007. Protocolos de muestreo y análisis para Fitoplancton en Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la Directiva Marco del Agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro. Editor De la Fuente Álvaro, M.J. p. 35-59
- VIDAL L y PÉREZ M. 2009. Claves Taxonómicas, en Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Editor Bonilla, S. p. 41-44.

## **XI. ANEXOS**

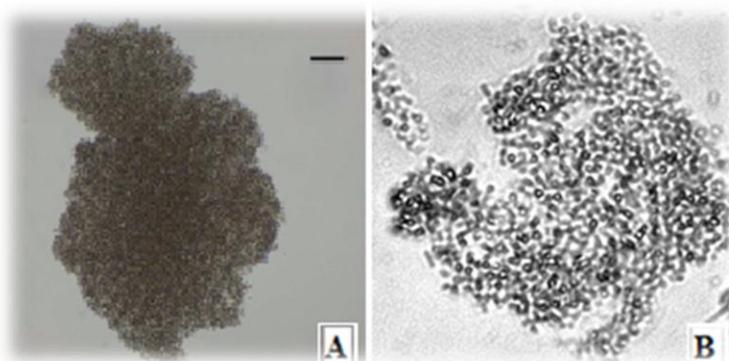
**Anexo 1.** Géneros de cianobacterias estudiados



*Oscillatoria* sp. Microscopio invertido (20X)



*Anabaena* sp. A) Barra de escala = 10 $\mu$ m, tomado de Cirés y Quesada 2011, B) En microscopio invertido (20X).



*Microcystis* sp. A) Barra de escala = 50 $\mu$ m, tomado de Cirés y Quesada 2011, B) En microscopio invertido (20X).

**Anexo. 2.** Muestreo cuantitativo de cianobacterias con una botella limnológica Niskin en el lago de Ilopango.



**Anexo. 3.** Cámara de recuento celular Sedgwick-Rafter.



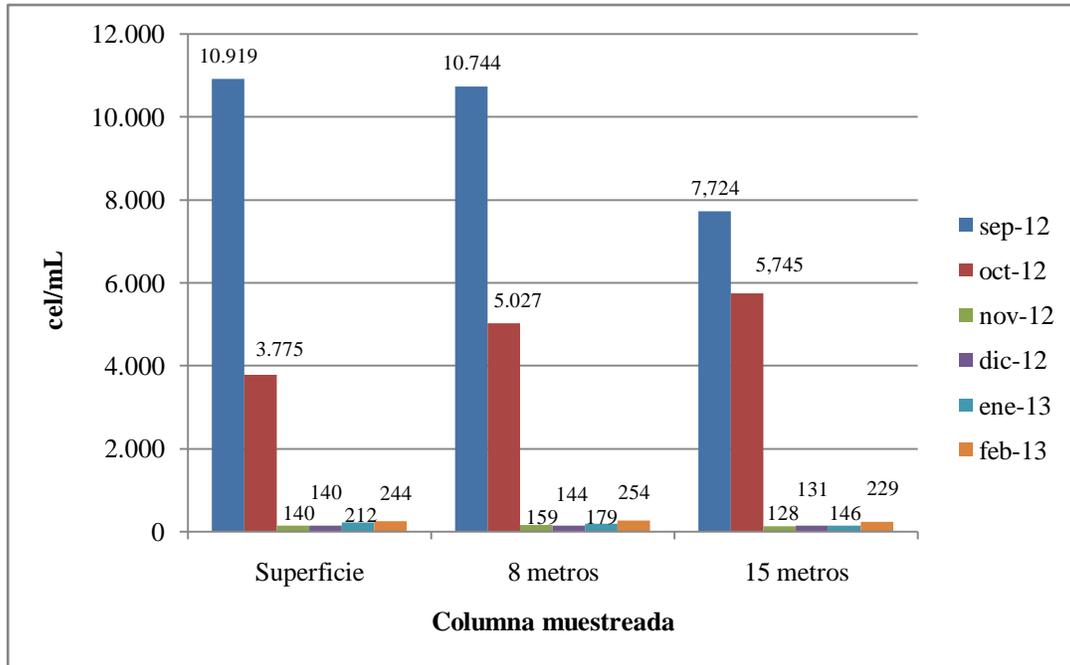
**Anexo. 4.** Reticulación (20 filas, 50 columnas) de una cámara Sedgwick-Rafter

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50							
2																																																								
3																																																								
4																																																								
5																																																								
6																																																								
7																																																								
8																																																								
9																																																								
10																																																								
11																																																								
12																																																								
13																																																								
14																																																								
15																																																								
16																																																								
17																																																								
18																																																								
19																																																								
20																																																								

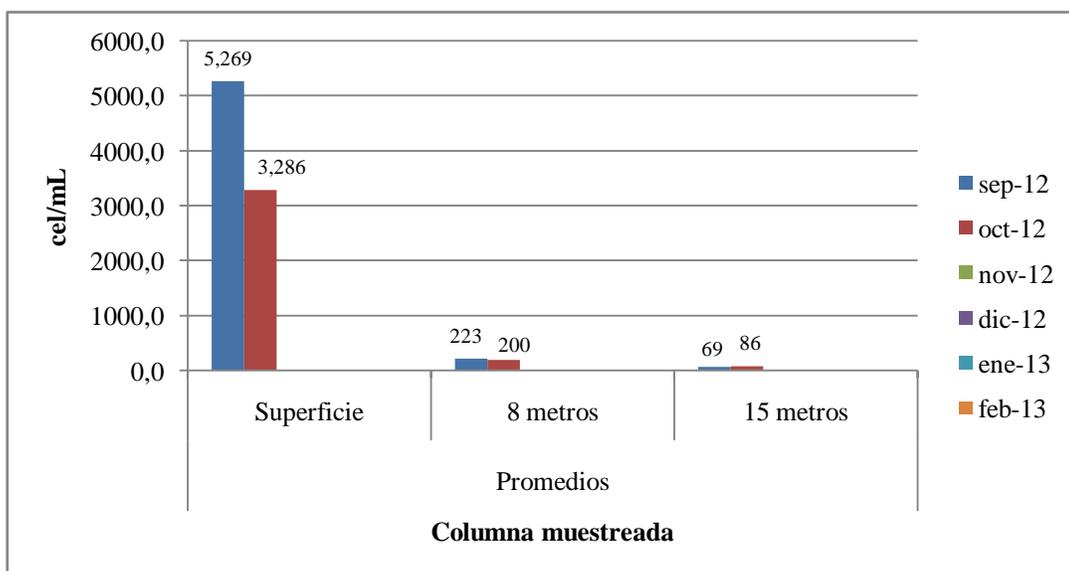
**Anexo. 5.** Abundancia de *Microcystis sp*, *Anabaena sp* y *Oscillatoria sp* en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre y octubre del 2012 en el lago de Ilopango (Olivares, datos no publicados)

		<i>Microcystis sp</i>		<i>Anabaena sp</i>		<i>Oscillatoria sp</i>	
		sep-12	oct-12	sep-12	oct-12	sep-12	oct-12
<b>P1</b>	<b>Superficie</b>	11,987	3029	20,600	7240	138	69
	<b>8 metros</b>	10,956	4060	160	440	138	138
	<b>15 metros</b>	6509	6831	0	160	0	69
<b>P2</b>	<b>Superficie</b>	14951	2964	920	1440	0	344
	<b>8 metros</b>	10504	3931	80	120	69	0
	<b>15 metros</b>	5864	5220	40	80	0	0
<b>P3</b>	<b>Superficie</b>	7411	3802	400	3920	0	138
	<b>8 metros</b>	7089	5027	160	320	69	69
	<b>15 metros</b>	7991	5736	40	0	0	0
<b>P4</b>	<b>Superficie</b>	11149	2320	2080	8680	69	0
	<b>8 metros</b>	11536	5413	880	280	138	276
	<b>15 metros</b>	11600	6251	360	240	0	69
<b>P5</b>	<b>Superficie</b>	7540	3158	720	1120	0	138
	<b>8 metros</b>	12309	4511	80	80	138	69
	<b>15 metros</b>	7282	3996	40	40	69	69
<b>P6</b>	<b>Superficie</b>	13340	6187	7400	200	69	0
	<b>8 metros</b>	13727	6444	160	160	138	0
	<b>15 metros</b>	8184	6702	0	0	0	0
<b>P7</b>	<b>Superficie</b>	10053	4962	4760	400	0	69
	<b>8 metros</b>	9087	5800	40	0	138	0
	<b>15 metros</b>	6638	5478	0	80	0	0
<b>Promedios</b>	<b>Superficie</b>	10919	3775	5269	3286	39	108
	<b>8 metros</b>	10744	5027	223	200	118	79
	<b>15 metros</b>	7724	5745	69	86	10	30

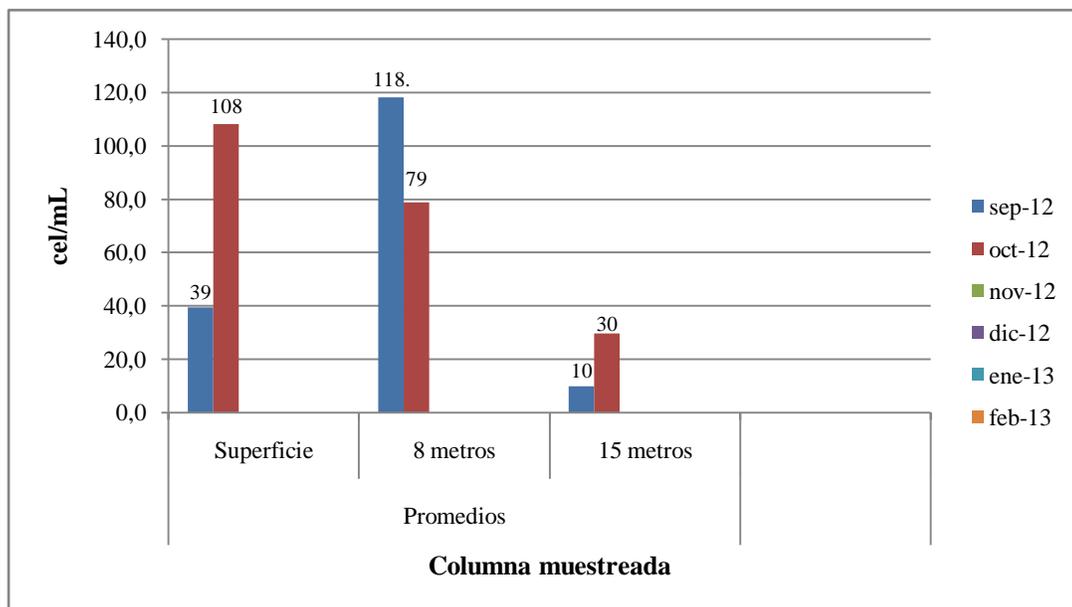
**Anexo. 6.** Abundancia promedio de *Microcystis sp.* en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre del 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.



**Anexo. 7.** Abundancia promedio de *Anabaena sp.* en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre del 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.



**Anexo. 8.** Abundancia promedio de *Oscillatoria sp.* en la columna muestreada en los siete puntos de muestreo entre los meses de septiembre del 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.



**Anexo. 9.** Promedios mensuales de temperatura, humedad relativa y precipitación de enero de 2000 a mayo de 2013, obtenidos de la estación aeropuerto de Ilopango ubicada en el departamento de San Salvador entre las coordenadas 13° 42' latitud Norte y 89° 07' longitud Oeste a una elevación de 615 msnm (SNET 2013).

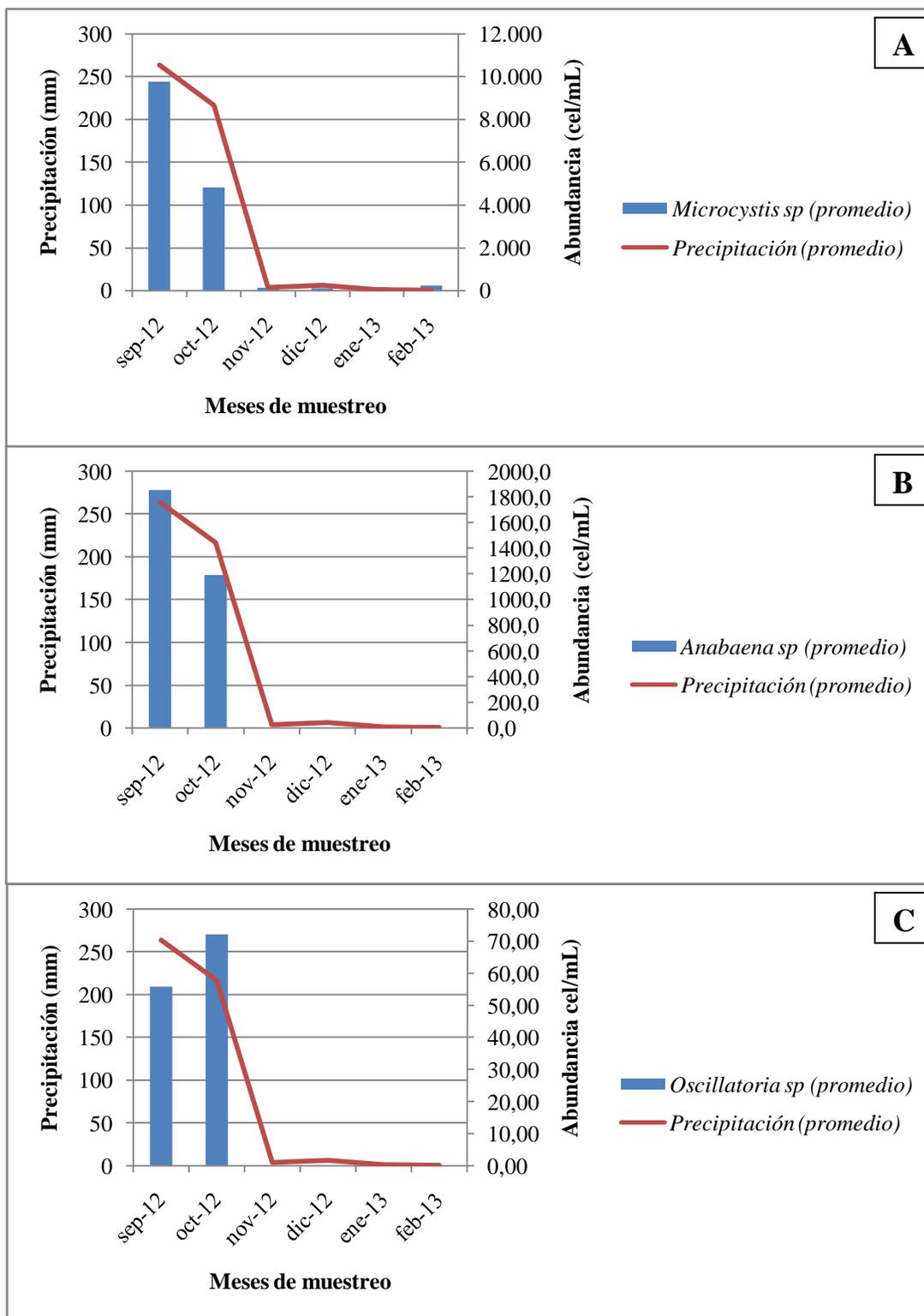
Año	Mes	Temperatura °C			Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)
		Máxima	Mínima	Media		
2000	enero	30.5	16.3	22.3	66	0
	febrero	31.2	16.5	22.9	65	0
	marzo	32.3	17.9	24.1	72	0.1
	abril	33	18.2	25	69	45.7
	mayo	29.4	20.3	23.9	85	270.1
	junio	29.9	20.2	23.6	84	285.6
	julio	30.2	19.7	23.9	85	256.3
	agosto	30.4	20	24	82	237.6
	septiembre	29.1	19.9	23.1	88	333.7
	octubre	29.5	19.4	23	80	180.4
	noviembre	30.1	19.5	23.5	80	22.5
	diciembre	30.4	18.3	23	69	0.1
2001	enero	30.3	17.6	22.6	69	0
	febrero	33	18.6	24.6	67	0
	marzo	32.1	18.2	23.6	69	0
	abril	34	20.4	25.5	68	13
	mayo	31.3	21.2	24.8	79	102.8
	junio	30.6	20.2	24.1	80	214.9
	julio	30.4	19.7	24.1	82	252.1
	agosto	31.2	20.4	24.5	83	215.1
	septiembre	29.5	20.1	23.4	87	220.9
	octubre	30	20.2	24	82	153.7
	noviembre	30.4	18.7	22.9	76	9.5
	diciembre	30.8	18.7	23.5	73	0
2002	enero	-	-	-	-	0
	febrero	-	-	-	-	0.3
	marzo	-	-	-	-	14.6
	abril	-	-	-	-	62.3
	mayo	-	-	-	-	237.4
	junio	-	-	-	-	258.9
	julio	-	-	-	-	394.8
	agosto	31.1	20	24.2	81	215.8
	septiembre	29.5	20.4	23.8	86	227.3
	octubre	30.4	20.1	24	83	221.7
	noviembre	29.9	18.8	23.2	74	17.9
	diciembre	31.3	18.4	23.3	71	0
2003	enero	31.7	17.6	22.6	63	0.1
	febrero	33.7	18.9	24.6	65	4
	marzo	32.9	19.8	24.4	69	57.8
	abril	33.1	20.4	25.3	70	0.4

	mayo	32.4	21.1	25.2	77	180
	junio	29.6	20.6	24	84	277.4
	julio	30.9	20.3	24.2	80	225.9
	agosto	30.7	20.1	24.3	83	450.7
	septiembre	30.2	20.2	24.1	86	284.1
	octubre	29.6	20.3	23.7	88	251.9
	noviembre	30.3	19.3	23.6	82	55.2
	diciembre	29.6	17.4	21.9	76	7.4
	enero	30.9	17.2	22.7	73	0.3
	febrero	32	18.4	23.8	70	0
	marzo	34.2	19.6	25.6	64	10.5
	abril	33.2	19.8	25	70	33.9
	mayo	31.6	20.9	24.8	80	260.3
2004	junio	30.7	20.3	24.4	82	185.1
	julio	30.3	19.9	24	82	212.3
	agosto	31.3	20.3	24.7	82	259.3
	septiembre	30.2	20.2	23.8	86	355.1
	octubre	30.4	20.3	24	85	242.2
	noviembre	30.3	18.7	23.4	77	29.8
	diciembre	30.3	18	22.8	71	0
	enero	30.3	17.1	22.4	67	0
	febrero	32.5	17.9	24	65	0
	marzo	32.7	20.7	25.1	76	0.9
	abril	33.7	21.3	25.9	70	12.3
	mayo	30.6	20.9	24.7	83	307.5
2005	junio	29.8	21.1	24.1	88	230.8
	julio	30.2	20.5	24.2	86	298.6
	agosto	30.5	20.5	24.2	85	378.2
	septiembre	30	20.1	23.5	87	580.5
	octubre	28.1	20	22.9	86	524.1
	noviembre	29.3	18.6	22.8	74	7.5
	diciembre	30.8	18.6	23.5	73	0
	enero	31	17.8	23.5	68	0.8
	febrero	32.4	17.1	23.7	65	0
	marzo	33.5	17.3	24.7	65	6.1
	abril	31.9	18.2	24.7	74	93.2
	mayo	30.5	19	24.6	84	180.5
2006	junio	29.2	18.3	23.7	87	230.8
	julio	30.2	17.7	24.1	85	521.1
	agosto	30.7	17.7	24.5	83	270.2
	septiembre	30.3	17.4	24	86	286
	octubre	30.2	18.2	24.1	86	131
	noviembre	29	18.3	22.7	79	69.5
	diciembre	31	18.3	23.4	77	12
	enero	32.8	17.6	24.1	72	0
	febrero	32.9	17.3	23.8	72	0
2007	marzo	33.9	19.2	25.1	69	9.8
	abril	33.1	19.8	25.1	77	81.5
	mayo	31.9	20.7	25.1	80	67.7

	junio	30.6	20.3	24.5	84	135.8
	julio	30.6	19.8	24.2	84	364.9
	agosto	29.7	20.1	24	87	282.6
	septiembre	30.4	19.9	23.6	87	309.7
	octubre	29	19.5	23	87	272.2
	noviembre	31	18.4	23.4	74	22.7
	diciembre	31.6	18	23.4	74	0.6
	enero	31.9	16.5	23.3	72	1
	febrero	32.7	18.7	23.7	77	4.8
	marzo	33.3	19	24.3	76	2.7
	abril	32.1	20	24.3	77	112.6
	mayo	30.4	20.6	24.4	82	159
2008	junio	30.2	20.1	23.8	86	437
	julio	30	19.6	23.9	85	411.2
	agosto	30.5	20.1	23.9	86	287.6
	septiembre	30.4	19.9	23.7	87	260.4
	octubre	29.6	19.4	22.9	85	358.5
	noviembre	30.7	17.1	22.2	72	0
	diciembre	32.7	17.2	23.1	71	0
	enero	33	16.9	23.3	70	3.4
	febrero	33.8	17.5	23.6	65	0
	marzo	34.2	17.9	23.9	64	0
	abril	34.4	20	25.4	70	16.6
	mayo	31.6	20.3	24.4	82	301.4
2009	junio	30.6	20.6	24.5	84	91.4
	julio	31.5	20.2	24.4	82	218.7
	agosto	31.7	20	24.6	83	561.6
	septiembre	31.8	20.1	24.5	87	463.8
	octubre	31.3	20	24.2	86	219.9
	noviembre	31.2	18.2	23.3	84	309.4
	diciembre	32	17.3	23.3	80	27.2
	enero	32.9	16.1	22.7	69	0
	febrero	34.5	18.7	24.6	69	0
	marzo	34.7	19.4	24.9	69	57.7
	abril	32.9	21.4	25.5	78	53.8
	mayo	30.7	21.9	24.9	84	472.9
2010	junio	29.8	21.2	24.3	87	543.9
	julio	29.5	20.7	23.4	89	530.4
	agosto	29.1	21.1	23.6	90	334.1
	septiembre	28.5	21.2	23.4	91	358.8
	octubre	30.9	19.4	23.7	78	93.2
	noviembre	30.7	18.3	23.1	77	10.3
	diciembre	30.5	16.2	21.6	71	0
	enero	32.3	18.2	23.6	72	6.9
	febrero	33	18.9	24.2	76	0
2011	marzo	32.5	18.4	23.7	73	47.8
	abril	32.1	20.5	24.8	81	52.7
	mayo	31.6	21.3	25.2	81	259.6
	junio	31.1	20.9	24.3	84	208.9

	julio	30.6	20.5	24.3	83	398.3
	agosto	30.3	20.6	24.2	86	330
	septiembre	30.7	20.7	24	86	274.5
	octubre	28.6	19.1	22.9	84	509.3
	noviembre	31.1	18.4	23.3	75	32.5
	diciembre	31.3	17.8	23.1	72	1
	enero	31.8	18.2	23.4	72	0
	febrero	33.2	19.1	24.4	73	2.7
	marzo	34	19.2	25	67	8.4
	abril	32.5	19.4	24.5	75	144.1
	mayo	30.8	21.2	24.5	86	183.3
2012	junio	30.5	20.8	24.4	85	149.3
	julio	32.2	20.1	24.5	83	350.2
	agosto	30.9	20.4	24.1	87	194.6
	septiembre	31.1	20.3	24.3	87	263.6
	octubre	30.8	19.9	23.8	87	216.2
	noviembre	31	18.4	23.3	82	3.9
	diciembre	31.8	18	23.5	81	6.6
	enero	32.4	18.8	24	72	1.3
	febrero	33	18.8	24.4	72	0.8
2013	marzo	33.4	19	24.5	61	0
	abril	32.5	21.3	25.6	73	71.8
	mayo	31.4	21.1	24.9	80	161.7

**Anexo. 10.** Relación entre abundancia de cianobacterias (A.- *Microcystis sp*, B.- *Anabaena sp* y C.- *Oscillatoria sp*) y precipitación promedio entre los meses de septiembre del 2012 a febrero de 2013 en el lago de Ilopango.



**Anexo. 11.** Promedios mensuales de dirección y velocidad del viento (nudos) de 2010 a mayo de 2013, obtenidos de la estación aeropuerto de Ilopango ubicada en el departamento de San Salvador entre las coordenadas 13° 42' latitud Norte y 89° 07' longitud Oeste a una elevación de 615 msnm. SNET (2013).

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Dirección Del Viento (Prom.)</b>	<b>Velocidad del Viento (Prom.)</b>
2010	enero	263.41	6.23
	febrero	223.28	5.07
	marzo	220.86	5.38
	abril	234.75	7.00
	mayo	217.00	12.26
	junio	198.30	3.48
	julio	203.12	0.22
	agosto	202.51	3.75
	septiembre	187.08	1.73
	octubre	257.85	3.64
	noviembre	248.19	4.41
	diciembre	271.67	5.68
2011	enero	232.47	4.90
	febrero	219.45	5.24
	marzo	229.27	4.72
	abril	196.12	4.18
	mayo	202.21	4.38
	junio	193.96	3.89
	julio	212.18	3.65
	agosto	199.83	3.63
	septiembre	205.65	3.53
	octubre	237.60	4.13
	noviembre	279.16	4.83
	diciembre	277.07	5.55
2012	enero	239.28	5.19
	febrero	210.94	4.67
	marzo	219.87	5.31
	abril	199.65	1.49
	mayo	205.69	3.83
	junio	193.95	3.69
	julio	236.21	4.15
	agosto	203.34	3.65
	septiembre	229.75	3.72
	octubre	231.35	3.95
	noviembre	296.59	6.41
	diciembre	240.65	4.87
2013	enero	241.29	5.55
	febrero	203.66	4.84
	marzo	238.36	6.60
	abril	187.80	6.65
	mayo	284.30	4.53

**Anexo. 12.** Análisis de Varianza para abundancia de *Microcystis sp* - Suma de Cuadrados Tipo III. Entre las variables están: profundidad (0, 8, 15 m), mes (sep-12 a feb-13) y punto (los 7 puntos de muestreo).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: profundidad	3.38099E6	2	1.69049E6	1.92	0.1553
B: mes	1.68717E9	5	3.37435E8	383.46	0.0000
C: punto	1.11456E7	6	1.8576E6	2.11	0.0651
INTERACCIONES					
AB	5.57266E7	10	5.57266E6	6.33	0.0000
AC	1.057E7	12	880833.	1.00	0.4593
BC	4.51042E7	30	1.50347E6	1.71	0.0391
RESIDUOS	5.27978E7	60	879964.		
TOTAL (CORREGIDO)	1.8659E9	125			

**Anexo. 13.** Análisis de Varianza para abundancia de *Anabaena sp* - Suma de Cuadrados Tipo III. Entre las variables están: profundidad (0, 8, 15 m), mes (sep-12 a feb-13) y punto (los 7 puntos de muestreo).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:A.profundidad	5.32549E7	2	2.66275E7	7.87	0.0009
B:A.meses	6.94264E7	5	1.38853E7	4.11	0.0028
C:A.punto	2.86793E7	6	4.77988E6	1.41	0.2244
INTERACCIONES					
AB	1.1544E8	10	1.1544E7	3.41	0.0014
AC	5.32174E7	12	4.43479E6	1.31	0.2362
BC	1.00431E8	30	3.34771E6	0.99	0.4985
RESIDUOS	2.02887E8	60	3.38144E6		
TOTAL (CORREGIDO)	6.23336E8	125			

**Anexo. 14.** Análisis de Varianza para abundancia de *Oscillatoria sp* - Suma de Cuadrados Tipo III. Entre las variables están: profundidad (0, 8, 15 m), mes (sep-12 a feb-13) y punto (los 7 puntos de muestreo).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:B.profundidad	15183.3	2	7591.65	3.97	0.0241
B:B.meses	117676.	5	23535.3	12.30	0.0000
C:B.punto	7856.19	6	1309.37	0.68	0.6628
INTERACCIONES					
AB	50945.1	10	5094.51	2.66	0.0092
AC	18603.8	12	1550.32	0.81	0.6386
BC	40575.5	30	1352.52	0.71	0.8489
RESIDUOS	114770.	60	1912.84		
TOTAL (CORREGIDO)	365611.	125			

**Anexo. 15.** Valores de temperatura (°C) y penetración de la luz (m.) registrados en el lago de Ilopango, de septiembre y octubre de 2012.

	sep-12		oct-12	
	T° (°C)	P.L.	T° (°C)	P.L.
<b>P1</b>	30,5	3	29,8	4
<b>P2</b>	30,7	3,5	30	4,45
<b>P3</b>	30	4	29,6	4,44
<b>P4</b>	30	3,5	29,8	4,45
<b>P5</b>	30,8	3,5	30,2	4,67
<b>P6</b>	30,4	3,25	28,8	3,25
<b>P7</b>	30,7	3,5	29,2	3,5
<b>Prom.</b>	<b>30,4</b>	<b>3,5</b>	<b>29,6</b>	<b>4,1</b>
<b>Desv.</b>	<b>0,33</b>	<b>0,30</b>	<b>0,48</b>	<b>0,54</b>

**Prom.** = Promedio y **Desv.** = Desviación Estándar