



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Facultad de Estudios Superiores Zaragoza**

***COMPOSICIÓN Y DINÁMICA DEL PLANCTON  
PROCARIOTE EN EL LAGO VOLCÁNICO,  
MONOMÍCTICO CÁLIDO SUBSALINO “LA  
PRECIOSA”, PUEBLA***

Tesis

Que para obtener el título de Biólogo

Presentan:

**Benítez Hernández María de los Angeles  
Contreras Tapia Fernando**

Director de tesis:

**Dr. Justo Salvador Hernández Avilés**  
Laboratorio de Limnoecología Microbiana



México D.F. Mayo, 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
PRESENTE.**

Comunico a usted que la alumna **BENÍTEZ HERNÁNDEZ MARÍA DE LOS ANGELES**, con número de cuenta **306131495**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **31 de mayo de 2016** a las **15:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

**PRESIDENTE** Dr. GUILLERMO ARTEMIO BLANCAS ARROYO

**VOCAL** Dr. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS

**SECRETARIO** Biól. ANGÉLICA ELAINE GONZÁLEZ SCHAFF

**SUPLENTE** Biól. ERNESTO CONSTANZO CASILLAS

**SUPLENTE** Biól. JOSÉ LUIS GUZMÁN SANTIAGO

El título de la tesis que presenta es: **Composición y dinámica del plancton procarionte en el lago volcánico, monomíctico cálido subsalino “La Preciosa”, Puebla.**

Opción de titulación: Tesis.

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**  
México, D. F., a 26 de abril de 2016

**DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ**  
DIRECTOR

DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
FACULTAD DE  
ZARAGOZA  
DIRECCIÓN

RECIBÍ  
OFICINA DE EXÁMENES  
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.  
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL  
JEFE DE CARRERA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
P R E S E N T E.**

Comunico a usted que el alumno **CONTRERAS TAPIA FERNANDO**, con número de cuenta **306119976**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **31 de mayo de 2016** a las **17:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

**PRESIDENTE** Dr. GUILLERMO ARTEMIO BLANCAS ARROYO

*[Firma]*

**VOCAL** Dr. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS

*[Firma]*

**SECRETARIO** Biól. ANGÉLICA ELAINE GONZÁLEZ SCHAFF

*[Firma]*

**SUPLENTE** Biól. ERNESTO CONSTANZO CASILLAS

*[Firma]*

**SUPLENTE** Biól. JOSÉ LUIS GUZMÁN SANTIAGO

*[Firma]*

El título de la tesis que presenta es: **Composición y dinámica del plancton procarionte en el lago volcánico, monomíctico cálido subsalino “La Preciosa”, Puebla.**

Opción de titulación: Tesis.

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

**ATENTAMENTE**

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

México, D. F., a 26 de abril de 2016

*[Firma]*  
**DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ**  
DIRECTOR

ACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA  
DIRECCIÓN

RECIBÍ  
OFICINA DE EXÁMENES  
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.  
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL  
JEFE DE CARRERA

*La Tierra y el cielo, bosques y campos, lagos y ríos,  
la montaña y el mar, son excelentes maestros de  
escuela y enseñan a algunos de nosotros más de lo  
que podemos aprender de los libros.*

*John Lubbock*

*Bosques, lagos y ríos, las nubes y los vientos, las  
estrellas y las flores, los glaciares estapendos y  
copos de nieve de cristal; toda forma de existencia  
animada o inanimada, deja su huella en el alma  
del hombre.*

*Orison Swett Marden*

*Olvidamos que el ciclo del agua  
y el ciclo de la vida son uno mismo.*

*Jacques Cousteau*

*El océano es más antiguo que las montañas  
y está cargado con los recuerdos y los  
sueños del tiempo.*

*H. P. Lovecraft*

## Agradecimientos Institucionales

A la Carrera de Biología de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza perteneciente a la máxima casa de estudios; la Universidad Nacional Autónoma de México, por habernos brindado la oportunidad de estudiar tras sus puertas, por haber estado acogidos bajo su apoyo durante nuestros años como estudiantes y por haber hecho de nosotros unos profesionales orgullosos de representar nuestros colores y profesión.

A la Facultad de Estudios Superiores Iztacala por el tiempo, apoyo y ayuda brindados a lo largo del periodo de muestreo al habernos facilitado el uso del microscopio de epifluorescencia a cargo del Dr. Miroslav Macek en el Proyecto de Investigación de Limnología Tropical.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIT) de la DGAPA-UNAM con el proyecto IN219313 intitulado “Dinámica del plancton procariota en lagos monomícticos cálidos volcánicos en la Cuenta Oriental Puebla”, para la adquisición de material, reactivos y salidas al campo para realizar los muestreos necesarios para la elaboración de esta tesis.

A nuestro director de tesis, el Dr. Justo Salvador Hernández Avilés, tutor del laboratorio de Limnoecología Microbiana de la FES Zaragoza por el tiempo, paciencia, apoyo, consejos, orientación y amistad otorgados a lo largo del culmino de este proyecto de vida.

A nuestros sinodales, el Dr. Guillermo Artemio Blancas Arroyo, la Biól. Angélica Elaine González Schaff, el Biól. Ernesto Constanzo Casillas y el Biól. José Luis Guzmán Santiago por el tiempo, comentarios y correcciones realizadas a nuestro trabajo para mejorarlo.

## Dedicatorias

A las dos personas más importantes en mi vida, quienes han estado conmigo en las buenas y en las malas, alentándome a ser mejor cada día, recordándome que siempre puedo contar con ellos sin importar las circunstancias y ayudándome a superar mis propias expectativas; a ustedes, que no tengo palabras suficientes ni hojas que me alcancen para agradecer todo lo que han hecho por mí; a quienes con orgullo, respeto y admiración puedo llamar mamá y papá les dedico este trabajo, porque no solo fue mío, fue de los tres; al fin hemos terminado.

A mi mamá Angeles Hernández, tu siempre serás “la mamá más mala del mundo”; en los últimos años me alentaste siempre a que cerrara este ciclo de mi vida, y hoy “no hay plazo que no se cumpla ni fecha que no llegue” (tu visita al Vaticano valió la pena ☺). Gracias por tu apoyo y amor incondicional, te amo mamá.

A mi papá Juan Benítez, “hay Juanito de mi colazón”, no conozco hombre más responsable y comprometido que tú; brindándome el amor y apoyo incondicional que solo un padre puede sentir por su hija. Te preocupaste y me alentaste todos los días para que terminara con este proyecto y me viera realizada profesionalmente, gracias por todo papá, ahora a seguir adelante; te amo.

A los dos les agradezco por jamás haber dudado de mí y transmitirme el orgullo y satisfacción que sienten cuando alcanzo y culmino alguno de mis objetivos y puedo compartirlo con ustedes, gracias por toda una vida de enseñanzas, amor y seguridad.

A mi mamá Rebeca y papá poncho, porque desde niña ambos me cuidaron y enseñaron que “siempre hay que ser el mejor entre los mejores, no entre los mediocres”, aunque no pudieron seguir conmigo a lo largo de la carrera, todo lo que hicieron por mí años atrás dejó una huella muy significativa en mi vida que jamás olvidare.

A mi hermana Rebeca y cuñado Clemente, porque de algún modo siempre estuvieron conmigo aconsejándome y apoyándome a lo largo de la carrera; pero principalmente quiero agradecerles por su tiempo, esfuerzo y dedicación para ayudarme a estudiar para el examen de admisión a nivel preparatoria, porque desde entonces pude pertenecer a la UNAM.

A Brianda Cid y Alejandro Camargo; aunque en los últimos años nos hemos distanciado bastante ustedes siempre serán amigos muy importantes y especiales para mí, ya que siempre los recuerdo con cariño y afecto en momentos especiales, como ahorita;

ambos me enseñaron tantas cosas y con cada uno viví momentos únicos e inigualables que jamás podría repetir con nadie más.

A mis colegas de carrera, compañeros y amigos Thelma, Karen y Gerardo; porque me ayudaron a hacer más llevaderos y entretenidos los años en la facultad; cada uno sabe muy bien todo lo que hicimos y deshicimos juntos, fue un placer e inmensa diversión haberlos conocido.

Al Doc. Salvador, porque para empezar sin usted nada de esto hubiera sido posible, gracias por siempre apoyarnos en todo momento, por haber compartido con nosotros una parte de su pasión por la Limnología, pero principalmente por haber actuado no solo como un profesor sino también como nuestro amigo y consejero todo este tiempo,

A Maye, Tadeo y Fer; con ustedes compartí el último año de la carrera, el más importante y pesado de todos, experimentamos tantas cosas juntos que me hicieron valorarlos como los amigos más especiales con los que puedo contar hoy en día; siempre que vea este trabajo vendrán a mi mente todas las cosas que vivimos y con una enorme sonrisa nunca los olvidare.

A mi compañero de trabajo y querido amigo Fernando Contreras Tapia, no pude haber tenido mejor pareja para realizar este proyecto, solo tú y yo sabemos muy bien lo que le flojearnos, trabajamos y desvelamos haciendo esto; las horas productivas y las otras tantas solo chismeando; fue una gran alegría, gusto y privilegio haber vivido todo esto contigo, jamás jamás pero jamás en la vida te voy a olvidar fercho.

A una persona muy especial que está en estos momentos a mi lado no solo como un amigo, no sé cuánto tiempo podamos compartir, pero por ahorita me ha brindado apoyo, cariño, aliento, comprensión, consejo y paciencia para terminar este trabajo, así que también él ha sufrido un poco de todo esto a mi lado y me ha ayudado a no desesperar en las últimas noches antes del examen soportando mis ataques de estrés, gracias Aarón; 251!.

A todas las demás personas que no menciono directamente en este trabajo pero que fueron o son parte de mi vida y me dieron alguna enseñanza, gracias.

María de los Angeles Benítez Hernández.



A mi madre Lourdes Tapia, porque nunca dejó de guiarme al estar superando los difíciles obstáculos a los que se enfrentó. Gracias por darme todo lo necesario para adquirir esa herencia que dices nadie me podrá que quitar. Porque sé que de alguna forma me entiendes y estás orgullosa de lo que hago. No olvides que te amo, que nadie podrá estar encima de ti y que haré lo necesario para no defraudarte. Gracias por tanto, no lo he desperdiciado.

A mi padre Fernando Contreras, porque siempre has estado conmigo. Porque la perfección fue una de tus cualidades que sin querer dejaste en mí. Porque de alguna forma me has levantado de mis tropiezos y porque sé que siempre estarás orgulloso de mis logros.

A mis abuelos Felipe y Julieta, por ser un soporte especial durante los momentos difíciles y destacados. Gracias por guiar a cada uno de sus descendientes, en donde estoy incluido, ya que su ayuda, apoyo y educación, siempre sostendrán a la persona que soy; un ser humano.

A mi hermano José Enrique Connelly, porque logré dejarte una enseñanza de vida, de la cual tomarás camino para ser mejor persona y así lograr tus objetivos. Porque soy un ejemplo del que aprenderás todo lo bueno y lo malo. Porque hemos sido compañeros de vida en los momentos más crudos y felices como familia y porque siempre nos apoyaremos pase lo que pase.

A mis tíos porque siempre me han apoyado como familia y porque su confianza ha hecho de mí un mejor individuo. Gracias por no dejar caer a lo máspreciado que tenemos y gracias por no dejar de convivir. También dedico esto a mis primos, porque somos el futuro de nuestra familia y porque nuestro compañerismo nos ha unido de una forma que aún no la podemos ver; a Israel por ser un ejemplo de dedicación en mi formación, a Zayil por ser como una hermana desde el momento en que nací, a Valeria porque aprendió a ser una guía de vida para sus hermanos, a todos...

A mis amigos, Massiel, Carlos, Jannice, Juan, Angeles y Tadeo, por compartir y estudiar a la vida. Gracias por ser parte de una etapa llena de buenos momentos y gracias sobre todo por apoyarme de alguna forma en la que cada uno se distingue como persona fiel. A Daniel, porque tu ayuda siempre fue importante para mí, nunca esperaste nada a cambio y porque demostraste que la amistad no tiene que ser representada con algo. Recuerden todos que aún son parte de mi camino.

Al Dr. Salvador Hernández, por ser un eje fundamental en mi vida profesional y por estimular cada uno de los pasos que he dado y que daré a lo largo de mi carrera como científico. Gracias por sus consejos, gracias por sus buenos deseos y gracias por ser una persona ejemplar, del que muchos nos sentimos orgullosos.

A Dios, porque nunca me ha dejado caer, por ponerme a prueba en todo lo que hago y porque siempre está conmigo.

**Fernando Contreras Tapia**

# Índice

<b>1. Resumen</b>	<b>17</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>18</b>
<b>3. Antecedentes</b>	<b>26</b>
<b>4. Justificación</b>	<b>28</b>
<b>5. Objetivos</b>	<b>29</b>
5.1. <u>Objetivo General</u>	29
5.2. <u>Objetivos Particulares</u>	29
<b>6. Hipótesis</b>	<b>29</b>
<b>7. Descripción de la Zona de Estudio</b>	<b>30</b>
<b>8. Método</b>	<b>36</b>
8.1. <u>Muestreo</u>	36
8.2. <u>Laboratorio</u>	39
8.3. <u>Gabinete</u>	42
8.3.1. <i>Análisis de Datos e Imágenes</i>	42
8.3.2. <i>Densidad y Biomasa</i>	42
8.3.3. <i>Análisis Estadístico</i>	44
<b>9. Resultados</b>	<b>45</b>
9.1. <u>Temperatura y Oxígeno Disuelto (OD)</u>	45
9.1.1. <i>Mezcla</i>	45
9.1.2. <i>Estratificación</i>	46
9.1.2.1. <i>Temprana</i>	47
9.1.2.2. <i>Bien Establecida</i>	49
9.1.2.3. <i>Tardía</i>	50
9.2. <u>Visibilidad al disco de Secchi (VDS) y Zona Eufótica (Ze)</u>	54
9.3. <u>Alcalinidad y pH</u>	57
9.4. <u>Nutrientes</u>	58
9.4.1. <i>Nitratos</i>	59

9.4.2. Nitritos.....	62
9.4.3. Amonio.....	64
9.4.4. Fósforo Soluble Reactivo (FSR).....	68
9.4.5. Fósforo Total (FT).....	72
9.4.6. Sulfatos.....	74
<b>9.5. <u>Parámetros biológicos</u>.....</b>	<b>77</b>
9.5.1. Densidad del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).....	77
9.5.2. Biomasa del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).....	80
9.5.3. Densidad del Plancton Procarionte Autótrofo (PPA).....	84
9.5.4. Biomasa del Plancton Procarionte Autótrofo (PPA).....	87
<b>9.6. <u>Análisis estadísticos</u>.....</b>	<b>90</b>
<b>10. <u>Discusión de resultados</u>.....</b>	<b>91</b>
10.1. <u>Temperatura y Oxígeno Disuelto (O.D.)</u> .....	91
10.2. <u>Visibilidad al Disco de Secchi (VDS) y Zona Eufótica (Ze)</u> .....	97
10.3. <u>Alcalinidad, pH, Salinidad y Conductividad</u> .....	99
10.4. <u>Nutrientes</u> .....	101
10.4.1. Nitratos.....	104
10.4.2. Nitritos.....	106
10.4.3. Amonio.....	107
10.4.4. Fósforo Soluble Reactivo (FSR).....	108
10.4.5. Fósforo Total (FT).....	109
10.5. <u>Parámetros Biológicos</u> .....	110
10.5.1. Densidad del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).....	110
10.5.2. Biomasa del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).....	112
10.5.3. Densidad del Plancton Procarionte Autótrofo (PPA).....	113
10.5.4. Biomasa del Plancton Procarionte Autótrofo (PPA).....	117
<b>11. Conclusiones.....</b>	<b>119</b>
<b>12. Literatura Citada.....</b>	<b>121</b>

# Índice de Figuras

1. Diagrama esquemático del circuito microbiano (Elaborado por Macek y tomado de Sánchez, 2013)	20
2. Representación esquemática de la trama trófica dominada por el circuito microbiano (Legendre y Rassoulzadegan, 1995; Gutiérrez y Torres, 2002)	22
3. Ubicación y extensión de Faja Volcánica Mexicana (FVM) y ubicación de la Cuenca Oriental, tomado de Rodríguez, 2002	31
4. Foto satelital capturada en el 2011 y tomada de Google Earth (2016). Se muestra la ubicación del lago “La Preciosa” en la república mexicana, en el estado de Puebla, su longitud máxima (rojo) y el punto de muestreo con coordenadas 19°22'23,87” N y 97°23'7.17” O	34
5. Foto satelital de Google Earth (2016). Se muestra la ubicación del lago “La Preciosa” entre los lagos Alchichica y Quechulac	35
6. Forma y batimetría del lago “La Preciosa”, tomado de Rodríguez, 2002	36
7. Material utilizado para realizar el muestreo en el lago “La Preciosa”	37
8. Manejo de la botella Van Dorn para la colecta de muestras de agua a diferentes profundidades	38
9. Determinación de nutrimentos mediante técnicas APHA, 1992	39
10. Filtración de muestras de agua en las membranas de policarbonato negras y blancas para su observación en el microscopio de epifluorescencia	41
11. Paquetería utilizada para los análisis de gabinete	44
12. Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de mezcla en el lago “La Preciosa” (2012-2013)	46

13. Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de estratificación temprana en el lago “La Preciosa” (2012-2013), donde se muestra el top y bottom de la termoclina (rojo) y oxiclina (azul)\_\_\_\_\_ **48**
14. Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de estratificación temprana en el lago “La Preciosa” (2012-2013), donde se muestra el top y botoom de la termoclina (rojo) y oxiclina (azul)\_\_\_\_\_ **50**
15. Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de estratificación tardía en el lago “La Preciosa” (2012-2013), donde se muestra el top y botoom de la termoclina (rojo) y oxiclina (azul)\_\_\_\_\_ **52**
16. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de temperatura a lo largo de la columna de agua, en donde se muestra la zona fótica (verde), así como el top y el bottom de la termoclina (amarillo)\_\_\_\_\_ **55**
17. Diagrama espacio-temporal de la dinámica del oxígeno a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo)\_\_\_\_\_ **56**
18. Diagrama espacio-temporal de la dinámica del pH y la alcalinidad a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013)\_\_\_\_\_ **58**
19. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de nitratos a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (verde), así como el top y el bottom de la termoclina (azul)\_\_\_\_\_ **61**
20. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de nitritos a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (azul)\_\_\_\_\_ **65**
21. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de amonio a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo)\_\_\_\_\_ **68**
22. Diagrama espacio - temporal de la dinámica del fósforo soluble reactivo a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo)\_\_\_\_\_ **72**

23. Diagrama espacio-temporal de la dinámica del fósforo total a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y bottom de la termoclina (rojo)\_\_\_\_\_ **74**
24. Diagrama espacio temporal de la dinámica de sulfatos a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo)\_\_\_\_\_ **77**
25. Diagrama de barras mensuales con la densidad del plancton procarionte heterótrofo representado en células por mililitro, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013)\_\_\_\_\_ **79**
26. Diagrama de barras de los periodos de estratificación con la densidad del plancton procarionte heterótrofo y separadas por estrato representado en células por mililitro en el lago “La Preciosa” (2012-2013) \_\_\_\_\_ **80**
27. Diagrama de cajas múltiples con muesca mensuales de la densidad del plancton procarionte heterótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013) \_\_\_\_\_ **81**
28. Diagrama espacio-temporal de la biomasa del plancton procarionte heterótrofo a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013)\_\_\_\_\_ **82**
29. Diagrama de cajas múltiples con muesca mensuales de la biomasa del plancton procarionte heterótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013) \_\_\_\_\_ **83**
30. Diagrama de barras mensuales con la densidad del plancton procarionte autótrofo representado en células por mililitro, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013). separadas por estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013)\_\_\_\_\_ **85**
31. Diagrama de barras de los periodos de estratificación con la densidad del plancton procarionte autótrofo y separadas por estrato representado en células por mililitro en el lago “La Preciosa” (2012-2013)\_\_\_\_\_ **86**

32. Diagrama de cajas múltiples con muesca mensuales de la densidad del plancton procarionte autótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013) \_\_\_\_\_ **87**

33. Diagrama-espacio temporal de la biomasa del plancton procarionte heterótrofo a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013) \_\_\_\_\_ **89**

34. Diagrama de cajas múltiples con muesca mensuales de la biomasa del plancton procarionte autótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013) \_\_\_\_\_ **90**

## Índice de Cuadros

1. Temperaturas máximas y mínimas con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **53**
2. Concentraciones máximas y mínimas de oxígeno disuelto con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **53**
3. Promedios y desviación estándar de temperaturas por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **53**
4. Promedios y desviación estándar de la concentración de oxígeno disuelto por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **54**
5. Concentraciones máximas y mínimas de nitratos con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **60**
6. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de nitratos por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **60**
7. Concentraciones máximas y mínimas de nitritos con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **63**
8. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de nitritos por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **63**
9. Concentraciones máximas y mínimas de amonio con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **66**
10. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de amonio por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **67**



11. Concentraciones máximas y mínimas de fósforo soluble reactivo con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **70**
12. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de fósforo soluble reactivo por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **70**
13. Concentraciones máximas y mínimas de fósforo total con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **72**
14. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de fósforo total por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **73**
15. Concentraciones máximas y mínimas de sulfatos con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente)\_\_\_\_\_ **75**
16. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de sulfatos por estrato durante los periodos de estratificación\_\_\_\_\_ **76**
17. Correlación de Spearman para los parámetros biológicos del plancton procarionte y los parámetro físico-químicos que fueron significativos ( $a=p<0.05$ ,  $b=p<0.01$ , cuadros sin valores  $p>0.05$ )\_\_\_\_\_ **91**
18. Promedios con desviación estándar de nutrientes por periodo y estrato durante el año de muestreo (2012-2013) en el lago “La Preciosa”\_\_\_\_\_ **103**

## 1. Resumen

En el presente estudio se evaluó la dinámica limnética del plancton procarionte en un período anual (2012-2013) y su relación con los parámetros limnológicos en el lago La Preciosa, Puebla. Para tal fin, por métodos de microscopía de epifluorescencia, se evaluó la densidad y biomasa del plancton procarionte heterótrofo (PPH) con muestras mensuales de agua a diferentes profundidades, el cual fue teñido con el fluorocromo DAPI (4,6-diamidino-2-fenilindol) que permite observar el ADN bacteriano a través de un filtro de luz ultravioleta. Del mismo modo se evaluó al plancton procarionte autótrofo (PPA) mediante sus pigmentos accesorios (ficocianinas y ficoeritrinas), las cuales autofluorescen bajo la excitación de un filtro de luz verde (CY3).

Asimismo, se determinó mensualmente la temperatura para establecer las etapas hidrodinámicas (estratificación y mezcla) del lago y los diferentes estratos; de los parámetros químicos se cuantificó el oxígeno disuelto, la conductividad, el pH, la alcalinidad, las durezas (total y de calcio), así como de los nutrientes las formas inorgánicas del nitrógeno, el fósforo soluble reactivo y los sulfatos.

La distribución del PPH a lo largo de la columna de agua estuvo en función de los gradientes físicos y químicos durante la estratificación térmica, presentando abundancias máximas hacia el hipolimnion por la acumulación de materia orgánica. Mientras que el PPA dependió principalmente de la profundidad eufótica y la disponibilidad de nutrientes a lo largo de la columna de agua. Se destaca que éste se pudo

desarrollar por debajo del 1% de la radiación fotosintéticamente activa, asociado con la acumulación de nutrientes en la termoclina.

La distribución del plancton procarionte estuvo regulada por la hidrodinámica del lago, teniendo una estructura homogénea durante el periodo de mezcla y un decremento de la biomasa y la abundancia a lo largo de la columna de agua durante la estratificación térmica.

## 2. Introducción

Existen individuos que al conformar diversas poblaciones, interactúan entre sí con otras para formar una comunidad y finalmente un conjunto, que junto con su ambiente físico constituyen un ecosistema. De tal forma que los ecosistemas son considerados la unidad básica funcional de la ecología, sin embargo, para poder entender su funcionamiento, hay que conocer qué poblaciones estructuran a las comunidades y cuáles son los parámetros abióticos que determinan su dinámica (Nahle, 1999).

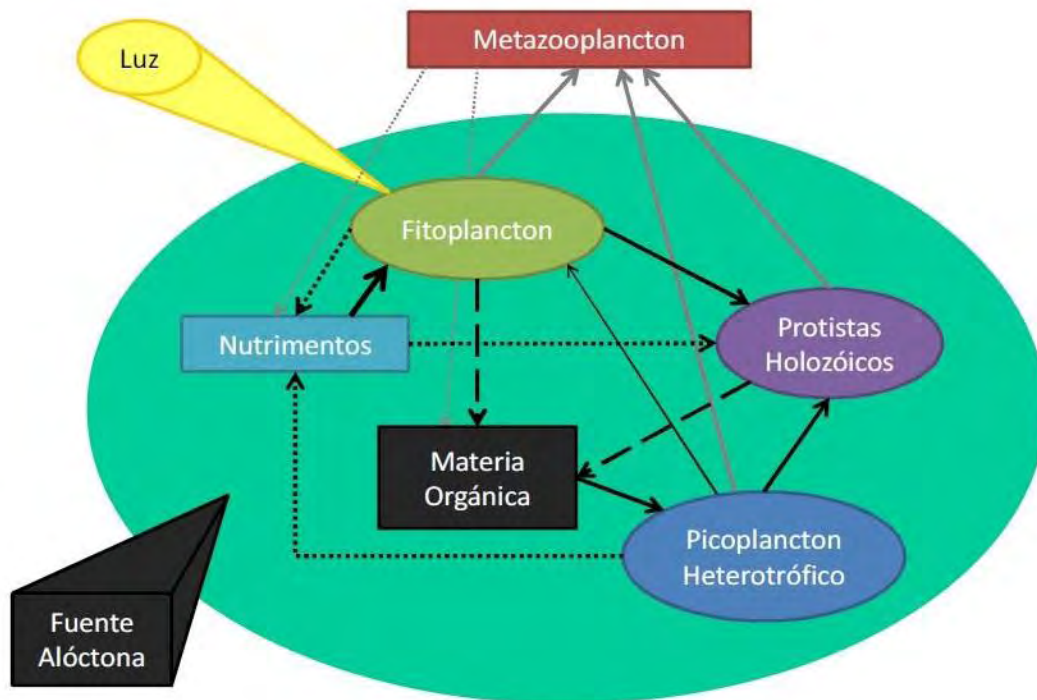
Al igual que los otros niveles de organización que estudia la ecología, las comunidades poseen un conjunto de características exclusivas que definen su estructura física y biológica. Estas características varían tanto en tiempo como en espacio, (Smith y Smith, 2001) y el conocimiento de las propiedades de una comunidad es importante para describirla, caracterizarla, compararla con otras comunidades y entender su funcionamiento.

Un aspecto importante a considerar dentro de las interacciones entre los seres vivos, es el concepto de recurso. Los recursos de los organismos vivos son principalmente los materiales de los que están constituidos sus cuerpos, la energía que intervienen en sus actividades y los lugares o espacios en los que desarrollan sus ciclos vitales (Badillo *et al.*, 2010). Asimismo, los organismos forman parte de los recursos alimentarios, en donde difieren de sus capacidades para formar parte de una cadena de acontecimientos en la que cada consumidor de un recurso se convierte, a su vez, en recurso para otro consumidor (Begon *et al.*, 1999).

Todas estas interacciones se presentan en sistemas acuáticos, que son aquellos sistemas que tienen como biotipo un cuerpo de agua. Dentro de la capa continental se encuentran cuerpos de agua llamados epicontinentales y estos a su vez son clasificados de acuerdo a su flujo hidrodinámico como lénticos y lóticos (Sánchez *et al.*, 2007). El funcionamiento ecológico de cualquier ecosistema acuático está basado en una serie de interacciones, tanto positivas como negativas, entre los diversos componentes bióticos y abióticos. Éstas se llevan a cabo a diferentes tiempos y velocidades e influyen en el hecho de que un sistema presente determinadas características (Gutiérrez y Torres, 2002).

A pesar de que para otros ambientes se conocen adecuadamente las interacciones entre los diferentes componentes que forman las tramas tróficas del sistema, en los sistemas acuáticos aún se continúa la reapreciación de la importancia del circuito microbiano (*microbial loop*) dentro del funcionamiento y transferencia de energía dentro de estos ambientes (Gutiérrez y Torres, 2002).

La red trófica microbiana puede ser presentada en unidades funcionales, lo que evita cualquier necesidad de encontrar una definición taxonómica de los microorganismos y la complejidad generada por su alta diversidad. Las dos principales unidades funcionales en términos de biomasa y procesamiento de carbono son los procariontes heterótrofos y el fitoplancton (autótrofos) (Sarmiento, 2012).



**Figura 1.** Diagrama esquemático del circuito microbiano (Elaborado por Macek y tomado de Sánchez, 2013)

El bucle o circuito microbiano trabaja de manera paralela a la cadena trófica convencional. Las bacterias heterótrofas usan directamente, como fuente de energía, el carbono contenido en la materia orgánica disuelta que se produce en los ecosistemas tras las primeras etapas de degradación de la misma. Por lo tanto, los organismos consumidores son

a su vez alimento de otros microorganismos (Figura 1) (Sherr y Sherr, 1991; Gutiérrez y Torres, 2002).

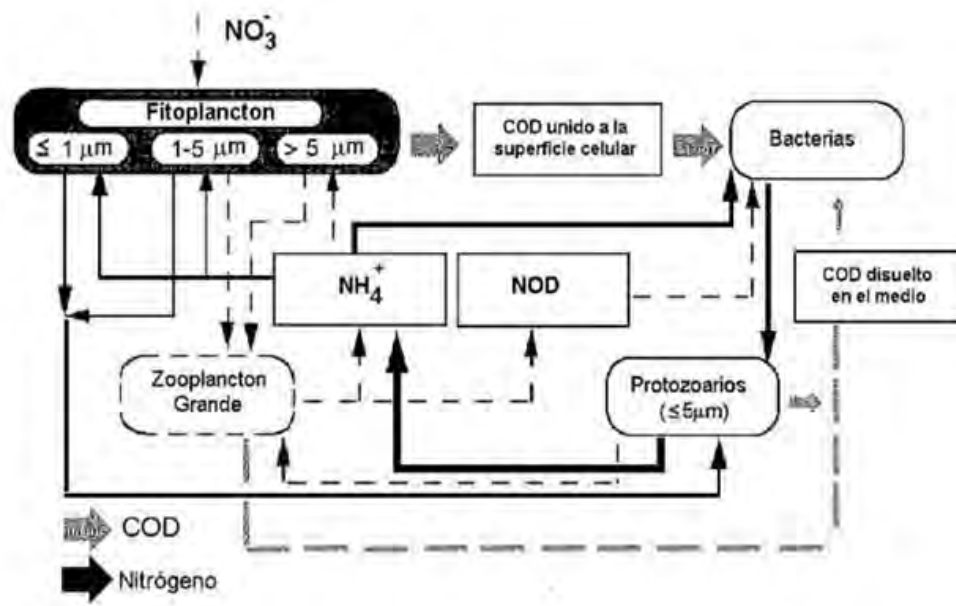
El circuito microbiano sirve como un sumidero de carbono orgánico y como un mecanismo eficiente de remineralización para el carbono orgánico, el nitrógeno y el fósforo a formas inorgánicas. Actualmente se acepta la idea de que la producción del bacterioplancton no es un eslabón importante para el zooplancton, si no que representa un sumidero de carbono fijado. Probablemente alguna fracción de la materia orgánica, derivada de las bacterias, está disponible para el zooplancton en la mayoría de los casos (Sherr *et al.*, 1986; Gutiérrez y Torres, 2002). En sistemas en donde la producción primaria es baja, la producción de bacterias puede ser importante para el zooplancton como en lagos de tipo oligotróficos (Figura 2) (Turley *et al.*, 2000).

Dentro del circuito microbiano, una parte importante de la productividad secundaria, que es aportada por las bacterias, fluye a través de nanoflagelados y ciliados hacia el metazooplancton. El descubrimiento de otras interacciones entre microorganismos ha ido haciendo más complejo este esquema, pasando a denominarse también como red trófica microbiana (Camacho, 2005).

Para estudiar al plancton en los diferentes sistemas acuáticos, es necesario conocer caracteres dimensionales y taxonómicos; dependiendo de su tamaño, el plancton se clasifica en macroplancton (200-2000  $\mu\text{m}$ ), microplancton (20-200  $\mu\text{m}$ ) y nanoplancton (2-20  $\mu\text{m}$ ) (Dussart, 1965). Sieburth *et al.*, (1978) establecieron un sistema bastante lógico con límites

de dimensión, que corresponden a tres clasificaciones de magnitud en el tamaño de los microorganismos que forman parte del plancton; microplancton (20-200  $\mu\text{m}$ ), nanoplancton (2-20  $\mu\text{m}$ ) y picoplancton (0.2-2  $\mu\text{m}$ ).

El plancton procarionte tiene dos divisiones subsecuentes en cuanto a su función y nutrición; plancton procarionte heterótrofo (PPH); compuesto principalmente por bacterias heterótrofas, que al ser muy abundantes, contribuyen con una parte considerable del biovolumen del bacterioplancton total (Callieri y Pinolini, 1995) y el plancton procarionte autótrofo (PPA); constituido generalmente por cianobacterias y proclorofitas (Sieburth *et al.*, 1978).



**Figura 2.** Representación esquemática de la trama trófica dominada por el circuito microbiano (Legendre y Rassoulzadegan, 1995; Gutiérrez y Torres, 2002).

El plancton procarionte es un grupo de microorganismos que es muy abundante en sistemas acuáticos continentales y marinos y a su vez

contribuyen con casi el total de la biomasa y producción primaria, particularmente en ambientes poco productivos. Hoy en día es posible estudiar tanto al PPA como al PPH utilizando técnicas de citometría de flujo y el análisis con microscopio de epifluorescencia (Weisse, 1993).

El PPA se distribuye en todo el mundo y se encuentra en todos los tipos de lagos de diferentes estados tróficos; son actores importantes en la producción de carbono en todos los ecosistemas acuáticos, incluidos los ambientes extremos como lagos cubiertos de hielo, lagos tropicales y manantiales termales (Callieri y Stockner, 2002).

El modelo descrito por Stockner *et al.*, (2000) en el aumento de la abundancia y biomasa de PPA, relativo con el aumento de la concentración de fósforo en los lagos, ha sido ampliamente aceptado y sólo recientemente confirmado en los ecosistemas marinos y de agua dulce. Sin embargo, la relación que acierta la presencia de PPA en los lagos de diferente estado trófico, aparece con una variación considerable, por lo que debemos concluir que el éxito del PPA en los lagos oligotróficos está definido de forma probable (Callieri y Stockner, 2002).

La importancia de la red trófica microbiana en lagos tropicales ha sido la hipótesis repetida en estudios previos, pero muy pocos han sido publicados para comparar numéricamente la estructura de las comunidades en estos ecosistemas. En los últimos años, algunos de los métodos utilizados en décadas anteriores han sido aplicados de manera integral en los sistemas templados y sólo recientemente en sistemas tropicales, sobre todo en Sudamérica y África Oriental (Sarmiento *et al.*, 2008).



La red trófica microbiana es entonces más relevante en los lagos tropicales, debido a que ésta se lleva a cabo por periodos más largos de tiempo y por consiguiente mantiene un mayor flujo de carbono que en los sistemas templados. De acuerdo con **Sarmento (2012)**, la idea de que el reciclaje de nutrientes es mayor en los lagos tropicales, aún tiene que ser demostrada con más detenimiento, ya que los datos disponibles no muestran ninguna diferencia a gran escala en el flujo de materiales entre lagos templados y tropicales.

Los microorganismos son los principales entes activos que participan en las diferentes transformaciones biológicas dentro de los ciclos biogeoquímicos debido a su extraordinaria flexibilidad metabólica. Dentro de estos ciclos, el del nitrógeno y el del fósforo son de gran interés, ya que estos elementos limitan con frecuencia la producción primaria y la actividad microbiana en los ecosistemas (**Stotzky y Norman, 1961**), afectando en escalas geológicas, al ciclo del carbono y consecuentemente a la química de la atmósfera.

Debido a la considerable abundancia que presentan los organismos procariontes en los sistemas acuáticos continentales, el aporte de carbono ha tomado mucha importancia debido a su relación con el aumento de temperatura en el planeta (**Kondratyev y Varotsos, 1995**), comparando su contribución con la abundancia presente en el océano y en los sistemas terrestres (**Battin *et al.*, 2009**).

Dentro del ciclo del carbono, un componente significativo es la formación mineral del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como resultado de la

actividad biológica, siendo uno de los procesos que regulan los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Bundeleva *et al.*, 2012). Cuando el CO<sub>2</sub> se encuentra limitado y no puede ser utilizado como fuente de carbono por los microorganismos autótrofos, los bicarbonatos, al estar en mayor abundancia, son aprovechados y utilizados como recurso para llevar a cabo la fotosíntesis. (Couradeau *et al.*, 2012).

Esto conlleva a la presencia de un fenómeno denominado como *whiting event* por Bathurst (1975), el cual se ha observado en sistemas marinos y continentales de regiones tropicales y subtropicales. Durante este evento, pequeñas partículas de CaCO<sub>3</sub> precipitan en forma de pequeños cristales y su saturación genera una coloración blanquecina en la superficie del agua.

El plancton procarionte autótrofo ha sido considerado como el principal agente responsable de la precipitación de carbonatos en los sistemas acuáticos (Shiraishi, 2012), sin embargo, también se ha señalado la importancia del plancton procarionte heterótrofo por favorecer y provocar este fenómeno (Tribovillard *et al.*, 2010). Según Hammes y Verstrete (2002), el proceso de precipitación está constituido principalmente por cuatro factores; concentración de calcio en el sistema, concentración de carbono inorgánico disuelto, pH y la disponibilidad de sitios de nucleación, destacando que existen ciertas especies de organismos que son capaces de precipitar diversas formas de carbonatos en vías autótrofas y heterótrofas.

### 3. Antecedentes

Desde estudios como el de *Azam et al., (1983)*, se ha propuesto que la comunidad bacteriana es la principal responsable de la reincorporación de nutrientes a los sistemas acuáticos y su integración en las cadenas tróficas.

*Ramos-Higuera et al., (2007)* han sugerido una colimitación de nitrógeno y fósforo en la producción primaria a lo largo de la columna de agua en el lago Alchichica, apoyando su estudio tras experimentos en donde enriquecieron diversos cultivos con los nutrientes mencionados.

En un periodo de cinco años, *Macek et al., (2009)* describieron la dinámica del plancton procarionte, también en el lago Alchichica, la cual sigue un patrón regular ligado al ciclo hidrodinámico del sistema. Evaluando su densidad, la mayor concentración se registró en el periodo de circulación y estratificación temprana, mientras que los números más bajos se presentaron en el periodo de estratificación tardía.

En el 2010, *Hernández-Avilés et al.*, identificaron la zonación de componentes del plancton procarionte asociadas a procesos biogeoquímicos, en los cuales ocupó técnicas de microscopia como Fluorescence *In Situ* Hybridization (FISH).

Dentro del lago “La Preciosa”, *Martínez (2010)* estudió las interacciones entre el zooplancton y el fitoplancton en el sistema. En sus resultados se destaca el aporte biológico del fitoplancton y algunas

cianobacterias en biomasa y densidad, así como sus fluctuaciones relacionadas con la hidrodinámica del lago.

De igual manera, **Álvarez (2012)** evaluó la dinámica bacteriana en los sedimentos de “La Preciosa”, en donde encontró mayor densidad y biomasa durante el periodo de circulación, asociando la disponibilidad y la concentración del oxígeno disuelto en los estratos profundos. También se estableció que, en sistemas oligotróficos, el aporte de biomasa de organismos autótrofos es generado en mayor número por el plancton procarionte (cianobacterias) (**Callieri y Stockner, 2002**).

En este lago, **Marcos y Reyes (2012)** determinaron la dinámica del plancton procarionte y su relación con el efecto de monomixis cálida y otros procesos fisicoquímicos, registrando un mayor aporte de biomasa del PPH durante un periodo anual.

De igual manera, **Lagunas y Martínez (2015)** emparentaron la biomasa y densidad bacteriana con los procesos biogeoquímicos en el lago Atexcac y su relación con el fenómeno de emblanquecimiento, lo cual se refuerza con el estudio de **Vizuet (2015)**, en donde se hizo una evaluación de la composición del procarioplancton antes, durante y después del *whiting event* en el mismo lago. A través de la técnica CARD-FISH, se identificaron taxas bacterianas, con los cuales, se propusieron mecanismos que desencadenan y participan en la precipitación de carbonatos, descartando la idea de que el emblanquecimiento se deba a causas inorgánicas.

Recientemente **Daw (2016)** evaluó la composición y abundancia del procarioplancton durante el *whiting event* en “La Preciosa” con el mismo método y finalidad que el de **Vizuet (2015)**.

## 4. Justificación

Gracias al desarrollo de técnicas modernas en biología molecular y de microscopia, hoy en día se ha incrementado el estudio del plancton procarionte. Sin embargo, en las latitudes tropicales, su conocimiento es aún incipiente y el estudio en estos ambientes podría mostrar diferencias significativas con los sistemas acuáticos templados respecto a su tamaño y distribución (**Sarmiento, 2012**).

El estudio de este grupo es particularmente importante, sobre todo en sistemas poco productivos como “La Preciosa”, ya que juegan un papel fundamental en la transferencia de carbono dentro del circuito microbiano; el PPH en los ciclos biogeoquímicos y el PPA para la productividad primaria, así como las variaciones de la alcalinidad y el sistema de amortiguamiento del pH en ambientes alcalinos. Por lo tanto, es importante conocer y entender su dinámica espacio temporal en función del comportamiento limnológico del sistema.

## 5. Objetivos

### 5.1. Objetivo General.

Evaluar la variabilidad espacio-temporal del plancton procarionte tanto autótrofo como heterótrofo en la zona limnética y su relación con la dinámica limnológica del lago “La Preciosa”, Puebla.

### 5.2. Objetivos Particulares.

- Determinar la dinámica limnológica del lago mediante parámetros físicos y químicos, así como establecer el estado trófico del sistema.
- Evaluar la densidad, volumen y biomasa del plancton procarionte de acuerdo al comportamiento de estratificación térmica a lo largo de la columna de agua.
- Identificar las posibles relaciones funcionales entre el plancton procarionte y los parámetros físicos y químicos analizados.

## 6. Hipótesis

El PPH y PPA presentarán un incremento de biomasa y densidad durante la etapa de mezcla debido a la redistribución de nutrientes provenientes de los estratos profundos y sedimentos, homogeneizados a lo largo de la columna de agua.

Durante el periodo de estratificación térmica del lago, por la baja disponibilidad de nutrientes en el epilimnion, el desarrollo del PPA y PPH se verá limitado.

El PPA será principalmente favorecido por la redistribución de nutrientes y su distribución dentro de la columna de agua dependerá principalmente de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR por sus siglas en inglés), acumulándose principalmente en el metalimnion por la disposición de nutrientes en esta zona que quedan atrapados por la barrera de la densidad del agua.

El PPH se desarrollará principalmente en el hipolimnion por la acumulación de la materia orgánica.

## 7. Descripción de la Zona de Estudio

México cuenta con una amplia variedad de ecosistemas acuáticos con importancia biológica por la presencia de endemismos, sin embargo, la mayoría han sido poco estudiados. Dentro de estos destacan una serie de lagos de origen volcánico conocidos como lagos *maars*.

La zona de estudio se encuentra dentro de la denominada Faja Volcánica Mexicana (FVM); la cual consiste en una cadena de estratovolcanes que atraviesan el país sobre los paralelos 19°20' N, extendiéndose de este a oeste desde Veracruz (Golfo de México) hasta

Nayarit (Océano Pacífico), alcanzando una longitud de cerca de 1,000 Km y de 20 a 150 Km de ancho (Carrasco y Gomez, 1997).

Dentro de esta provincia existen innumerables cuencas cerradas ocupadas por lagos; una de esas cuencas es la Cuenca Oriental, con una altitud media de 2,300 m.s.n.m. (Reyes, 1979) y situada dentro de los 19°42'00"-18°57'00" N y los 98°02'24"-97°09'00" W (Arriaga *et al.*, 1988), abarcando parte de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz (Arredondo, 2002) que se localiza en el extremo W de la FVM (INEGI, 1987) (Figura 3).

La Cuenca Oriental es de tipo endorreico, sin cursos de agua, aunque ha propiciado la formación de lagos cuando la humedad de la zona es suficiente.

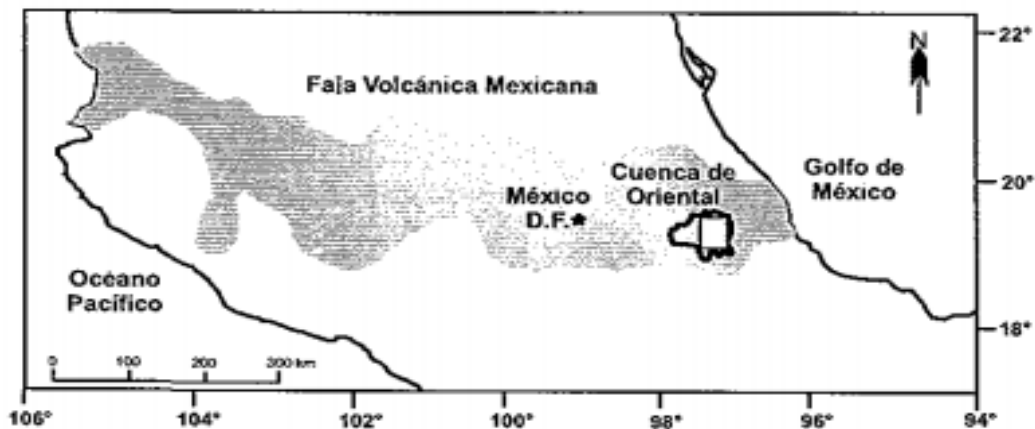


Figura 3. Ubicación y extensión de Faja Volcánica Mexicana (FVM) y ubicación de la Cuenca Oriental, tomado de Rodríguez, 2002.

El lago cráter “La Preciosa”, también llamado “Las Minas”, pertenece a los axalapascos (del náhuatl “ollas de arena con agua”), nombre local que reciben los seis lagos de origen *maars* permanentes (Vilaclara *et al.*, 1993)



característicos de la Cuenca Oriental y cuyo origen se remonta al Pleistoceno tardío mediante explosiones volcánicas que ocasionaron fallas y rupturas en el manto freático de la región llenando los cráteres de agua (Fuentes, 1972; Reyes, 1979; Gasca, 1981; Arredondo *et al.*, 1983; Armienta *et al.*, 2008).

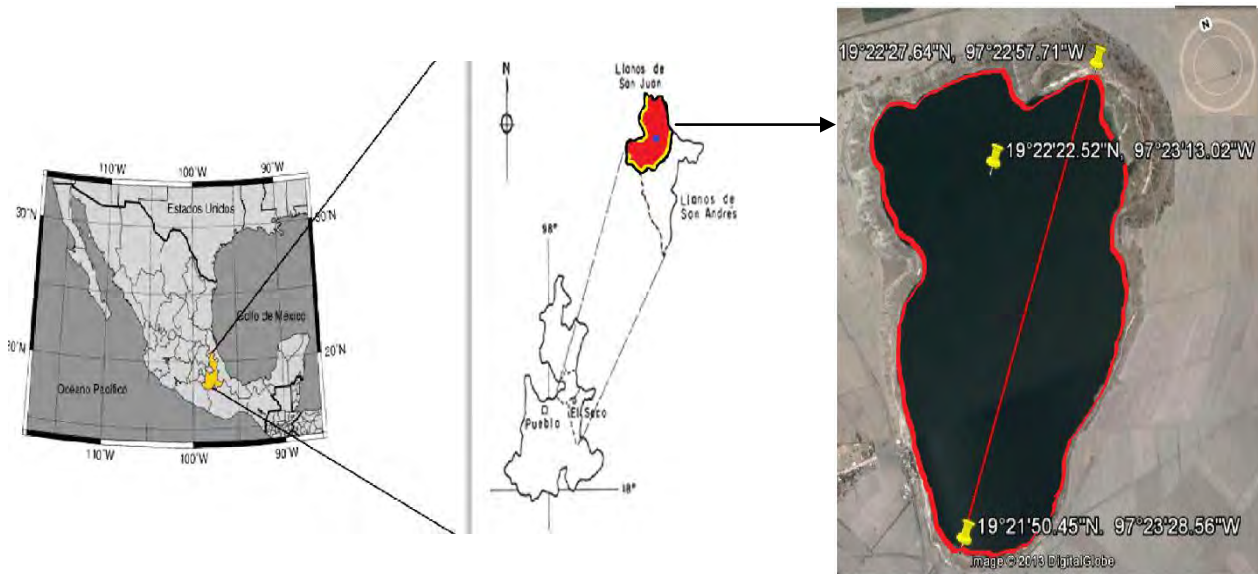
La principal fuente de agua es aportada por la infiltración del manto freático a través del muy permeable suelo de la zona (Álvarez, 1950; Gasca, 1981). Las características del agua de estos lagos evidencian el origen subterráneo de ésta, ya que, por su interrelación con las rocas y sedimentos subterráneos, el agua presenta diversos grados de salinidad y composición química que varían de un lago a otro. Se puede decir que las características limnológicas de “La Preciosa” son intermedias, ya que Alchichica y Atexcac poseen aguas atalosalinas, y Quechulac, Aljojuca y Tecuitlapa son dulceacuícolas, mientras que “La Preciosa” posee una salinidad de 1.3-1.4 g L<sup>-1</sup>, lo cual no se considera como un lago salino desde el punto de vista biológico (la frontera es de 3 g L<sup>-1</sup>, Williams, 1964), pero tampoco lo podemos considerar estrictamente dulceacuícola.

En cuanto a su conductividad, posee valores de 2,150 µS cm<sup>-1</sup> y un pH de 8.7, por lo que podemos considerarlo como un lago alcalino, con tendencia hacia la atalosalinidad, con dominancia de sodio y magnesio sobre potasio y calcio, así como de cloruros y bicarbonatos sobre sulfatos y carbonatos (Vilaclara *et al.*, 1993) considerado como un lago oligotrófico.

La cuenca presenta un clima que está influido principalmente por la altitud, la exposición de vientos secos y la sombra orográfica que

producen las montañas cercanas (Ramírez y Novelo, 1984); éstas ayudan a detener los vientos húmedos (alisios) provenientes del Golfo de México, confiriéndole así un clima templado semiárido con lluvias en invierno, pero en latitudes tropicales (García, 1988; Vilaclara *et al.*, 1993). Su precipitación total anual es de 500 mm y mantiene un rango de temperatura media anual entre 16 y 23 °C. (Armienta *et al.*, 2008).

Hidrológicamente se encuentra en las regiones 18 y 29 denominadas “Balsas” y “Papaloapan” (INEGI, 2002). Pertenece al Municipio Guadalupe Victoria en el Estado de Puebla y se ubica entre las coordenadas 19°22’30” N y 97°23’42” W (Figura 4) a una altitud promedio de 2,330 m.s.n.m., un área de 780 m<sup>2</sup>, una longitud máxima es de 1.34 km con orientación noreste-suroeste, una anchura máxima de 920 m y una profundidad máxima de 45 m (Arredondo *et al.*, 1983), todo el contorno del lago está formado de los materiales cineríticos arrojados durante la explosión (Ordóñez, 1995) que precedió a la formación del lago y su cuenca está formada por cenizas semiconsolidadas de pómez y material andesítico muy fino (Alcocer, 1995; Reyes, 1979; Úbeda y Estrada, 1994).



**Figura 4.** Foto satelital capturada en el 2011 y tomada de **Google Earth (2016)**. Se muestra la ubicación del lago “La Preciosa” en la república mexicana, en el estado de Puebla, su longitud máxima (rojo) y el punto de muestreo con coordenadas 19°22'23,87” N y 97°23'7.17” O.

El tipo de suelo que circunda al lago es de aluvión, caracterizado por tener un relieve en planicie, permeabilidad mediana y con un suelo arenociloso (Úbeda y Estrada, 1994). En la actualidad y muy cerca del lago hay zonas de cultivo. El lago se localiza a 4 Km al sureste del lago cráter Alchichica y muy cerca del lago cráter Quechulac (Figura 5). Ocupa el segundo lugar en cuanto al área superficial y volumen de los lagos ubicados en la cuenca.



**Figura 5.** Foto satelital de **Google Earth (2016)**. Se muestra la ubicación del lago “La Preciosa” entre los lagos Alchichica y Quechulac.

Su forma es aproximadamente triangular, debido a que la cavidad se originó en una superficie plana y el estrangulamiento que presenta obedece a una triple explosión freática causadas en puntos próximos y simultáneos (Ordoñez, 1995; Gasca, 1981; Armienta *et al.*, 2008). En la porción central del piso lacustre se definen dos microcuencas, una al noreste y otra al sureste, la cuenca del noreste presenta dos bordes anchos con pendientes suaves que alcanzan la profundidad máxima del lago (Armienta *et al.*, 2008) (Figura 6).

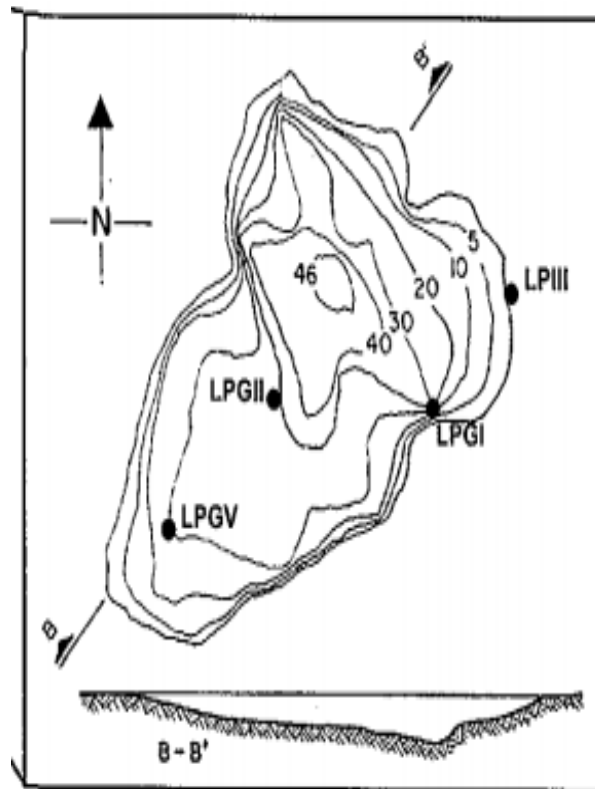


Figura 6. Forma y batimetría del lago “La Preciosa”, tomado de Rodríguez, 2002.

## 8. Método

### 8.1. Muestreo.

Se estableció una estación de muestreo en el punto más profundo de la zona limnética de acuerdo con la batimetría del lago para poder representar todas las profundidades del cuerpo acuático.

Durante los periodos mensuales de muestreo de agosto 2012 a julio 2013, se realizaron hojas de campo en donde se registraron fecha, sitio de muestreo, hora de inicio y finalización, porcentaje de nubosidad,

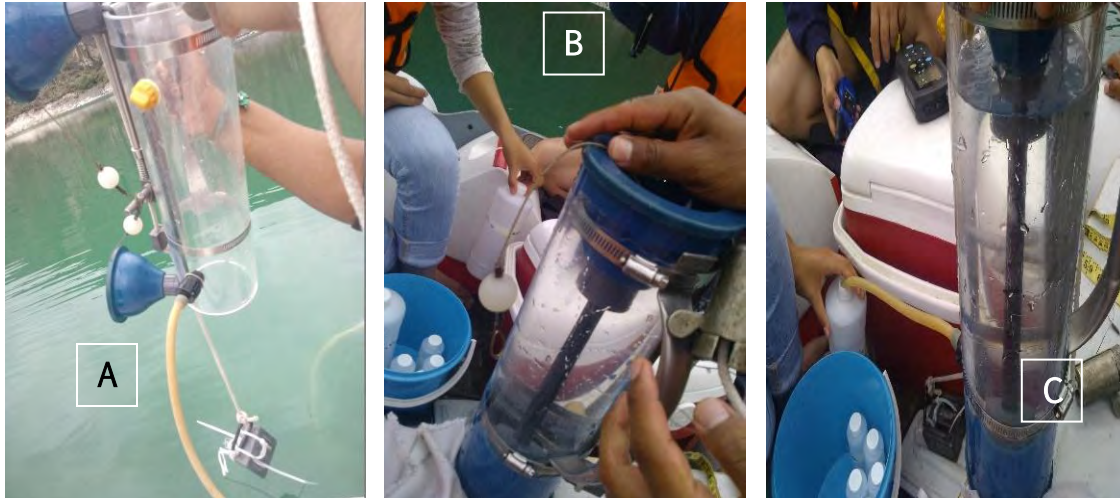
temperatura ambiental (termómetro de mercurio  $-20$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  de precisión) y la visibilidad al disco de Secchi (V.D.S.) para calcular posteriormente la profundidad eufótica ( $Z_e$ ), resultado del producto entre la V.D.S. y el coeficiente de Margalef (1983).



**Figura 7.** Material utilizado para realizar el muestreo en el lago “La Preciosa”.

Se utilizó un oxímetro Hanna Instruments Hi 9145 con  $0.01\text{ mg L}^{-1}$  y  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  de resolución para registrar la temperatura y el oxígeno disuelto (O.D.) a lo largo de la columna de agua, para elaborar sus perfiles verticales y poder discernir el estado hidrodinámico del lago, dependiendo las variaciones de éstas, a lo largo de la columna de agua, se consideraron las profundidades de muestreo mensuales.

Se tomaron de 5 a 6 muestras de agua en botellas de plástico de 1 L con una botella Van Dorn (Wildco Instruments de 2.5 L) a diferentes profundidades dependiendo el estado hidrodinámico presente (Figura 8).



**Figura 8.** Manejo de la botella Van Dorn para la colecta de muestras de agua a diferentes profundidades.

En la etapa de monomixis cálida (mezcla) se tomaron muestras de superficie, Ze, 20 m, 30 m, 40 m y fondo debido a la homogenización térmica y óxica de la columna de agua. En las etapas de estratificación térmica, las muestras se colectaron dependiendo las variaciones de temperatura y O.D. junto con la profundidad de Ze.

*In situ* se determinaron parámetros físico-químicos como conductividad, total de sólidos disueltos y salinidad (con el multiparámetros Corning  $\pm 0.1$  de precisión), pH (con potenciómetro Conductronic  $\pm 0.1$  de precisión), alcalinidad (método volumétrico) y durezas totales y de calcio (método complejométrico) (APHA, 1992).

Para el análisis biológico del plancton procarionte se tomaron muestras de agua con la botella Van Dorn en las mismas profundidades consideradas para los parámetros físicoquímicos. Se emplearon botellas de

plástico de 125 mL; cada una conteniendo 7.5 mL de formol libre de bacterias al 4% (formol filtrado con una membrana de 0.2  $\mu\text{m}$ ) para fijar a los microorganismos (Porter y Feig, 1980).

Todas las muestras de agua, tanto para los análisis físicoquímicos y biológicos, se conservaron a una temperatura aproximada de 4 °C con hielo y sal en una hielera para evitar la actividad biológica y así ser analizados en laboratorio.

## 8.2. Laboratorio.

Se evaluaron nutrientes como Nitratos [ $\text{NO}_3^-$ ] (método del ácido fenoldisulfónico), Nitritos [ $\text{NO}_2^-$ ] (método del ácido sulfanílico), Amonio [ $\text{NH}_4^+$ ] (método del fenato), Fósforo Soluble Reactivo [ $\text{PO}_4^{3-}$ ] (método del fosfomolibdato), Fósforo Total (a través de la digestión ácida y el método del fosfomolibdato) y Sulfatos [ $\text{SO}_4^{2-}$ ] (método turbidimétrico) (APHA, 1992) (Figura 9).



Figura 9. Determinación de nutrientes mediante técnicas APHA, 1992.



A partir de las concentraciones de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y de Fósforo Soluble Reactivo (FSR), se determinó el estado trófico del sistema según **Wetzel (2001)**.

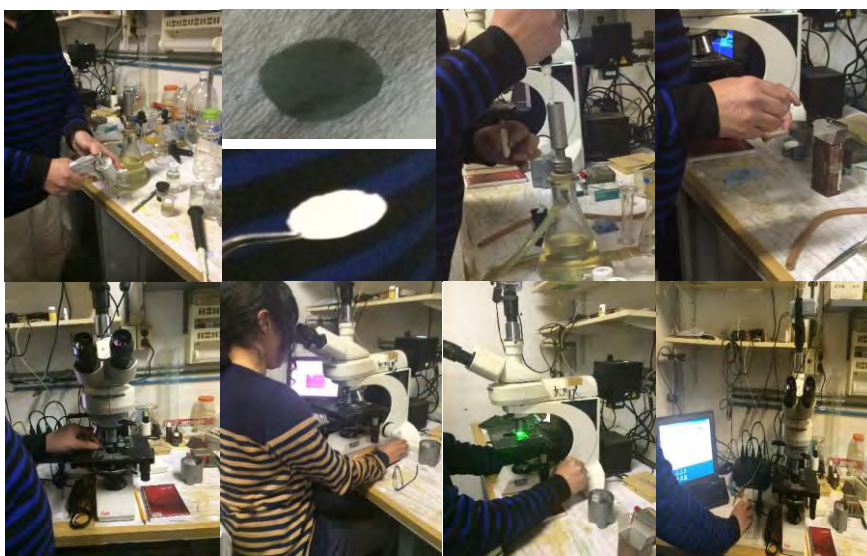
Para realizar los conteos bacterianos de PPH y PPA se utilizó una torre de filtración, una membrana de soporte y una membrana de policarbonato de 0.2  $\mu\text{m}$  de poro y 2 cm de diámetro acoplado a un sistema de vacío, para el PPH las laminillas se realizaron 15 días posteriores a su colecta como máximo y para el PPA antes de 24 horas después de su colecta; estas preparaciones se almacenaron en un congelador (-20 °C) hasta el momento de su cuantificación.

El recuento del PPH se realizó de acuerdo con el protocolo propuesto por **Porter y Feig (1980)**. Dependiendo la profundidad a analizar se filtró un volumen de muestra de 1 o 1.5 mL con una membrana de policarbonato negra de 0.2  $\mu\text{m}$  de poro y 2 cm de diámetro, posteriormente se agregaron 50  $\mu\text{L}$  de colorante DAPI (4,6-diamidino-2-fenilindol) sobre la membrana para teñir su ADN y se dejó el tiempo establecido (3-4 minutos) por el protocolo protegiéndolo de la luz.

Se colocó la membrana en el portaobjetos con aceite de inmersión y se cubrió con un cubreobjetos para observarlas al microscopio de epifluorescencia (Leica DFC300 FX) bajo la excitación de luz ultra violeta con un lente de inmersión 100x apocromático y se contaron cierto número de campos al azar hasta llegar a un total de 400 células por profundidad.

Para el conteo de PPA se utilizó el protocolo propuesto por Weisse (1993), que es similar al anterior, sin embargo, el volumen de muestra fue de 10 a 15 mL, ya que se esperó que la cantidad de bacterias fuera menor debido a las condiciones de luz. Se filtró a través de una membrana de policarbonato blanca con 0.2  $\mu\text{m}$  de poro y 2 cm de diámetro y no se utilizó ningún colorante, ya que se utilizaron sus pigmentos accesorios autofluorescentes (ficoeritrinas y ficocianinas) para realizar el conteo en el microscopio de epifluorescencia 100x bajo la excitación de un filtro 510-560 (CY3) que emite un haz de luz verde.

Para ambos casos se tomaron entre 10 y 15 fotografías por profundidad con una cámara digital (Canon Power-Shot 545) que se encontraba montada al microscopio de epifluorescencia, con ayuda del programa ZoomBrowser, las fotografías fueron guardadas en una computadora (fecha, volumen y profundidad) para realizar la estimación de las medidas morfométricas de las bacterias (Figura 10).



**Figura 10.** Filtración de muestras de agua en las membranas de policarbonato negras y blancas para su observación en el microscopio de epifluorescencia.

## 8.3. Gabinete.

### 8.3.1. Análisis de Datos e Imágenes.

Los datos de temperatura y O.D. se capturaron en una hoja de cálculo, se agruparon y se establecieron por mes para identificar los periodos de mezcla y estratificación térmica (temprana, bien establecida y tardía) y así determinar el epilimnion, el metalimnion, la termoclina y el hipolimnion mensuales, además de la variación de O.D. a lo largo de la columna de agua y determinar la región óxica y anóxica (Figura 11).

Se utilizó el programa Surfer 8 (Golden Software Incorporated, 2002) para realizar los diagramas de tipo tridimensional y demostrar la variación de los datos de concentración de nutrientes, contenido de carbono, densidad y biomasa de PPH y PPA con respecto a la profundidad, organizándolos por mes durante el año de muestreo (Figura 11).

Mediante el software Image J se analizaron las imágenes que se tomaron en el microscopio de epifluorescencia, de manera que, a través del uso de formas como cilindros o esferas en comunidades bacterianas, se corrigieron para separarlas por unidades y así proporcionar una serie de datos morfométricos que incluyeron área, perímetro y máximo feret (distancia máxima entre una bacteria y otra). Se trasladaron a una hoja de cálculo con macros determinados para calcular los valores de contenido de carbono (CC), así como largo y ancho de la célula (Figura 11).

### 8.3.2. Densidad y Biomasa.

Se contó el número de células directamente en el microscopio por campos al azar, los datos se importaron a una hoja de cálculo, la cual estimó la densidad promedio en base al volumen filtrado y una constante que se obtuvo para cuadro, cuadrícula o línea según fuera el caso.

Se realizó una base de datos con ancho, largo, volumen celular, contenido de carbono (CC) y densidad; esto para calcular la biomasa y el biovolumen del PPA y PPH.

Para el CC del PPH se utilizó la ecuación alométrica de **Loferer-Krößbacher *et al.*, (1998)** citado por **Posch *et al.*, (2001)**:

$$CC = 218 \times V^{0.86}$$

Donde:

CC = Contenido de Carbono ( $\text{fgC}_{\text{org}}\text{célula}^{-1}$ )

V = Volumen celular ( $\mu\text{m}^3 \text{ célula}^{-1}$ )

Para el CC del PPA se usó el factor de corrección de **Weisse (1993)**:

$$CC = V \times 200$$

Donde:

CC = Contenido de Carbono ( $\text{fgC}_{\text{org}}\text{célula}^{-1}$ )

V = Volumen celular ( $\mu\text{m}^3 \text{ célula}^{-1}$ )

Para calcular la biomasa tanto para PPA como PPH se utilizó:

$$\text{Biomasa} = \text{Densidad} \times \text{Contenido de Carbono}$$

## 8.3.3. Análisis Estadístico.

Con la utilización del programa STATGRAPHICS 5, se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, realizando transformaciones logarítmicas a los datos que así lo requirieron en caso de no ser normales, para posteriormente realizar un análisis de varianza y pruebas de Tukey.

Para verificar las relaciones funcionales entre los parámetros biológicos y fisicoquímicos, se hicieron correlaciones no paramétricas (coeficiente de Spearman) (Márquez, 1991). Para la densidad, CC y biomasa de PPH y PPA, se realizaron análisis exploratorios de datos a través de diagramas de caja y bigotes múltiple con muesca agrupados por mes (Figura 11) (Salgado-Ugarte, 1992).



Figura 11. Paquetería utilizada para los análisis de gabinete.

## 9. Resultados.

### 9.1. Temperatura y Oxígeno Disuelto (O.D.).

La temperatura fue el primer indicador para determinar la etapa hidrodinámica del lago y dividir en su caso los estratos a lo largo del periodo de muestreo. Con los resultados de O.D. se delimitaron las zonas óxicas y anóxicas durante la estratificación térmica.

#### 9.1.1. Mezcla.

Abarcó desde el mes de noviembre del 2012 hasta el mes de marzo del 2013, se reportó una temperatura máxima de 16.8 °C y una mínima de 14. °C, con un promedio a lo largo de la columna de agua de  $15.6 \pm 0.89$  °C (Cuadro 1). Se destaca que la temperatura más baja durante el año de muestreo fue de 14. °C y se registró durante el mes de febrero (Figura 12).

En cuanto a la concentración de O.D., su promedio fue de  $6.08 \pm 1.56$  mg L<sup>-1</sup> con un máximo de 7.81 mg L<sup>-1</sup> y un mínimo de 1.85 mg L<sup>-1</sup> en el sistema (Cuadro 2). Durante el mes de febrero se cumplió con la relación inversa entre la temperatura y el O.D., ya que se registró la mayor solubilidad de este gas en la superficie (7.81 mg L<sup>-1</sup>) (Figura 12).

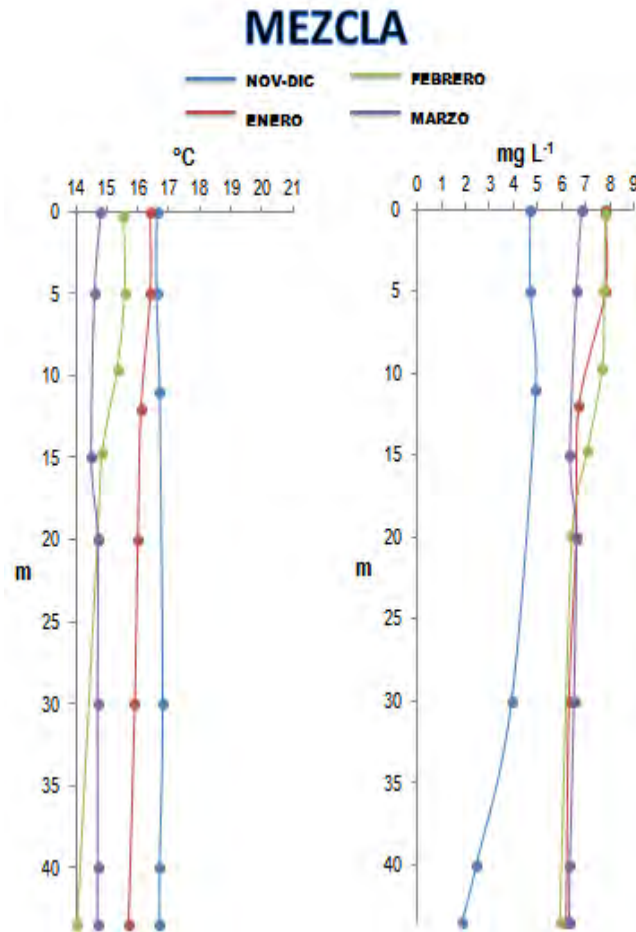


Figura 12. Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de mezcla en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

### 9.1.2. Estratificación.

A finales del mes de marzo, con el inicio de la primavera, la temperatura ambiental aumentó y por consecuencia la del agua del sistema, lo que provocó que la columna de agua se empezara a estratificar por la diferencia de densidades de la misma (temperaturas más cálidas arriba y temperaturas menores abajo) y permaneciera en esta condición el resto del año.

De acuerdo con los parámetros de temperatura y O.D., la columna de agua se pudo dividir en tres estratos (epilimnion, metalimnion e hipolimnion) que, dependiendo a su amplitud y profundidad a través del tiempo, se separaron por periodos (temprana, bien establecida y tardía). Asimismo, se estableció la termoclina definiendo su límite superior (top) y el inferior (bottom).

#### 9.1.2.1. Estratificación Temprana.

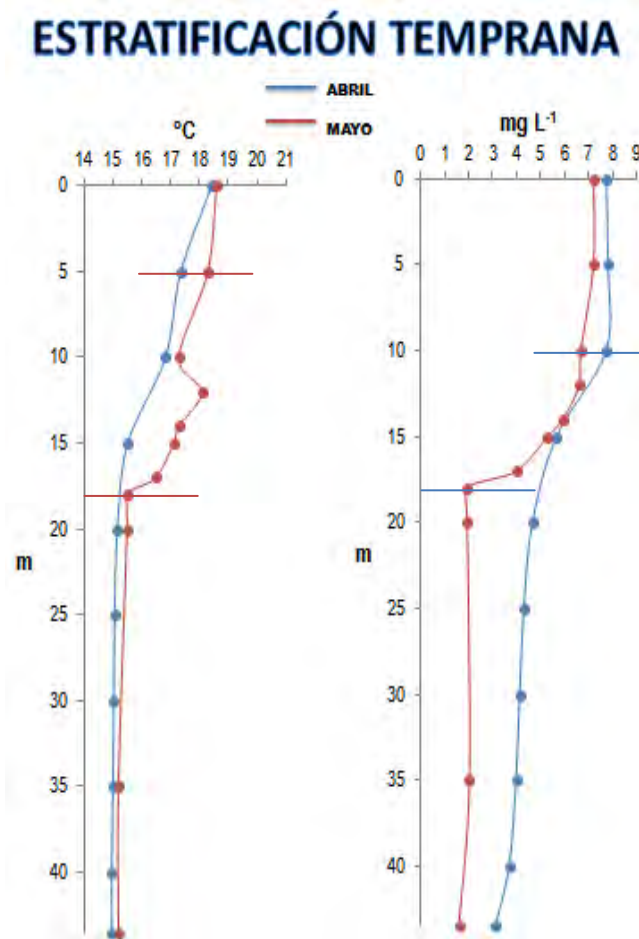
Es el primer periodo en el lago y correspondió a los meses de abril y mayo del 2013, su temperatura máxima fue de 18.6 °C y la mínima fue de 15 °C con un promedio de  $16.3 \pm 1.32$  °C (Cuadro 1). Se registró una concentración de O.D. máxima de 7.8 mg L<sup>-1</sup> y una mínima de 1.59 mg L<sup>-1</sup> con un promedio de  $4.91 \pm 2.09$  mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 2).

El epilimnion presentó una temperatura promedio de  $18.16 \pm 0.58$  °C que se extendió desde la superficie (0 m) hasta los 10 m de profundidad (Cuadro 3), su concentración promedio de O.D. fue de  $7.49 \pm 0.32$  mg L<sup>-1</sup>, formado parte de la zona óxica (Cuadro 4).

El metalimnion tuvo una temperatura promedio de  $16.78 \pm 0.91$  °C con un top de la termoclina a los 5 m y el bottom a los 18 m, con una amplitud de 13 m. Sin embargo, en el mes de mayo se registró una dicotermia a los 12 m (Cuadro 3) y la concentración promedio de O.D. que se registró fue de  $5.27 \pm 1.65$  mg L<sup>-1</sup> terminando aquí la zona óxica (Cuadro 4).



Por último, la zona que se encuentra por debajo de la termoclina, la cual llega hasta la máxima profundidad, es el hipolimnion, el cual cuantificó una temperatura promedio de  $15.13 \pm 0.17$  °C (Cuadro 3) y una concentración promedio de O.D. de  $2.92 \pm 1.05$  mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 4), correspondiendo a una zona microaerobia (Figura 13).

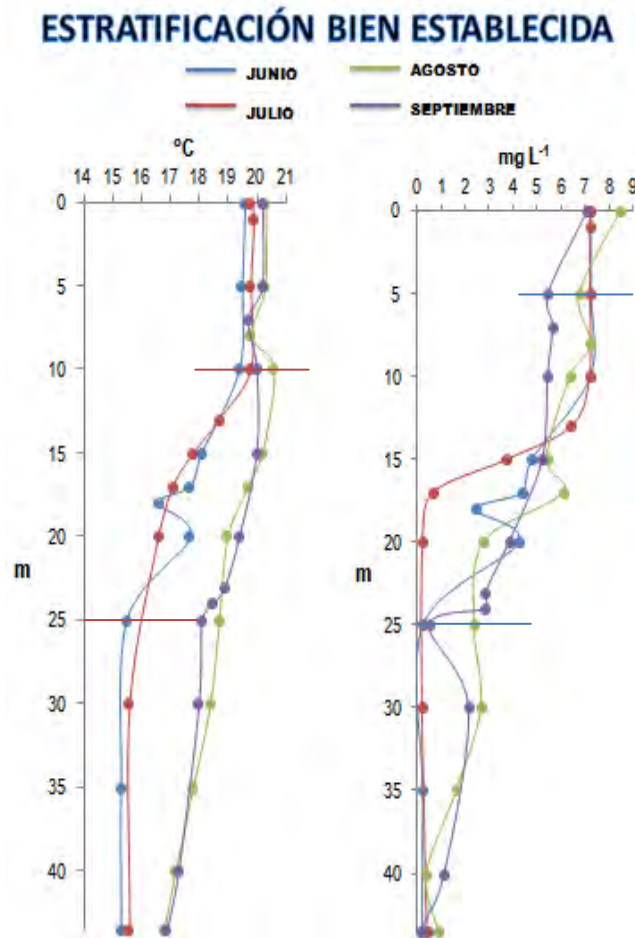


**Figura 13.** Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de estratificación temprana en el lago “La Preciosa” (2012-2013), donde se muestra el top y bottom de la termoclina (rojo) y oxiclina (azul).

### 9.1.2.2. Estratificación Bien Establecida.

Este periodo de muestreo correspondió a los meses de junio a septiembre del 2013 y se registró una temperatura máxima de 20.6 °C que además fue la mayor durante el año de muestreo. La mínima fue de 15.3 °C con un promedio de 18.4±1.58 °C (Cuadro 1) y una concentración de O.D. máxima de 8.45 mg L<sup>-1</sup>, que de igual modo correspondió con la máxima concentración anual en el epilimnion. El promedio de este gas durante esta fase hidrodinámica fue de 3.90±2.73 mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 2).

Mientras que los promedios de concentración de O.D. se registraron como epilimnion 7.37±0.48 mg L<sup>-1</sup>, metalimnion 4.24±2.24 mg L<sup>-1</sup> e hipolimnion 0.90±0.88 mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 4) resultó ser evidente el inicio y fin de las zonas óxica y anóxica (Figura 14).



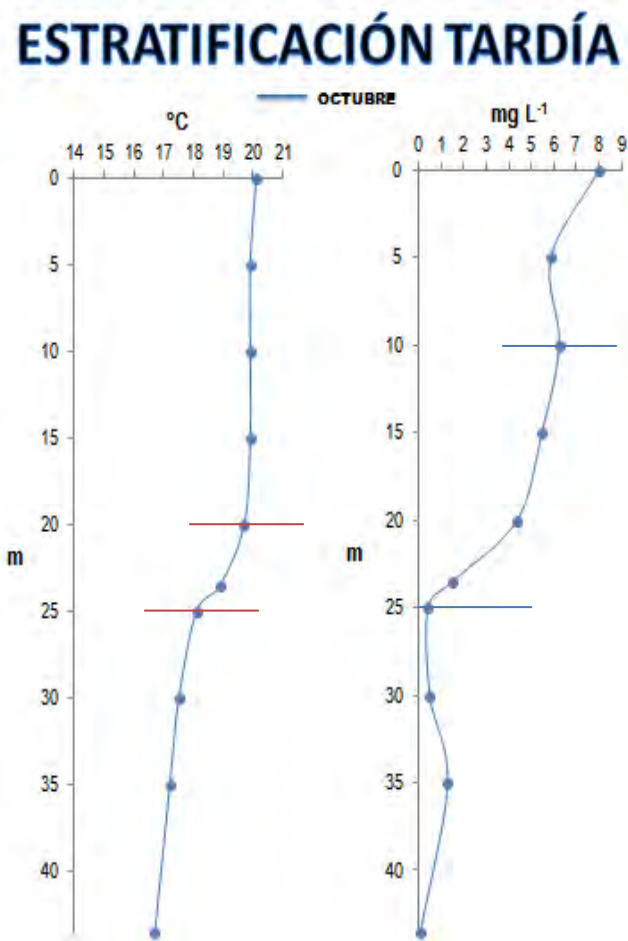
**Figura 14.** Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de estratificación temprana en el lago “La Preciosa” (2012-2013), donde se muestra el top y bottom de la termoclina (rojo) y oxiclina (azul).

### 9.1.2.3. Estratificación Tardía.

Fue la etapa más corta y se mantuvo sólo durante el mes de octubre del 2013, calculando una temperatura máxima y mínima de 20.1 °C y 16.7 °C (Cuadro 1), así como una concentración de O.D. de 8.01 mg L<sup>-1</sup> y 0.08 mg L<sup>-1</sup>, con rangos promedio de 18.9±1.30 °C y 3.6±2.93 mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 2).

La temperatura promedio del epilimnion, metalimnion e hipolimnion se registraron como  $19.95 \pm 0.10$  °C,  $18.90 \pm 0.80$  °C y  $17.13 \pm 0.40$  °C respectivamente (Cuadro 3). Mientras que la concentración promedio de O.D. de cada estrato fue de  $6.94 \pm 1.51$  mg L<sup>-1</sup>,  $3.60 \pm 2.53$  mg L<sup>-1</sup> y  $0.62 \pm 0.61$  mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 4).

En este periodo las profundidades de los estratos del epilimnion e hipolimnion se profundizaron más abarcando una mayor amplitud por tener cambios de temperatura poco significativos, por consiguiente, la amplitud de la termoclina disminuyó (20 a 25 m), haciendo evidente que el inicio de la mezcla estuviera próximo (Figura 15).



**Figura 15.** Perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto durante el período de estratificación tardía en el lago “La Preciosa” (2012-2013), donde se muestra el top y bottom de la termoclina (rojo) y oxiclina (azul).

°C	Estratificación			
	Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía
(N) 16.8 – (F) 14.0 15.6 ± 0.89	(Mar) 18.6 – (A) 15.0 16.3 ± 1.32	(Ag) 20.6 – (Jun) 15.3 18.4 ± 1.58	(O) 20.1 – (O) 16.7 18.9 ± 1.30	

**Cuadro 1.** Temperaturas máximas y mínimas con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación			
	Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía
(F) 7.81 – (N) 1.85 6.08 ± 1.56	(A) 7.8 – (M) 1.59 4.91 ± 2.09	(Ag) 8.45 – (S) 0.11 3.90 ± 2.73	(O) 8.01 – (O) 0.08 3.6 ± 2.93	

**Cuadro 2.** Concentraciones máximas y mínimas de oxígeno disuelto con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

°C	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	18.16 ± 0.58	19.94 ± 0.37	19.95 ± 0.10
Metalimnion	16.78 ± 0.91	18.60 ± 1.35	18.90 ± 0.80
Hipolimnion	15.13 ± 0.17	16.91 ± 1.22	17.13 ± 0.40

**Cuadro 3.** Promedios y desviación estándar de temperaturas por estrato durante los periodos de estratificación.

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	7.49 ± 0.32	7.37 ± 0.48	6.94 ± 1.51
Metalimnion	5.27 ± 1.65	4.24 ± 2.24	3.60 ± 2.53
Hipolimnion	2.92 ± 1.05	0.90 ± 0.88	0.62 ± 0.61

**Cuadro 4.** Promedios y desviación estándar de la concentración de oxígeno disuelto por estrato durante los periodos de estratificación.

## 9.2. Visibilidad al Disco de Secchi (V.D.S.) y Zona Eufótica (Ze).

La V.D.S. fluctuó a lo largo del año entre 1.78 m y 4.35 m según lo calculado de manera *in situ* durante los 12 meses de muestreo. La Ze varió de 8.2 m a 15.2 m durante la mezcla, registrando el valor máximo en el mes de marzo. Durante la estratificación temprana la Ze se mantuvo constante con un promedio de 7.2 m, descendiendo al inicio de la estratificación bien establecida a 10.7 m y al final de este periodo subiendo a los 7 m.

Cabe destacar que al inicio de la estratificación la Ze se encontró por debajo del límite superior de la termoclina, coincidiendo estos parámetros a mediados de la estratificación bien establecida. Para los meses restantes de la estratificación, la Ze se mantuvo por arriba de la termoclina. (Figuras 16 y 17).

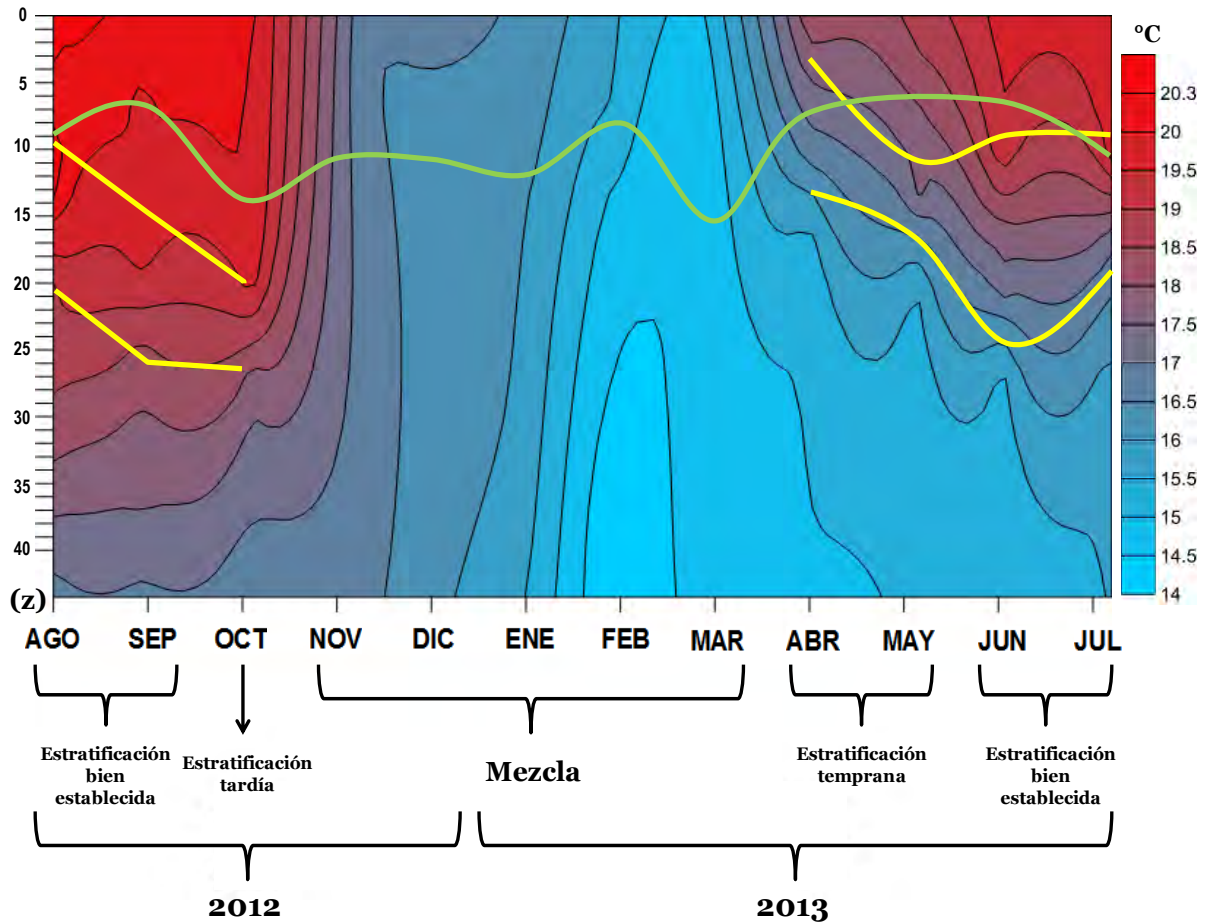


Figura 16. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de temperatura a lo largo de la columna de agua, en donde se muestra la zona fótica (verde), así como el top y el bottom de la termoclina (amarillo).



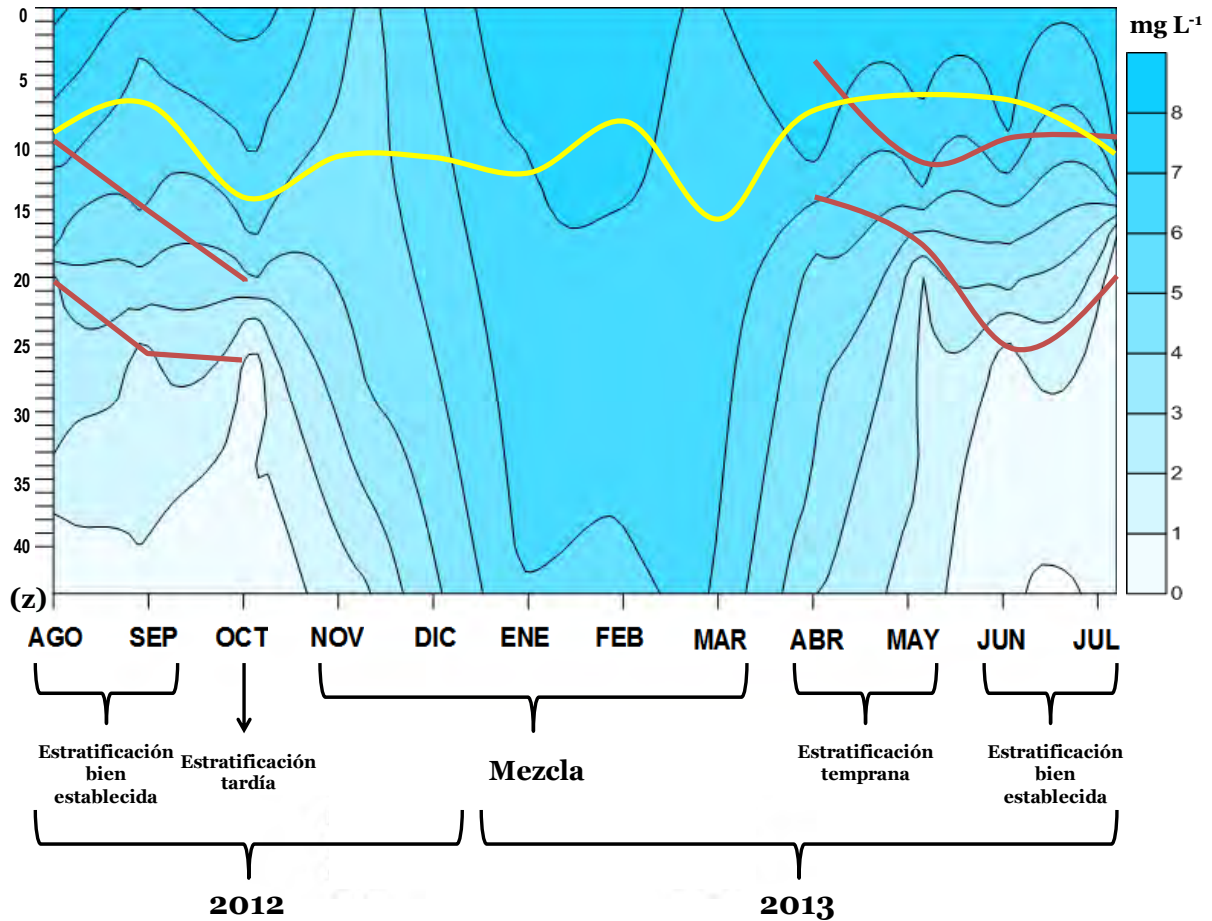


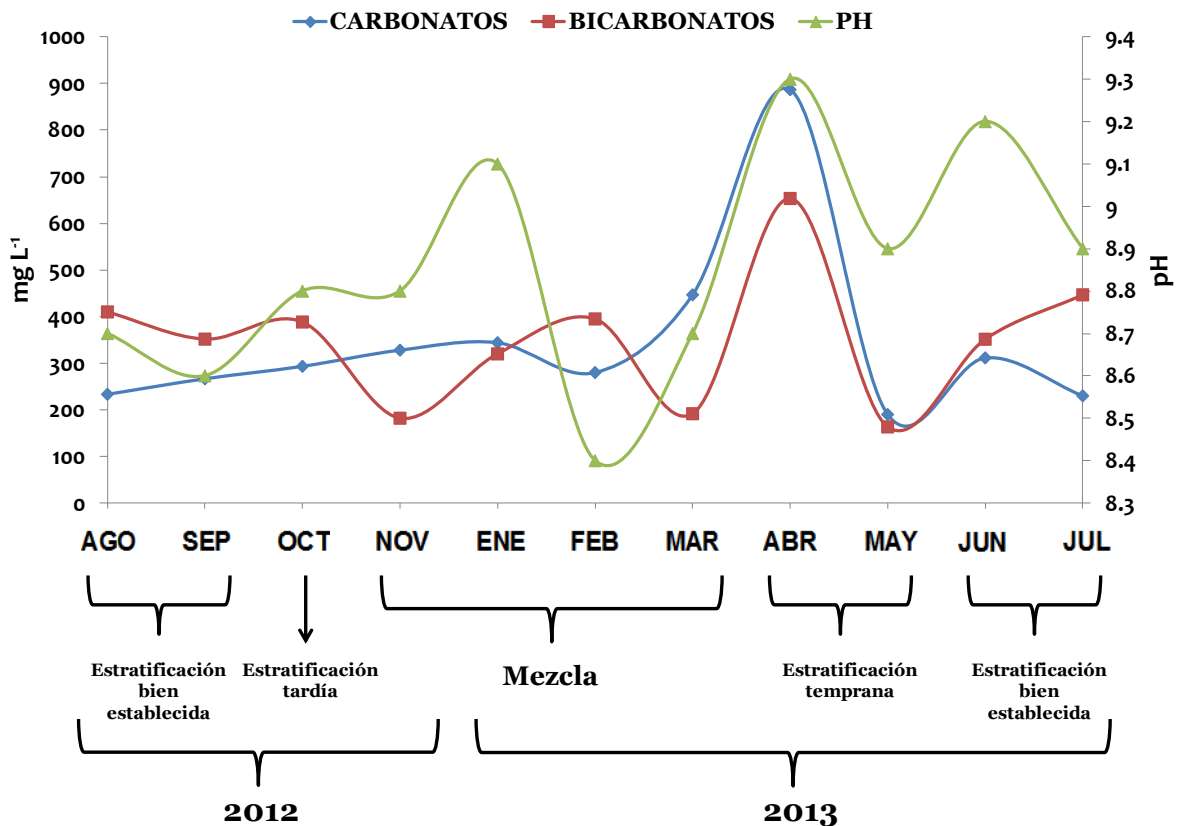
Figura 17. Diagrama espacio-temporal de la dinámica del oxígeno a lo largo de la columna de agua en el lago "La Preciosa" (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo).

### 9.3. Alcalinidad y pH.

Las concentraciones de carbonatos y bicarbonatos, conservaron una variación similar durante el año de muestreo (Figura 18). Al inicio de la estratificación temprana (abril), las concentraciones de ambos aniones se ubicaron en el punto máximo de todo el año (carbonatos  $887 \text{ mg L}^{-1}$  y bicarbonatos  $653 \text{ mg L}^{-1}$ ), al final de este periodo (mayo), ambos descienden a su concentración mínima anual (carbonatos  $190 \text{ mg L}^{-1}$  y bicarbonatos  $163 \text{ mg L}^{-1}$ ).

A partir de la estratificación bien establecida y también durante la tardía, (junio-octubre) en promedio los bicarbonatos ( $390 \pm 40.53 \text{ mg L}^{-1}$ ) se ubicaron por encima del promedio de los carbonatos ( $267 \pm 35.95 \text{ mg L}^{-1}$ ). Pero durante la mezcla (noviembre-marzo), los papeles se invierten y el promedio de los bicarbonatos ( $272 \pm 103.26 \text{ mg L}^{-1}$ ) se mantiene por debajo del promedio de los carbonatos ( $350 \pm 70.15 \text{ mg L}^{-1}$ ), excepto en febrero, en donde los bicarbonatos aumentaron.

El pH presentó una asociación general con la concentración de bicarbonatos y carbonatos de acuerdo a los periodos de estratificación y se observó un mínimo de 8.4 en febrero y un máximo de 9.3 en abril con un promedio anual de  $8.85 \pm 0.27$ . Los tres parámetros reportaron sus puntos máximos un mes antes del *whiting event* (Figura 18).



la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

#### 9.4. Nutrientes.

La valoración de la calidad de agua del sistema con base en los nitratos, nitritos, amonio, fósforo soluble reactivo, fósforo total y sulfatos fue pieza clave para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo. Todos los parámetros se evaluaron mensualmente durante un año y a continuación con ayuda de cuadros con información específica de cada nutriente y diagramas espacio-temporal se describirán cada uno.

#### 9.4.1. Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).

Los nitratos presentaron una concentración promedio anual de  $0.446 \pm 0.33 \text{ mg L}^{-1}$  (Cuadro 5), lo que los ubicó en primer lugar entre las formas presentes del nitrógeno inorgánico disuelto NID (nitratos, nitritos y amonio) (Cuadros 7 y 9). Sus concentraciones promedio permanecieron siempre por encima a la de los nitritos y amonio en todos los periodos de estratificación térmica al igual que durante el periodo de mezcla (Cuadros 6, 8 y 9).

El periodo en el que se cuantificó una concentración promedio mayor fue durante la estratificación tardía ( $0.999 \pm 0.292 \text{ mg L}^{-1}$ ) y durante la estratificación temprana se obtuvieron los valores promedio más bajos ( $0.283 \pm 0.133 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Cuadro 5).

Durante la estratificación bien establecida presentaron una concentración promedio intermedia a lo largo de la columna de agua, ya que para la estratificación tardía aumentaron al doble su concentración promedio y en el periodo de estratificación temprana disminuyeron en promedio de concentración a más de la mitad (Cuadro 6).

mgL <sup>-1</sup>		Estratificación			Concentración Anual
Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía		
(N) 1.248 – (E) 0.203	(M) 0.604 – (A) 0.116	(S) 0.883 – (A) 0.032	(O) 1.577 – (O) 0.774		0.446 ± 0.330
0.440 ± 0.300	0.283 ± 0.133	0.394 ± 0.300	0.999 ± 0.292		

**Cuadro 5.** Concentraciones máximas y mínimas de nitratos con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	0.317 ± 0.010	0.427 ± 0.334	0.828 ± 0.077
Metalimnion	0.285 ± 0.186	0.422 ± 0.302	1.212 ± 0.516
Hipolimnion	0.277 ± 0.105	0.342 ± 0.303	0.956 ± 0.052

**Cuadro 6.** Promedios y desviación estándar de las concentraciones de nitratos por estrato durante los periodos de estratificación.

La concentración máxima que se registró en el sistema de acuerdo al diagrama espacio-temporal, se encontró en la parte superior de la termoclina durante la estratificación tardía y las concentraciones mínimas se presentaron desde el mes de diciembre hasta el final de la

estratificación bien establecida en agosto. En los meses de mayo y junio, existen dos puntos en donde la concentración de este nutriente aumentó dentro y por encima de la termoclina (Figura 19).

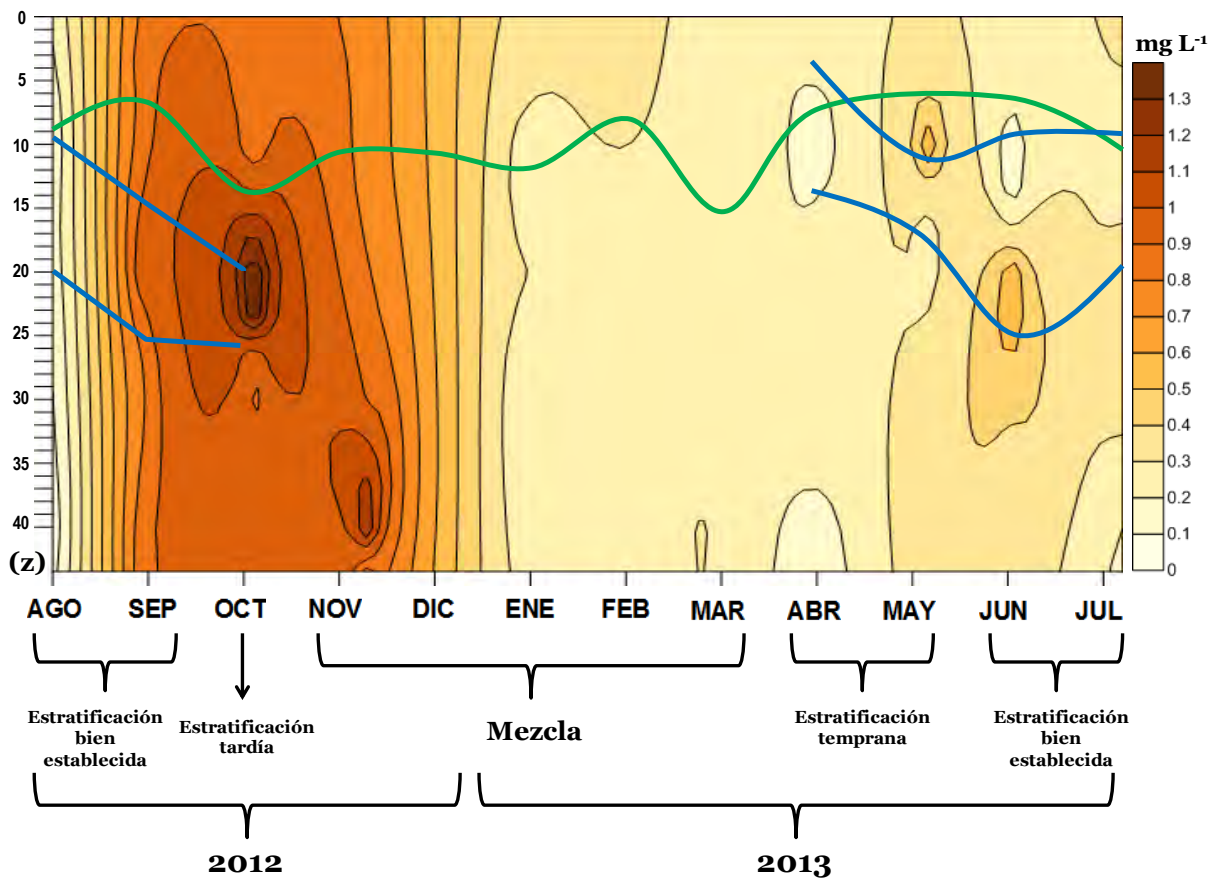


Figura 19. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de nitratos a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (verde), así como el top y el bottom de la termoclina (azul).

#### 9.4.2. Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ).

Los nitritos presentaron una concentración promedio anual de  $0.093 \pm 0.052 \text{ mg L}^{-1}$  (Cuadro 7), teniendo así la segunda posición del NID; por lo tanto, sus concentraciones promedio fueron siempre intermedias con respecto a las de nitratos y amonio durante el proceso hidrodinámico del lago.

En la mezcla, su concentración promedio fue muy parecida a la reportada durante la estratificación temprana y el mismo patrón de similitud se cuantificó entre la estratificación bien establecida y tardía, pero en este caso las concentraciones promedio disminuyeron (Cuadro 7).

La concentración promedio más alta que se cuantificó fue en el epilimnion de la estratificación tardía con  $0.125 \pm 0.029 \text{ mg L}^{-1}$  y el más bajo se reportó en el hipolimnion de la estratificación bien establecida ( $0.051 \pm 0.040 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Cuadro 8).

En general, durante la estratificación temprana (abril-mayo) se cuantificaron las concentraciones promedio máximas en la columna de agua y el hipolimnion reportó las concentraciones promedio más bajas durante el año de muestreo (Cuadro 8).

mgL <sup>-1</sup>		Estratificación			Concentración Anual
Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía		
(F) 0.164 – (N) 0.051	(M) 0.258 – (A) 0.022	(Jun) 0.214 – (S) 0.019	(O) 0.146 – (O) 0.043		
					0.093 ± 0.052
0.107 ± 0.032	0.112 ± 0.060	0.077 ± 0.057	0.078 ± 0.045		

**Cuadro 7.** Concentraciones máximas y mínimas de nitritos con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	0.111 ± 0.010	0.080 ± 0.051	0.125 ± 0.029
Metalimnion	0.119 ± 0.086	0.099 ± 0.067	0.053 ± 0.048
Hipolimnion	0.107 ± 0.042	0.051 ± 0.040	0.054 ± 0.017

**Cuadro 8.** Promedios y desviación estándar de las concentraciones de nitritos por estrato durante los periodos de estratificación.

La mínima concentración de nitritos observada, conforme al diagrama espacio-temporal, se registró en los meses de agosto y septiembre desde la parte inferior de la termoclina hasta el fondo de la columna de agua.



En dichos meses, las concentraciones de este nutrimento sólo aumentaron de  $0.01 \text{ mg L}^{-1}$  a  $0.07 \text{ mg L}^{-1}$  hacia la superficie.

Durante los meses de mezcla, las concentraciones de nitritos siguieron el patrón de disminuir hacia el fondo, sin embargo, al final de esta etapa, hubo un incremento y se presentó una concentración de más de  $0.13 \text{ mg L}^{-1}$ .

Las máximas concentraciones registradas, se presentaron en el mes de mayo por encima de la termoclina y en el mes de junio en la parte inferior de la misma. En estos meses, también hubo sitios de bajas concentraciones, principalmente en el fondo de la columna del sistema (Figura 20).

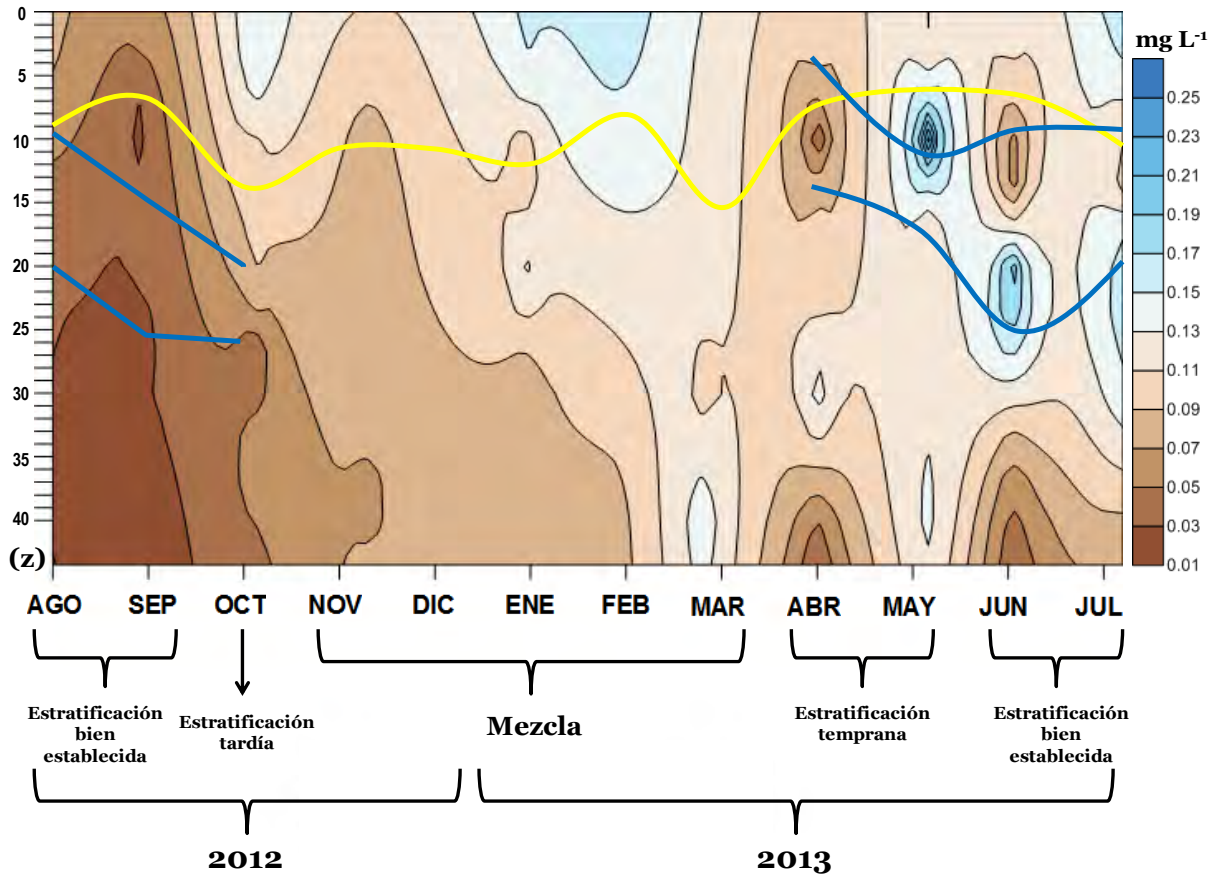


Figura 20. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de nitritos a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (azul).

#### 9.4.3. Amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

De este nutrimento se obtuvo una concentración anual promedio de  $0.051 \pm 0.032$  mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 9), siendo la concentración promedio más baja del NID al no rebasar en general los 0.070 mg L<sup>-1</sup> durante el periodo de estratificación y mezcla (Cuadro 10).

Su concentración promedio superior fue en el hipolimnion de la estratificación bien establecida ( $0.072 \pm 0.051$  mg L<sup>-1</sup>) y la mínima durante la

mezcla ( $0.035 \pm 0.010 \text{ mg L}^{-1}$ ). También se observó que en la estratificación tardía la concentración promedio cambió de manera considerable entre los estratos como en los demás periodos, registrando un promedio general de  $0.065 \text{ mg L}^{-1}$  a lo largo de la columna y disminuyendo a la mitad en el periodo de mezcla (Cuadro 10).

Durante la mezcla y la estratificación temprana, su concentración promedio fue aproximadamente tres veces menor con respecto a la concentración promedio de los nitritos (Cuadros 7 y 9).

mgL <sup>-1</sup>		Estratificación			Concentración Anual
Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía		
(E) 0.060 – (M) 0.017	(M) 0.085 – (A) 0.024	(JUN) 0.169 – (J) 0.013	(O) 0.075 – (O) 0.045		0.051 ± 0.032
0.035 ± 0.010	0.046 ± 0.023	0.060 ± 0.043	0.065 ± 0.011		

**Cuadro 9.** Concentraciones máximas y mínimas de amonio con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	0.067 ± 0.010	0.048 ± 0.022	0.069 ± 0.010
Metalimnion	0.040 ± 0.023	0.056 ± 0.046	0.066 ± 0.009
Hipolimnion	0.048 ± 0.026	0.072 ± 0.051	0.060 ± 0.021

**Cuadro 10.** Promedios y desviación estándar de las concentraciones de amonio por estrato durante los periodos de estratificación.

De acuerdo al diagrama espacio-temporal, a partir de la etapa de mezcla, la concentración de amonio tendió a ser baja y constante a lo largo de la columna de agua con muy poca variación, hasta llegar a un máximo de 0.06 mg L<sup>-1</sup> en el fondo. Al término de ésta, la concentración se mantuvo casi en toda la columna con un promedio de 0.02 mg L<sup>-1</sup>. En la estratificación temprana, el amonio se ubicó casi igual en toda la columna con puntos que llegaron hasta 0.09 mg L<sup>-1</sup> sobre todo en la superficie y en el fondo.

Los puntos máximos de concentración se ubicaron desde la parte inferior de la termoclina hasta el fondo de 0.11 mg L<sup>-1</sup> a 0.16 mg L<sup>-1</sup> en el mes de junio. En los meses de julio y agosto, el amonio descendió a 0.02 mg L<sup>-1</sup> desde la termoclina hasta el fondo y se incrementó hasta 0.1 mg L<sup>-1</sup> en el hipolimnion en el mes de septiembre (Figura 21).

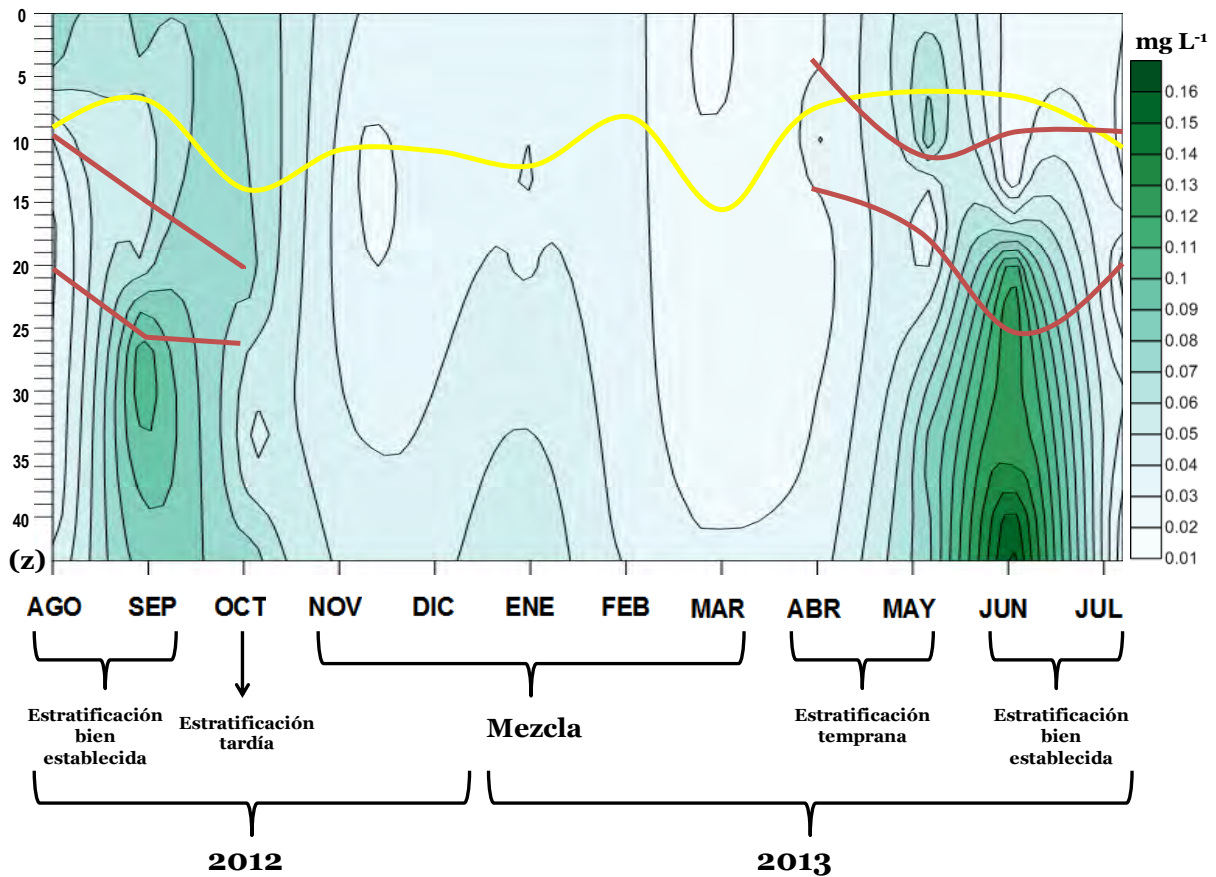


Figura 21. Diagrama espacio-temporal de la dinámica de amonio a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo).

#### 9.4.4. Fósforo Soluble Reactivo (FSR) ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

Se cuantificó una concentración anual promedio de  $0.026 \pm 0.031 \text{ mg L}^{-1}$  (Cuadro 11), la cual fue menor a la concentración promedio anual del fósforo total (Cuadro 13). Su máxima concentración promedio fue en el metalimnion de la estratificación tardía ( $0.102 \pm 0.126 \text{ mg L}^{-1}$ ) y la mínima en el metalimnion de la estratificación temprana ( $0.010 \pm 0.014 \text{ mg L}^{-1}$ ) siendo

muy variable a lo largo de la columna y durante el año de muestreo (Cuadro 12).

Durante el periodo de mezcla y estratificación temprana, se registraron concentraciones promedio constantes de  $0.014 \pm 0.016 \text{ mg L}^{-1}$  y  $0.015 \pm 0.015 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente (Cuadro 11).

Durante la estratificación temprana, la concentración promedio disminuyó del epilimnion al metalimnion y se incrementó hacia el hipolimnion. En tanto que, para la estratificación bien establecida, la concentración promedio del metalimnion aumentó al doble con respecto a la del epilimnion y se mantuvo con poca variación en el estrato profundo.

Al término de la estratificación, la concentración promedio tuvo un aumento considerable en los diferentes estratos, cuantificando un aumento considerable en la concentración promedio del epilimnion al metalimnion y una notable disminución de más de la mitad hacia el hipolimnion (Cuadro 12).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación				Concentración Anual
	Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía	
(N) 0.071 – (F) 0.003	(M) 0.043 – (A) 0.011	(JUN) 0.087 – (S) 0.004	(O) 0.191 – (O) 0.013		0.026 ± 0.031
0.014 ± 0.016	0.015 ± 0.015	0.027 ± 0.023	0.076 ± 0.061		

**Cuadro 11.** Concentraciones máximas y mínimas de fósforo soluble reactivo con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	0.023 ± 0.010	0.015 ± 0.015	0.078 ± 0.011
Metalimnion	0.010 ± 0.014	0.030 ± 0.030	0.102 ± 0.126
Hipolimnion	0.018 ± 0.017	0.033 ± 0.016	0.048 ± 0.001

**Cuadro 12.** Promedios y desviación estándar de las concentraciones de fósforo soluble reactivo por estrato durante los periodos de estratificación.

De acuerdo con el diagrama espacio-temporal, se observa una concentración baja y constante de este nutriente durante la mezcla. Mientras que, para la estratificación, se registraron concentraciones altas por debajo de la termoclina y en la parte superior del hipolimnion durante

los meses de junio y octubre. Se estableció un gradiente de variación en la concentración de este nutriente durante la estratificación bien establecida y tardía (Figura 22).

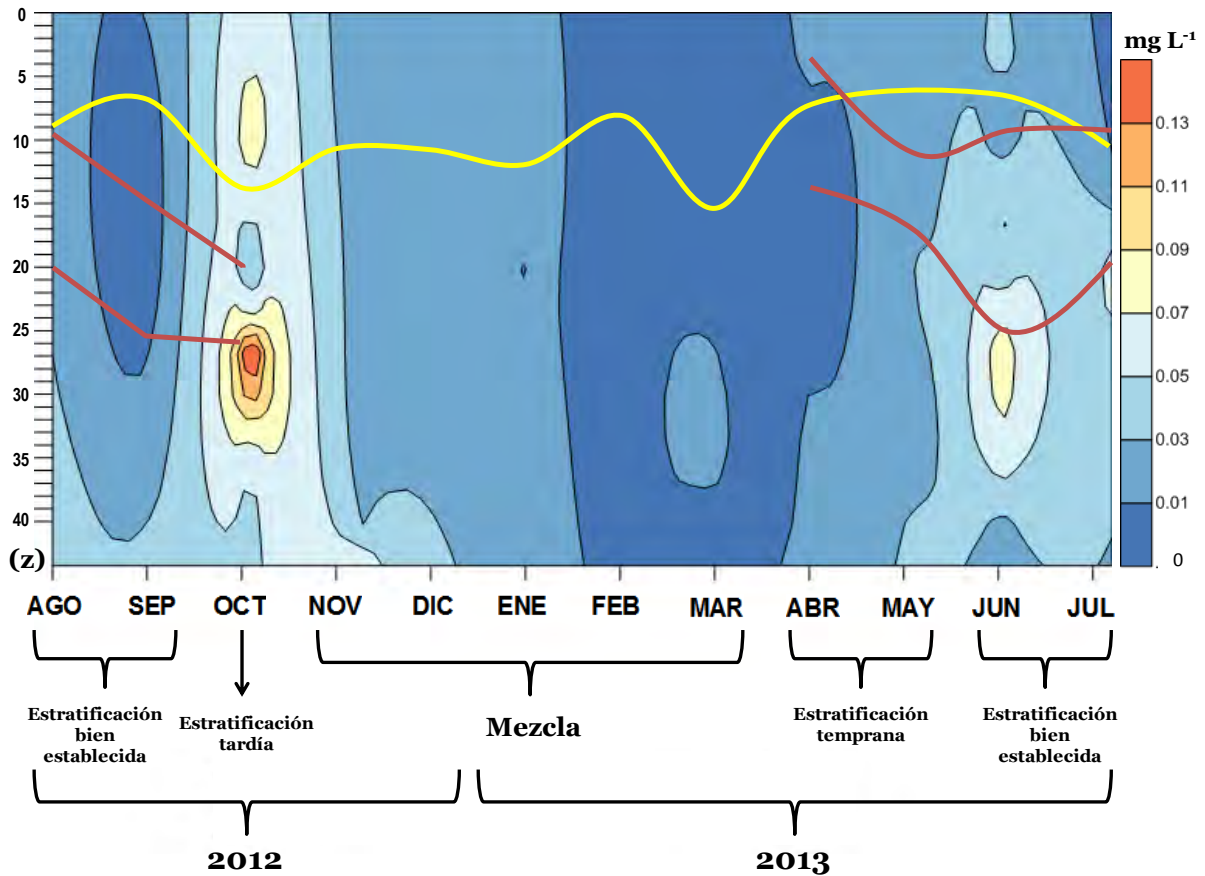


Figura 22. Diagrama espacio - temporal de la dinámica del fósforo soluble reactivo a lo largo de la columna de agua en el lago "La Preciosa" (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo).



## 9.4.5. Fósforo Total (FT).

La concentración promedio del FT fue cinco veces mayor que la del FSR a lo largo de la columna de agua durante la mezcla (Cuadro 13). Su concentración promedio aumentó más del doble en la estratificación temprana; con una disminución consecutiva desde el epilimnion hacia el hipolimnion (Cuadro 14).

Durante la estratificación bien establecida, la variación en la concentración promedio fue distinta, ya que tendió a aumentar gradualmente del epilimnion al metalimnion y terminó con una concentración promedio de más del doble en el hipolimnion. En la estratificación tardía, la concentración promedio del metalimnion disminuyó a la mitad con respecto a la del hipolimnion (Cuadro 14).

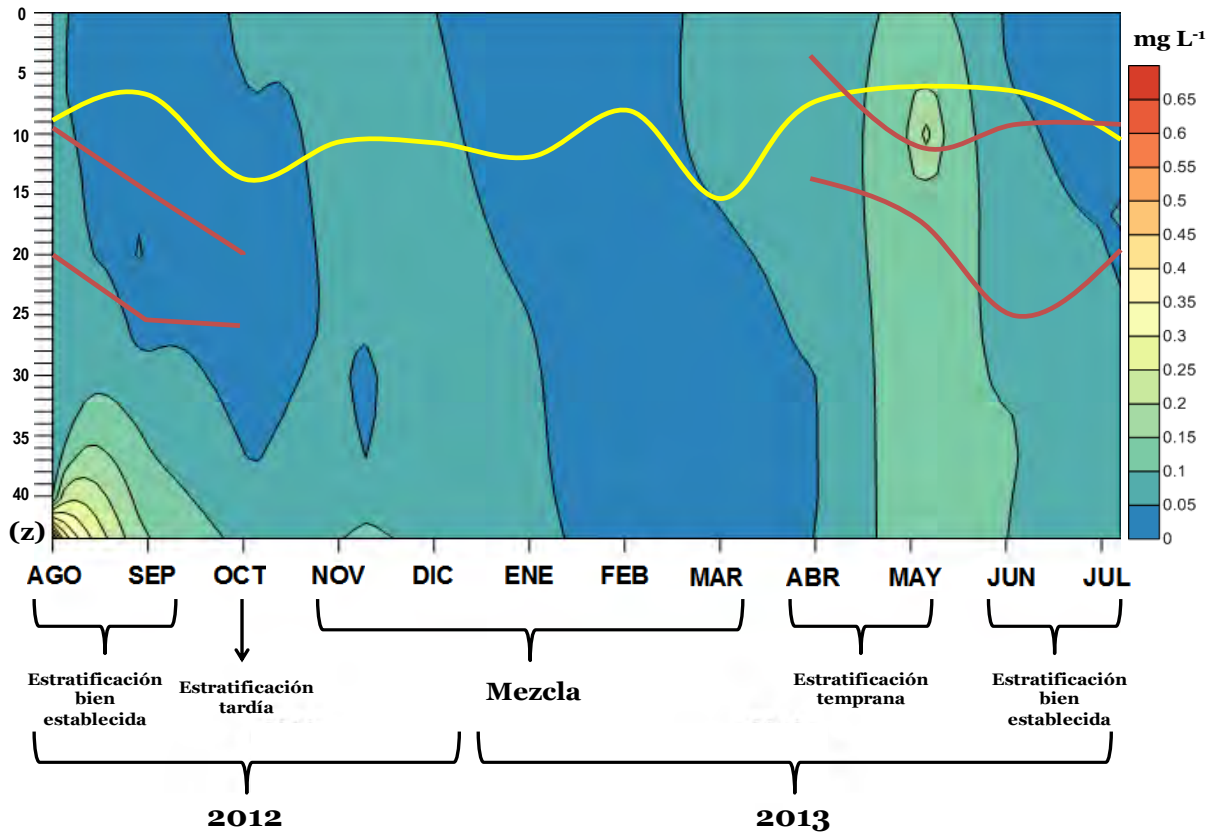
mgL <sup>-1</sup>		Estratificación			Concentración Anual
Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía		
(N) 0.128 – (F) 0.002	(M) 0.218 – (A) 0.043	(A) 0.618 – (JUL) 0.014	(O) 0.086 – (O) 0.023	0.075 ± 0.075	
0.050 ± 0.027	0.101 ± 0.051	0.087 ± 0.114	0.045 ± 0.024		

**Cuadro 13.** Concentraciones máximas y mínimas de fósforo total con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	0.125 ± 0.010	0.043 ± 0.016	0.044 ± 0.025
Metalimnion	0.108 ± 0.070	0.059 ± 0.022	0.030 ± 0.010
Hipolimnion	0.092 ± 0.041	0.148 ± 0.178	0.060 ± 0.036

**Cuadro 14.** Promedios y desviación estándar de las concentraciones de fósforo total por estrato durante los periodos de estratificación.

Se observó, de acuerdo al diagrama espacio-temporal, que las mínimas concentraciones registradas se ubicaron al final de la etapa de mezcla, así como en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, en donde estas concentraciones se limitan desde la superficie hasta la parte superior del hipolimnion. Las máximas concentraciones observadas se encontraron en el mes de agosto hacia el fondo y en el mes de mayo por encima de la termoclina (Figura 23).



**Figura 23.** Diagrama espacio-temporal de la dinámica del fósforo total a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y bottom de la termoclina (rojo).

#### 9.4.6. Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

La concentración promedio anual cuantificada para este nutriente fue de  $7.397 \pm 2.332$  mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 15), siendo el de mayor concentración promedio de todos. Su máxima concentración promedio anual fue durante la estratificación tardía, registrando la mayor en el epilimnion ( $9.762 \pm 0.117$  mg L<sup>-1</sup>) (Cuadro 16).

La dinámica de los sulfatos fue relativamente constante durante el periodo de estratificación, en donde los valores de concentración promedio

fueron similares a lo largo de la columna de agua. Durante la estratificación temprana, los sulfatos se presentaron bajos en el epilimnion y aumentaron poco más del doble hacia el metalimnion, disminuyendo nuevamente en el hipolimnion (Cuadro 16).

En la estratificación bien establecida, las concentraciones promedio aumentaron el doble con respecto al periodo anterior (Cuadro 16).

mgL <sup>-1</sup>		Estratificación			Concentración Anual
Mezcla	Temprana	Bien Establecida	Tardía		
(E) 9.514 – (M) 4.639	(A) 6.769 – (M) 2.880	(S) 12.442 – (JUN) 4.903	(O) 9.956 – (O) 8.630	7.397 ± 2.332	
6.833 ± 1.724	4.963 ± 1.709	8.475 ± 2.149	9.468 ± 0.486		

**Cuadro 15.** Concentraciones máximas y mínimas de sulfatos con sus promedios y desviación estándar durante las etapas hidrodinámicas, (entre paréntesis se escribe la abreviatura del mes correspondiente).

mgL <sup>-1</sup>	Estratificación		
	Temprana	Bien Establecida	Tardía
Epilimnion	2.972 ± 0.010	8.920 ± 2.268	9.762 ± 0.117
Metalimnion	5.639 ± 1.417	7.934 ± 1.891	9.597 ± 0.508
Hipolimnion	4.731 ± 1.873	8.779 ± 2.448	9.044 ± 0.586

**Cuadro 16.** Promedios y desviación estándar de las concentraciones de sulfatos por estrato durante los periodos de estratificación.

De acuerdo al diagrama espacio-temporal, la concentración de sulfatos se mantuvo constante a lo largo de la columna de agua durante todo el periodo anual. Al inicio de la mezcla, las concentraciones prevalecieron bajas con valores que van de 5.5 mg L<sup>-1</sup> en el mes de noviembre a 9 mg L<sup>-1</sup> en enero y descendieron de nuevo al final de esta etapa en el mes de marzo (Figura 24).

Entre la estratificación temprana y la bien establecida, se presentaron los valores más bajos con concentraciones que llegan hasta los 2.5 mg L<sup>-1</sup> en el epilimnion y en el hipolimnion. Por último, desde el mes de julio, los sulfatos tendieron a aumentar de 8 mg L<sup>-1</sup> hasta los 11.5 mg L<sup>-1</sup> en la superficie al final de la estratificación bien establecida en el mes de septiembre (Figura 24).

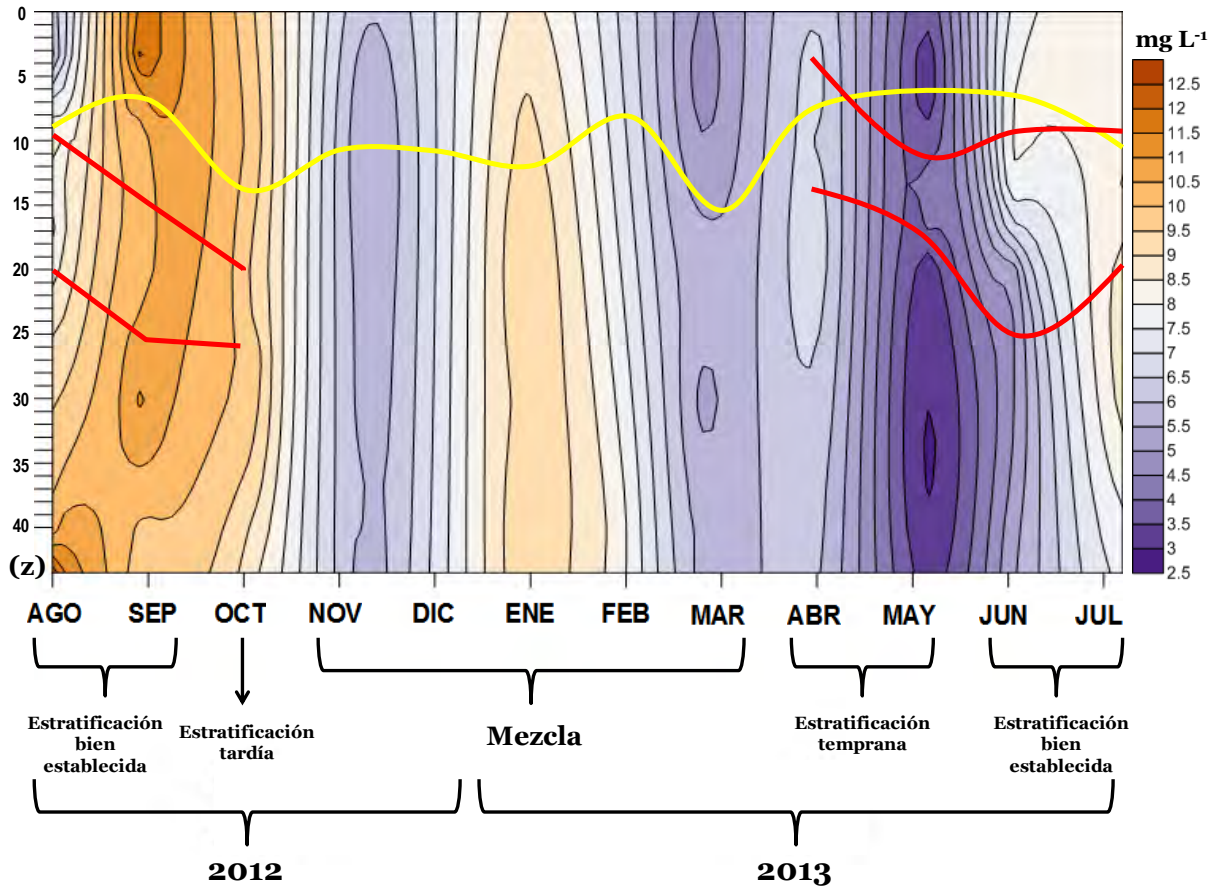


Figura 24. Diagrama espacio temporal de la dinámica de sulfatos a lo largo de la columna de agua en el lago "La Preciosa" (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo).

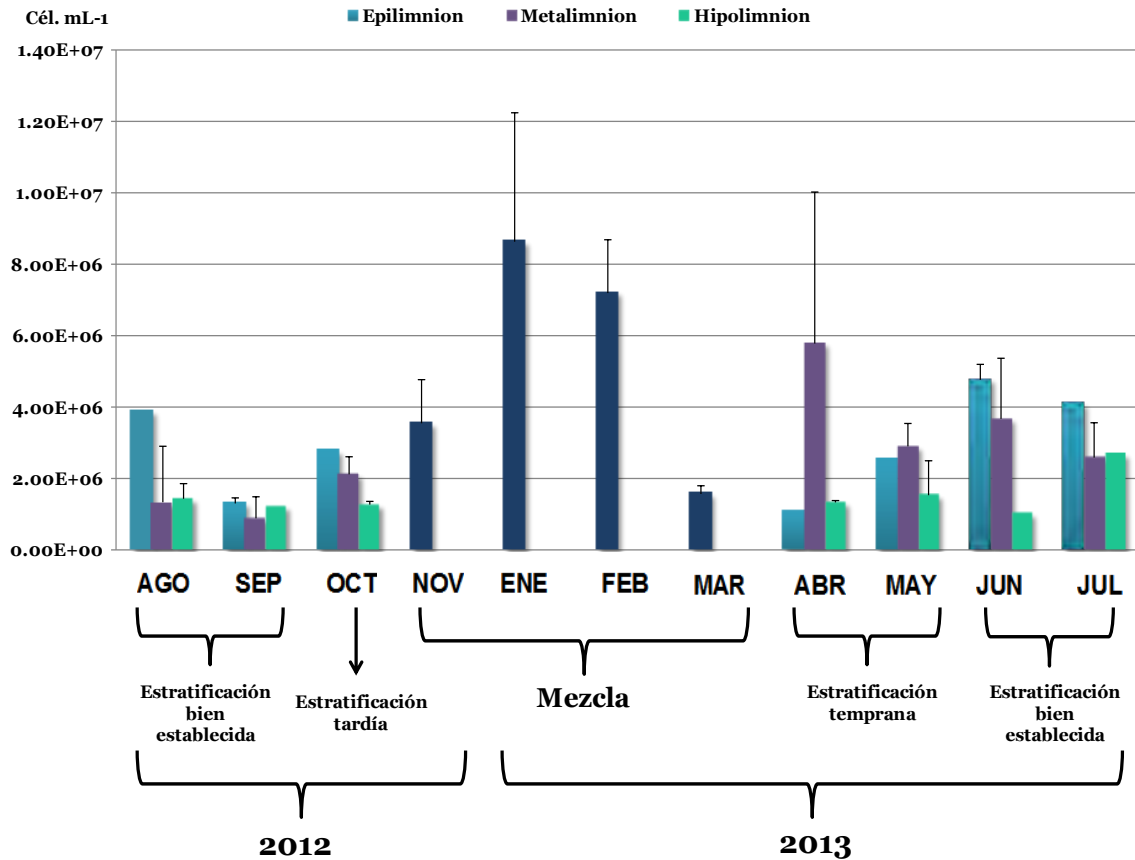
## 9.5. Parámetros Biológicos.

### 9.5.1. Densidad del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).

La densidad promedio que se registró a lo largo de todo el muestreo fue de  $3.10 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup>; se observó un máximo de  $1.25 \times 10^7$  cél. mL<sup>-1</sup> en el mes de enero y un mínimo de  $1.77 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup> en el mes de septiembre.

Durante la mezcla se presentaron los máximos puntos de densidad excepto en marzo, en donde hubo una disminución hasta  $1.55 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup>. Durante la estratificación temprana, la máxima densidad se presentó en el metalimnion y se destacó en el mes de abril, en donde ésta llegó hasta  $5.77 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup>.

En la estratificación bien establecida, la densidad se vio favorecida en el epilimnion con un máximo de  $4.75 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> en el mes de junio, mientras que los puntos mínimos se presentaron al final de este periodo en el metalimnion e hipolimnion hasta el mes de octubre, durante la estratificación tardía, en donde la densidad descendió del epilimnion al hipolimnion (Figura 25).



heterótrofo representado en células por mililitro, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

De acuerdo con el diagrama de barras por periodo y por estrato (Figura 26), se observó que el promedio de la densidad en el periodo de mezcla y en el metalimnion, durante la estratificación temprana, tendieron a ser similares.

En los periodos de estratificación bien establecida y tardía, los promedios de densidad fueron disminuyendo desde la superficie hasta el fondo a lo largo de la columna de agua; siendo la estratificación tardía, el



periodo en donde los puntos más bajos de densidad se presentaron a lo largo de todo el muestreo.

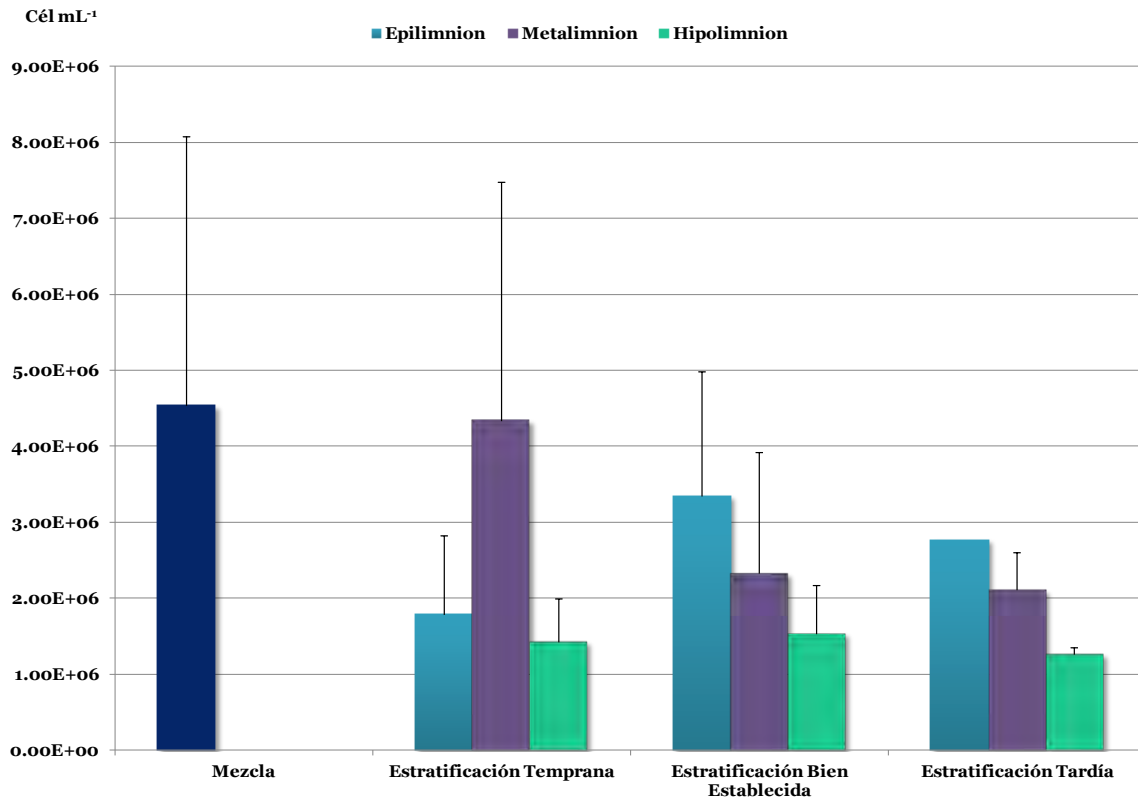
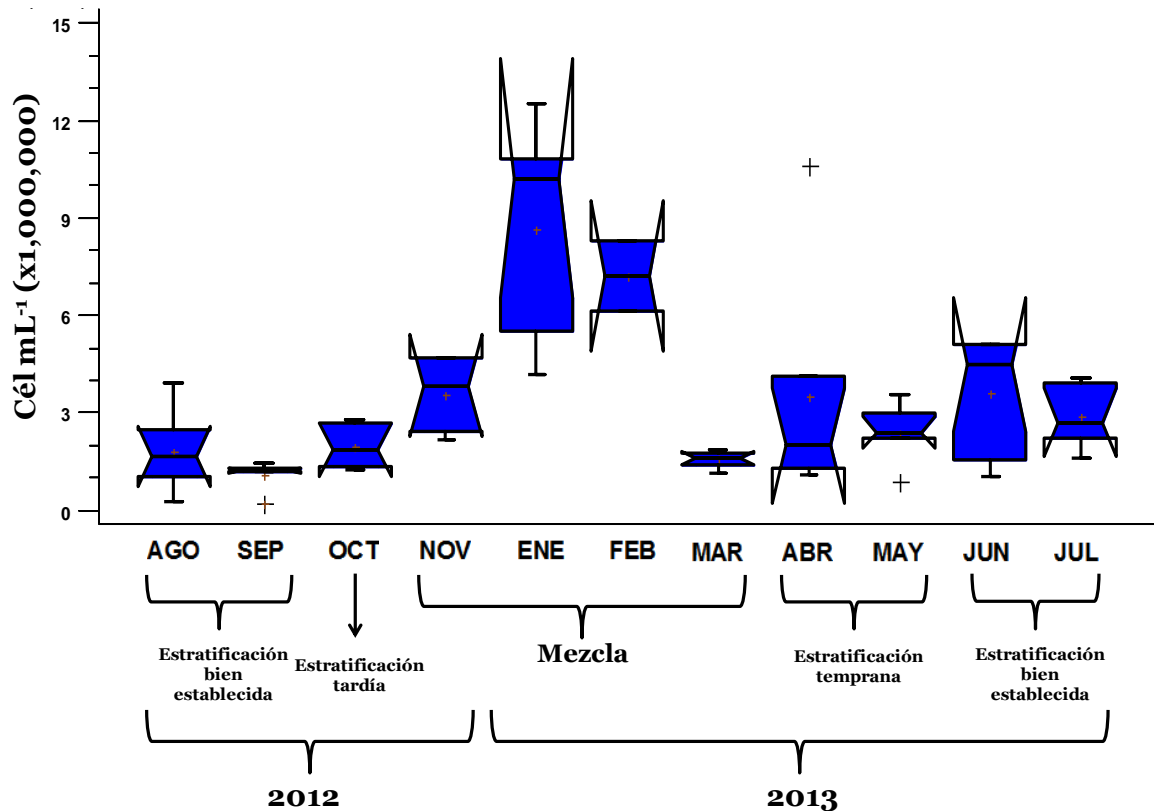


Figura 27. Diagrama de barras de los períodos de estratificación con la densidad del plancton procarionte heterótrofo y separadas por estrato representado en células por mililitro en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

Para la densidad del PPH, de acuerdo con el análisis de Kruskal-Wallis, se encontró diferencia significativa  $p < 0.05$  (0.0004) entre las medianas de los diferentes meses de muestreo. Además, se presentaron diferencias significativas sólo en algunos meses del periodo de mezcla, de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca ( $p \approx 0.05$ ). A diferencia de los meses de estratificación, en donde no se observaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Figura 27).



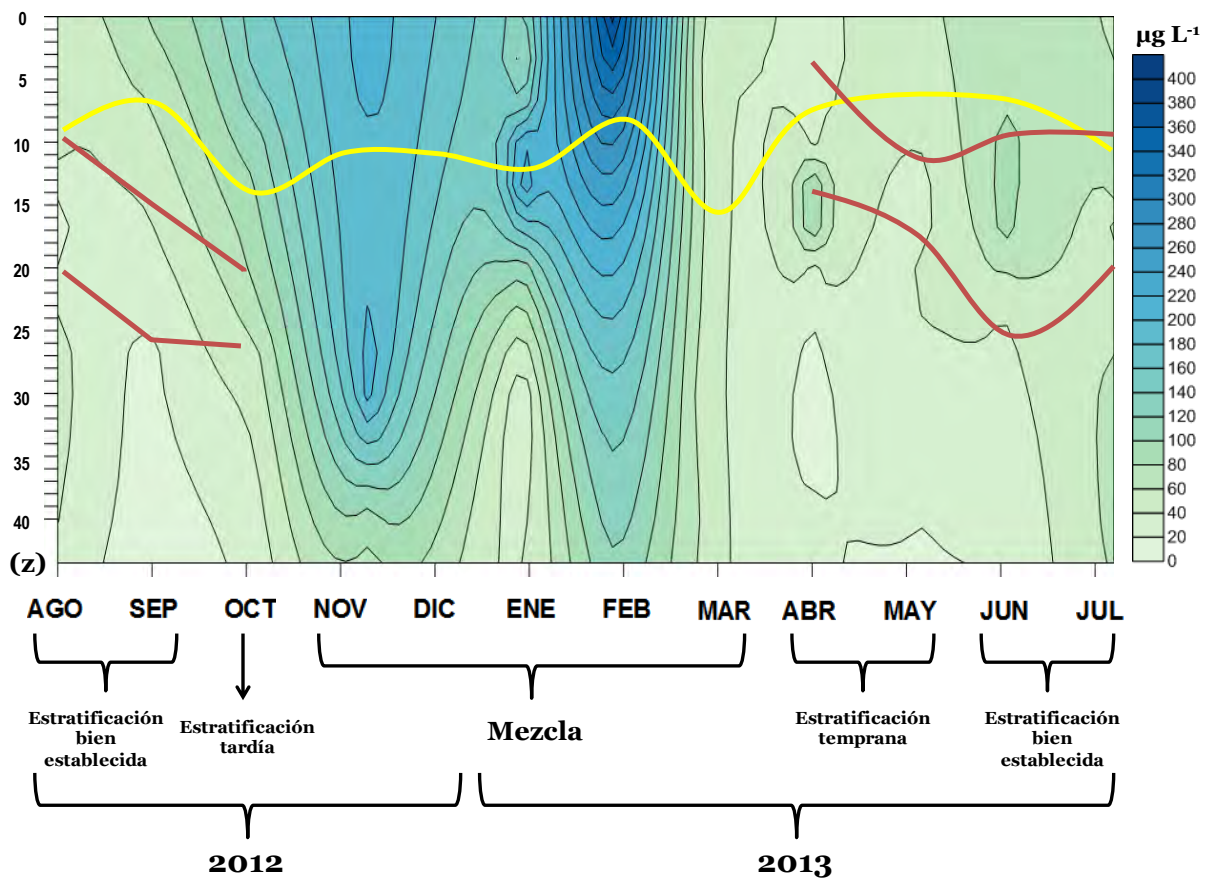
**Figura 27.** Diagrama de cajas múltiples con muesca mensual de la densidad del plancton procarionte heterótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

### 9.5.2. Biomasa del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).

De acuerdo al diagrama espacio-temporal (Figura 28), en el periodo de mezcla se observó una mayor biomasa a lo largo de la columna de agua a comparación de los periodos de estratificación. En el mes de noviembre la biomasa se concentró de manera similar desde la superficie hasta los 30 m aproximadamente; a partir de esta profundidad, la concentración tendió a disminuir hasta el fondo.

Al final de la mezcla, entre enero y marzo, la biomasa aumentó desde el fondo con  $120 \mu\text{g L}^{-1}$ , hacia la superficie, en donde se observó la máxima concentración durante el año,  $400 \mu\text{g L}^{-1}$ .

En los periodos de estratificación, la biomasa se presentó en concentraciones relativamente bajas a lo largo de la columna y éstas aumentaron de manera poco destacable en la termoclina y epilimnion.



**Figura 28.** Diagrama espacio-temporal de la biomasa del plancton procarionte heterótrofo a lo largo de la columna de agua en el lago "La Preciosa" (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo).

De acuerdo con el análisis de Kruskal-Wallis, se encontró diferencia significativa  $p < 0.05$  (0.002) entre las medianas de los diferentes meses de muestreo. Además, se presentaron diferencias significativas al final del periodo de mezcla de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca ( $p \approx 0.05$ ). En cambio, en todos los meses de estratificación, no se observaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Figura 29).

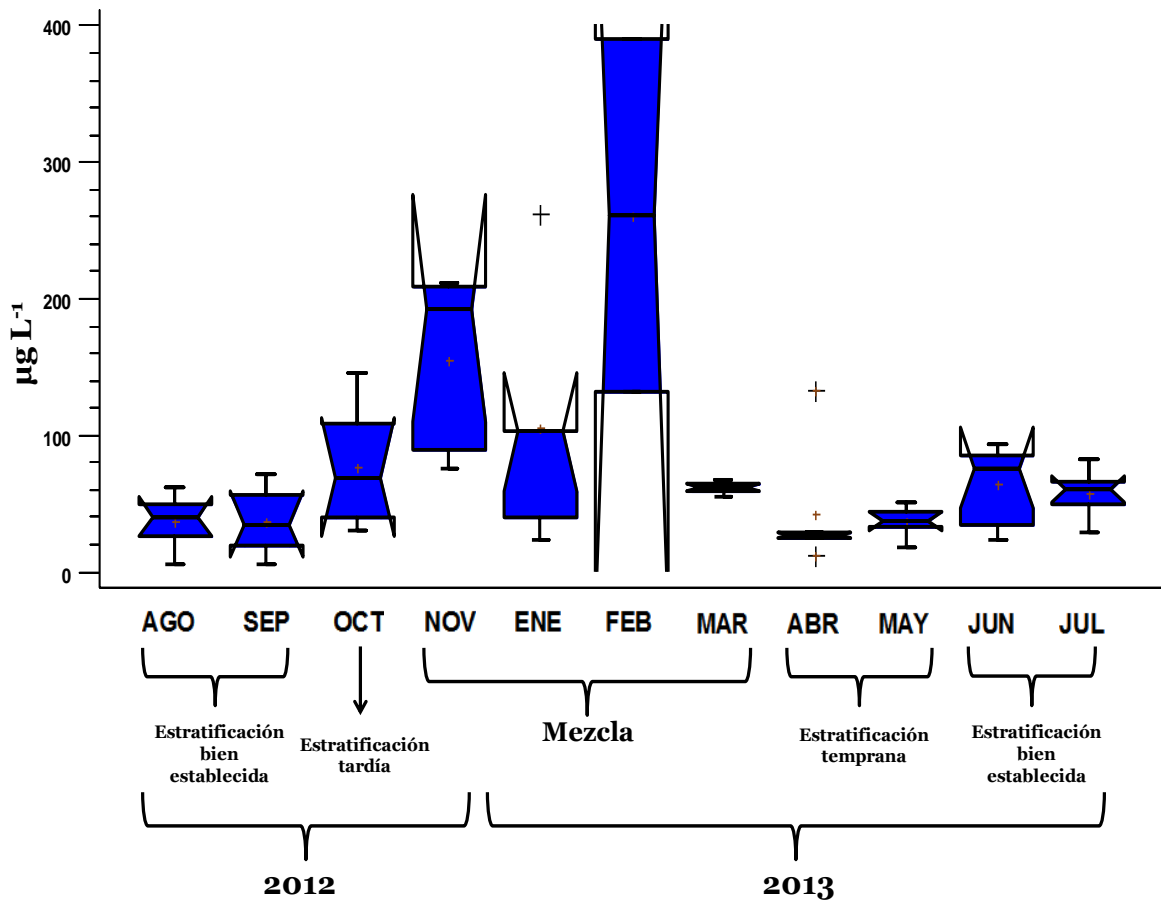


Figura 29. Diagrama de cajas múltiples con muesca mensual de la biomasa del plancton procarionte heterótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago "La Preciosa" (2012-2013).

### 9.5.3. Densidad del Plancton Procarionte Autótrofo (PPA).

A lo largo de todo el año, la densidad del PPH y del PPA presentaron patrones similares durante la mezcla difiriendo en la estratificación (Figuras 16 y 20). La densidad promedio que se registró a lo largo de todo el muestreo fue de  $4.26 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup>; se observó un máximo de  $1.49 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> en el mes de enero y un mínimo de  $1.64 \times 10^4$  cél. mL<sup>-1</sup> en el mes de octubre.

Durante la mezcla, específicamente en el mes de enero se presentaron las máximas densidades. Al final de este periodo, en marzo, hubo una disminución hasta  $2.17 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup>. En la estratificación temprana, la máxima densidad se presentó en el epilimnion con un promedio de  $6.64 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup>.

En el mes de julio, la densidad se vio favorecida en el metalimnion con un máximo de  $8.50 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup>; esta tendencia se mantuvo durante la estratificación bien establecida en agosto y septiembre con un promedio de  $6.77 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup> en el metalimnion. (Figura 30).

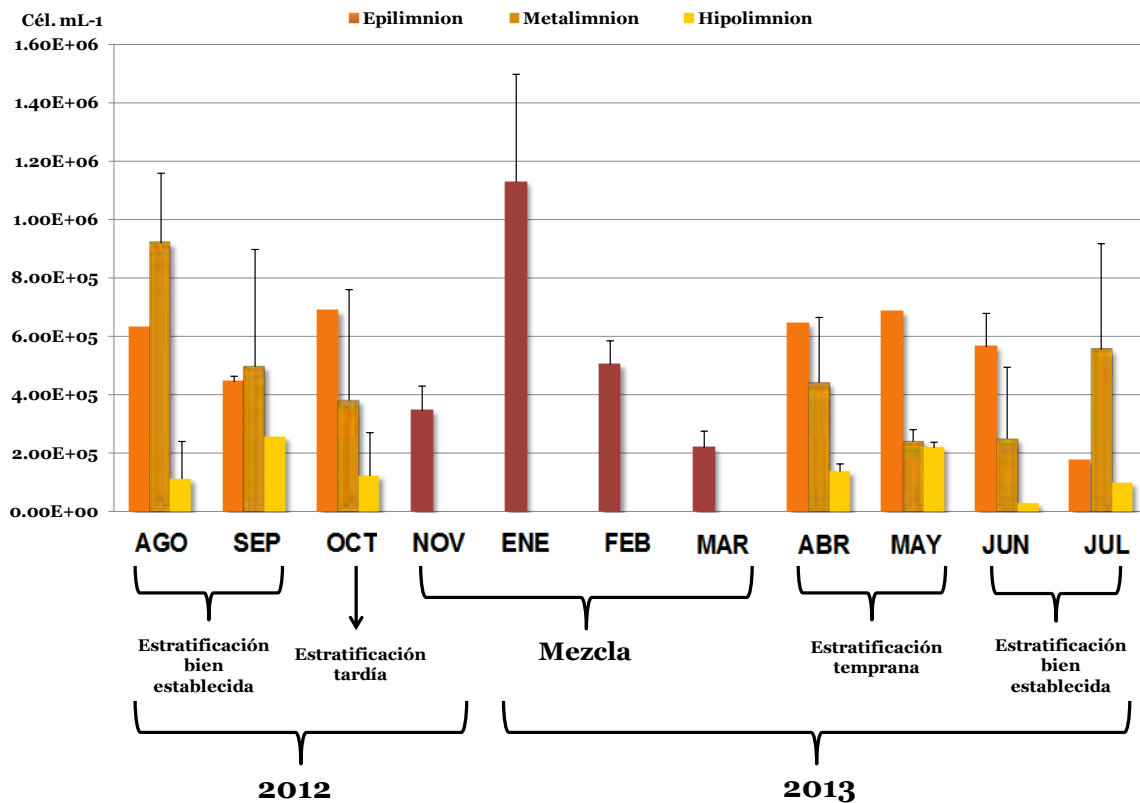
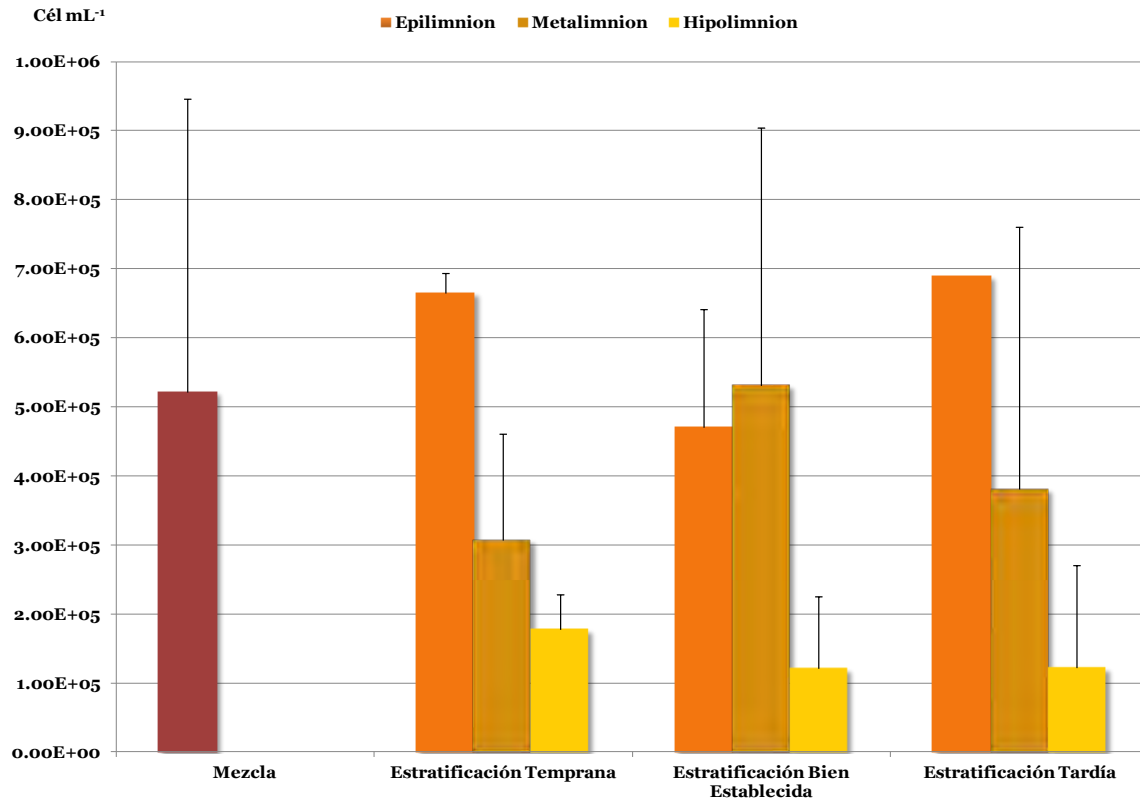


Figura 30. Diagrama de barras mensuales con la densidad del plancton procarionte autótrofo representado en células por mililitro, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013). separadas por estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

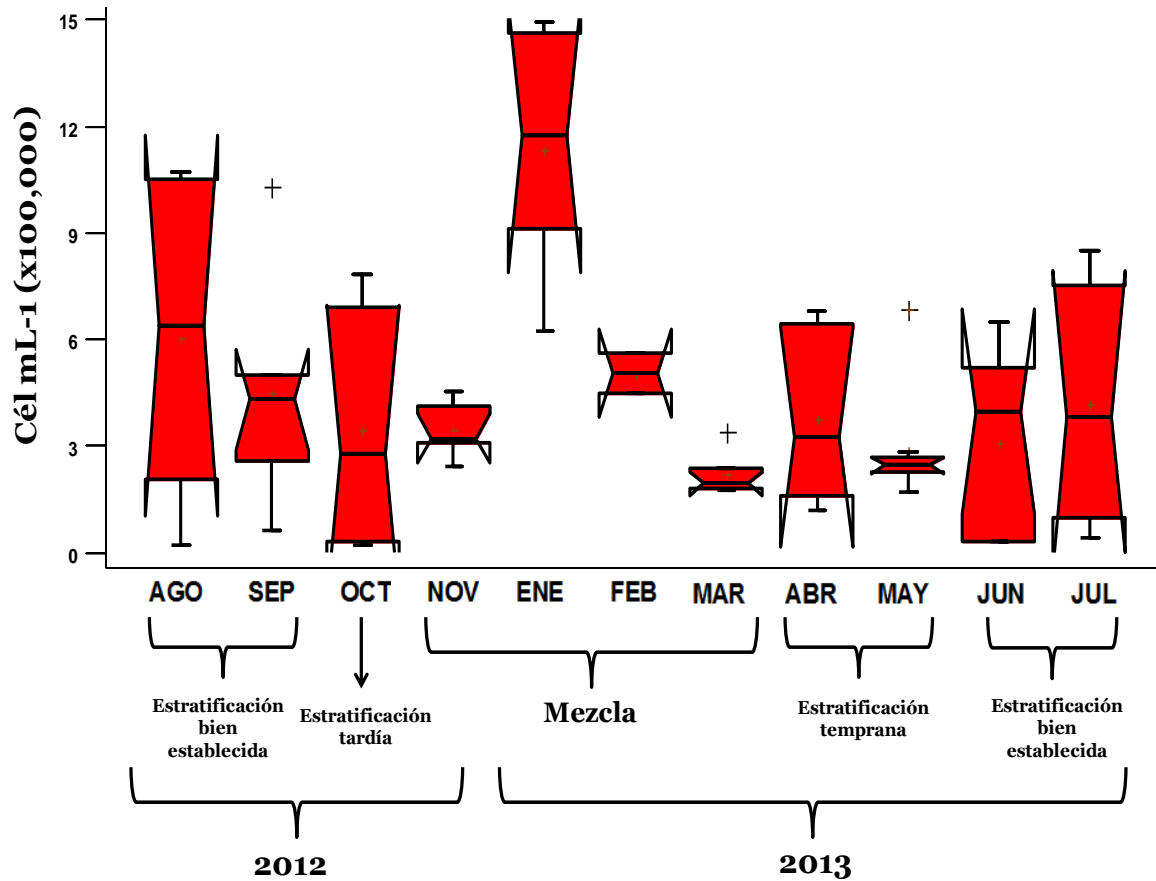
De acuerdo al diagrama de barras por periodo y por estrato, se observó que el promedio de la densidad durante la mezcla ( $5.21 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup>), no superó a la del epilimnion en las etapas de estratificación ( $6.07 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup>).

En todas las etapas de estratificación, la densidad tendió a disminuir conforme los estratos descendieron, sin embargo, en la estratificación bien establecida, la máxima densidad se presentó en el metalimnion con un promedio de  $5.30 \times 10^5$  célmL<sup>-1</sup> (Figura 31).



**Figura 31.** Diagrama de barras de los periodos de estratificación con la densidad del plancton procarionte autótrofo y separadas por estrato representado en células por mililitro en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

De acuerdo con el análisis de Kruskal-Wallis, no se encontraron diferencias significativas  $p > 0.05$  (0.06) entre las medianas de los diferentes meses de muestreo. Con el análisis de cajas múltiples con muesca, se presentaron diferencias significativas de acuerdo ( $p \approx 0.05$ ). A diferencia de los meses de estratificación donde no se observaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), incluso en el mes de mayo, que fue cuando se presentó el fenómeno de emblanquecimiento (Figura 32).



**Figura 32.** Diagrama de cajas múltiples con muesca mensual de la densidad del plancton procarionte autótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

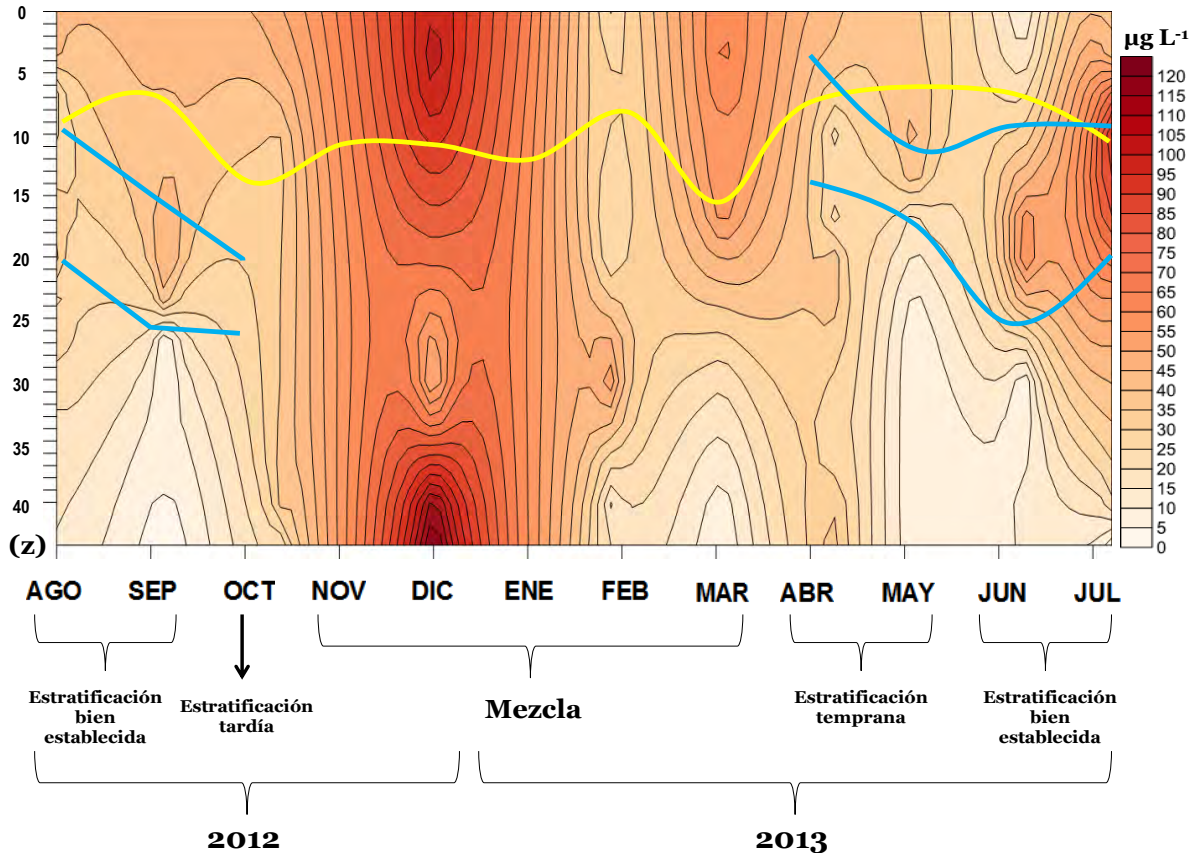
#### 9.5.4. Biomasa del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPA).

De acuerdo al diagrama espacio-temporal (Figura 33), al igual que en con el PPH, en el periodo de mezcla se observó una mayor biomasa a lo largo de la columna de agua a comparación de los periodos de estratificación.



Entre los meses de noviembre y enero, la biomasa se concentró de manera similar en la zona eufótica y el fondo por debajo de los 35 m. A partir de enero, la biomasa se mantuvo de manera constante a largo de la columna de agua y disminuyó al final del periodo de mezcla.

A lo largo de la estratificación se presentaron los puntos más bajos de biomasa por debajo de la termoclina, ya que, dentro de ésta, hubo un incremento considerable, sobre todo en el mes de julio. Al término de la estratificación, en el mes de octubre, la biomasa se mantenía constante a lo largo de la columna de agua hasta aumentar en el inicio de la mezcla.



**Figura 33.** Diagrama-espacio temporal de la biomasa del plancton procarionte heterótrofo a lo largo de la columna de agua en el lago “La Preciosa” (2012-2013), en donde se muestra la zona fótica (amarillo), así como el top y el bottom de la termoclina (rojo).

De acuerdo con el análisis de Kruskal-Wallis, se encontraron diferencias significativas  $p < 0.05$  (0.02) entre las medianas de los diferentes meses de muestreo. Con el análisis de cajas múltiples con muesca, se presentaron diferencias significativas de acuerdo ( $p \approx 0.05$ ). A diferencia de los meses de estratificación donde no se observaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), incluso en el mes de mayo, que fue cuando se presentó el fenómeno de emblanquecimiento (Figura 34).

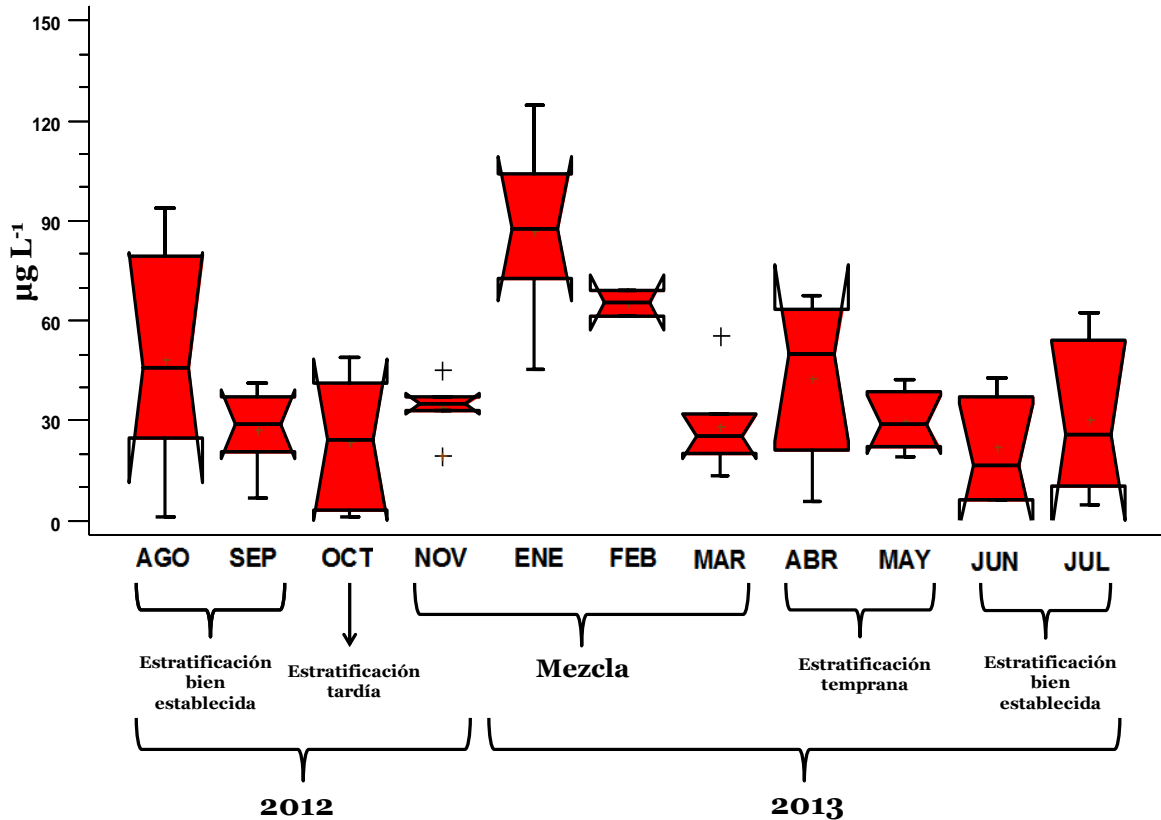


Figura 34. Diagrama de cajas múltiples con muesca mensuales de la biomasa del plancton procarionte autótrofo, separadas por periodo de estratificación y estrato en el lago “La Preciosa” (2012-2013).

## 9.6. Análisis Estadísticos.

Se encontraron correlaciones significativas entre la densidad, el contenido de carbono y la biomasa solamente con algunos parámetros físico-químicos (Cuadro 17). Así, para el PPA, hubo una correlación positiva de la biomasa con los carbonatos y negativa con los nitratos, mientras que el contenido de carbono con las durezas y los sulfatos.

Para el PPH se encontró una correlación de la densidad y el contenido de carbono con el pH y las formas oxidadas del nitrógeno, mientras que para la biomasa además de correlacionarse con los carbonatos y los nitritos se asoció con el fósforo total. Al igual que para el APP el CC del PPH se correlacionó con los sulfatos.

		pH	Carbonatos	Dureza Total	Dureza de Calcio	Nitratos	Nitritos	Fósforo Total	Sulfatos
PPA	Densidad								
	CC			0.2781 <sup>a</sup>	0.2965 <sup>a</sup>				0.3999 <sup>b</sup>
	Biomasa		0.2636 <sup>a</sup>			0.2907 <sup>a</sup>			
PPH	Densidad	0.3456 <sup>b</sup>					0.3613 <sup>b</sup>		
	CC	0.4161 <sup>b</sup>				0.3774 <sup>b</sup>			0.2937 <sup>a</sup>
	Biomasa		0.2596 <sup>a</sup>				0.3269 <sup>a</sup>	0.4275 <sup>b</sup>	

**Cuadro 17.** Correlación de Spearman para los parámetros biológicos del plancton procarionte y los parámetro físico-químicos que fueron significativos (a= $p < 0.05$ , b= $p < 0.01$ , cuadros sin valores  $p > 0.05$ ).

## 10. Discusión de Resultados

### 10.1. Temperatura y Oxígeno Disuelto (O.D.).

En el lago Alchichica, perteneciente a la misma cuenca Oriental en la que se ubica el lago “La Preciosa”, se ha reportado que, durante periodos de fenómenos como “El Niño” o “La Niña”, hay cambios en la temperatura

del agua, así como en las diferentes etapas hidrodinámicas en cuanto a la formación de los estratos, además de la termoclina y la oxíclina, que favorecen florecimientos marcados de cianobacterias (Alcocer y Lugo, 2003).

El año de muestreo de estudio en “La Preciosa” se consideró como no afectado por los fenómenos meteorológicos de gran escala dado que según el **Climate Prediction Center (2015)**, sitio recomendado por el Servicio Meteorológico Nacional, la temperatura en los sistemas acuáticos no fue afectada por fenómenos como “El Niño” o “La Niña”. Así desde agosto del 2012 hasta julio del 2013, se considera un año neutral, ya que los registros del Oceanic Niño Index, no muestran un promedio mayor o menor de la temperatura en los sistemas acuáticos ( $\pm 0.5$  °C).

Por la ubicación latitudinal del lago “La Preciosa” en el trópico y su altitud dentro del Altiplano Mexicano, la clasificación térmica del lago se ajusta a la de un sistema monomítico cálido (Hutchinson y Löffler, 1956), conservando así esta misma clasificación según la revisión de Lewis (1983), quien incorporó la latitud y la altitud en un sólo factor denominado latitud ajustada, que para el lago es de 27°, agregando además la profundidad del cuerpo acuático (44 m) y la acción del fetch como nuevas variables de clasificación.

Esta clasificación se caracteriza por presentar una estratificación estable gran parte del año y un sólo periodo de mezcla durante el invierno (Hutchinson y Löffler, 1956; Lewis, 1983), adecuando los demás lagos volcánicos profundos de la Cuenca Oriental (Atexcac, Alchichica,

Quechulac, Aljojuca) a esta clasificación térmica típica en lagos tropicales (Lewis, 1996).

Los resultados en este estudio, describen que durante la estratificación térmica, la columna de agua se separó en tres capas de acuerdo con la densidad de las masas de agua; epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Estas capas se pudieron distinguir con base en los perfiles verticales y los diagramas de profundidad-tiempo con isotermas de temperatura. De aquí, se observa que el sistema, incluso durante este periodo, es muy dinámico, dado que la ubicación, amplitud y profundidad de la termoclina, varía a través del tiempo y por ende las características de los estratos y de la oxiclina.

De acuerdo con **Alcocer y Lugo (2003)**, el lago Alchichica presenta tres periodos de distribución espacio temporal de biomasa fitoplanctónica relacionado con el patrón térmico correspondiente; el primero es un florecimiento invernal de diatomeas (mezcla), el segundo es un florecimiento primaveral de cianobacterias (estratificación temprana) y el tercero es la formación de un máximo profundo de clorofila (estratificación bien establecida y tardía).

Si se adecua esto a la hidrodinámica registrada en el lago de estudio con lo reportado para la comunidad fitoplanctónica por **Martínez (2010)**, hay una correspondencia con el florecimiento de diatomeas durante la mezcla representado predominantemente por *Cyclotella* sp. y *Chaetoceros* sp., así como la presencia de una especie filamentosa de cianobacteria

(*Planktolyngbya tallingi*) que predomina durante la estratificación bien establecida y la tardía.

Del presente estudio se derivó también la importancia de la abundancia y biomasa de las picocianobacterias principalmente en la mezcla total del lago, durante la estratificación temprana en el epilimnion y para la estratificación bien establecida en la termoclina, ésta última probablemente asociada con los máximos profundos de clorofila.

La solubilidad del oxígeno en el agua depende de dos variables; salinidad y temperatura, ya que cuando éstos se presentan a menor concentración, mayor será la solubilidad del oxígeno en la columna de agua. En el lago, al ser un sistema subsalino, disminuye la solubilidad del oxígeno disuelto, dado que existe una relación en la solubilidad del gas con el incremento de la salinidad (Wetzel, 2001).

Con respecto a la temperatura, cuando el lago es más frío durante los meses de invierno correspondientes a la mezcla, se observó una homogenización del oxígeno disuelto a lo largo de toda la columna de agua y se presentó una mayor solubilidad. Sin embargo, para los meses de noviembre-diciembre, no se registraron las etapas más frías, sino de manera atípica hasta el mes de marzo, en donde se reportaron las temperaturas más bajas durante todo el año (14.8 °C en la superficie y 14.7 °C en el fondo).

Además, se detectaron los vientos más intensos en el lago y en el ambiente que favorecieron una mayor disolución de este gas, presentando

una columna completamente óxica desde la superficie hasta el fondo y alcanzando incluso una concentración de  $6.31 \text{ mgL}^{-1}$  de oxígeno disuelto en el fondo (43.5 m).

Durante la estratificación bien establecida, en el mes de julio del 2012, el lago presentó su fase máxima de estratificación, al tener una diferencia de  $4.2 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura entre la superficie y el fondo. **Lewis (1996)** menciona diferencias de temperatura de  $0.5$  a  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  en lagos tropicales a lo largo de la columna de agua, lo que favorece una variación en el oxígeno disuelto más evidente por estratos; teniendo a condiciones anóxicas desde los 15 m de profundidad, esto por debajo de la zona eufótica asociado con la zona afótica que corresponde con la trofólítica donde se llevan a cabo principalmente los procesos de descomposición de la materia orgánica.

De acuerdo con los perfiles verticales de oxígeno disuelto, durante la estratificación, “La Preciosa” muestra un patrón de curva clínograda (**Wetzel, 2001**), es decir; el epilimnion presenta una saturación de oxígeno disuelto durante el periodo de estratificación, probablemente debido al florecimiento de fitoplancton durante el invierno y la primavera (**Vinner-Mozzini et al., 2003**).

En los lagos volcánicos de la cuenca oriental, durante la mezcla, se da un florecimiento de diatomeas, mientras que en la estratificación temprana, es de cianobacterias filamentosas (**Alcocer y Lugo, 2003**). En particular, en el lago de estudio, el taxón presente, durante la



estratificación bien establecida y tardía, corresponde a *Planktolyngbya tallingii* (Martínez, 2010).

Asimismo, el lago al presentar un fetch de 1,300 m, la acción directa del viento sobre la superficie del lago favorece el intercambio atmosférico de este gas hacia la columna de agua, además de que su cuenca está muy expuesta debido a la carencia de una cobertura vegetal desarrollada. Incluso es factible observar la formación de remolinos en la microcuenca no protegida por el cráter.

Mientras que el oxígeno disuelto del hipolimnion se va agotando durante la estratificación debido a la oxidación de la materia orgánica, el hundimiento de organismos muertos de las capas superficiales y la respiración heterotrófica bacteriana (Fuhrman y Azam, 1982; Ducklow, 2000), conduciendo a un estado de anoxia durante la estratificación bien establecida y tardía, esto se conoce como déficit de oxígeno hipolimnético (Lind, 1985).

Este comportamiento se ha encontrado en lagos monomícticos cálidos tropicales como resultado de la estratificación de lago durante ocho meses lo que favorece la acumulación de materia orgánica detrítica conforme avanza el tiempo y su consecuente degradación con el consumo de oxígeno (Lewis, 2002). El déficit de oxígeno hipolimnético se presenta en el lago a pesar incluso de ser poco productivo.

## 10.2. Visibilidad al Disco de Secchi (V.D.S.) y Zona Eufótica (Ze).

Según *Arredondo et al. (1984)*, se estima que la profundidad de la capa eufótica es hasta donde incide el 1% de la luz solar. Para poder estimar la Ze se ha utilizado el cálculo de la profundidad medida por la V.D.S. multiplicado por una constante de 2.5 (*Margalef, 1983*), sin embargo, este factor fue propuesto para embalses templados, así que, con base a *Estévez (1988)*, es mejor considerar multiplicar por un factor de 3 o 3.5 para estudios de cuerpos de agua tropicales.

De acuerdo con los resultados y adecuando el factor para “La Preciosa”, la zona eufótica del lago abarcó en promedio 6 m de profundidad durante la estratificación bien establecida y se profundizó hasta 16 m durante la mezcla.

Así la Ze presentó dos fases; una clara, característica de una mayor V.D.S. y por ende de una Ze más profunda (hasta 16 m), la cual se presentó durante la estratificación tardía y la mezcla. Esta fase se asocia con la disminución drástica de nutrimentos en el epilimnion durante la estratificación tardía como consecuencia de su agotamiento por la utilización de los productores primarios en las etapas hidrodinámicas previas. Mientras que a pesar de que hay una mayor carga de nutrientes y abundancia fitoplanctónica durante la mezcla esta se distribuye a lo largo de toda la columna de agua por efecto del movimiento vertical de la misma.

Durante la estratificación temprana y la bien establecida, se presentó la fase turbia, característica de una menor V.D.S. y de una Ze menos profunda (hasta 6 m). En “La Preciosa”, esta fase no se presentó de la misma forma en la que la reportaron **Marcos y Reyes (2012)**, quienes la establecen durante la mezcla, producto de la remoción de materia orgánica y nutrientes depositados en el fondo que se resuspenden a lo largo de la columna de agua para ser aprovechados por los productores primarios fitoplanctónicos.

El establecimiento de la fase turbia se asocia principalmente con florecimientos de diatomeas en el epilimnion. **Martínez** en el **2010** reportó que, en esta fase, los organismos fitoplanctónicos que predominaron fueron *Chaetoceros sp.*, *Tetrastrum sp.* y algunas especies del género *Oocystis sp.* durante la estratificación temprana. En la estratificación bien establecida también se presentó *Chaetoceros sp.* en mayor volumen, así como *Gloecoccusalsius sp* y *Elakatothrix sp.*

Cuando la profundidad de la Ze coincide con la de la termoclina, se favorece el crecimiento del fitoplancton, las dinámicas de luz son un factor importante en la diferenciación de nichos de picocianobacterias y puede modular el balance entre células libres y micro colonias (**Callieri, 2010**).

En “La Preciosa” hubo una diferencia de hasta 9 m de profundidad entre la Ze y la termoclina, sin embargo, la termoclina siempre estuvo por debajo de la Ze a excepción del mes de abril, en donde se traslapan, lo que puede favorecer un florecimiento equitativo de fitoplancton y PPA. En los demás meses el PPA tuvo ventaja sobre el fitoplancton, ya que este

puede ubicarse por debajo del límite fótico del 1% del PAR (Camacho *et al.*, 2003) y fotosintetizar hasta en zonas con 0.1% de PAR (Hernández-Avilés *et al.*, 2010) incluso aún por debajo de la termoclina y así aprovechar la acumulación de nutrientes en la termoclina.

### 10.3. Alcalinidad, pH, Salinidad y Conductividad.

La composición química de los lagos cráter depende principalmente de factores relacionados con la geología regional, el clima y el nivel de actividad volcánica (Armienta *et al.*, 2008). Sin embargo, diversas actividades biológicas, como el reciclaje de nutrientes en los ciclos biogeoquímicos y la fotosíntesis, modifican directa o indirectamente la concentración de diversos compuestos dentro del sistema. Los parámetros de alcalinidad y pH están íntimamente ligados, ya que, si alguno se ve afectado, el otro también.

Se considera que los lagos de la Cuenca Oriental están presentes en una región sub-árida que se caracteriza por tener una menor precipitación en comparación con la evaporación para así mantener un déficit de agua que favorece una concentración de materiales disueltos. Asimismo, tienen una alcalinidad alta en donde dominan distintas formas de carbono presentes como bicarbonatos y carbonatos, pH básicos, así como la presencia de los cationes magnesio y sodio, principalmente.

La salinidad y la conductividad fueron considerados parámetros conservativos debido a su mínima variación a través del tiempo, sin

embargo, el pH mostró cierta fluctuación temporal. En “La Preciosa”, el pH tiende a ser conservativo a lo largo del tiempo, a excepción de los meses de estratificación bien establecida y su poca variabilidad responde a la actividad de diferentes grupos autótrofos dominantes como la cianobacteria *Planktolyngbya tallingii*, dinoflagelados como *Peridinium sp.* (Martínez, 2010) y algunas picocianobacterias, éstas últimas asociadas con el emblanquecimiento del lago.

El aumento de la actividad fotosintética, consecuencia de los florecimientos de estos grupos autótrofos, incrementan el pH. En el 2010 se reportó para el lago un pH promedio de  $8.7 \pm 0.52$  (Marcos y Reyes, 2012) y en el presente estudio se reportan valores promedio de  $8.8 \pm 0.65$ .

Al inicio de la mezcla y durante los meses de abril y junio, se presentaron valores de pH por encima de 9, consecuencia en parte por el aumento de la actividad fotosintética, en donde el  $\text{CO}_2$  es consumido por productores primarios para liberar oxígeno. Este incremento de pH se ve relacionado con el florecimiento de cianobacterias y la nucleación de bicarbonatos, fenómeno conocido como *whiting* event, blanco o de descalcificación epilimnética.

Aunque el aumento en la densidad de PPA dentro del lago puede atribuirse para determinar las causas del fenómeno de nucleación, diversas publicaciones como la de Oliva *et al.* (2009) en el lago Alchichica o la más reciente de Lagunas y Martínez (2015) en el lago Atexcac, asocian una elevada actividad fotosintética con florecimientos de *Nodularia*

*spumigena*, una cianobacteria filamentosa que predominó al inicio de la estratificación.

Para el caso del lago Atexcac, se presupone que un disparador del evento del emblanquecimiento es producido por PPA un mes posterior al florecimiento de esta cianobacteria filamentosa como consecuencia de un agotamiento del CO<sub>2</sub>. Se presupone un fenómeno similar en el lago “La Preciosa”, aunque en este caso, al no existir *Nodularia spumigena*, el desencadenante del emblanquecimiento podría ser *Planktolyngbya tallingii*.

#### 10.4. Nutrientes.

De los procesos químicos, los nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo resultan de suma importancia y su escasez limita la fotosíntesis del fitoplancton (Wetzel y Lickens, 2000), ya que el uso de los recursos por parte de cualquier organismo tiene como fin principal el mantenimiento y autoperpetuación de la especie, creando durante este proceso acumulaciones de materia y energía que organizadas dan lugar a células, poblaciones, comunidades y ecosistemas (Wetzel, 2001).

El lago “La Preciosa” es un lago tropical monomítico cálido con un largo período de estratificación (meses más cálidos) y un corto periodo de mezcla (meses más fríos), por lo que presenta una importante limitación de nutrientes en su epilimnion, ya que de estos el fósforo; que se considera como el principal nutriente limitante de la producción acuática en cuerpos de aguas epicontinentales (Jones *et al.*, 1998) en lagos

templados (Elser *et al.*, 1990) se sedimenta hacia el hipolimnion cuando predominan condiciones anaerobias y reducidas (Alcocer y Lugo, 2003), pero en contraste los estudios en lagos tropicales sugieren cada vez más que es el nitrógeno el nutrimento limitante para la producción primaria lacustre (Henry *et al.*, 1985, Wurtsbaugh *et al.*, 1985 y Widinski *et al.*, 2001); lo que se puede validar por las bajas concentraciones de nitrógeno registradas en el epilimnion de lagos tropicales profundos, el hallazgo de concentraciones altas de Fósforo Soluble Reactivo por periodos largos, la sostenida presencia de heterocistos en cianobacterias en lagos con diferentes niveles tróficos y baja tasa de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) evidencian que este nutrimento es el limitante (Lewis, 2002). Mientras que durante la mezcla los nutrientes se homogenizan a lo largo de la columna de agua (Lewis, 1983).

Los nutrientes en el lago “La Preciosa” presentaron cambios a lo largo del año durante el período de estudio asociados con las etapas hidrodinámicas del lago con los promedios  $\pm$  desviación estándar (Cuadro 18), ya que es importante compararlos y determinarlos en un lago para concluir su efecto directo inicial sobre los productores primarios y posteriormente si pueden afectar al resto de la trama trófica planctónica (Elser *et al.*, 1988).

	Columna de Agua mg m <sup>-3</sup>	Epilimnion Anual mg m <sup>-3</sup>	Metalimnion Anual mg m <sup>-3</sup>	Hipolimnion Anual mg m <sup>-3</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	35.47 ± 10.47	54.87 ± 20.15	52.65 ± 37.78	62.22 ± 40.79
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	107.13 ± 32.29	93.50 ± 46.65	99.28 ± 70.00	71.28 ± 45.83
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	440.07 ± 300.28	504.09 ± 325.06	474.46 ± 396.96	391.28 ± 309.39
NID	<b>582.67</b>	<b>652.47</b>	<b>626.39</b>	<b>524.78</b>
PSR	<b>14.79 ± 16.26</b>	<b>29.81 ± 30.05</b>	<b>32.51 ± 48.19</b>	<b>29.45 ± 17.76</b>
PT	50.28 ± 27.25	52.26 ± 31.19	70.03 ± 46.86	118.09 ± 132.79

**Cuadro 18.** Promedios con desviación estándar de nutrientes por período y estrato durante el año de muestreo (2012-2013) en el lago “La Preciosa”.

Los lagos se pueden clasificar según su estado trófico, el cual se determina mediante la concentración de sus principales nutrientes; nitrógeno a partir del Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y el fósforo mediante el FSR (Wetzel, 2001).

La concentración promedio de NID (Cuadro 18) clasifica al lago La Preciosa como un sistema mesoeutrófico, ya que por periodo presento concentraciones promedio correspondientes al intervalo de 300-650 mgm<sup>-3</sup> (Wetzel, 2001).

Mientras que la concentración promedio de FSR (Cuadro 18) clasifica al lago “La Preciosa” como mesotrófico, por tener concentraciones promedio por estrato dentro del intervalo de 10-30 µgL<sup>-1</sup> (Wetzel, 2001).



#### 10.4.1. Nitratos.

Con respecto a la distribución de los nitratos a lo largo de la columna de agua en el lago La Preciosa, se observó que durante la estratificación tardía se registraron las concentraciones más altas de nitratos durante el año de estudio. Esto puede atribuirse a que durante la estratificación tardía el epilimnión descendido hasta casi los 25 m de profundidad y había una importante concentración de oxígeno incluso a los 35 m de profundidad ( $1.28 \text{ mg L}^{-1}$ ) lo cual beneficia la producción de nitratos por la nitrificación de amonio acumulado en el hipolimnion ( $0.072 \text{ mg L}^{-1}$ ) durante la estratificación bien establecida.

Durante la mezcla, vemos una disminución notoria de casi 4 veces ( $0.23 \text{ mg L}^{-1}$ ) su total al registrado en el hipolimnion de la estratificación tardía ( $0.96 \text{ mg L}^{-1}$ ), este descenso drástico en la mezcla podría estar relacionado con las altas temperaturas y concentraciones de oxígeno que se registraron para el mes de octubre que pudieron favorecer a un incremento en la producción fitoplanctónica y por lo tanto al consumo de nitratos y que durante los meses fríos correspondientes al periodo de mezcla las bajas temperaturas y las altas concentraciones de oxígeno así como el registro de un pH elevado favorecieron el proceso de desnitrificación y por lo tanto el descenso de nitratos que pasaron a ser nitrógeno atmosférico durante el periodo de mezcla.

En comparación con otros lagos de la Cuenca Oriental (Alchichica y Atexcac), el lago de estudio no presenta una especie de cianobacteria

filamentosa llamada *Nodularia spumigena*, que es un organismo capaz de fijar nitrógeno atmosférico y representa una entrada adicional de este gas hacia el lago. Dada esta capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, *Nodularia spumigena* tiene una ventaja competitiva sobre otros organismos fitoplanctónicos cuando el nitrógeno se vuelve el nutriente limitante para el crecimiento algal (Oliva *et al.*, 2009); cuando estos organismos fijan el nitrógeno atmosférico introducen al sistema amoníaco el cual después se oxida en amonio y en condiciones bien oxigenadas en el epilimnion y el metalimnion, son transformados nuevamente en nitratos por el proceso de nitrificación (Oliva *et al.*, 2009) pero *Nodularia spumigena* requiere de 5 g L<sup>-1</sup> a 20 g L<sup>-1</sup> de salinidad para estar presente y de 5 g L<sup>-1</sup> a 10 g L<sup>-1</sup> de salinidad para alcanzar un crecimiento máximo, especialmente cuando el sulfato y el sodio son dominantes (Nordin y Stein, 1980).

En La Preciosa se encontraron concentraciones de salinidad de 1.10±0.04 mg L<sup>-1</sup> con dominancia de bicarbonatos y magnesio con valores de pH de 8.88±0.27, lo que hace evidente la ausencia de *Nodularia spumigena*, pero la presencia de *Planktolyngbya tallingii* (Martinez, 2010), que es otra especie de cianobacteria filamentosa, podría realizar funciones similares a *Nodularia spumigena* como la fijación de nitrógeno atmosférico y tener un florecimiento que sería un indicador del próximo fenómeno de emblanquecimiento.

El 25 de mayo del 2013, correspondiente a la estratificación temprana, en donde las concentraciones de nitratos se duplicaron a lo largo de la columna de agua a comparación de los de la mezcla, se registró el fenómeno de emblanquecimiento en el lago “La Preciosa”,

donde las picocianobacterias tienen la capacidad de nuclear bicarbonatos para realizar fotosíntesis.

Otra razón que explica este considerable incremento de nitratos y florecimiento algal durante la estratificación temprana es que el amonio después de la mezcla es oxidado y queda disponible como nitrato epilimnetico que permite el desarrollo del fitoplancton y de las cianobacterias (Yamasaki *et al.*, 2002). Durante la estratificación bien establecida se ve una disminución moderada en la concentración de nitratos en epilimnion y metalimnion debido a la asimilación del nutrimento por los organismos y por desnitrificación, mientras que en el hipolimnion se reducen a más de la mitad por la amonificación resultante de la acumulación de materia orgánica que precipita por el decaimiento de las poblaciones de *Planktolyngbya tallingii* aumentando el amonio del hipolimnion durante la estratificación bien establecida.

#### 10.4.2.Nitritos.

Para los nitritos se registraron concentraciones menores que para los nitratos pero mayores que para el amonio, esto debido a que son la fase de transición del proceso de oxidación del nitrógeno (Wetzel, 2001). Durante el periodo de mezcla se registró una concentración promedio mayor que la concentración promedio durante el periodo de estratificación (0.107 mg L<sup>-1</sup> y 0.088 mg L<sup>-1</sup> respectivamente) esto se atribuye a la circulación de los nutrientes que se encuentran en el sedimento y a su homogenización en la columna de agua durante el periodo de mezcla.

Se registraron bajas concentraciones en el epilimnion y metalimnion porque son las zonas en donde se realiza la nitrificación por la disponibilidad de oxígeno. Sin embargo, se observó que durante el mes de mayo, correspondiente al mes de emblanquecimiento; se registraron las mayores concentraciones ( $0.144 \pm 0.05 \text{ mg L}^{-1}$ ) por encima de la termoclina debido al florecimiento de *Planktolyngbya tallingii* y a la gran cantidad de nitrógeno que se encontraba disponible hasta finales del mes de junio.

#### 10.4.3. Amonio.

En el caso del amonio su concentración promedio durante la mezcla es menor que durante el periodo de estratificación ( $0.035 \text{ mg L}^{-1}$  y  $0.058 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente) esto debido a que en presencia de oxígeno el amonio es nitrificado y se transforma en nitratos que quedan disponibles a lo largo de la columna de agua durante el periodo de mezcla.

La mayor concentración se registró en el hipolimnion de la estratificación bien establecida, correspondiente con el mes de junio; mes posterior al fenómeno de emblanquecimiento, lo que explicaría esta máxima concentración debido a la acumulación y descomposición de materia orgánica acumulada en el metalimnion y al aporte de amoniaco por la fijación del nitrógeno atmosférico de *Planktolyngbya tallingii* del mes anterior, este pico decrece después del mes de julio por que el hipolimnion deja de ser completamente anóxico, condición que favorece el proceso de amonificación y el aumento de los iones amonio resultado final de la descomposición de la materia orgánica por las bacterias heterótrofas.

#### 10.4.4.Fósforo Soluble Reactivo (FSR).

El fósforo es un elemento esencial para la vida siendo un componente estructural y funcional en todos los organismos. Las formas orgánicas e inorgánicas, disueltas y partículas del fosforo tienen transformaciones continuas en la columna de agua. La parte del fosforo inorgánico disuelto (los ortofosfatos) generalmente es asimilado por el plancton e incorporado en biomasa. El ciclo biogeoquímico del fósforo está vinculado mayormente a la química ácido-base de un sistema (Falkowski et al., 2008) y que en lagos tropicales los fosfatos se encuentran en función del oxígeno disuelto y del régimen térmico del sistema (Wu et al., 2000) más que con el estado trófico del sistema como en los lagos templados.

Para el caso del FSR en el lago “La Preciosa” se registraron altas concentraciones por debajo de la termoclina, esto debido a la descomposición de la materia orgánica que se acumula en la termoclina y/o precipita cuando logra atravesar el gradiente de densidad (Wetzel, 2001) y que este mismo fósforo precipitado que se encuentra en los sedimentos es liberado en las zonas anóxicas del hipolimnion que favorecen su liberación (Estéves, 1988), explicando porque durante el mes de junio hay un importante aumento de este nutrimento; por la importante cantidad de materia orgánica formada durante el mes de mayo durante el florecimiento de cianobacterias y a la anoxia a partir de los 25 m de profundidad del mes de junio.

Durante el periodo de mezcla se registraron concentraciones de FSR constantes y homogéneas por la descomposición de la gran cantidad de

materia orgánica en el hipolimnion de la estratificación tardía y a su redistribución a lo largo de la columna (Payne, 1986) y que el fósforo precipita al entrar en reacción con el oxígeno.

La baja concentración de FSR durante la estratificación temprana es por la asimilación de los ortofosfatos que son liberados durante la mezcla y quedan disponibles a lo largo de la columna de agua y son consumidos por el fitoplancton y cianobacterias presentes durante el mes de mayo, siendo un nutriente esencial para el almacenamiento de energía y como transformador dentro de la estructura de la membrana (Björkman y Karl, 2003).

#### 10.4.5. Fosforo Total (FT).

El comportamiento general del FSR y del FT es similar durante el año de muestreo. La concentración de FT durante el periodo de mezcla fue cinco veces mayor a la de FSR y de igual manera se distribuye de manera constante y homogénea, otra similitud entre ambos parámetros es que las máximas concentraciones se registraron por debajo de la termoclina y en la zona del hipolimnion y con una mayor concentración durante el mes de junio.

Los ortofosfatos precipitan como fosfato de calcio en un pH elevado y disminuye su disponibilidad para los organismos (Wetzel, 2001), lo que explica también su baja concentración y distribución homogénea en los meses de enero, abril y junio, correspondientes a la mitad del periodo de mezcla, al inicio de la estratificación temprana e inicio de la estratificación bien establecida; meses en los que se registró un pH mayor a 9.

## 10.5. Parámetros Biológicos.

### 10.5.1. Densidad del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).

A lo largo del periodo de estudio en el lago, el PPH prevaleció numéricamente sobre el PPA, ya que su densidad fue alrededor de ocho veces más alta que la de la comunidad autótrofa, contribuyendo de esta forma con el 80% del bacterioplancton total.

Aunque la densidad del PPH está directamente relacionada con la oxidación de la materia orgánica y su concentración por acumularse hacia el fondo de la columna de agua, existen otros parámetros con los que puede estar relacionada. Así, por ejemplo, **Szelag-Wasielewska y Stachnik (2010)** describen una relación positiva de este parámetro biológico con la temperatura del agua, destacando que es un factor ambiental que afecta al metabolismo de la comunidad del PPH.

**White *et al.* (1991)** describen una relación positiva con el incremento en la temperatura sobre la biomasa y la densidad del bacterioplancton. En su estudio sugieren que las bacterias deben poseer un alto  $Q_{10}$ , por lo que su respuesta es inmediata a estas variaciones en comparación con otros organismos que se encuentran en la columna de agua.

Como una estrategia de sobrevivencia por parte de la comunidad bacteriana heterótrofa ante los diversos cambios que puedan alterar su hábitat, como la reducción significativa del oxígeno disuelto que ocurre en

el hipolimnion del lago La Preciosa, **Amy y Morita (1983)** mencionan que es común observar un rápido aumento en el número total de células antes de una fuerte reducción tras la baja disponibilidad de alimento.

Aunque la materia orgánica tiende a acumularse hacia el fondo del lago, su velocidad de oxidación disminuye, así como la actividad metabólica bacteriana. Sin embargo, el patrón de distribución del PPH, durante la estratificación, aparentemente no se asoció con el proceso de acumulación de materia orgánica hacia los estratos más profundos de la columna de agua.

En el metalimnion, zona caracterizada por presentar acumulación de materiales, el PPH tuvo su máxima densidad durante la estratificación temprana, mientras que en la estratificación bien establecida y la tardía, la densidad tendió a ser mayor en el epilimnion. Esto podría estar asociado al aporte de terrígenos de la cuenca por el aumento de la acción del viento, el cual produce fuertes tolvaneras que llegan a ingresar al lago en forma de remolinos o bien, por el efecto del incremento de la precipitación pluvial que arrastra materiales de la cuenca, que está expuesta y fuertemente alterada con claros procesos erosivos. Cabe destacar que el epilimnion es un estrato que a través del tiempo presenta concentraciones altas de oxígeno disuelto favoreciendo el desarrollo del bacterioplancton heterótrofo.

Según **Suess (1980)**, más del 90% del carbono orgánico es oxidado aeróbicamente antes de alcanzar el sedimento; al irse depositando la materia orgánica, como consecuencia de la fuerza gravitacional, la



comunidad bacteriana sigue remineralizándola en el fondo y al final de la estratificación sólo permanece aquella más difícil de oxidar y es sepultada, constituyéndose como parte del sedimento (Henrichs y Reeburgh, 1987).

Aunado a esto, Schallenberg y Kalff (1993) señalan que no se debe relacionar únicamente la densidad y la biomasa bacteriana con el contenido de materia orgánica, ya que estos parámetros biológicos dependen adicionalmente de otros factores como es la actividad enzimática y la asimilación bacteriana. Aunque estos autores lo refieren principalmente a los sedimentos, no se puede dejar escapar esta idea, además de resaltar que la concentración de oxígeno disuelto juega un papel muy importante para la distribución, abundancia y composición del PPH.

#### 10.5.2. Biomasa del Plancton Procarionte Heterótrofo (PPH).

En el lago “La Preciosa”, al presentar una biomasa del PPH mayor a la del PPA, se infiere que este puede jugar un papel más relevante en la transferencia de carbono hacia los niveles tróficos superiores por medio del circuito microbiano, tal como ha sido propuesto por Szlag-Wasielewska y Stachnik (2010), resaltando su importancia en lagos de las latitudes tropicales (Sarmiento, 2012).

Mientras el PPA, además de utilizar los nutrientes inorgánicos en concentraciones bajas de forma eficiente, participa en la regulación de las formas de carbono a través de la fotosíntesis, destacando su capacidad de utilizar las formas de bicarbonato cuando el bióxido de carbono es limitante para tal fin. Este proceso genera cambios en las concentraciones

relativas de bicarbonatos y carbonatos del agua y modifica temporalmente el pH, hasta el establecimiento de una condición de equilibrio químico.

### 10.5.3. Densidad del Plancton Procarionte Autótrofo (PPA).

Al utilizar la microscopia de epifluorescencia, se observó que el PPA estuvo presente en toda la columna de agua, a pesar de que la zona eufótica sólo llegó a un máximo de entre 15 y 16 m al final de la mezcla. La densidad de PPA presentó sus mayores abundancias durante este periodo con un pico máximo en enero ( $1.49 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup>).

Al iniciar el conteo de PPA para calcular la densidad, el manejo de éstas fue relativamente fácil, ya que se utilizaron sus pigmentos accesorios (ficocianinas y ficoeritrinas) que emiten una fluorescencia amarillo-naranja cuando son excitadas con un filtro de luz verde (CY3) en el microscopio.

Éstas se observaron con brillo de distinta magnitud, sobre todo en los puntos extremos de la columna de agua; superficie y fondo. Según **Veldhuis y Kraay (1993)**, la intensidad de la radiación solar tiene como respuesta una mayor pigmentación de estos organismos fotoautótrofos; mientras más cerca estuvieron de la superficie, más brillantes resultaron a la vista en el microscopio.

Durante la mezcla, como consecuencia del movimiento de toda la columna de agua, el fitoplancton se desplazó temporalmente por debajo de la zona eufótica, lo que podría generar una desventaja por la limitación de luz, aunque no así de nutrientes, los cuales tienden estar en mayor disponibilidad. El PPA, como estrategia, para permanecer en la zona con

mayor intensidad de luz, formó conglomerados o colonias asociadas por medio de mucilagos, lo que les permitió tener una mayor flotabilidad.

La distribución de la densidad del PPA fue la esperada si se considera la alta disponibilidad de luz con la que cuentan los estratos superiores y su obvia disminución hacia el hipolimnion. En el inicio de la estratificación, así como en el final de ésta, se presentaron las mayores densidades en el epilimnion, en cambio, durante la estratificación bien establecida, se observó la mayor densidad en el metalimnion. Así, la densidad del PPA pudo estar determinada por la efectiva acumulación de nutrientes en la termoclina como efecto del gradiente de densidad en este estrato por parte del agua.

Durante la estratificación térmica, si la zona eufótica está por debajo de la termoclina, se encuentra en una condición muy favorable para el PPA, ya que es en donde se presenta una acumulación de nutrientes por el gradiente de densidad. En el momento en que la termoclina se encuentra por debajo de la zona eufótica, se conoce que el PPA tiene la capacidad de fotosintetizar por debajo del 1% del PAR (Camacho *et al.*, 2003; Callieri, 2010), lo que implica que amplía su distribución hacia el metalimnion, teniendo incluso un desarrollo tendiente a ser óptimo.

En la estratificación bien establecida, a pesar de que la termoclina se profundizó, ésta presentó su mayor amplitud y el PPA (picocianobacterias) se encontró entre el 0.1% y el 1% del PAR.

Diversos reportes, sobre todo en ambientes templados, indican que el PPA tiende a ser más abundante en el epilimnion durante agosto y septiembre, correspondiendo a los periodos de limitación de nutrientes para el fitoplancton de tallas mayores, sin embargo, para el PPA, con una mayor relación superficie-volumen, esta condición oligotrófica resulta favorable al aprovechar los recursos disponibles (Crosbie *et al.*, 2003). Este autor también hace referencia a las colonias o microcolonias que pueden alcanzar altas concentraciones en la superficie y cerca de ella debido a la producción de mucílago como producto de la fotosíntesis durante los períodos de deficiencia de nutrientes.

En “La Preciosa”, las colonias se presentaron durante todo el periodo de muestreo sin que hubiera una determinada disminución o aumento en algún mes en específico, sin embargo, la presencia de éstas siempre se observó en el epilimnion. Klut y Stockner (1991) han sugerido que su ubicación podría tener una función adaptativa al modificar su eficiencia en el reciclaje de nutrientes y proporcionarles protección contra posibles depredadores.

En la estratificación tardía, que es en donde la termoclina descendió a su máxima profundidad, la probabilidad de que el PPA tuviera disponibilidad de nutrimentos seguía siendo alta, aunque la disponibilidad de luz fue muy baja.

La densidad promedio en La Preciosa fue de  $4.26 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup> y se puede comparar con años anteriores en el mismo sitio de muestreo, donde el promedio aproximado fue de  $2.9 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup> (Marcos y Reyes,

2012), o también con otro lago tropical, donde la densidad fluctuó entre las  $0.44 \times 10^4$  cél. mL<sup>-1</sup> y  $1.44 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup> (Sarmiento *et al.*, 2008). En los lagos tropicales, la densidad se presenta con mayores unidades en comparación con lagos templados, donde la densidad oscila entre las 50,000 cél. mL<sup>-1</sup> (Callieri, 2007) y las 70,000 cél. mL<sup>-1</sup> (Padisák *et al.*, 1997; Padisák *et al.*, 2010).

En general, las diferencias latitudinales se asocian con una mayor incidencia de luz y un mayor reciclamiento de nutrientes, donde, en zonas tropicales, estos factores son mayores (Kilham y Kilham, 1990), resaltando que la variabilidad temporal puede estar determinada por factores ecológicos ambientales diferentes a lagos de zonas templadas. En La Preciosa, no hubo correlación alguna con los diferentes parámetros fisicoquímicos que se determinaron, destacando dicha variabilidad con diversos aspectos que se presentaron con mayor relevancia a lo largo del año de muestreo.

Además de los nutrimentos, la densidad del PPA también está en función de la actividad de los depredadores (Pernthaler *et al.*, 1996) y en el lago “La Preciosa”, los copépodos y los cladóceros dominan como los principales consumidores de fitoplancton al terminar la mezcla y durante la estratificación temprana (Martínez, 2010), que es cuando el PPA no presenta su máxima densidad.

Aunado a esto, Padisák *et al.* (1997), utilizando un lago templado como modelo de estudio (Stechlin, Alemania), mencionan que el PPA se encontró con densidades altas dentro del ducto intestinal en la mayoría

del zooplancton. Esto se suma a la importancia significativa que tiene el PPA, no sólo para el circuito microbiano, si no para las redes tróficas clásicas.

#### 10.5.4. Biomasa del Plancton Procarionte Autótrofo (PPA).

El APP es una forma muy importante de la biomasa total para el circuito microbiano en los lagos oligotróficos (Straškrabová *et al.*, 1999), en donde su variación estacional en ambientes oligotróficos se encuentra regularmente afectada por la temperatura. Sin embargo, cabe decir que el aporte de materia orgánica puede ser la razón por la cual los ambientes con menor concentración de nutrientes registren máximos de biomasa durante el invierno (mezcla) y la primavera (inicio de estratificación). En estos periodos, los picos de biomasa del APP están en respuesta a los cambios estacionales en los nutrientes y la cantidad de luz disponible (Fahnenstiel y Carrick, 1992; Ernst *et al.*, 1995).

Durante la mezcla, al igual que el fitoplancton en este tipo de lagos oligotróficos (Adame *et al.*, 2008), las mayores concentraciones de biomasa bacteriana de PPA se distribuyeron homogéneamente y aumentaron parcialmente en la superficie de la columna de agua, disminuyendo hacia el fondo. En cambio, durante la estratificación hubo una distribución diferencial de la biomasa por estratos, siendo mayor en el epilimnion en la estratificación temprana, en el metalimnion durante la bien establecida y mínima a lo largo de toda la columna de agua durante la estratificación tardía, en respuesta principalmente a la disponibilidad de nutrientes y de luz.

Según **Montoya y Aguirre (2010)**, la biomasa de organismos autótrofos no se encuentra directamente relacionada con la producción primaria, ya que los eventos de estratificación y mezcla determinan su concentración evidenciándose su relación con la transparencia del agua.

Las cianobacterias pueden verse afectadas por los eucariontes, ya que compiten con otras formas del fitoplancton por la radiación de la luz en ambientes oligotróficos y la biomasa bacteriana autótrofa puede verse afectada por consumo por depredadores (**Callieri y Stockner, 2002**).

## 11. Conclusiones.

De acuerdo con las concentraciones del Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y del Fósforo Total, el lago se clasificó de mesoeutrófico a eutrófico.

En el lago “La Preciosa”, la variación espacio temporal de la densidad y la biomasa del plancton procarionte heterótrofo (PPH), estuvo determinada en general por la dinámica de monomixis cálida del lago, definiendo también su dinámica limnológica (estratificación y mezcla). Mientras que, la variación del plancton procarionte autótrofo (PPA) se vio favorecida por el gradiente de densidad establecido por la termoclina y la acumulación de nutrientes en el metalimnion.

El PPH juega un papel importante en el ciclo del carbono a través de la oxidación de la materia orgánica y en el circuito microbiano. Asimismo, el PPA participa en la producción de oxígeno disuelto en la fotosíntesis, la remineralización de los nutrientes, así como el amortiguamiento del sistema (pH) por su participación en la utilización de bicarbonatos y la precipitación de carbonatos durante el evento de emblanquecimiento del lago.

La dinámica de la densidad y la biomasa del PPH y el PPA dependieron también de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago, con máximos de estos parámetros biológicos durante la mezcla debido a la homogenización de oxígeno a lo largo de la columna de agua, a la redistribución de nutrimentos de los estratos profundos y de los



sedimentos, la disponibilidad de luz en las capas superficiales y sus estrategias para evitar el hundimiento.

La densidad del PPH presentó una variación temporal mientras que la del PPA fue de tipo espacial. La biomasa del PPH superó numéricamente a la del PPA, contribuyendo con casi el 80% de la biomasa del bacterioplancton total del sistema.

La biomasa del PPA, constituida principalmente por cianobacterias (Pcy), se vio favorecida por la disponibilidad de nutrientes y de luz en la zona eufótica y por debajo de ella, debido a que las Pcy son activas fotosintéticamente a una radiación (PAR) menor al 1%.

El PPH dependió de los estratos en donde se acumula la materia orgánica como la termoclina y el hipolimnion. Al aportar mayor biomasa al sistema, resulta de gran importancia como eslabón en la transferencia de carbono en los distintos niveles tróficos por medio del circuito microbiano.

## 12. Literatura Citada.

Adame, M. F., Alcocer, J. y Escobar, E. (2008) *Size fractioned phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake*. *Freshwater Biology* 53: 22-31.

Alcocer, D. J. (1995) *Análisis holístico de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos litorales de seis lagos cráter con un gradiente de salinidad*. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias, UNAM.

Alcocer, J. y Lugo, A. (2003) *Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central México*. *Geofísica Internacional*. 42 (3): 523-528.

Álvarez, J. (1950) *Contribución al conocimiento de los peces de la region de los Llanos, Estado de Puebla (México)*. *An Esc. Nal. De Cienc. Boil.* 6: 81-107.

Álvarez, L. F. (2012) *Densidad y biomasa bacteriana en los sedimentos profundos del lago Alchichica, Puebla*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM.

Amy, P. y Morita, R. (1983) *Starvation-Survival Patterns of Sixteen Freshly Isolated Open-Ocean Bacteria*. *Applied and Environmental Microbiology*. 45: 109-115.

APHA-AWWA-WPCF. (1992) *Standard Methods for the Examination of Water Wastewater*. 18 ed. American Public Health Association, Washington, 1010 pp.

Armienta, M.A., Vilaclara, G., De la Cruz-Reyna, S., Ramos, S., Cenicerros, S., Cruz, O., Aguayo, A. y Arcega-Cabrera, F. (2008) *Water chemistry of lakes to active and inactive Mexican volcanoes*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 178: 249-258.

- Arredondo, F.J.L., Borrego, L.E., Castillo, D.R.M. y Valladolid, L.M.A. (1983) *Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca Oriental, Puebla, México*. *Biótica* 8: 37-47.
- Arredondo, F.J.L. (2002) *Los Axalapascos de la cuenca Oriental Puebla*. En *De la Lanza y Espino*. Lagos y Presas de México. Centro de Ecología y Desarrollo, México D.F. 65-87 pp.
- Arriaga, C. L., Aguilar, V., Alcocer, J., Jiménez, R., Muñoz, E. y Vázquez, E. (1988) *Regiones hidrológicas prioritarias, fichas técnicas y mapa (escala 1: 4,000,000)*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 142 pp.
- Azam, F., Fenchel, T., Field, J., Gray, J., Meyer-Reil, L. y Thingstad, F. (1983) *The ecological role of water-column microbes in the sea*. Marine ecology progress series. Oldendorf 10:257-263.
- Badillo, A.M., Galindo, D.S., Gallardo, T.A., Lizama, U.G., Palomino, A.G., Arena, O.M.L. y Chiappa, C.X. (2010) *Manual de Prácticas de Ecología Acuática*. Facultad de Ciencias. UNAM.
- Bathurst, R. G. (1975) *Development in sedimentology 12: carbonate sediments and their diagenesis*. Elsevier Science Inc.
- Begon, M., Harper, J.L. y Townsend, C.R. (1999) *Ecology: Individuals, Populations and Communities*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Battin, T. J., Luysaert, S., Kaplan, L. A., Aufdenkampe, A. K., Richter, A y Tranvik, L. J. (2009) *The boundless carbon cycle*. *Nature Geoscience* 2:598-600.
- Björkman, K. y Karl, D. (2003) *Bioavailability of dissolved organic phosphorus in the euphotic zone at Station ALOHA, North Pacific Subtropical Gyre*. *Limnol. Oceanogr.* 48(3):1049-1057.

- Bundeleva, I. A., Shirokova, L. S., Bénézeth, P., Pokrivsky, O. S., Kompantseva, E. I. y Balor, S. (2012) *Calcium carbonate precipitation by anoxygenic photrophic bacteria*. *Chemical Geology* 291:116-131.
- Callieri, C. y Pinolini, M. L. (1995) *Picoplankton in Lake Maggiore, Italy*. *Int. Revue. GesHydrobiol.* 80: 491-501.
- Callieri, C. y Stockner, J. G. (2002) *Freshwater autotrophic picoplancton: a review*. *J. Limnol.* 61(1): 1-14.
- Callieri, C. (2007) *Picophytoplankton in freshwater ecosystems: The importance of small-sized phototrophs*. *Freshwater Reviews.* 1: 1-28.
- Callieri, C. (2010) *Single cells and microcolonies of fresh water pycocyanobacteria: A common ecology*. *Journal of Limnology.* 69: 257-277.
- Camacho, A., Miracle, R. M. y Vicente, E. (2003) *Which factor determine the abundance and distribution among different types of lakes and ponds*. *Arch. Hydrobiol.* 157: 332-336.
- Camacho, A., Fernández-Valiente, E. (2005) *Un mundo dominado por los microorganismos. Ecología microbiana de los lagos Antarticos*. *Ecosistemas* 14 (2): 66-78.
- Carrasco, N. G. y Gómez, T. A. (1997) *Volcanogenic sedimentation around Citlaltépetl volcano (pico de Orizaba) and, surroundings, Veracruz, México*. 131-151 pp. in Aguirre D.G.J., J. Aranda., G. Carrasca y L. Ferrari. (Eds): *Magmatism and tectonics in the central and northwestern México*. A selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions. México D.F. UNAM, Instituto de Geología Excursión 16.
- Climate Prediction Center. (2015) <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

- Couradeau, E., Benzerara, K., Gérard, E., Moreria, D., Bernard, S., Brown, G. E., y López-García, P. (2012). *An early-branching microbialite cyanobacterium forms intracellular carbonates*. *Science* 336:459-462.
- Crosbie, N.D., Teubner, K. y Weiss, T. (2003) *Flowcytometry mapping provides novel insights into the seasonal and vertical distributions of freshwater autotrophic picoplankton*. *Aquatic Microbial Ecology*. 33: 53-55.
- Daw, A. (2016) *Evaluación de la composición y abundancia del procarioplancton durante el fenómeno de emblanquecimiento whitening event en el Lago Volcánico La Preciosa, estado de Puebla*. Tesis de Licenciatura. Biología. FES Zaragoza, UNAM.
- Ducklow, H. (2000) *Bacterial production and biomass in the oceans*. *Microbial Ecology of the Oceans* 1:85-120.
- Dussart, B.H. (1965) *Las diferentes categorías del plancton*. *Hydrobiol.* 26: 72-74.
- Elser, J. J., Elser, M. M, Mackay, N. A. y Carpenter, S. R. (1988) *Zooplankton-mediated transitions between N and P limited algal growth*. *Limnology and Oceanography*. 33: 1-14.
- Elser, J. J., Marzolf, E. R. y Goldman, C. R. (1990) *Phosphorus and nitrogen limitation on phytoplankton growth in the freshwaters of North America: a review and critique of experimental enrichments*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 47: 1468-1477.
- Ernst, A., Marschall, P. y Postius, C. (1995) *Genetic diversity among Synechococcus spp. (cyanobacteria) isolated from the pelagial of lake Constance*. *Microbiol. Ecol.* 17:197-204.
- Estévez, F. A. (1988) *Fundamentos de Limnología*. Interciencia/Finep. Río de Janeiro. 575 pp.

- Fahnenstiel, G. L. y Carrick, H. J. (1992) *Phototrophic picoplankton in lakes Huron and Michigan: abundance, distribution, composition, and contribution to biomass and production*. Can. J Fish Aquatic Sci. 49:379-388.
- Falkowsky, P. G., Fenchel, T. y Delong, E. F. (2008) *The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles*. Science 320 (5879): 1034-1039.
- Fuentes A. L. (1972) *Direc. De Publ. Regiones Naturales del Estado de Puebla*. UNAM, 143 Pág.
- Fuhrman, J. A. y Azam, F. (1982) *Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton and field results*. Mar. Biol. 66: 109-120.
- García, M. E. (1988) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köeppen*. Larios. México. 252 pp.
- Gasca, D. A. (1981) *Algunas notas de la génesis de los lagos cráter de la Cuenca Oriental, Puebla-Tlaxcala*. INAH, México, Colección Científica de la Prehistoria. 98: 57 pp.
- Google Earth. (2016) *Google Incorporation*.  
<http://www.google.com.mx/intl/es/earth/>
- Gutiérrez, F. y Torres, R. (2002) *El ciclo microbiano y su importancia en el funcionamiento de los ambientes pelágicos*. Laboratorio de Ecosistemas Costeros. Hidrobiología, UAM I.
- Hammes, F. y Verstraete, W. (2002) *Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation*. Reviews in environmental science and biotechnology. 1(1):3-7.

- Henrichs, S. M. y Reeburgh, W. S. (1987) *Anaerobic mineralization of marine sediment organic matter: Rates and the role of anaerobic processes in the oceanic carbon economy*. Geomicrobiology Journal 5 (3-4): 191-237.
- Henry, R., Hino, K., Tundisi, J. G. y Ribeiro, J. S. B. (1985) *Responses of phytoplankton in Lake Jacaretinga to enrichment with nitrogen and phosphorus in concentrations similar to those of the River Solimoes (Amazon, Brazil)*. Archiv für Hydrobiologie 103: 453-477.
- Hernández-Avilés, J. S., Macek, M. J., López, B. T. y Merino-Ibarra, M. (2010) *Prokaryotic picoplankton dynamics in a warm-monomictic saline lake: temporal and spatial variation in structure and composition*. Journal of Plankton Research 32: 1301-1314.
- Hutchinson, G. E. y Löffler, H. (1956) *The termal classification of lakes*. Proc. Nat. Acad. Sci. 42: 84-86
- INEGI. (1987) *Síntesis Geográfica, Anexo cartográfico del Estado de Puebla*. México. 56pp.
- INEGI. (2002) *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. México, D.F. <http://www.inegi.org.mx/>
- Jones, A.B., Dudley, B.J. y Dennison, W.C. (1998) *Factors limiting phytoplankton biomass in the Brisbane River and Moreton Bay*. School of Marine Science, The University of Queensland, Brisbane. 301-308 pp.
- Kondratyev, K. Y. y Varotsos, C. (1995) *Atmospheric greenhouse effect in the context of global climate change*. Il Nuovo Cimento C 18:123-151.

- Klut, M. E. y Stockner, J. G. (1991) *Picoplankton associations in an ultra-oligotrophic lake on Vancouver-Island, British Columbia*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 48: 1092-1099.
- Lagunas, M. y Martínez, J. (2015) *Estructura de la comunidad del plancton procarionte en el lago volcánico, hiposalino y monomíctico cálido Atexcac, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Carrera de Biología. FES Zaragoza, UNAM.
- Legendre, L. y Rassoulzadegan, F. (1995) *Plankton and nutrient dynamics in marine waters*. Ophelia 41: 153-172.
- Lewis, W. M. (1983) *A revised classification of lakes based on mixing*. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1779-1787 pp.
- Lewis W. M. (1996) *Tropical lakes: How latitude makes a difference*. En: F. Shiemer y Boland B. T. (Ed.) *Perspectives in Tropical Limnology*. AcadPubl, Amsterdam. 43-64.
- Lewis W. M. (2002) *Causes for the high frequency of nitrogen limitation in tropical lakes*. Verth International Limnol. 28: 210-213.
- Lind, O. T. (1985) *Handbook of common methods in limnology*. Kendall/Hunt, Dubuque, 199 pp.
- Loferer-Krößbacher, M., Klima, J. y Psenner, R. (1998) *Determination of bacterial cell dry mass by transmission electron microscopy and densitometric image analysis*. Appl. Environ. Microbiol. 64: 688-694.
- Macek, M., Alcocer, J., Lugo, A., Martínez, M., Peralta, L. y Vilaclara, G. (2009) *Long term picoplankton dynamics in a warm-monomictic, tropical high altitude lake*. J. Limnol. 68(2):1-10.



- Marcos, H. y Reyes, P. (2012) *Variabilidad Anual del Picoplancton procarionte en el Lago Monomítico Cálido, La Preciosa, Puebla*. Tesis. UNAM, FES Zaragoza.
- Margalef, R. (1983) *Limnología*. Ed. Omega, Barcelona. 1010 pp.
- Márquez, M. J. (1991) *Probabilidad y estadística para ciencias químico biológicas*. McGraw-Hill, México. 67 pp.
- Martínez, M. (2010) *Efecto de cladóceros y copépodos sobre el fitoplancton del lago La Preciosa, Puebla*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM.
- Montoya-Moreno, Y. y Aguirre, N. (2010) *Dinámica del ensamblaje algal epifítico en el sistema de planes inundables de ayapel a través del pulso de inundación*. Rev. U. D. CA Act. & Div. Cient. 16(2): 491-500.
- Nahle, N. (1999) *Ecología*. Biology Cabinet Organization. New Braunfels, TX.
- Nordin, R.N. y Stein, J. (1980) *Taxonomic revision of Nodularia (Cyanophyceae/Cyanobacteria)*. Canadian Journal of Botany 58: 1211-1224.
- Oliva, M., Lugo, A., Alcocer, J., Peralta, L. y Oseguera, L. (2009) *Planktonic Bloom-forming Nodularia in the saline lake Alchichica, México*. Natural Resources and Environmental Issues. 15: 120-126.
- Ordoñez, E. (1995) *Los axalapascos del Estado de Puebla*. Paregones Instituto Geológico de México. 1(8): 348-405.
- Padisák, J., Krienitz, L., Scheffler, W., Koschel, R., Kristiansen, J. y Grigorszky, I. (1997) *Phytoplankton succession in the oligotrophic Lake Stechlin, Germany in 1994 and 1995*. Hydrobiologia (in press).

- Padisák, J., Krienitz, L., Koschel, R. y Nedoma, J. (2010) *Deep-layer autotrophic picoplankton maximum in the oligotrophic Lake Stechlin, Germany: origin, activity, development and erosion*. European Journal of Phycology. 32 (4): 403-416.
- Payne, A. I. (1986) *The Ecology of Tropical Lakes and Rivers*. Wiley, New York.
- Pernthaler, J., Šimek, K., Sattler, B., Schuwarzenbacher, A., Bobkova, J. y Psenner, R. (1996) *Short-term changes of protozoan control on autotrophic picoplankton in a oligomesotrophic lake*. Journal of Plankton Research, 18: 443-462.
- Porter, K. G. y Feig Y. S. (1980) *The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora*. Limnology and Oceanography. 25: 943-948.
- Posch, T., Loferer-Kröbber, M., Gao, G., Alfreider, A., Pernthaler, J. y Psenner, R. (2001) *Precision of bacterioplankton biomass determination: a comparison of two fluorescent dyes and of allometric and linear volume-to carbon conversions factors*. Aqua. Microbiol. Ecol. 25: 55-58.
- Ramírez, G. P. y Novelo, R. A. (1984) *La vegetación acuática vascular de seis lagos cráter del Estado de Puebla, México*. Bol. Soc. Bot. Méx. 46: 75-88.
- Ramos-Higuera, E., Alcocer, J., Ortega-Mayagoitia, E. y Camacho, A. (2008) *Nitrógeno: elemento limitante en un lago oligotrófico tropical*. Hidrobiológica 18(1) suplemento: 105-113.
- Reyes, C. M. (1979) *Geología de la Cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México. 62 pp.

- Rodríguez, A. (2002) *Aspectos paleolimnológicos de la historia reciente del lago La Preciosa, Puebla*. Tesis de Maestría. PCMyL. UNAM.
- Salgado Ugarte, I. H. (1992) *El análisis exploratorio de datos biológicos, fundamentos y aplicaciones*. ENEP Zaragoza, UNAM. Ediciones Marc. México. 243 pp.
- Sánchez, O., Herzig, N., Peters, E., Márquez Huitzil, R. y Zambrano, L. (2007) *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. SEMARNAT.
- Sánchez, X. (2013) *Análisis de la composición de ciliados en la interfase termoclina y/o oxiclina en lagos cráter de la Cuenca Oriental, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Carrera de Biología. FES Iztacala, UNAM.
- Sarmiento, H., Unrein, F., Isumbisho, M., Stenuite, S., Gasol, J. M. y Descy, J.P. (2008) *Abundance and distribution of picoplankton in tropical, oligotrophic Lake Kivu, Eastern Africa*. *Freshwater Biology* 53: 756-771.
- Sarmiento, H. (2012) *New paradigms in tropical limnology: the importance of the microbial food web*. *Hydrobiol.* 686: 1-14.
- Schallenberg, M. y Kalff, J. (1993) *The Ecology of sediment bacteria in lakes and comparisons with other aquatic ecosystems*. *Ecology* 74(3): 919-934.
- Sherr, B. F., Sherr, E. B., Andrew, T. L., Fallon, R. D. y Newell, S. Y. (1986) *Trophic interactions between heterotrophic protozoa and bacterioplankton in estuarine waters, analyzed with selective metabolic inhibitors*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 32: 169-179.
- Sherr, E. y Sherr B. F. (1991) *Planktonic microbes: Tiny cells at the base of the ocean's food webs*. *TREE* 6(2): 50-53.

- Shiraishi, F. (2012) *Chemical conditions favoring photosynthesis-induced CaCo<sub>3</sub> precipitation and implications for microbial carbonate formation in the ancient ocean*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 77:157-174.
- Sieburth, Mc. J., Smetaceck, V., Lenz, J. (1978) *Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions*. *Limnol. Oceanogr.* 23: 1256-1263.
- Smith R. L. y Smith, T. M. (2001) *Ecología*. Edit. Addison Wesley Pearson, 4<sup>ta</sup> edición. 642 pp.
- SMN. (2005) *Servicio Meteorológico Nacional*. México, D.F.  
<http://www.smn.gob.mx/>
- Stockner, J. G., Callieri, C. y Cronberg, G. (2000) *Picoplankton and other non-bloom-forming cyanobacteria in lakes*. En: Whitton, B.A., Potts, M. (Eds). *The ecology of cyanobacteria*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 195-231.
- Stotzky, G. y Norman, A. G. (1961) *Factors limiting microbial activities in soil*. *Archiv. Für Mikrobiologie* 40(4):341-369.
- Suess, E. (1980) *Particulate organic carbon flux in the oceans-surface productivity and oxygen utilization*. *Nature* 288: 260-263.
- Szelag-Wasielewska, E. y Stachnik, W. (2010) *Auto-and heterotrophic picoplankton in a lowland river (Warta River, Poland)*. *International Journal of Oceanography and Hydrobiology*. 39 (1): 137-146.
- Tribovillard, N., Récourt, P. y Trentesaux, A. (2010) *Bacterial calcification as a possible trigger for francolite precipitation under sulfidic conditions*. *Comptes Rendus Geoscience* 342:27-35.

- Turley, C., Bianchi, M., Christiaki, U., Conan, P., Harris, J. R., Psarra, S., Ruddy, G., Stutt, E. D., Tselepidis, A. y Van-Wambeke, F. (2000) *Relationship between primary producers and bacteria in an oligotrophic sea: the Mediterranean and biogeochemical implications*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 193: 11-18.
- Ubeda, A. M. y S. Estrada. (1994) *Variación temporal de las comunidades macrobentónicas de los lagos de la región de los Llanos, Puebla, México (composición, abundancia, distribución, asociaciones)*. Tesis de Licenciatura E.N.E.P. Iztacala, UNAM. México. 44 pp.
- Veldhuis, M. J. W. y Kraay, G. W. (1993) *Cell Abundance and Fluorescence of Picoplankton in relation to Growth irradiance and Nitrogen Availability in the Red Sea*. Netherlands Journal of Sea Research 31(2): 135-145.
- Vilaclara, G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. Gaytán. (1993) *Comparative description basic chemistry of crater-lakes in Puebla State, Mexico*. Verh. Int. Ver. Limnol. 25:435- 440.
- Vinner-Mozzini, Y., Zohany, T. y Gasith, A. (2003) *Dinoflagellate bloom development and collapse in lake Kinneret: A sediment trap study*. Journal of Plankton Research 25: 591-602.
- Vizuet, L. (2015) *Evaluación de la composición del procarioplancton durante el fenómeno de emblanquecimiento "whiting event" en el lago volcánico Atexcac, Estado de Puebla*. Tesis de Licenciatura. Carrera de Biología. FES Zaragoza, UNAM.
- Weisse, T. (1993) *Dynamics of autotrophic picoplankton in marine and freshwater ecosystems*. Adv. Microbiol. Ecol. 13: 327-370.
- Wetzel, R. G. y Lickens, G. E. (2000) *Limnological Analyzes*. 3<sup>rd</sup> ed. Springer. 429 pp.
- Wetzel, R. G. (2001) *Limnology, lake and river ecosystems*. 3<sup>rd</sup> ed. Academic Press. San Diego. 1006 pp.

- White, P. A., Kalff, J., Rasmussen, J. B. y Gasol, J.M. (1991) *The effects of temperature and algal biomass on bacterial production and specific growth rate in freshwater and marine habitats*. Microbial Ecology 21: 99-118.
- Widinski, R. W., Klein, R. M., Gosses, M. W., Schnake, K. K., Groves, G. M., Smith, C. D. y Pederson, C. L. (2001) *Nitrogen limitation of algal standing crop in strip mine lakes*. Transactions of the Illinois State Academy of Sciences 94(1): 37-53.
- Williams, W. D. (1964) *A contribution to lake tipology in Victoria, Australia*. Verh int Ver. Limnol. 15: 158-163.
- Wu, J. F., Sunda, W., Boyle, E. A. y Karl, D. M. (2000) *Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean*. Science 289: 759-762.
- Wurtsbaugh, W., Vincent, W., Alfaro, R., Vincent, C. y Richerson, P. (1985) *Nutrient limitation of algal growth and nitrogen fixation in a tropical alpine lake, Lake Titicaca (Peru/Bolivia)*. Freshwater Biology 15: 185-195.
- Yamasaki, S., Uneshida, H., Shimada, T., Shimeka, M. y Seok-Kyong. (2002) *Factors controlling Hypolimnetic ammonia accumulation in a lake*. Limnol. 3: 43-46.