



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**VARIABILIDAD ANUAL DEL PICOPLANCTON PROCARIONTE EN EL  
LAGO MONOMÍCTICO CÁLIDO “LA PRECIOSA”, PUEBLA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGO**

**PRESENTAN**

**HUNAHPU MARCOS BENITEZ**

**MIGUEL PAVEL REYES RODRÍGUEZ**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS  
LABORATORIO DE LIMNOECOLOGÍA MICROBIANA**

**MÉXICO, D.F.**

**OCTUBRE, 2012**

*La ciencia no debe ser un placer egoísta,  
los que tienen la suerte de poder dedicarse a las tareas científicas  
deben ser los primeros en poner sus conocimientos al servicio de la  
humanidad.*

**Karl Marx**

*La magia de una acción está en llevarla siempre hasta el final.*

**Gengis Khan**

*Si avanzo sígueme,  
si me detengo empújame  
si retrocedo mátame.*

**Ernesto Ché Guevara**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestra gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México máxima casa de estudios y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza que ha sido nuestro hogar durante estos años de formación académica.

Al Dr. Justo Salvador Hernández Avilés nuestro director de tesis por mostrarnos lo fantástico de la ciencia, que el mundo del saber por muy complicado que parezca es solo una historia por contar. Gracias por toda la entrega a su trabajo, a sus alumnos y el apoyo fraternal que brinda. Además de enseñarnos a trabajar con entusiasmo.

Al Dr. Miroslav Macek y a los integrantes del Proyecto de Investigación en Limnología Tropical de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala que nos brindaron su apoyo para la realización del trabajo de microscopía de epifluorescencia.

Al proyecto PAPIIT UNAM (IN222709-03) “Papel de la salinidad y salinización potencial en la estructura y funcionamiento de la red trófica planctónica en tres lagos similares a lo largo de un gradiente” en el que nuestro Director de tesis fungió como colaborador.

A nuestros sinodales: Biól. Angélica Elaine González Schaff, Dra. Bertha Peña Mendoza, Dr. José Luis Gómez Márquez y al Dr. Isaías Hazarmabeth Salgado Ugarte, por las observaciones y críticas en la elaboración de nuestro trabajo, así como su apoyo a nuestra formación durante la carrera.

## DEDICATORIAS

### **Hunahpu:**

*Agradezco a mi Madre Guadalupe, por todo su amor, tiempo, esfuerzo, paciencia y tenacidad para que yo llegara hasta este momento. ¡Gracias Mamá!*

*A Bety porque desde el momento en que la conocí hasta el día de hoy solo me desea lo mejor, por ser el sustento que no me deja caer, por mostrarme las maravillas de vivir, disfrutar y sobre todas las cosas a mostrarme el camino positivo de cualquier experiencia. Gracias por dedicarme tus buenos deseos aunque no estés presente. Por brindarme tanta luz y alegría a mi vida, te amo Bety.*

*A mi hermano Tlahuquecholli y mis seres queridos por confiar en mí, brindarme su ayuda y darme el ánimo de seguir adelante.*

*A mi camarada Madaleno por que más que un compañero de trabajo es una persona carismática, eficaz, divertida, elocuente y de gran ética. Gracias amigo por todo tu apoyo, consejos, críticas, sorpresas, ocurrencias, pero sobre todo por permitirme compartir la universidad como tu amigo.*

*A todos mis amigos y compañeros que han estado al pendiente de mí, y brindándome su cariño, apoyo y divertidísima amistad.*

**Pavel:**

*A mis padres por su dedicación, esfuerzo y trabajo para hacer esto posible. Disculpen también el tiempo que tuvieron que esperar para ver llegar este día, pero en serio que hasta que no pasa no entiende uno; “una cosa a la vez, porque el que mucho abarca poco aprieta”. Y recordarles que esto apenas comienza, es ahora que me gustaría se voltearan los papeles y contribuir realmente al bienestar de nuestra familia.  
¡Gracias!*

*A Nancy por su cariño, tiempo y comprensión, contigo conocí un mundo que para mí era desconocido. Entiendo ahora a Pablo Neruda cuando dijo “quiero hacer contigo lo que la primavera hace con los cerezos, florecer”.  
¡Te quiero mucho chaparrita!*

*Al Madaleno por compartir tantos momentos de emoción, miedo, alegría, tristeza y realidades virtuales. Gracias a ti conocí mi lado deportivo, montañero y luego parkourero-gimnasta. Que buenos días de vagancia deportiva hemos vivido y los que nos faltan. Recuerda tenemos que llegar a la cima del Iztaccíhuatl, bajar por las grapas y claro, llegar al bosque escondido en lo alto de esa montaña, detrás de Atexcac.  
¡Chido camarada!*

*A todas esas personas que después de conocerlas han dejado en mí una pequeña parte de ellos, ya sea en forma de cariño, emoción, palabras de aliento, discusiones, experiencias y que eso ha contribuido a lo que soy ahora.  
¡Qué chido es compartir la vida con ustedes!*

*A la Brigada Multidisciplinaria de Apoyo a las Comunidades de México y a todos sus integrantes que hicieron despertar en mí la solidaridad, compañerismo y el sentimiento revolucionario enfocado al beneficio de otras personas.  
¡Gracias camaradas!*

# ÍNDICE

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
ANTECEDENTES .....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
JUSTIFICACIÓN .....	5
HIPÓTESIS .....	5
OBJETIVOS .....	5
ZONA DE ESTUDIO .....	6
MÉTODO .....	9
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>12</b>
<b>Parámetros físicos y químicos .....</b>	<b>12</b>
Temperatura .....	12
Zona eufótica .....	14
Oxígeno disuelto .....	15
Salinidad, conductividad, alcalinidad y pH .....	17
Nutrientes .....	18
Nitratos $\text{NO}_3^-$ .....	18
Nitritos $\text{NO}_2^-$ .....	20
Amonio $\text{NH}_4^+$ .....	21
Fósforo soluble reactivo .....	23
Fósforo total .....	25
<b>Parámetros Biológicos .....</b>	<b>27</b>
Abundancia del picoplancton autotrófico (APP) .....	27
Biomasa del picoplancton autotrófico .....	29
Abundancia del picoplancton heterotrófico (HPP) .....	30
Biomasa del picoplancton heterotrófico .....	33
<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....</b>	<b>34</b>
Abundancia del picoplancton autotrófico .....	34
Contenido de carbono del picoplancton autotrófico .....	36
Biomasa del picoplancton autotrófico .....	37
Abundancia del picoplancton heterotrófico .....	39
Contenido de carbono del picoplancton heterotrófico.....	41
Biomasa del picoplancton heterotrófico .....	42
Correlaciones entre variables biológicas y fisicoquímicas.....	44

<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	47
<b>Parámetros físico-químicos</b> .....	47
Temperatura .....	47
Oxígeno disuelto .....	48
Salinidad, conductividad, alcalinidad y pH .....	50
Nutrientes .....	51
<b>Parámetros biológicos</b> .....	55
Abundancia del picoplancton autotrófico .....	55
Contenido de carbono del picoplancton autotrófico.....	57
Biomasa del picoplancton autotrófico .....	57
Abundancia del picoplancton heterotrófico .....	58
Contenido de carbono del picoplancton heterotrófico .....	60
Biomasa del picoplancton heterotrófico .....	61
<b>CONCLUSIONES</b> .....	62
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	63
<b>ANEXO</b> .....	73
I. El lago La Preciosa durante el estudio 2009-2010 .....	73
II. Metodología de campo y laboratorio .....	78
III. Picoplancton heterotrófico y autotrófico .....	81
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<i>Fig. 1</i> Modelo Batimétrico de La Preciosa basado en la batimetría presentada por Arredondo et al. (1983) .....	9
<i>Fig. 2</i> Diagrama espacio temporal de la temperatura. ....	13
<i>Fig. 3</i> Diagrama espacio temporal del oxígeno disuelto.....	16
<i>Fig. 4</i> Diagrama espacio temporal de los nitratos.....	19
<i>Fig. 5</i> Diagrama espacio temporal de los nitritos.....	20
<i>Fig. 6</i> Diagrama espacio temporal de amonio.....	22
<i>Fig. 7</i> Diagrama espacio temporal del fósforo soluble reactivo.....	24
<i>Fig. 8</i> Diagrama espacio temporal del fósforo total.....	26

Fig. 9 Diagrama espacio temporal de la abundancia del APP.....	27
Fig. 10 Diagrama espacio temporal de la abundancia de agregados coloniales de APP..	28
Fig. 11 Diagrama espacio temporal de la biomasa del APP.....	29
Fig. 12 Diagrama espacio temporal de la abundancia del HPP. ....	31
Fig. 13 Diagrama espacio temporal de la abundancia flocular de HPP.....	32
Fig. 14 Diagrama espacio temporal de la biomasa del HPP. ....	34
Fig. 15 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del APP por mes. ....	35
Fig. 16 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del APP por estrato. ....	36
Fig. 17 Diagrama del análisis de cajas múltiples con bigote y muesca para el contenido de carbono del APP por mes. ....	37
Fig. 18 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del APP por mes. ....	38
Fig. 19 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del APP por estrato. ....	39
Fig. 20 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del HPP por mes. ....	40
Fig. 21 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del HPP por estrato. ....	41
Fig. 22 Diagrama del análisis de cajas múltiples con bigote y muesca para el contenido de carbono del HPP por mes. ....	42
Fig. 23 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del HPP por mes. ....	43
Fig. 24 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del HPP por estrato.....	44
Fig. 25 Composición iónica de La Preciosa con base en Armienta et al. (2008) .....	51

## ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Localización y ubicación geográfica de la Cuenca Oriental, en el recuadro verde (Google Earth, 2010). ..... 7

Foto 2. Fotografía Aérea, Zona E14B Línea 360, Veracruz. Lagos Cráter: AL Alchichica, LP La Preciosa y LQ Quechulac (INEGI-SINFA 22 Febrero-2006).....8

Foto 3. Imagen satelital del lago La Preciosa destacando su forma próxima a triángulo, el margen de sus coordenadas (verde) y su longitud máxima en azul (Google Earth, 2010).....8

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro A. Concentraciones promedio  $\pm$  desviación estándar y rango (mínimo, máximo) de parámetros químicos en el lago La Preciosa durante un ciclo anual. ....17

Cuadro B. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la abundancia del APP entre meses, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). ..... 35

Cuadro C. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la biomasa del APP entre meses, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). .....38

Cuadro D. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la biomasa del APP por estrato, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). .....39

Cuadro E. Prueba de rangos múltiples de Tukey para la abundancia del HPP por estrato, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). .....41

Cuadro F. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la biomasa del HPP entre meses, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). .....43

Cuadro G. Correlaciones de Spearman entre parámetros biológicos del APP y las variables físicas y químicas. ....45

Cuadro H. Correlaciones de Spearman entre parámetros biológicos del HPP y las variables físicas y químicas. ....46

Cuadro I. Concentraciones promedio  $\pm$  desviación estándar de nutrientes en el lago La Preciosa durante un ciclo anual con base en la clasificación de Wetzel (2001). .....52

## RESUMEN

Se evaluó la variación espacial y temporal de la comunidad picoplanctónica heterotrófica (HPP) y autotrófica (APP) en el lago volcánico tipo maar La Preciosa durante un ciclo anual y su relación con la dinámica de monomixis cálida del sistema. Para el picoplancton se determinaron parámetros biológicos (abundancia, contenido de carbono y biomasa) a través de microscopía de epifluorescencia y análisis de imágenes. El HPP fue teñido con el fluorocromo DAPI (4,6-diamidino-2-fenilindol) que permite observar el ADN bacteriano con un filtro de luz UV. Mientras el APP al presentar ficoeritrinas y ficocianinas autofluorescen bajo la excitación de luz verde. Asimismo, se determinaron mensualmente parámetros limnológicos como la temperatura, el oxígeno disuelto, la conductividad, el pH y los nutrientes inorgánicos (nitrógeno y fósforo). En el Lago La Preciosa se registró una mayor diversidad de morfotipos bacterianos (cocos, bacilos, espirilos, vibrios y filamentos) en comparación con lagos más salinos de la misma cuenca. La distribución del HPP estuvo determinada en general por la hidrodinámica del lago, de tal modo que la abundancia y la biomasa tendieron a ser homogéneas en la columna de agua durante la mezcla, con un decremento consecutivo con la profundidad en la estratificación térmica. Presentándose un máximo de biomasa hacia el hipolimnion en la estratificación tardía en respuesta a una acumulación de nutrientes. Mientras la distribución del APP dependió de la disponibilidad de los nutrientes y de la zona eufótica. Así, presentó sus máximas abundancias y biomasa en las capas superficiales durante la circulación desarrollando como estrategia la formación de agregados coloniales y en el metalimnion donde se dio una acumulación de nutrientes durante la estratificación, siendo las picocianobacterias activas incluso a una radiación fotosintéticamente activa cercana al 0.1%. El HPP aportó más biomasa que el APP, pudiendo ser esta fracción sumamente importante como enlace de transferencia de energía a través del circuito microbiano en ambientes poco productivos como La Preciosa. Observaciones *in situ* puntuales y experimentales así como el monitoreo del sistema son necesarios para el mejor entendimiento de fenómenos como años de Niño o eventos blanco (precipitación de calcio) y su relación con la dinámica del picoplancton.

## INTRODUCCIÓN

En el territorio nacional, los cuerpos acuáticos interiores son de vital importancia para las comunidades bióticas, especialmente en las zonas áridas donde los lagos juegan un papel esencial como reservorios, además de que son estos sistemas los principales aportadores de productividad primaria por sus comunidades planctónicas.

Las fracciones del plancton se clasifican por su tamaño de la siguiente manera: picoplancton (0.2 a 2  $\mu\text{m}$ ), nanoplancton (2-20  $\mu\text{m}$ ), microplancton (20-200  $\mu\text{m}$ ), y macroplancton (200-2000  $\mu\text{m}$ ) (Sieburth *et al.*, 1978). Cabe destacar que el picoplancton es un grupo muy abundante en sistemas marinos y dulceacuícolas de todo el mundo (Kalf, 2001), contribuyen del 10 al 90% de la biomasa y/o producción primaria en estos ambientes (Stockner, 1991).

El picoplancton a su vez suele dividirse en dos categorías funcionales: picoplancton autótrofo, APP por sus siglas en inglés, este tiene como características que utiliza como fuente de energía la luz y como fuente de carbono compuestos inorgánicos ( $\text{CO}_2$ ). Y el picoplancton heterótrofo (HPP) que emplea fuentes de energía química y el carbono de sustratos orgánicos (Sieburth *et al.*, 1978).

La mayor contribución del APP es como productores primarios en la base de las cadenas tróficas, tanto por su contribución en biomasa total como en producción primaria, siendo mucho más relevante en bajos niveles tróficos (Sommaruga y Roberts, 1997). Sin embargo, en lagos oligotróficos se ha reportado una variación entre el 10 y el 80% de la productividad fototrófica total atribuida a estos microorganismos (Callieri y Stockner, 2002).

El HPP lo conforman principalmente bacterias heterótrofas, las cuales al ser muy abundantes contribuyen considerablemente más al biovolumen del picoplancton total que las células autótrofas (Callieri y Pinolini, 1995). Los picoeucariontes en sistemas lacustres son frecuentemente menos abundantes que las picocianobacterias (Pcy) en un orden de magnitud. Weisse (1993) sugiere que los factores que controlan la distribución espacial y temporal de ambos grupos difieren marcadamente por sus requerimientos nutricionales y de luz, así como por sus tasas de crecimiento potencial específicas.

El APP está compuesto de cianobacterias procariontes cocoides, proclorofitas y las más pequeñas algas de forma y tamaño similar, además las picocianobacterias cuentan con ficocianinas y ficoeritrinas como fotoreceptores para realizar la fotosíntesis. Las cianobacterias coloniales son más prominentes en ecosistemas de agua dulce que de agua salada. En la actualidad no existe una clave para la identificación del APP, debido a la falta de organelos celulares y estructuras internas de fácil identificación; para su estudio se utilizan técnicas sofisticadas como la citometría de flujo o el análisis vía microscopía de epifluorescencia (Weisse, 1993).

## ANTECEDENTES

Ramírez-García y Vázquez-Gutiérrez (1988) realizaron un estudio en seis lagos cráter de la Cuenca Oriental de Puebla incluyendo La Preciosa, evaluando las variables físico-químicas del agua y del sedimento y analizando las relaciones que tienen estas variables con la composición florística de hidrófilas y con la producción de biomasa de las especies más abundantes. En esta investigación encontraron que los iones más abundantes fueron los carbonatos de magnesio. Además de que estos fueron el eje de las mayores correlaciones con las demás variables y que la producción de biomasa se vio afectada, principalmente, por las variables de sedimento como la textura.

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992) se reportó que dado que en la zona centro de la Cuenca predomina el clima semi-árido, esta se encuentra expuesta a los efectos adversos de un cambio climático.

Komárek J. et al. (2002) contribuyeron al conocimiento de las cianoprocariotas planctónicas en la zona central de México y mediante un estudio realizado en mayo de 1992, y de marzo a septiembre de 1993 reportaron dos especies de cianoprocariotas planctónicas en el lago La Preciosa: *Anabaena manguinii* (Bourr.) Kom. 1974 y *Planktolyngbya tallingii* Kom. et Kling 1991.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con un estudio paleolimnológico del lago La Preciosa, Puebla el registro sedimentario indicó condiciones de un lago de agua dulce y alcalina durante los últimos 5,000 años, que ha venido incrementado su salinidad y alcalinidad recientemente (ca. 100-150 años) debido a un probable cambio ambiental hacia un clima más árido en la localidad y posiblemente también asociado con un impacto humano reciente (Rodríguez-Ramírez et al. 2002). Así mismo, se registra una tendencia hacia condiciones de disminución en el nivel lacustre. Y actualmente, las condiciones químicas del lago señalan una situación limítrofe entre agua dulce y subsalina (Juárez-Bustos et al. 2002).

Además los pobladores indican que a menudo se abren nuevos pozos para riego, por lo que resulta evidente que el número de éstos en la actualidad es mucho mayor. Los pozos se encuentran en La Preciosa así como en el resto de los lagos volcánicos de la región (Alcocer et al., 2005).

En La Preciosa se reporta que se desarrollaron cultivos de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) por parte de los habitantes de la zona. Sin embargo algunas de ellas se escaparon y establecieron en el lago, lo que favoreció una pesquería deportiva incipiente. Al momento no existen estudios del impacto de estas especies exóticas introducidas sobre las poblaciones locales de charales, no obstante al ser carnívoras, éstas depredarán juveniles y adultos de charales. Resulta necesario recordar que los

charales de los lagos-cráter son endémicos de cada uno de ellos (en *La Preciosa Poblana alchichica squamata* y *Poblana letholepis*) por lo tanto, su existencia está puesta en riesgo no sólo por la disminución del nivel de los lagos y la contaminación, sino ahora por la presencia de especies depredadoras más grandes y voraces. Aparte de las introducciones, son pocos los casos de impactos directos en otros organismos. Sin embargo resulta importante mencionar que las aves acuáticas han disminuido notablemente debido a la reducción o eliminación de la zona litoral de los lagos (menor disponibilidad de zonas de alimentación, refugio, reproducción, etc.), así como al incremento de la caza no controlada llevada a cabo por locales y foráneos (Alcocer et al., 2005).

La deforestación provoca, sin duda, el efecto ambiental más notable sobre el ciclo hidrológico. La vegetación cumple un importante papel en el movimiento natural del agua dado que, entre otras, realiza las funciones de intercepción del agua de lluvia, captación de la niebla, conducción de agua hacia el suelo, y regulación de la velocidad de escurrimiento. La denudación de un área tiene, por lo tanto, severos efectos sobre una porción importante del ciclo hidrológico dado que aumenta la velocidad de escurrimiento y disminuye la cantidad de agua que se infiltra. Esto a su vez produce cambios en la recarga de los acuíferos (manantiales), aparición de inundaciones catastróficas, reducción de la humedad de las laderas (lo cual facilita la aparición de incendios forestales), cambios en la dinámica geomorfológica y, por supuesto, erosión (Toledo et al., 1989).

En la cuenca se practica la tala y aclareo del bosque, sobrepastoreo y sobreexplotación agrícola del suelo, lo que aunado a las lluvias torrenciales que en ocasiones ocurren en el área, contribuye a acelerar los procesos erosivos (Koterba y Oliveri, 1983). Un suelo erosionado presenta una capacidad limitada para la captación de agua pluvial y, por consiguiente para la recarga de los acuíferos, en razón de la falta de vegetación y suelo (Alcocer et al., 2005).

Todo lo anterior indica que los lagos de la Cuenca Oriental pueden estar sometidos a una fuerte presión ambiental que aunado a la falta de estudios limnológicos no permite tomar decisiones de conservación y manejo de los mismos. Lagos como La Preciosa que tienen un origen volcánico tipo maar, han sido catalogados como oligotrófico, lo que hace suponer que el picoplancton sea componente muy importante en las comunidades pelágicas al ser un ambiente con pocos recursos (Weisse, 1993). De lo que deriva la importancia de su estudio, así como de los parámetros limnológicos asociados con su desarrollo.

## JUSTIFICACIÓN

La importancia del picoplancton en ambientes oligotróficos radica en ser un componente principal de la base del circuito microbiano, no obstante, su diminuto tamaño dificulta el estudio y por consiguiente es escaso el conocimiento del mismo. En el presente trabajo se pretende aportar información para el mejor entendimiento de la distribución espacio-temporal del picoplancton, ya que cuenta con ciclos de vida cortos y posee respuesta rápida a los cambios en el ambiente, se puede determinar su comportamiento y relacionarlo con las condiciones limnológicas del sistema.

## HIPÓTESIS

Los fenómenos de variación térmica y gradientes químicos presentes en el lago, determinan la distribución espacio-temporal del picoplancton a lo largo de la columna de agua, ya que este posee ciclos de vida cortos y presentan respuesta rápida a los cambios en el ambiente.

El picoplancton heterotrófico incrementará en biomasa durante la estratificación bien establecida y tardía hacia el hipolimnion debido a la acumulación de nutrientes inorgánicos.

El picoplancton autotrófico presentará un afloramiento en los estratos cercanos a la superficie durante la etapa de mezcla por el incremento y la homogeneidad de nutrientes y por su capacidad para fotosintetizar dentro de la zona fótica; asimismo al presentarse la estratificación su distribución también se verá restringida al metalimnion donde se espera una acumulación de nutrientes.

## OBJETIVOS

### General:

Determinar la dinámica espacio-temporal del picoplancton asociada con los fenómenos de variación térmica y gradientes químicos presentes en el sistema durante un ciclo anual.

### Particulares:

1. Evaluar la variación de parámetros físico-químicos en el lago.
2. Cuantificar la concentración de los nutrientes presentes, determinar el estado trófico del lago y asociarla con la distribución espacio temporal del picoplancton.
3. Cuantificar los parámetros biológicos del picoplancton (densidad, biomasa y contenido de carbono) y evaluar su variación espacio-temporal.
4. Correlacionar los parámetros limnológicos con los del picoplancton.

## ZONA DE ESTUDIO

El lago se encuentra en la Cuenca Oriental (Foto 1) que comprende los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz dentro del polígono: Latitud 19°42'00" - 18°57'00" N, Longitud 98°02'24" - 97°09'00" W (CONABIO (2011) [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx)).

Los dos grandes llanos que forman parte de esta cuenca son de origen lacustre, llamados Llanos de San Andrés y Llanos de San Juan, que se encuentran al noroeste de la meseta poblana entre los poblados de San Salvador El Seco y Perote. En los llanos de San Andrés se encuentran los lagos Aljojuca y Tecuitlapa y en los llanos de San Juan los lagos de Atexcac, La Preciosa, Quechulac y Alchichica.

Estos lagos tipo Maars, se originaron de explosiones volcánicas que probablemente ocurrieron entre el terciario medio y el cuaternario superior. Las explosiones ocasionaron fallas y rupturas en el manto freático de la región que con el tiempo llenaron los cráteres de agua (Fuentes, 1972; Gasca, 1982; Arredondo *et al.*, 1983).

El lago La Preciosa se localiza a 4 km al sureste del lago cráter Alchichica y muy cerca del lago cráter Quechulac (Foto 2). Presenta una forma irregular, sus bordes sobresalen muy poco a la llanura; todo el contorno del lago está formado de los materiales cineríticos arrojados por la explosión. Aunque un estribo bajo de la Sierra de Techachalco casi llega a los bordes del lago, el material acumulado impide ver las pizarras y calizas, así como las rocas intrusitas que componen dicha sierra (Ordóñez, 1905).

Lago de Las Minas es el otro nombre que se le da al lago cráter "La Preciosa". La denominación se debe a unas minas de oro abandonadas que se hallan en la región sureste. Las tonalidades cambiantes del rojo al azul dan un aspecto característico al cono, y son al parecer la causa de su nombre. Existe una baja salinidad y como consecuencia una rica ictiofauna, y cierta abundancia de aves, anfibios y reptiles lacustres. Los colores rojos en la zona litoral se deben a macrofitas acuáticas que crece en el lago. De la misma manera Quechulac presenta un cráter muy erosionado, además permite la llegada de más agua de lluvia y arroyos, con lo que su salinidad descende, permitiendo el desarrollo de la vida. Aquí también se practica el wakeboard (deporte acuático), buceo y la pesca (México desconocido (1996) [www.mexicodesconocido.com.mx](http://www.mexicodesconocido.com.mx)).

En la Cuenca Oriental, de acuerdo con la modificación de la clasificación climática de Köpen (García E., 2004), los climas predominantes son el semiárido que se distribuye en la parte central y más baja a una altitud entre 2300 y 2400 m s.n.m., y el templado subhúmedo con lluvias en verano, el cual rodea en forma concéntrica al clima semiárido. Hacia las parte altas, el clima es de frío a muy frío.

La temporada de lluvias abarca los meses de abril a octubre, siendo agosto y septiembre los más lluviosos, con valores máximos de 50 a 140 mm. Asimismo la evaporación potencial media anual es de 1460 mm/año, mientras que la evapotranspiración potencial, es de 472 mm/año (CNA, 2002).

En cuanto a la vegetación nativa presenta pastizales y una pequeña extensión de bosque de pino en los alrededores; aunque la mayor parte la componen cultivos introducidos principalmente de alfalfa, los cuales han tenido un incremento en cuanto a su extensión a través de los años (Fotos 2 y 3), llegando a estar presentes en los alrededores del lago; esto debido a la creciente tasa de deforestación y el posterior uso del suelo para la agricultura.

El lago La Preciosa se ubica entre los paralelos  $19^{\circ}22'32.78''$  -  $19^{\circ}21'49.14''$  de latitud norte y los meridianos  $97^{\circ}22'56.77''$  -  $97^{\circ}23'30.58''$  de longitud Oeste (Foto 3 y Fig.1), a una altitud de 2,330 m s.n.m. Presenta una profundidad máxima de 43m, una longitud máxima de 1,300m, un área superficial de  $0.78 \text{ Km}^2$  y un volumen de  $18,200,000 \text{ m}^3$ .

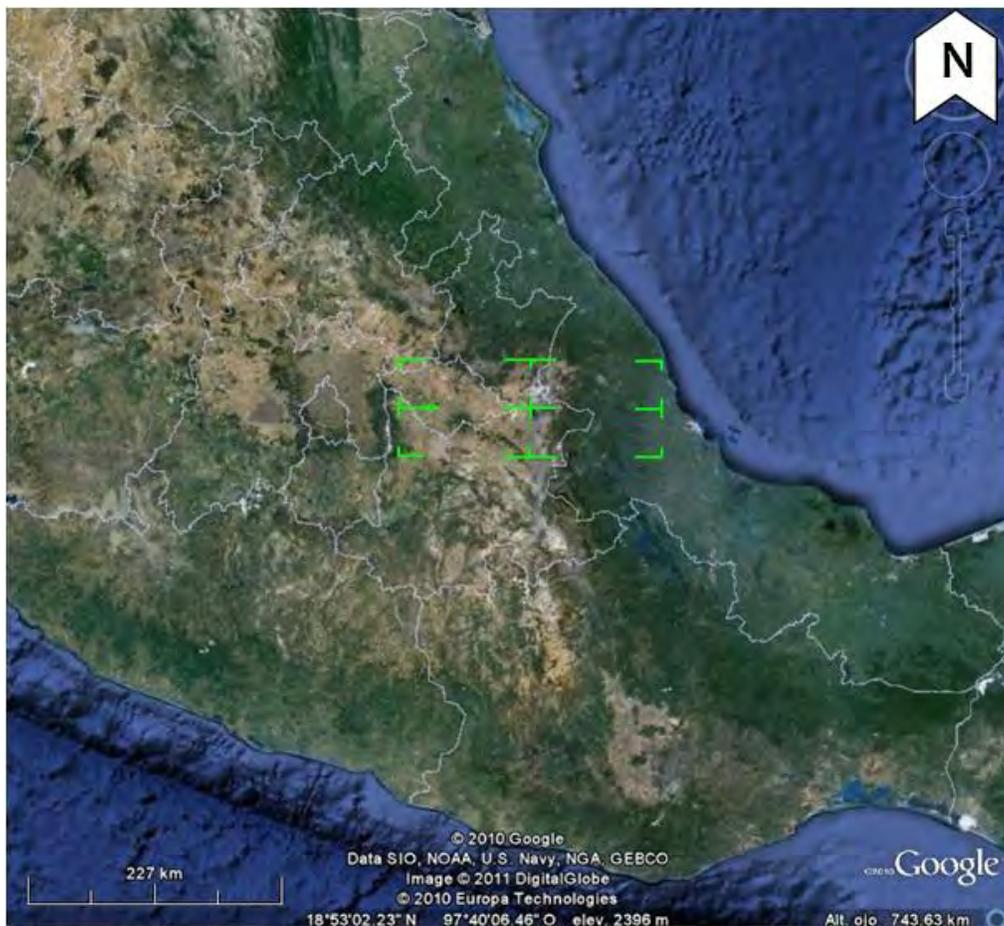


Foto 1. Localización y ubicación geográfica de la Cuenca Oriental, en el recuadro verde (Google Earth, 2010).

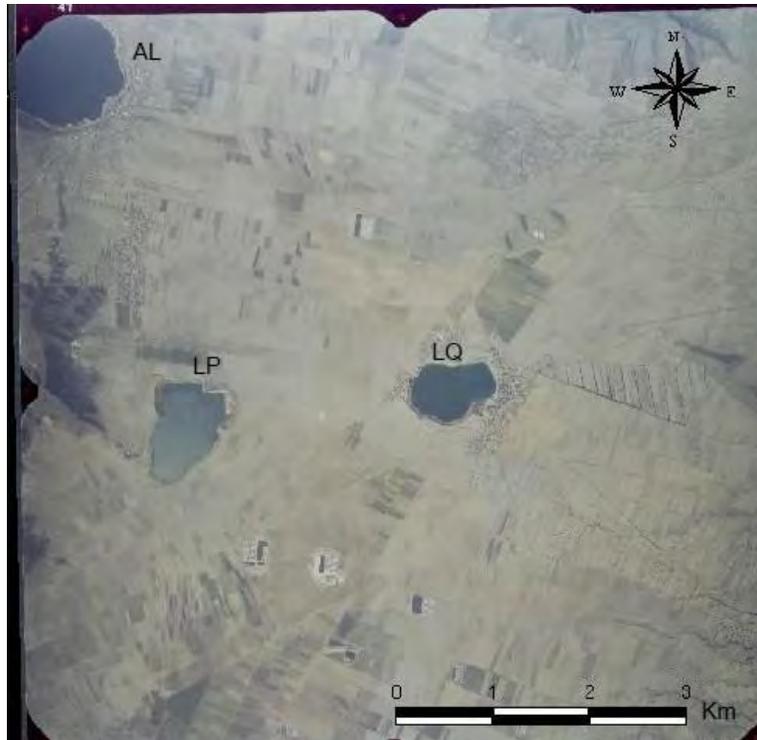


Foto 2. Fotografía Aérea, Zona E14B Línea 360, Veracruz. Lagos Cráter: AL Alchichica, LP La Preciosa y LQ Quechulac (INEGI-SINFA 22 Febrero-2006).



Foto 3. Imágen satelital del lago La Preciosa destacando su forma próxima a triángulo, el margen de sus coordenadas (verde) y su longitud máxima en azul (Google Earth, 2010).

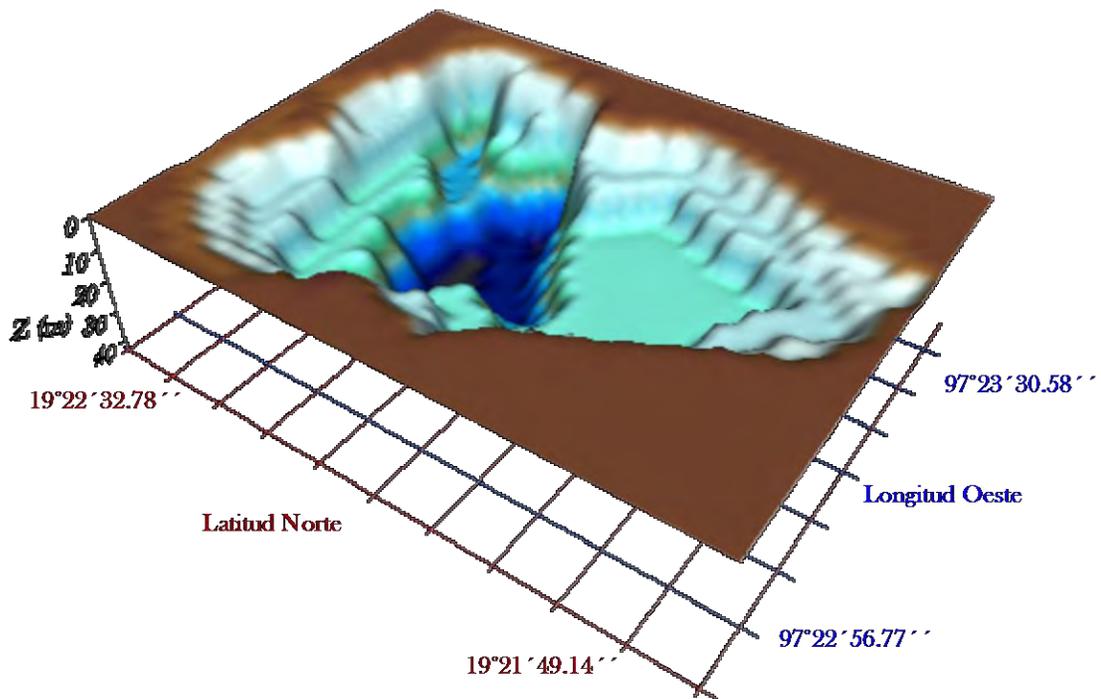


Fig. 1. Modelo Batimétrico de La Preciosa basado en la batimetría presentada por Arredondo et al. (1983).

## MÉTODO

Los métodos empleados se dividieron en tres fases: campo, laboratorio y gabinete.

**Campo.** Se realizaron muestreos mensuales del perfil vertical de la columna de agua del sistema procurando el punto más profundo del lago (43m), se evaluó la temperatura ambiental, el porcentaje de nubosidad, oxígeno disuelto y temperatura, (Oxímetro YSI modelo 57 Ohio USA con  $\pm 0.05$  mg/L de precisión para oxígeno y de  $\pm 0.05$  °C para temperatura), visibilidad al disco de Secchi.

Para la selección de las profundidades de muestreo, primero se cuantificó con el oxímetro (temperatura y oxígeno disuelto) delimitando los límites de la termoclina, oxiclina y del oxígeno disuelto muestreados, además de tener representados los distintos gradientes y estratos presentes en la columna de agua durante el período de estratificación térmica. Mientras para la mezcla se consideraron 5 profundidades: superficie, fondo y otras tres ubicadas a lo largo de la columna de agua.

Cada muestra de agua para evaluar el picoplancton se fijó con formalina al 2% (Straškrabova et al., 1999) y las muestras destinadas para nutrientes se conservaron en hielo con sal dentro de una hielera, para su transportación al laboratorio. Estas muestras se congelaron por debajo de los 4°C con el fin de inhibir la actividad biológica y preservarlas para su determinación en los siguientes días (menos de 7).

*In situ* se realizaron mediciones de oxígeno disuelto (Método de Winkler además del oxímetro) y alcalinidad por el Método de indicadores (Cervantes S. A., 1980). También se registró la conductividad eléctrica y salinidad con un conductímetro Corning NY USA de  $\pm 0.01$  de precisión para ambos parámetros, y el pH con un potenciómetro Conductronic modelo pH 10 de  $\pm 0.01$  precisión).

**Laboratorio.** Se aplicaron los métodos para el análisis de parámetros físico-químicos: dureza total (método de titulación con EDTA complejométrico), dureza de calcio (método complejométrico). Y los nutrientes se determinaron con técnicas colorimétricas de la siguiente forma: nitratos por el método del ác. fenoldisulfónico, nitritos; método del ácido sulfanílico, amonio; método del fenato, fosfatos; método del fosfomolibdato y para fósforo total se hidrolizaron las diferentes formas de fósforo a fosfatos, por tratamiento con ácido, calentamiento y presión. Se midió la concentración de fosfato por el método del fosfomolibdato (Cervantes S. A., 1980). En estas técnicas se usó un espectrofotómetro Spectronic 20D Milton Roy de  $\pm 0.001$  de precisión en absorbancia y  $\pm 0.1$  de transmitancia.

El picoplancton autotrófico se evaluó antes de 24 horas por medio de muestras concentradas en membranas de policarbonato (con un diámetro de  $0.2 \mu\text{m}$ ; Poretics, USA) montadas con aceite de inmersión y se observaron por medio de autofluorescencia utilizando un filtro Cy3-luz verde (microscopio de epifluorescencia Leica, Germany). Mientras que para el picoplancton heterotrófico además de haber concentrado la muestra en la membrana, también se le agregó  $50 \mu\text{L}$  del fluorocromo DAPI (4,6-diamidino-2-fenilindol). Después la membrana pasó 15 minutos en alcohol al 80% y 10 min. en agua libre de bacterias, y se añadió una gota de Vecta Shield (Fluorescent Mounting Media, Vector Labs) y se montó en un portaobjetos, se observó al microscopio de epifluorescencia con un filtro UV (este tipo de luz hace fluorecer el DNA bacteriano teñido). Se tomaron 10 fotografías (cámara Canon S-45 montada al microscopio) en promedio dependiendo del número de células presentes en las muestras.

La densidad del HPP se contó directamente al microscopio por medio de una cuadrícula, se tomaron diferentes campos tratando de cubrir toda la muestra hasta llegar a 600 células, este conteo se transfirió a una hoja de cálculo de Excel (Microsoft Office, 2007) con la cual se determinó la densidad tomando en cuenta el conteo de células en cada cuadro en el microscopio que tiene una área de  $277.55 \mu\text{m}^2$ .

La densidad del APP se contó a través de una cuadrícula diseñada para usarse en Microsoft Power Point (Microsoft Office, 2007) y se contó con base en las fotografías anteriormente tomadas, este conteo se llevó a una hoja de cálculo con la cual se determinó la densidad tomando en cuenta el conteo de células en cada fotografía y mediante el uso de una constante que relaciona el área de cada cuadro y el área de la membrana.

**Gabinete.** Se realizó el análisis de imágenes por medio del software Imagen J (USA) el cual permitió corregir las fotografías, separar células coloniales o en división, eliminar halo (brillo excesivo alrededor de las células) y mucílago; para después proporcionar una serie de valores morfométricos (largo, ancho y feret) que fueron insertados en una hoja de cálculo de Microsoft Excel (Microsoft Office, 2007) con un macros específico (Instituto Hidrobiológico de la República Checa) en donde se calcularon los valores de contenido de carbono celular [fgC cel<sup>-1</sup>] y biovolumen (volumen bacteriano) [μm<sup>3</sup> L<sup>-1</sup>].

El contenido de carbono del HPP se estimaron utilizando un factor de conversión alométrica específicamente elaborado para el fluorocromo utilizado (DAPI)  $CC=218 \times V^{0.86}$  (Loferer-Krößbacher *et al.* 1998). Mientras que para el APP, el CC obtenido del macros se multiplicó por 200 (Weisse, 1993).

La biomasa se calculó mediante el producto de la densidad y el contenido de carbono, el resultado se multiplicó por 0.000001 para obtener el valor en μgC L<sup>-1</sup>.

Se realizaron análisis estadísticos de los datos que comenzaron con la verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad con un gráfico de probabilidad normal, se hizo una transformación logarítmica en caso de no ser normales; cumplidos los requisitos se realizó un análisis paramétrico (ANOVA) de los datos. Por el contrario si los datos no se pudieron normalizar se procedió a realizar un análisis no paramétrico (Kruskal Wallis). Además de un diagrama de caja y bigote con muesca en donde se pudieron o no encontrar diferencias significativas entre estratos o meses de muestreo. Se incluyeron correlaciones entre las variables limnológicas y los parámetros del picoplancton con Statgraphics Centurión XV (StatPoint, 2007).

Al contar con todos estos valores se procedió a la elaboración de bases de datos, gráficas y diagramas espacio-temporales con Surfer 8 (Golden Software, 2002) para una mejor comprensión del estudio.

## RESULTADOS

### Parámetros físicos y químicos Temperatura

El presente estudio abarcó año y medio de enero de 2009 a junio de 2010, que correspondieron con periodos alternados de mezcla y estratificación.

En el lago se registró un período de mezcla durante el invierno hemisférico y uno de estratificación el resto del tiempo durante un ciclo anual (Fig. 2), que de acuerdo con la clasificación de Hutchinson (1957) corresponde con un lago monomítico cálido.

La etapa de mezcla abarcó de finales de diciembre a principios de marzo con temperaturas que fluctuaron entre 13.5°C y 14°C. Y la estratificación se presentó durante los 8 meses siguientes. El período de estratificación se puede caracterizar en tres etapas:

-Estratificación temprana (de finales de marzo a principios de junio). Es cuando la mezcla inducida por los vientos invernales pierde fuerza y ya no logra homogeneizar toda la columna de agua, teniendo solo un efecto directo sobre la superficie (epilimnion), además se presenta un incremento de temperatura con la llegada de los meses primaverales.

Al inicio de la estratificación, el límite superior (top) de la termoclina se ubica cerca del espejo de agua (4 m) hasta alcanzar un límite inferior (bottom) a los 14 m de profundidad, que implica una amplitud de 10 m. En el lago este período registró una temperatura máxima de 20.4°C en la superficie y una mínima de 13.5°C hacia el fondo.

-Estratificación bien establecida (de mediados de junio a finales de septiembre). En esta etapa se registra un gradiente máximo de temperatura cercano a 1°C por metro de profundidad, este a su vez genera un gradiente marcado de densidad. Durante esta fase el top de la termoclina se profundizó de 12 a 17 m, presentando una amplitud de 8 a 9 metros con temperaturas que fluctuaron entre los 13°C y los 21°C. En esta etapa quedan claramente definidos los estratos en la columna de agua: epilimnion, metalimnion e hipolimnion y el máximo gradiente fue registrado en agosto, con 1.17°C de los 16 a los 17 metros en el perfil vertical.

-Estratificación tardía (de finales de septiembre a finales de diciembre). En esta etapa la termoclina se profundiza al máximo (25m) disminuyendo su amplitud (3 m). La temperatura en las capas superficiales disminuye al finalizar las estaciones cálidas del año debilitándose también el gradiente del metalimnion. La mezcla comienza a afectar una mayor parte de la columna de agua hasta que finalmente se rompe por completo la estratificación.

Destaca el hecho de que la amplitud del epilimnion, metalimnion e hipolimnion a lo largo del período de estratificación cambia a través del tiempo, lo que se asoció directamente con la ubicación y el tamaño de la termoclina.

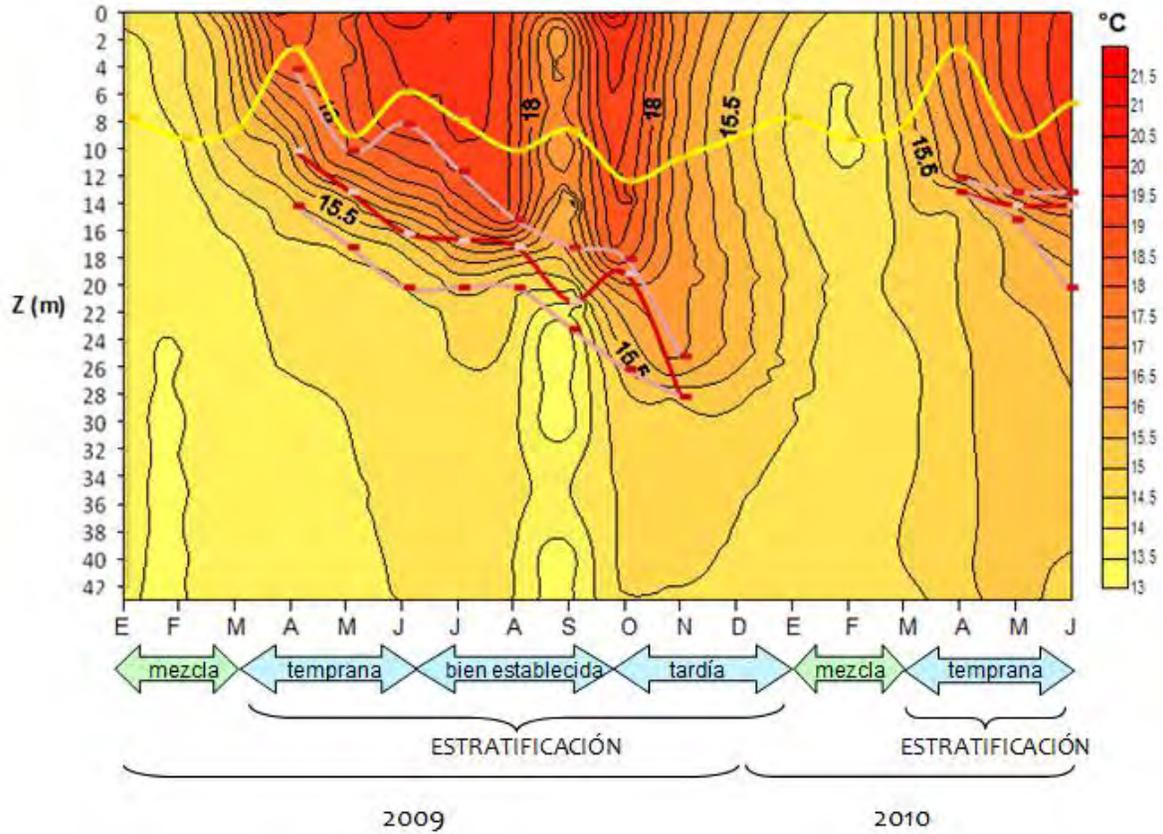


Fig. 2 Diagrama espacio temporal de la temperatura marcando las termoclinas con líneas continuas en lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, las etapas de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con flechas indicando el inicio y culminación de cada etapa.

## Zona eufótica

El límite fótico indica la profundidad hasta la cual logra penetrar la luz en la columna de agua, esta zona es mejor conocida como *zona eufótica* ( $Z_{EU}$ ) considerada hasta donde se encuentra el 1% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR por sus siglas en inglés).

De acuerdo con Lalli (1993) en esta zona la tasa de actividad fotosintética es mayor a la tasa de actividad respiratoria. En la figuras 2 y 3 se logra apreciar la fluctuación de la zona eufótica, en la época de mezcla osciló de 7 a 9 metros de profundidad, presentando su valor mínimo del año al inicio de la estratificación en los 2.4 metros de profundidad, lo que corresponde con el inicio de una fase turbia en el lago. Cabe destacar que este valor mínimo coincidió con el top de la termoclina en la estratificación temprana del 2009, la zona fótica se mantuvo por arriba del top de la termoclina hasta la estratificación bien establecida.

En los meses de estratificación bien establecida el límite fótico ganó profundidad y llegó hasta su máximo valor del ciclo en los 12.1 metros, lo que se asocia con una fase clara en el sistema.

Finalmente en la estratificación tardía su profundidad se reduce y fluctuó entre los 10.5 y los 7.5 metros de profundidad.

## Oxígeno disuelto

Durante el estudio se observó presencia constante de oxígeno disuelto para las capas superficiales, con un promedio de  $5.2 \pm 2.91 \text{ mg L}^{-1}$ . Mientras que se encontraron condiciones completamente anóxicas en el hipolimnion en los meses de estratificación bien establecida (Fig.3).

En los periodos de mezcla del 2009 y 2010 la concentración de oxígeno disuelto osciló entre  $5.19$  y  $11 \text{ mg L}^{-1}$  a lo largo de la columna de agua, la mezcla del 2009 se mostró más uniforme que la del 2010, en 2009 las concentraciones predominantes permanecieron cercanas a  $7 \text{ mg L}^{-1}$ , notándose las partes mejor mezcladas de los 4 metros hacia el fondo. Mientras que para el año siguiente el mismo periodo, se encontró concentraciones de  $7$  a  $11 \text{ mg L}^{-1}$ , cabe destacar que las concentraciones mayores se distribuyeron preferentemente sobre los 18 metros de profundidad.

En la estratificación temprana, se reduce paulatinamente el oxígeno disuelto a lo largo de la columna de agua notándose variaciones de oxígeno que comienzan a establecerse entre abril y mayo, de tal manera que para mayo es distinguible el oxígeno que decrece por debajo de la termoclina (10 m), este patrón de formación de gradiente del gas (oxiclina) a lo largo de la columna de agua se presentó en 2009 y 2010.

En el 2009 la estratificación temprana presentó concentraciones de  $7 \text{ mg L}^{-1}$  en la superficie, mientras que en el metalimnion la concentración fluctuó de poco más de  $6 \text{ mg L}^{-1}$  hasta menos de  $2 \text{ mg L}^{-1}$  de 8 a 22 metros respectivamente, lo que es una oxiclina suave y de amplia extensión. Por otra parte en los mismos meses del 2010, se desarrolló una estratificación de menor amplitud de los 11 a los 15 metros de profundidad y la variación de oxígeno disuelto fue más marcada de  $10.3$  a  $0.8 \text{ mg L}^{-1}$ .

Durante la estratificación bien establecida (de principios de junio a finales de septiembre) el oxígeno presentó un máximo de  $9.8 \text{ mg L}^{-1}$  en la superficie del epilimnion, en el metalimnion cerca de los 13 metros se estableció la oxiclina hasta los 21 metros, por debajo de esta se encontraron condiciones tendientes a la anoxia inferiores a  $0.8 \text{ mg L}^{-1}$  a partir de septiembre de aproximadamente 20 m al fondo, y hasta noviembre durante la estratificación tardía de los 28 m al fondo, se mantuvo esta condición. Por otra parte mientras que en el metalimnion en general el descenso de la oxiclina se acopla con el descenso de la termoclina, el epilimnion tiende a una homogenización de la columna de agua hasta los 13 metros (en octubre y noviembre).

En esta última etapa de la estratificación las concentraciones de oxígeno disuelto aumentaron gradualmente a lo largo de la columna de agua por el inicio del período de mezcla a finales de diciembre.

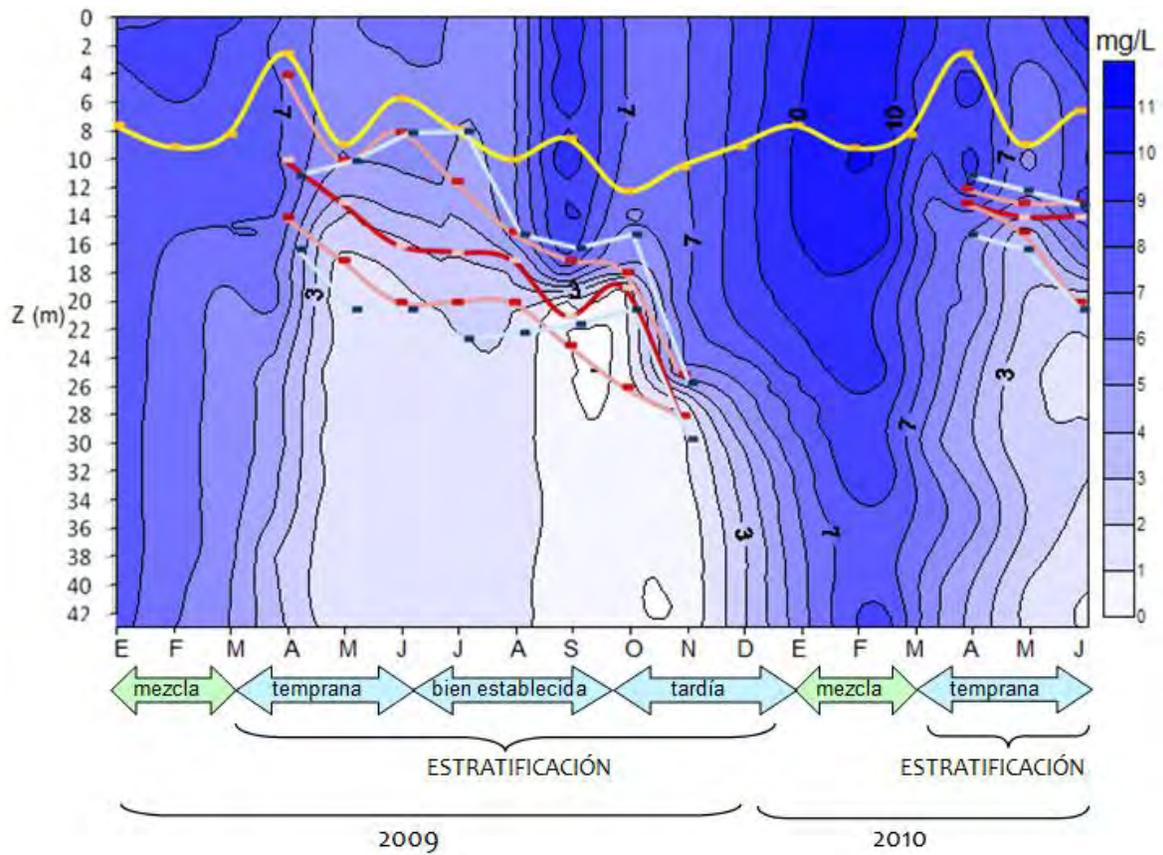


Fig. 3 Diagrama espacio temporal del oxígeno disuelto marcando las termoclinas con líneas continuas en lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, las etapas de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con flechas indicando el inicio y culminación de cada etapa.

## Salinidad, conductividad, alcalinidad y pH

Los siguientes componentes se consideran parámetros conservativos ya que su variación es mínima a través del tiempo. Aunque las concentraciones tuvieron fluctuaciones notorias (Cuadro A) muchos de ellos cambiaban muy ligeramente entre profundidades o entre meses sin tener un patrón definido; el pH se mantuvo alcalino la mayor parte del año lo que sugiere una predominancia de bicarbonatos sobre carbonatos; aunque tuvo concentraciones mínimas neutras de 7.32 en febrero 2010 en superficie y máximos de 9.55 en junio de los 10 a los 30 metros.

La conductividad eléctrica está relacionada con la presencia de sales en disolución cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar energía eléctrica. Para La Preciosa se registró una fluctuación de 0.88 a 4.3 milisiemens por centímetro. El contenido salino en el sistema fluctuó de 1.0 a 1.6 g L<sup>-1</sup> y registró un promedio de 1.2 g L<sup>-1</sup>.

La Alcalinidad o capacidad ácido neutralizante de una solución está compuesta por los equivalentes base por litro, pudiendo ser el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) tal equivalente, sin embargo en gran parte de las aguas naturales la alcalinidad está compuesta de iones carbonato y bicarbonato. En el lago la alcalinidad osciló de 280 a 360 con promedio de 320 para los carbonatos y de 560 a 620 con promedio de 590 para los bicarbonatos.

Cuadro A. Concentraciones promedio  $\pm$  desviación estándar y rango (mínimo, máximo) de parámetros químicos en el lago La Preciosa durante un ciclo anual.

pH	Conductividad mS cm <sup>-1</sup>	Salinidad gL <sup>-1</sup>	Alcalinidad mgL <sup>-1</sup>	
			Carbonatos	Bicarbonato
8.7 $\pm$ 0.52 (7.32,9.55)	2.09 $\pm$ 0.74 (0.88,4.3)	1.2 $\pm$ 0.2 (1,1.57)	320 $\pm$ 57 (280,360)	590 $\pm$ 42 (540,640)

## Nutrientes

### Nitratos $\text{NO}_3^-$

En el tiempo de estudio se encontraron de los  $0.78 \mu\text{mol L}^{-1}$  a los  $15.12 \mu\text{mol L}^{-1}$ , con un promedio anual de  $6.24 \mu\text{mol L}^{-1}$ . Para el periodo de circulación (enero, febrero y marzo) se registraron concentraciones pequeñas por debajo de los  $2 \mu\text{mol L}^{-1}$  en la mayor parte de la columna de agua distribuidos preferentemente de la superficie hasta los 32-38 metros (de enero a marzo respectivamente) donde se nota un incremento por un máximo de  $11.3 \mu\text{mol L}^{-1}$  en los 41 metros de enero (Fig. 4). Las concentraciones mínimas se encontraron en enero a 30 metros de profundidad con  $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ .

En la estratificación temprana las concentraciones se incrementaron constantemente a lo largo de la columna de agua hasta los  $14.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ , a 10 metros de profundidad en junio. Concentraciones similares permanecieron en los 10, 13 y 15 metros de profundidad de junio, julio y agosto respectivamente, el resto de la columna de agua se mantuvo predominantemente en  $9.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ .

En los meses restantes de la estratificación los nitratos disminuyeron nuevamente hasta  $\pm 2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ , en las partes más profundas de 8m, sin embargo las capas superficiales solo descendieron a  $\pm 7 \mu\text{mol L}^{-1}$ .

Para finales de diciembre 2009 y mediados de febrero 2010 se registró un incremento homogéneo a lo largo de la columna de agua, mucho más notorio de los 7 metros hacia el fondo, no obstante se presentaron 2 incrementos cercanos a  $11 \mu\text{mol L}^{-1}$  en 10 y 32 metros, entre febrero y marzo. Para el siguiente periodo de estratificación temprana 2010 se presentaron fluctuaciones irregulares cercanas a  $5.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ .

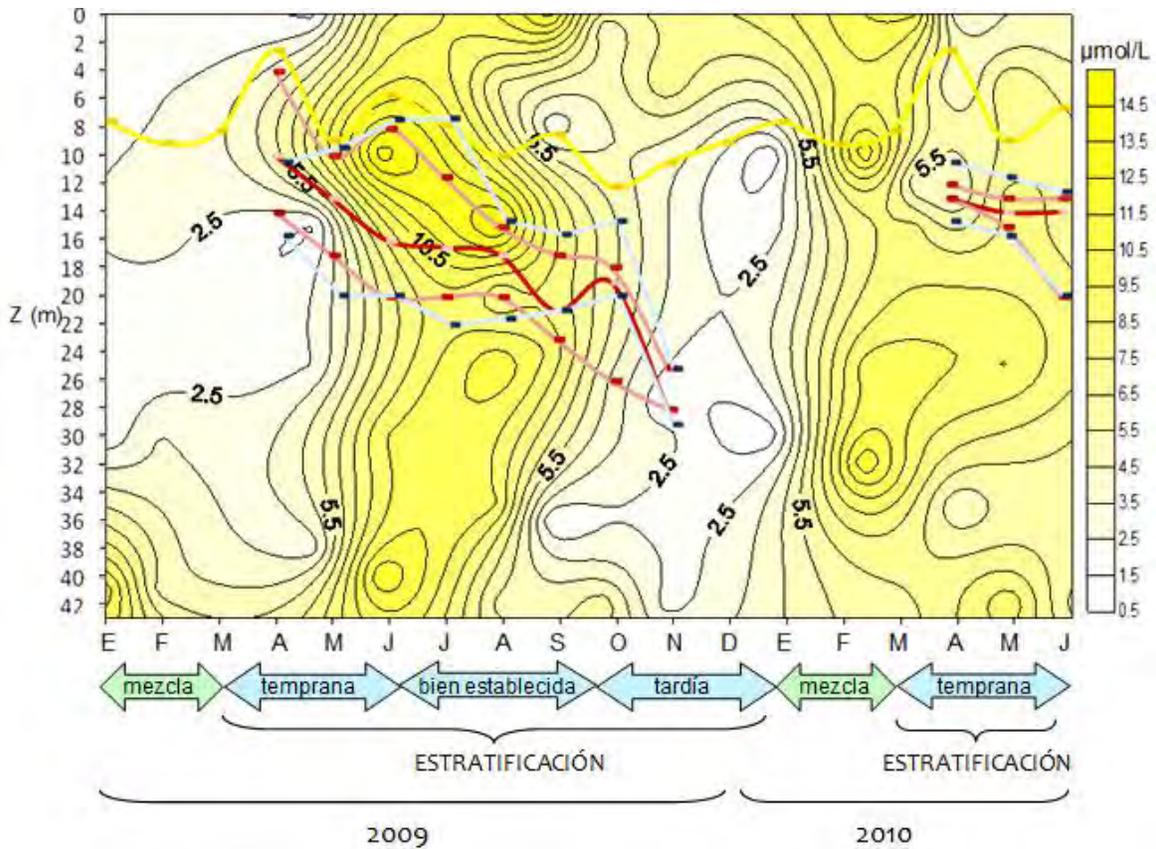


Fig.4 Diagrama espacio temporal de los Nitratos en el lago La Preciosa marcando las termoclinas con líneas continuas en lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, las etapas de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con flechas indicando el inicio y culminación de cada etapa.

## Nitritos $\text{NO}_2^-$

Los nitritos tuvieron un promedio de  $0.01 \mu\text{mol L}^{-1}$  durante el estudio, con fluctuaciones de 0 a  $0.50 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Fig. 5). Para el periodo de mezcla del 2009 las concentraciones de nitritos fueron homogéneas con  $0 \mu\text{mol L}^{-1}$  en el perfil vertical del lago.

Durante la estratificación temprana del 2009 y 2010 se presentaron máximos en la zona del hipolimnion de  $0.50$  y  $0.20 \mu\text{mol L}^{-1}$  respectivamente, mientras que en la estratificación bien establecida y tardía las concentraciones de nitritos fueron homogéneas con una rango de 0 a  $0.02 \mu\text{mol L}^{-1}$ .

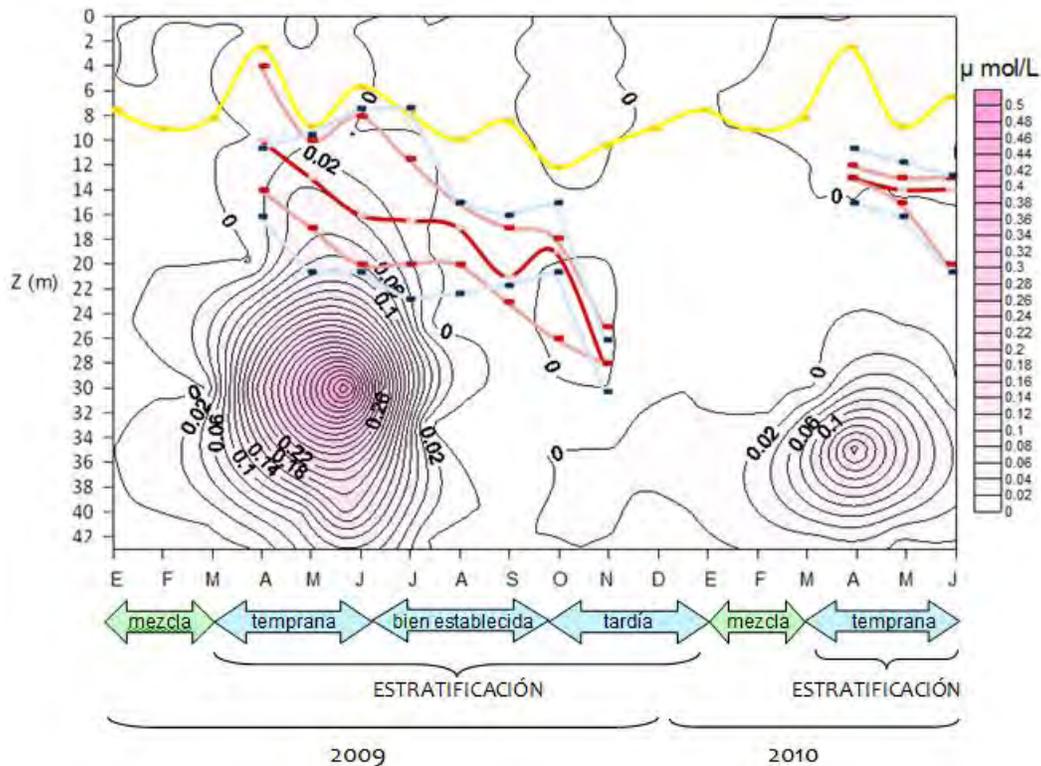


Fig.5 Diagrama espacio temporal de los Nitritos en el lago La Preciosa marcando las termoclinas con líneas continuas en lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, las etapas de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con flechas indicando el inicio y culminación de cada etapa.

## Amonio $\text{NH}_4^+$

En el amonio la oscilación de concentraciones fue la más variable de todos los nutrientes, durante el 2009 y primer semestre del 2010 se observaron concentraciones de 1.04 a 24.21  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , con un promedio de 5.74  $\mu\text{mol L}^{-1}$  (Fig. 6). En la mezcla del 2009 (enero a marzo), se notó una clara uniformidad de superficie a fondo con incremento simultáneo de concentraciones a lo largo de los 43 metros de profundidad.

A finales de la estratificación temprana se encontraron concentraciones que fluctuaron de 8 a 18  $\mu\text{mol L}^{-1}$  desde los primeros metros hasta los 16 m, de aquí a los 22 metros se encontró una región por entre los 3 y 8  $\mu\text{mol L}^{-1}$  que se mantuvo en estas profundidades los meses de estratificación temprana y hasta septiembre. En la zona hipolimnética se registraron concentraciones de 1 a 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$  en los 40 metros para el mes de mayo. Posteriormente estas concentraciones bajas aumentaron gradualmente hasta finales de la estratificación bien establecida.

Durante la estratificación tardía las concentraciones fluctuaron de 7 a 8  $\mu\text{mol L}^{-1}$  desde la superficie hasta los 10 m, mientras que a los 26 y 42 m se registraron concentraciones bajas de 1 y 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$  respectivamente. La mezcla de 2010 presentó concentraciones irregulares en su perfil vertical, estas fluctuaron de 4 a 9  $\mu\text{mol L}^{-1}$ . En la estratificación de 2010 las condiciones irregulares se mantuvieron con una fluctuación de 1 a 4  $\mu\text{mol L}^{-1}$ .

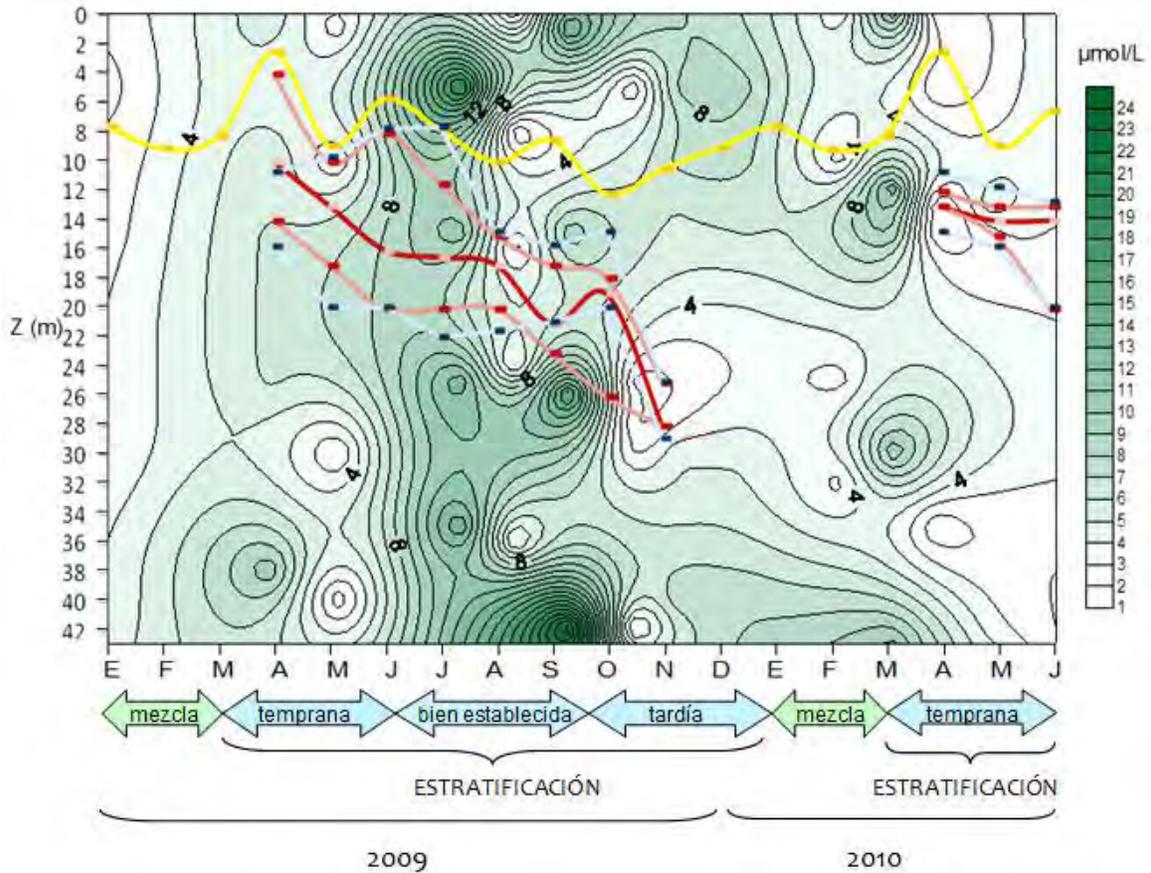


Fig.6 Diagrama espacio temporal de Amonio en el lago La Preciosa marcando las termoclinas con líneas continuas en lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, las etapas de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con flechas indicando el inicio y culminación de cada etapa.

## Fósforo soluble reactivo

Las concentraciones de fósforo soluble reactivo para el período de mezcla del 2009 oscilaron entre 2.08 y 10.13  $\mu\text{mol L}^{-1}$  lo que hace homogénea a la columna de agua, mientras que para el 2010 se registraron concentraciones de 2 a 10  $\mu\text{mol L}^{-1}$  (Fig. 7).

Al inicio de la estratificación las concentraciones fluctuaron de 0.21 a 11  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , mostrando un gradiente de concentraciones con tres profundidades en las que la concentración fue baja: entre 8 y 10 m, 29 y 31 m y de 40 a 41 m para el 2009 y mientras que en el 2010 la columna de agua se mantuvo homogénea con una concentración de 0 a 2  $\mu\text{mol L}^{-1}$ .

En la estratificación bien establecida se registró un aumento en las concentraciones al inicio de esta etapa que fluctuaron de 0.27 a 21.69  $\mu\text{mol L}^{-1}$  y una disminución al final con zonas en las que se obtuvieron concentraciones muy bajas de P.S.R como lo registrado entre 15 y 17 m y de 40 a 42 m.

Para la estratificación tardía las concentraciones de PSR total fueron relativamente altas, encontradas estas entre 4 y 6 m con 25  $\mu\text{mol L}^{-1}$ . Mientras que en la parte más profunda, entre 40 y 42 m se registró una concentración de 20.46  $\mu\text{mol L}^{-1}$ .

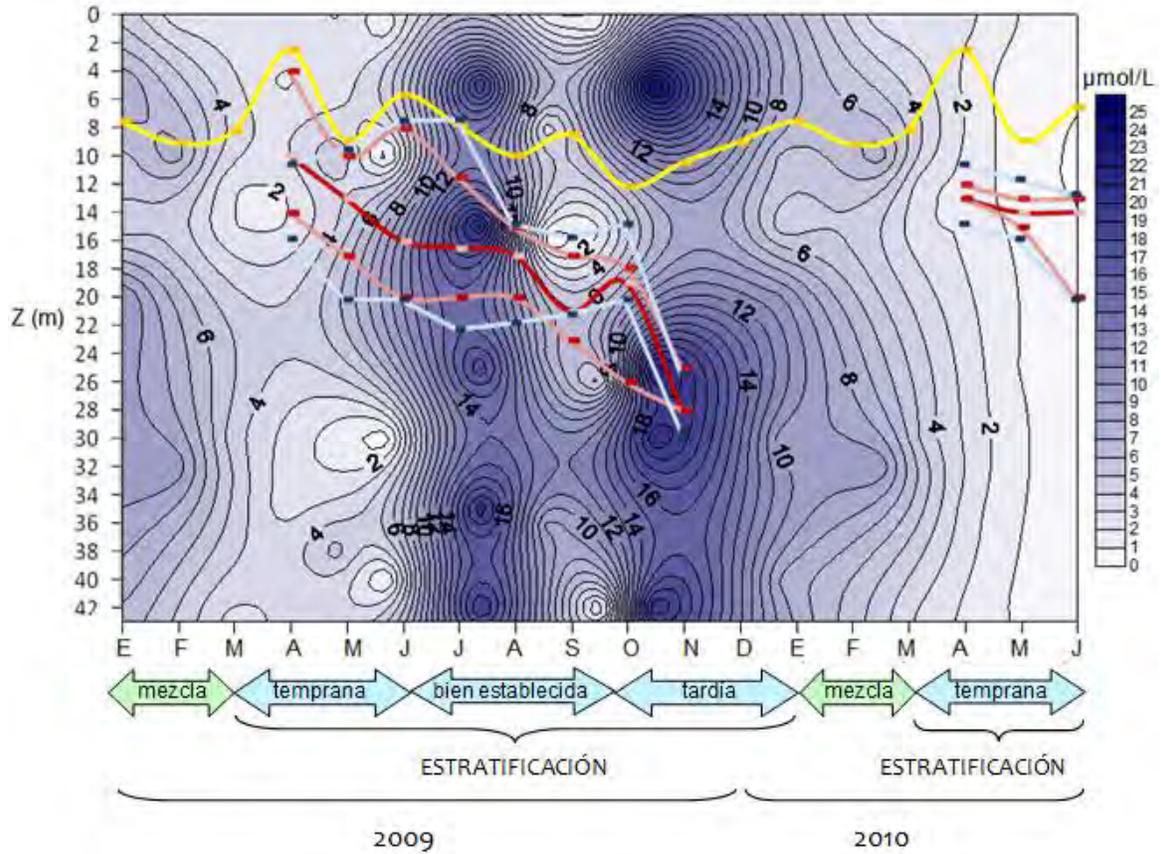


Fig.7 Diagrama espacio temporal del Fósforo soluble reactivo en el lago La Preciosa marcando las termoclinas con líneas continuas en lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, las etapas de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con flechas indicando el inicio y culminación de cada etapa.

## Fósforo total

Durante el año 2009 las concentraciones de fósforo total fluctuaron entre 0.27 y 10.76  $\mu\text{mol L}^{-1}$  para el período de mezcla, mientras que para el 2010 se presentó una homogenización de la columna de agua (Fig. 8).

Al presentarse la estratificación temprana se registraron tres concentraciones altas, la primera en la superficie con 14.82  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , de los 12 a 16 m 26  $\mu\text{mol L}^{-1}$  con 16.68  $\mu\text{mol L}^{-1}$  y en el hipolimnion una concentración de 29.68  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , siendo esta la concentración más alta presente en el lago para el 2009; mientras que para el 2010 la columna de agua se mantuvo relativamente homogénea con una fluctuación de 0 a 5  $\mu\text{mol L}^{-1}$ .

Para la estratificación bien establecida las concentraciones oscilaron entre 0.73 y 22.62  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , con concentraciones altas en la superficie, de 6 a 10 m, 14 a 16 m y de 22 a 25 m con 20.22  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , y una concentración máxima de 22.62  $\mu\text{mol L}^{-1}$  en el hipolimnion.

En la última etapa de la estratificación las concentraciones fluctuaron de 2 a 13.85  $\mu\text{mol L}^{-1}$  al término de este período.

Durante la estratificación es visible un aumento de la concentración del fósforo total del epilimnion hacia el hipolimnion, a finales de esta, las concentraciones comienzan a homogeneizarse siendo esto parte del comienzo de la mezcla.

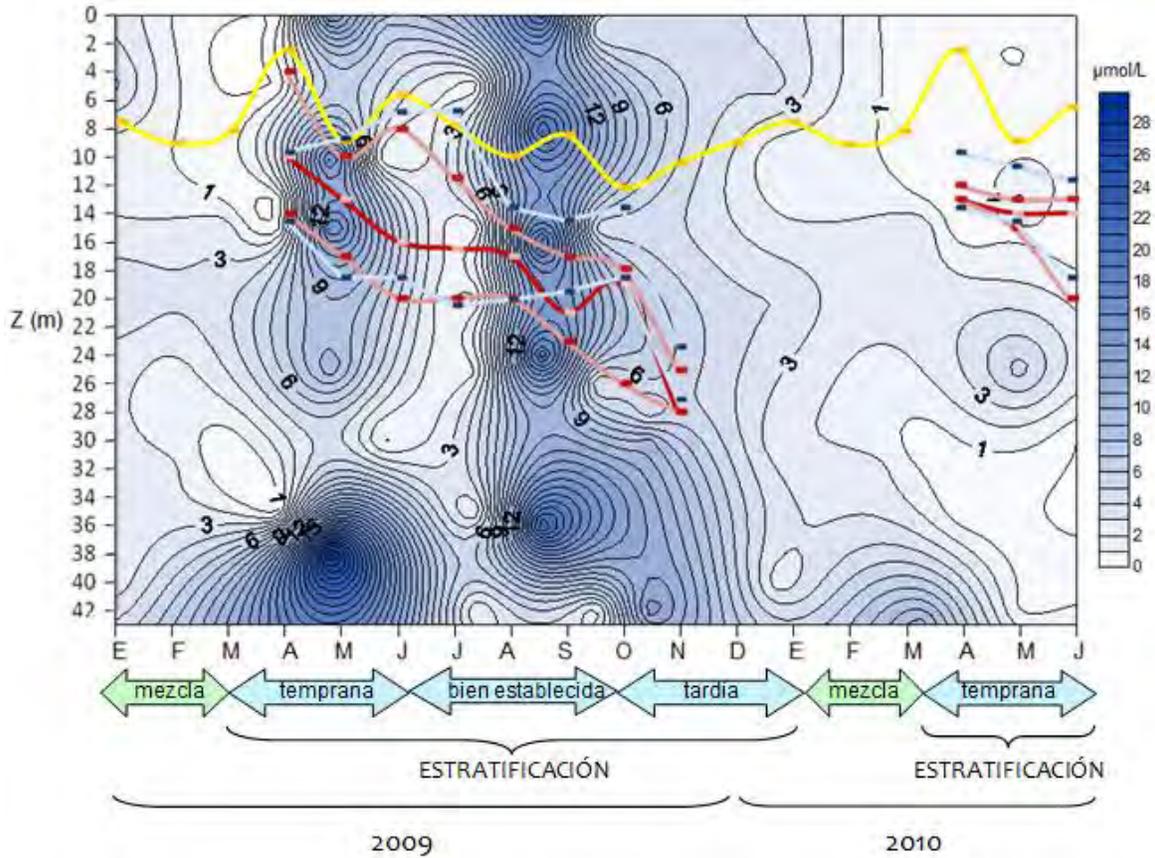


Fig. 8 Diagrama espacio temporal del Fósforo total en el lago La Preciosa marcando las termoclinas con líneas continuas en lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, las etapas de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con flechas indicando el inicio y culminación de cada etapa.

## Parámetros biológicos

### Abundancia del picoplancton autotrófico (APP)

Para la abundancia del APP se obtuvo una densidad promedio de  $6.99 \times 10^4$  n° cél. mL<sup>-1</sup>, con un mínimo de  $1.35 \times 10^3$  n° cél. mL<sup>-1</sup> y un máximo de  $5.5 \times 10^5$  n° cél. mL<sup>-1</sup> durante el año 2009 (Fig. 9).

De acuerdo con la densidad obtenida del APP durante la mezcla (finales de diciembre a principios de marzo) se registró un máximo en la superficie que disminuyó hacia la zona profunda del lago. En el mes de febrero se obtuvo un máximo de  $1.71 \times 10^5$  n° cél. mL<sup>-1</sup> a los 5 m de profundidad. Las densidades durante este período oscilaron entre  $3.31 \times 10^4$  y  $1.71 \times 10^5$  n° cél. mL<sup>-1</sup>.

Durante la estratificación térmica se registraron picos máximos de densidad de APP en el epilimnion y el metalimnion presentándose una disminución de la densidad notoria hacia el hipolimnion. En este período (mediados de marzo a diciembre) el máximo valor de densidad registrado fue de  $5.5 \times 10^5$  n° cél. mL<sup>-1</sup> que correspondió con el mes de julio a la profundidad de 10 m. El intervalo de variación de densidad de APP osciló entre  $1.35 \times 10^3$  y  $5.5 \times 10^5$  n° cél. mL<sup>-1</sup>.

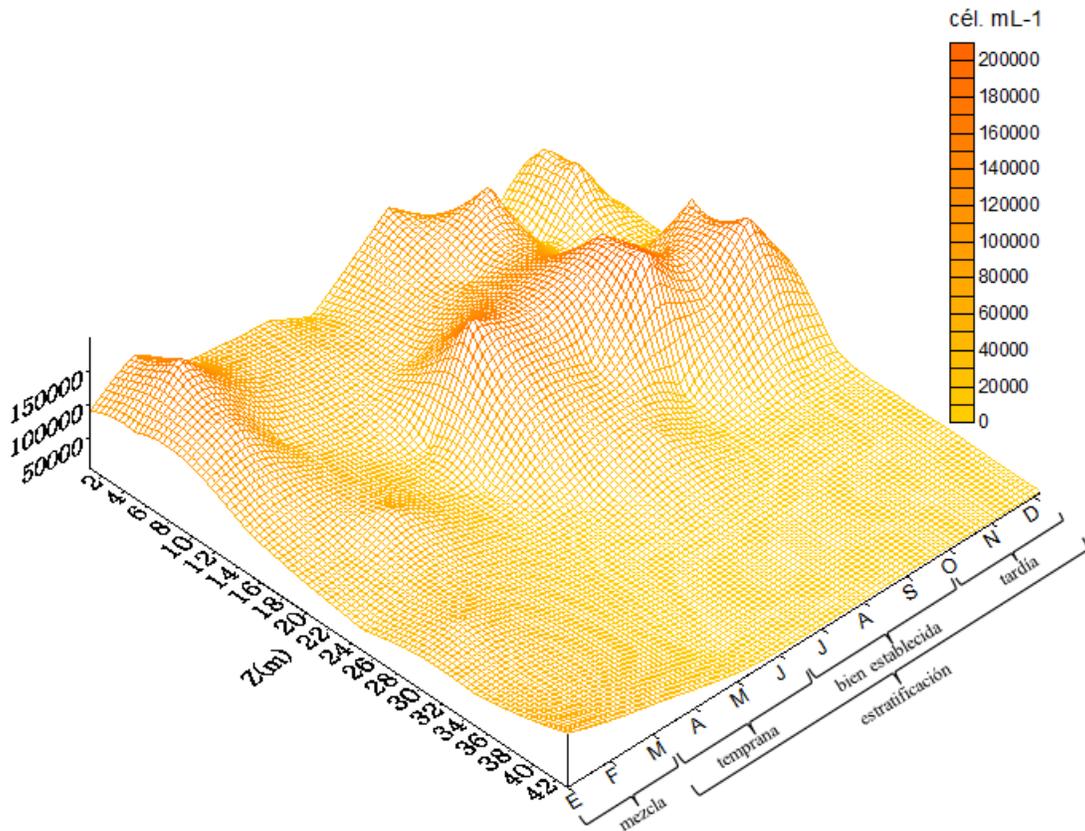


Fig. 9 Diagrama espacio temporal de la abundancia del APP.

Marcos (2011) registró formas coloniales grandes y densas, de las cuales su abundancia fue predominante durante en la circulación, en este periodo la abundancia se mantuvo por arriba de 2 000 agregados col/ml a lo largo de la columna de agua. Se encontró un máximo en el límite de la zona fótica con poco más de 6 500 agregados coloniales en este mismo período (Fig. 10).

A través de la estratificación la abundancia fue mínima manteniéndose debajo de 1000 Col/ml en todo el perfil vertical. La parte de la termoclina registró cúmulos importantes de colonias durante la estratificación bien establecida y la tardía, estas colonias alcanzaron abundancias de 4500 col/ml.

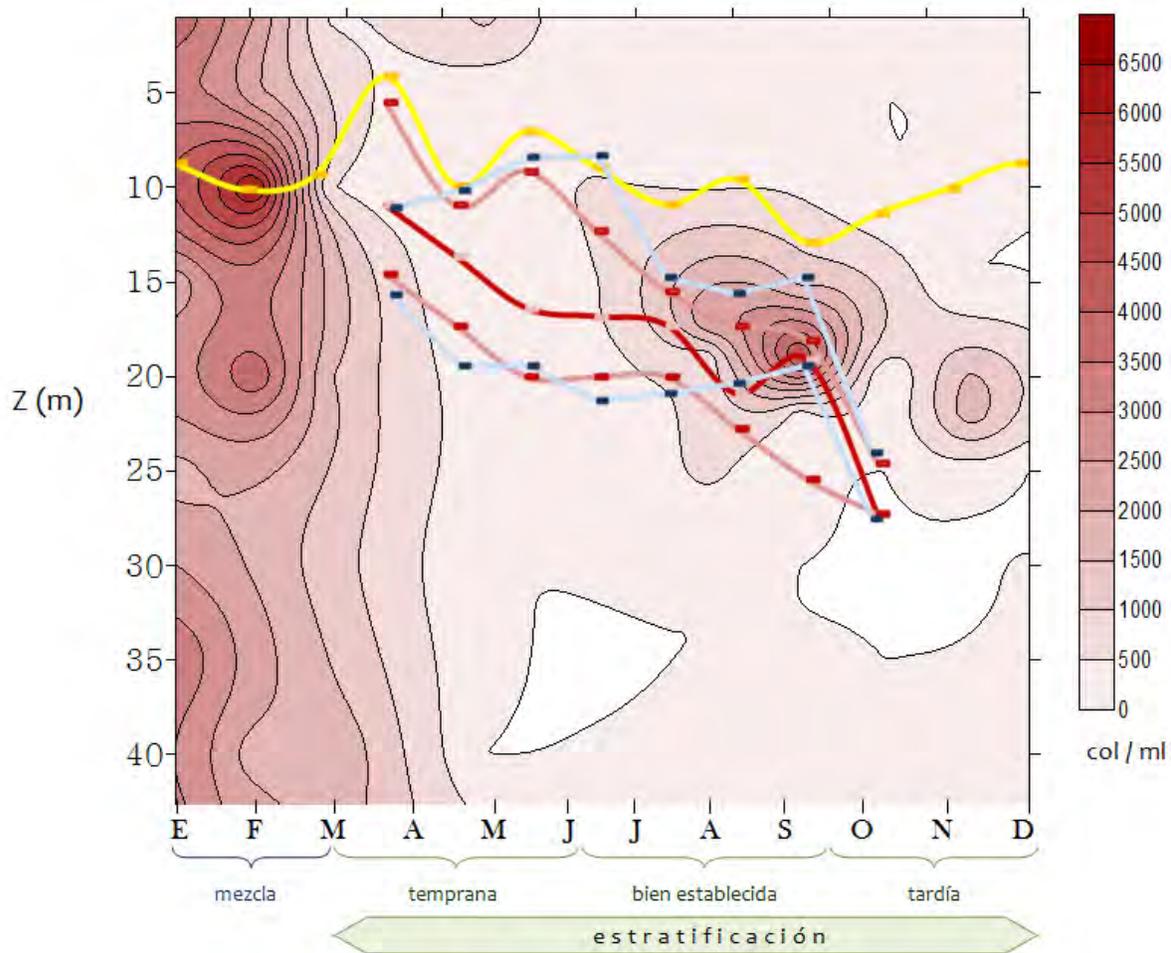


Fig. 10 Diagrama espacio temporal de abundancia de agregados coloniales de APP durante el 2009 en La Preciosa. Termoclinas con líneas continuas color lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, así como los periodos de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con llaves indicando el inicio y culminación de cada etapa. (Modificado de Marcos 2011).

## Biomasa del picoplancton autotrófico

Para la biomasa del APP se encontró una fluctuación en un intervalo entre  $0.65 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  y  $98.93 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  y un promedio anual de  $21.57 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  (Fig. 11). Durante el período de mezcla se registraron altas concentraciones de biomasa cercanas a la superficie que disminuyeron notoriamente hacia el hipolimnion. Las biomazas oscilaron entre  $16.65 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  y  $98.93 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$ , esta última registrada en febrero a los 5 m de profundidad.

Durante la estratificación se presentaron altas concentraciones de biomasa en la superficie y principalmente en la zona de termoclina, disminuyendo hacia el hipolimnion llegando a concentraciones casi nulas. La fluctuación de concentraciones fue de  $0.65 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  como mínima en octubre a los 5 m de profundidad y de  $78.71 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  en septiembre a los 19 m de profundidad, en la zona de la termoclina.

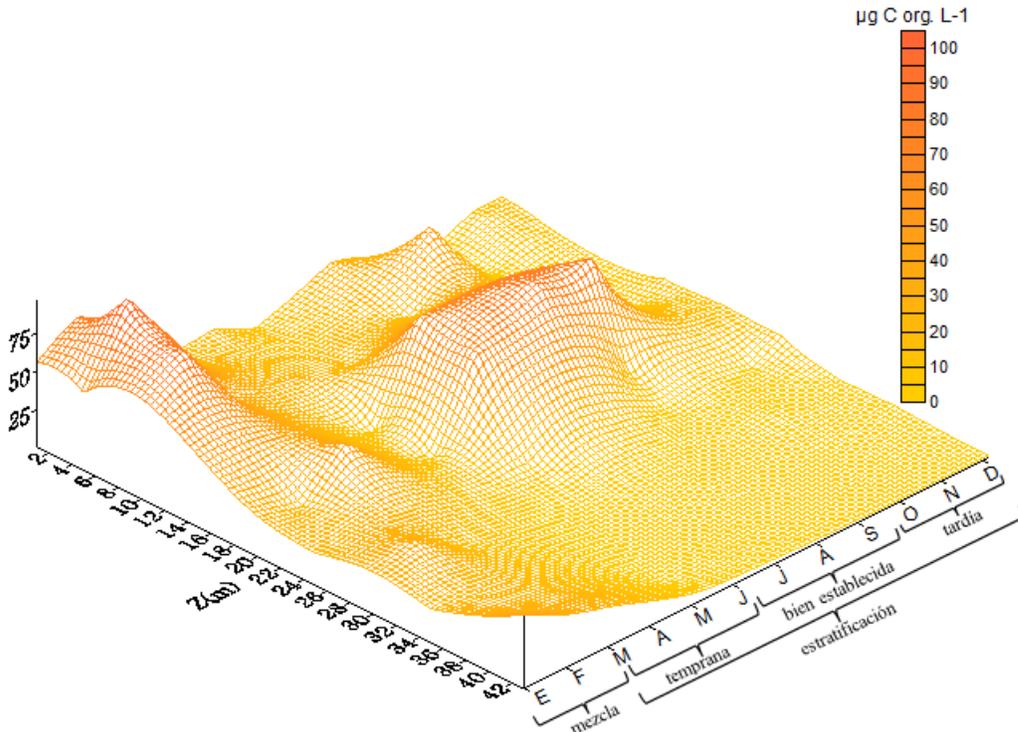


Fig. 11 Diagrama espacio temporal de la biomasa del APP.

## Abundancia del picoplancton heterotrófico (HPP)

Los resultados de abundancia del HPP mostraron una variación de  $2.12 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup> a  $4.29 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> como densidades extremas durante el 2009, en este año el promedio fue de  $1.79 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> (Fig. 12). En los meses de mezcla la densidad mostró densidades equivalentes a lo largo de la columna de agua, presentándose picos máximos en febrero con valores alrededor de  $2.98 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> desde la superficie hasta el fondo.

Al comenzar la estratificación temprana se encontraron densidades próximas a  $1.2 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> en las zonas profundas a partir de los 20 m y hasta el fondo, en el metalimnion (a 15 metros de profundidad) en el mes de abril la densidad alcanzó  $2.85 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup>, y en superficie ese mismo mes registró  $2.95 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup>. Sin embargo estos dos máximos no fueron continuos en epilimnion ni en metalimnion.

Posteriormente en la estratificación bien establecida no se registraron variaciones importantes, se encontró una densidad de  $1.2 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> en la columna de agua con excepción de un gradiente (incrementó hasta  $2.39 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup>) en la zona de metalimnion a 19 metros en el mes de agosto. Consecuentemente a partir de septiembre y entrando la estratificación tardía (de octubre a diciembre) se distinguen variaciones importantes en la zona de epilimnion y metalimnion hasta los 28 metros. Las densidades en este periodo fueron muy irregulares, fluctuaron de  $1.8 \times 10^6$  a  $4.29 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> en metalimnion y epilimnion. Y de  $2.4 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> a  $3.4 \times 10^6$  cél. mL<sup>-1</sup> en el hipolimnion.

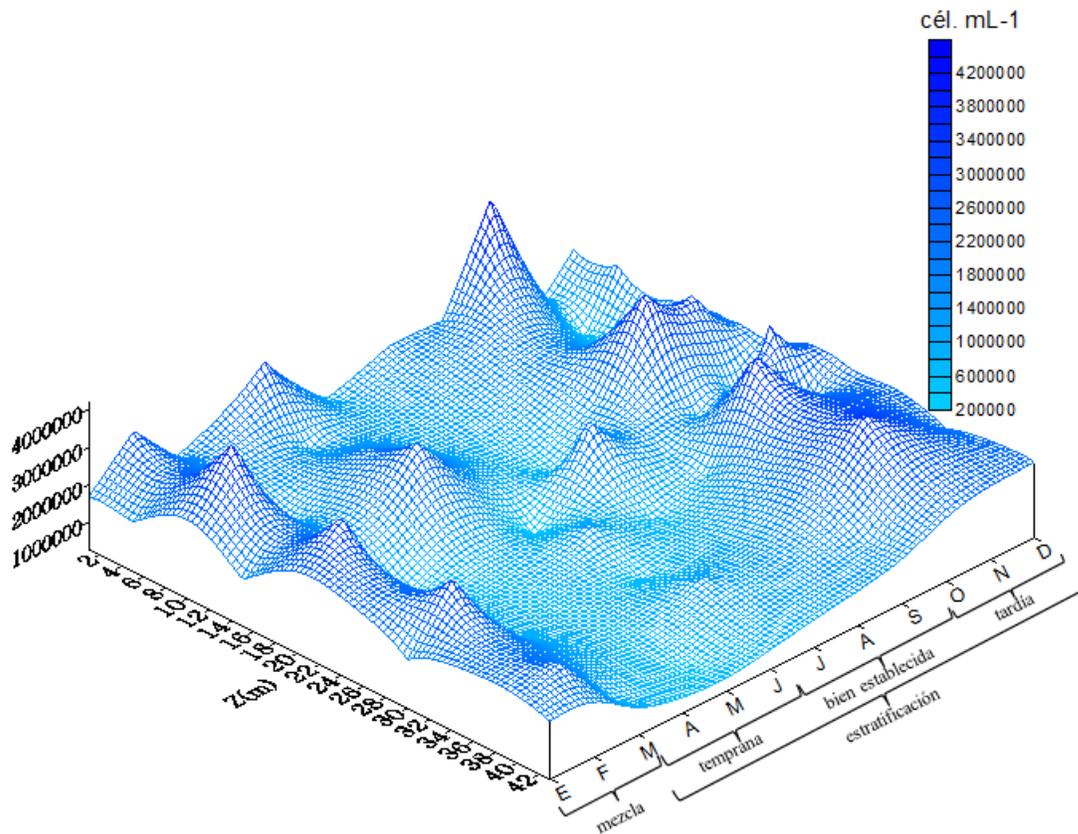


Fig. 12 Diagrama espacio temporal de la abundancia del HPP.

Marcos (2011) reportó diversos morfotipos celulares; espirilos, filamentos, bacilos, cocos y vibrios, de las cuales las tres últimas formas fueron las encontradas en flóculos. Su densidad estuvo determinada principalmente por la estratificación, durante todo el año y a lo largo del perfil vertical su abundancia fue menor a 2000 flóc/ml, con agregados dispersos y en algunas partes ausentes, con excepción de la termoclina en la estratificación bien establecida y tardía presentó las más altas abundancias acoplándose a la profundización de la termoclina y superando los 18 000 flóculos por ml (Fig. 13).

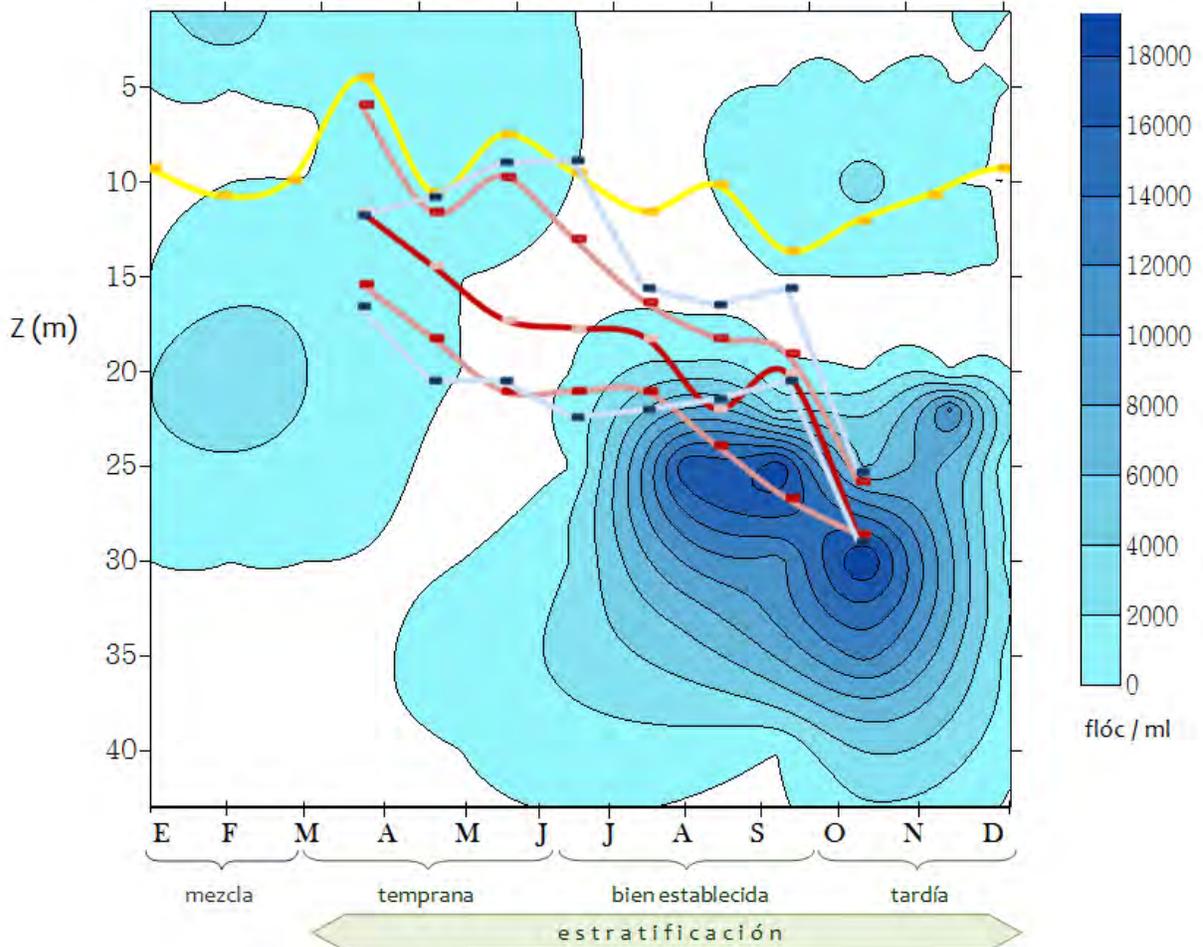


Fig.13 Diagrama espacio temporal de abundancia de flóculos de picoplancton heterotrófico durante el 2009 en La Preciosa. Termoclinas con líneas continuas color lila (top y bottom), y en línea continua roja (planar) el límite fótico en amarillo, la zona de oxiclina en líneas azules claras, así como los periodos de mezcla y estratificación (temprana, bien establecida y tardía) se señalan con llaves indicando el inicio y culminación de cada etapa. (Modificado de Marcos 2011).

## Biomasa del picoplancton heterotrófico

Con respecto a la biomasa del picoplancton heterotrófico se registró una fluctuación de  $1.8 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  a  $253 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  y un promedio anual de  $55 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  (Fig. 14). En los meses de mezcla (enero, febrero y marzo) la biomasa se mantuvo entre  $30$  y  $80 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  en la mayor parte del perfil vertical, sin embargo se encontró un máximo de  $154 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  a 10 metros de profundidad en el mes de febrero. Poco antes de concluir la mezcla y durante los periodos de estratificación temprana y bien establecida (de marzo a finales de septiembre), la biomasa presentó concentraciones bajas, inferiores a  $60 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$ , que se distribuyeron irregularmente desde la superficie hasta el fondo. Algunas zonas con concentraciones entre  $5$  y  $7 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  en agosto en la zona de metalimnion.

Finalmente en la estratificación tardía, la biomasa aumentó considerablemente en múltiples secciones del perfil vertical; en la superficie alcanzó  $162 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  en octubre, en los 15 metros de noviembre la biomasa alcanzó los  $128 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  para la zona del hipolimnion, concentraciones superiores a  $100 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  se registraron el resto de la estratificación tardía, siendo las biomásas más altas del ciclo anual con máximos de  $253$  y  $245 \mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$  en octubre (35m) y noviembre (25m) respectivamente. Cabe destacar que las concentraciones máximas de la estratificación tardía no fueron constantes en la columna de agua, lo que desarrollo gradientes importantes, principalmente a partir de los 23m en noviembre.

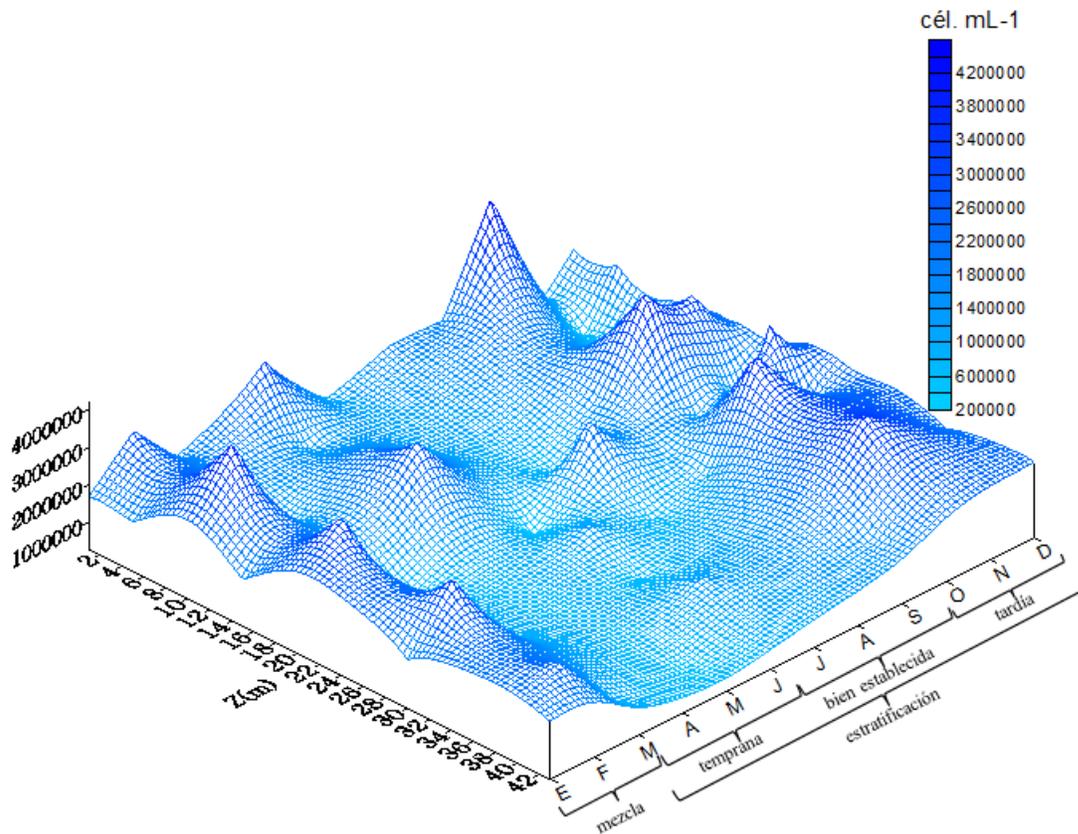


Fig. 14 Diagrama espacio temporal de la biomasa del HPP.

## Análisis estadísticos

### Abundancia del picoplancton autotrófico

Para la abundancia del picoplancton autotrófico entre los meses de mezcla no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) de acuerdo con el diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 15), notando que si presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) de estos con octubre y diciembre. Esto se confirmó para el logaritmo de la abundancia al encontrar diferencias temporales significativas ( $F_{11,69} = 3.40$ ,  $p < 0.05$ ). De acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey se registraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los meses de mezcla con octubre y diciembre (Cuadro B).

La mayor variabilidad se presentó en julio durante la estratificación bien establecida con densidades que oscilaron de  $3.20 \times 10^4$  a  $5.5 \times 10^5$  cél. mL<sup>-1</sup> y la menor se registró en abril (de  $2.50 \times 10^4$  a  $3.75 \times 10^4$  cél. mL<sup>-1</sup>).

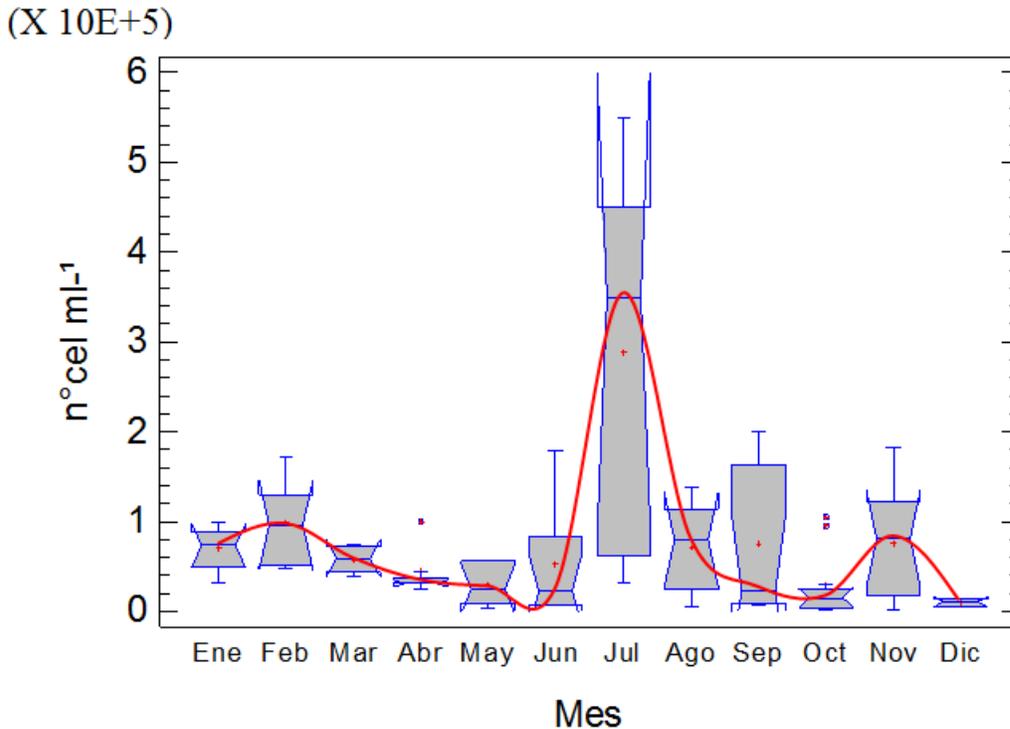


Fig. 15 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del APP por mes.

Cuadro B. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la abundancia del APP entre meses, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene										X		X
Feb					X					X		X
Mar										X		X
Abr							X					X
May							X					
Jun							X					
Jul									X	X	X	X
Ago										X		X
Sep												X
Oct											X	X

Para la abundancia entre estratos se encontraron diferencias espaciales significativas ( $p < 0.05$ ) de acuerdo a la prueba de Kruskal-Wallis. De acuerdo al diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 16), el período de mezcla presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con el hipolimnion pero no hubo diferencias con el epilimnion y metalimnion ( $p > 0.05$ ).

La mayor variabilidad se presentó en el metalimnion con densidades que fluctuaron de  $5.02 \times 10^3$  a  $2.01 \times 10^5$  cél.  $\text{mL}^{-1}$  y la menor en el hipolimnion (de  $3.13 \times 10^3$  a  $6.25 \times 10^4$  cél.  $\text{mL}^{-1}$ ).

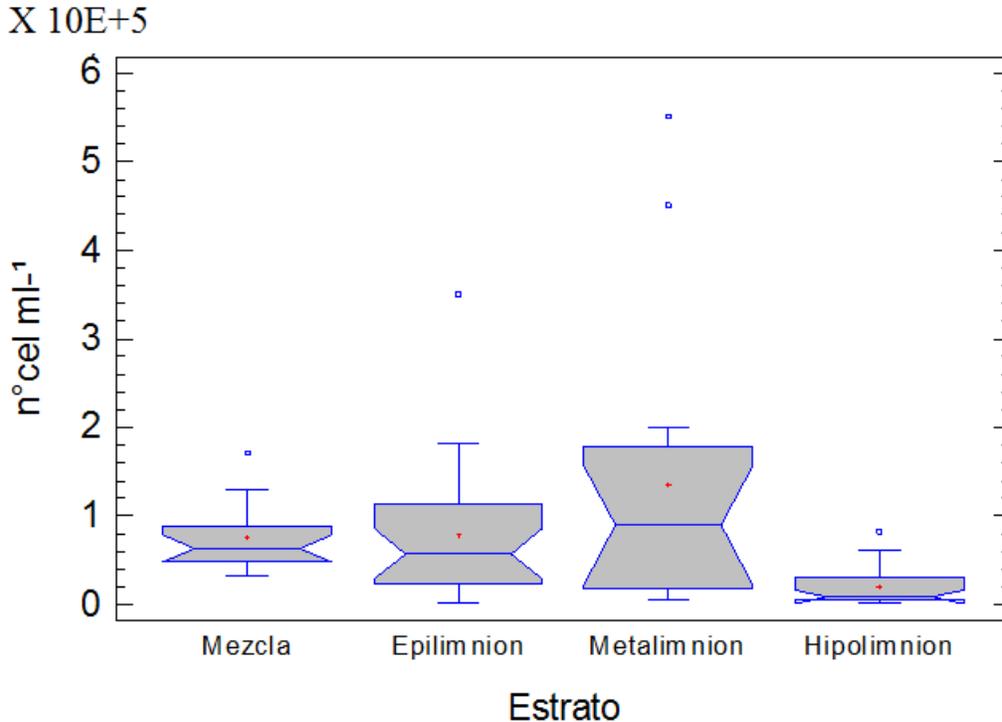


Fig. 16 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del APP por estrato.

### Contenido de carbono del picoplancton autotrófico

Para el contenido de carbono del APP durante el período de mezcla (finales de diciembre a principios de marzo) no se observan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig. 17), con concentraciones que oscilaron de 45.60 a 146.71  $\text{fg C}_{\text{org.cél.}^{-1}}$ . La menor variabilidad anual se registró en el mes de febrero (80.47-127.58  $\text{fg C}_{\text{org.cél.}^{-1}}$ ).

Mientras que para la estratificación si hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con este mismo análisis, además en este período se registraron las concentraciones máximas del ciclo anual, de 213.96  $\text{fg C}_{\text{org.cél.}^{-1}}$  para el mes de noviembre en la estratificación tardía (de finales de septiembre a finales de diciembre) y mínima de 30.20  $\text{fg C}_{\text{org.cél.}^{-1}}$  en septiembre durante la estratificación bien establecida (de principios de junio a finales de septiembre), en donde también se encontró la mayor variabilidad interanual para el mes de agosto (39.66 a 195.59  $\text{fg C}_{\text{org.cél.}^{-1}}$ ). El promedio anual del contenido de carbono fue de 97.23  $\text{fg C}_{\text{org.cél.}^{-1}}$ .

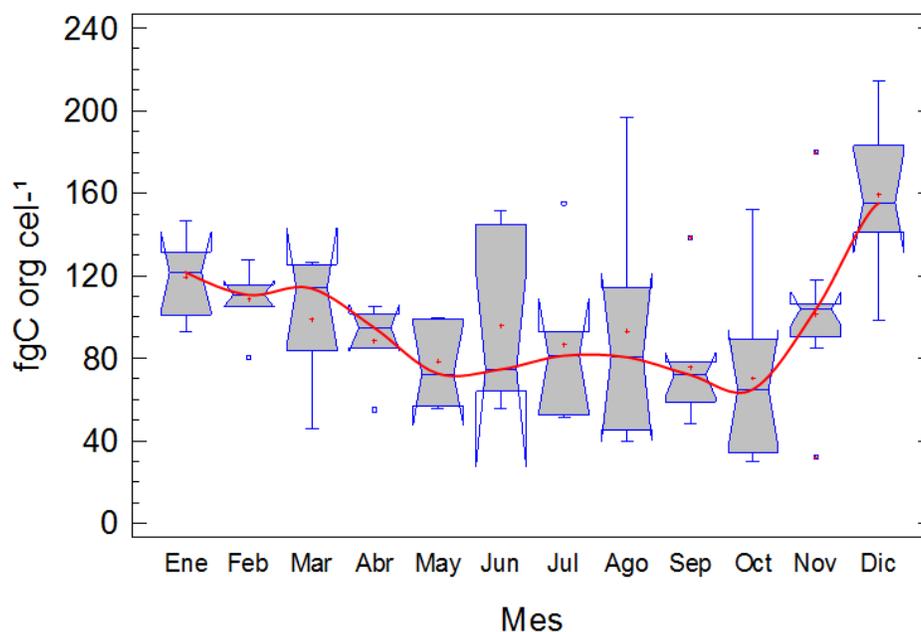


Fig. 17 Diagrama del análisis de cajas múltiples con bigote y muesca para el contenido de carbono del APP por mes.

## Biomasa del picoplancton autotrófico

Para la biomasa del APP se diferencian dos grupos: mezcla y estratificación de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig. 18). En el caso de mezcla se registran concentraciones medias y medianas mayores con respecto a la estratificación donde se presentó una reducción general de estos estimadores. En la mezcla y la estratificación bien establecida se observa la mayor variabilidad de este parámetro con respecto a la amplitud de las cajas. Mientras que para la estratificación temprana y tardía la variabilidad fue mínima.

Para el logaritmo de la biomasa del APP se encontraron diferencias temporales significativas ( $F_{11,69} = 3.74, p < 0.05$ ). Al realizar la prueba de rangos múltiples de Tukey se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los meses de mezcla en general con los de estratificación. Destaca que febrero y octubre fueron en los que se encontraron mayores diferencias significativas respecto con los otros meses del año (Cuadro C).

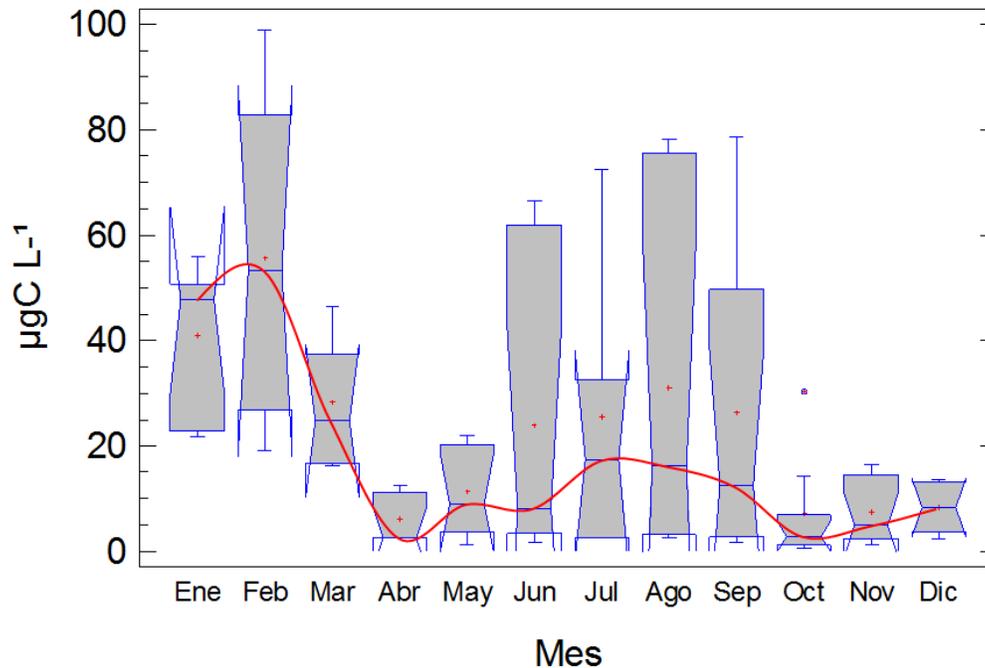


Fig. 18 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del APP por mes.

Cuadro C. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la biomasa del APP entre meses, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene				X	X					X	X	X
Feb				X	X	X	X		X	X	X	X
Mar				X						X	X	X
Abr												
May												
Jun										X		
Jul										X		
Ago										X	X	
Sep										X		

Al comparar la columna de agua durante el período de mezcla con los diferentes estratos en la estratificación térmica se presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con el epilimnion y el hipolimnion pero no hubo diferencias con el metalimnion ( $p > 0.05$ ) de acuerdo al diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 19). Esto se corroboró para el logaritmo de la biomasa al encontrar diferencias espaciales significativas ( $F_{3,77} = 24.41$ ,  $p < 0.05$ ). De acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre el hipolimnion y el resto de los estratos, así con la columna de agua durante la mezcla (Cuadro D).

La mayor variabilidad se presentó en el metalimnion con biomazas que fluctuaron de 1.82 a 78.71  $\mu\text{g C}_{\text{org.}} \text{L}^{-1}$  y la menor en el hipolimnion (de 1.15 a 5.37  $\mu\text{g C}_{\text{org.}} \text{L}^{-1}$ ).

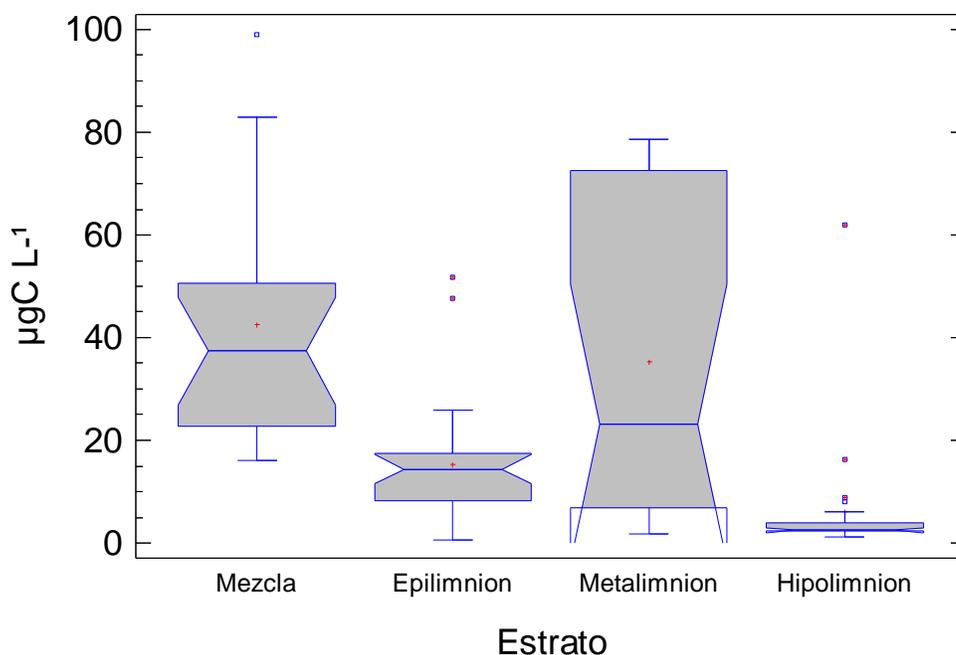


Fig. 19 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del APP por estrato.

Cuadro D. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la biomasa del APP por estrato, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Estrato	Mezcla	Epilimnion	Metalimnion	Hipolimnion
Mezcla		X		X
Epilimnion			X	X
Metalimnion				X

## Abundancia del picoplancton heterotrófico

De acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis para la abundancia del picoplancton heterotrófico se encontraron diferencias temporales significativas ( $p < 0.05$ ) entre meses. Entre los meses de circulación (enero, febrero y principios de marzo) se presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con la diferencia más abrupta entre febrero y marzo. Durante la estratificación se diferencian dos grupos: estratificación temprana y bien establecida con medias similares y estratificación tardía en donde las medias y medianas aumentan, existiendo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre estos grupos (fig. 20).

La mayor variabilidad se presentó en noviembre (de  $4.14 \times 10^5$  a  $3.37 \times 10^6$  cél.  $\text{mL}^{-1}$ ) seguido por una similar en mayo. La menor variabilidad se registró en enero (de  $1.52 \times 10^6$  a  $1.84 \times 10^6$  cél.  $\text{mL}^{-1}$ ).

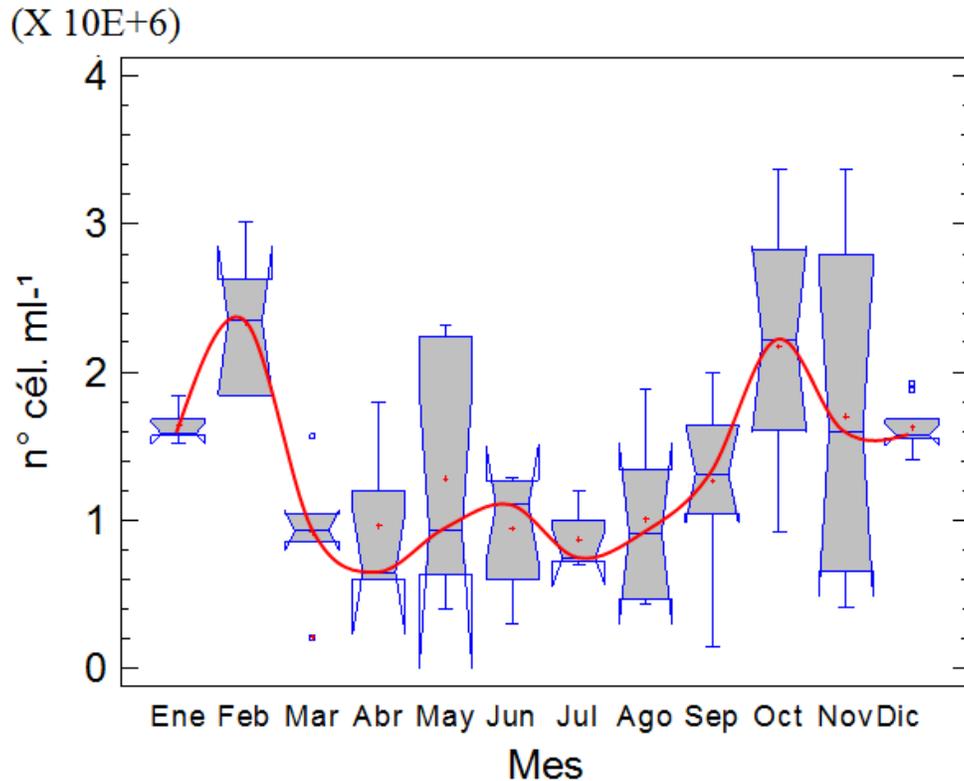


Fig. 20 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del HPP por mes.

De acuerdo con el diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 21), al comparar el período de mezcla con los de estratificación no se encontraron diferencias significativas con el epilimnion y el metalimnion ( $p > 0.05$ ) pero si hubo diferencias con el hipolimnion ( $p < 0.05$ ).

Esto se confirmó para la abundancia al encontrar diferencias significativas ( $F_{3,76} = 2.81$ ,  $p < 0.05$ ). De acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre el hipolimnion con la mezcla y el epilimnion (Cuadro E).

La mayor variabilidad se registró en el período de mezcla (de  $2.12 \times 10^5$  a  $3.02 \times 10^6$  cél.  $\text{mL}^{-1}$ ) y la menor en el metalimnion (de  $3.03 \times 10^5$  a  $2.82 \times 10^6$  cél.  $\text{mL}^{-1}$ ).

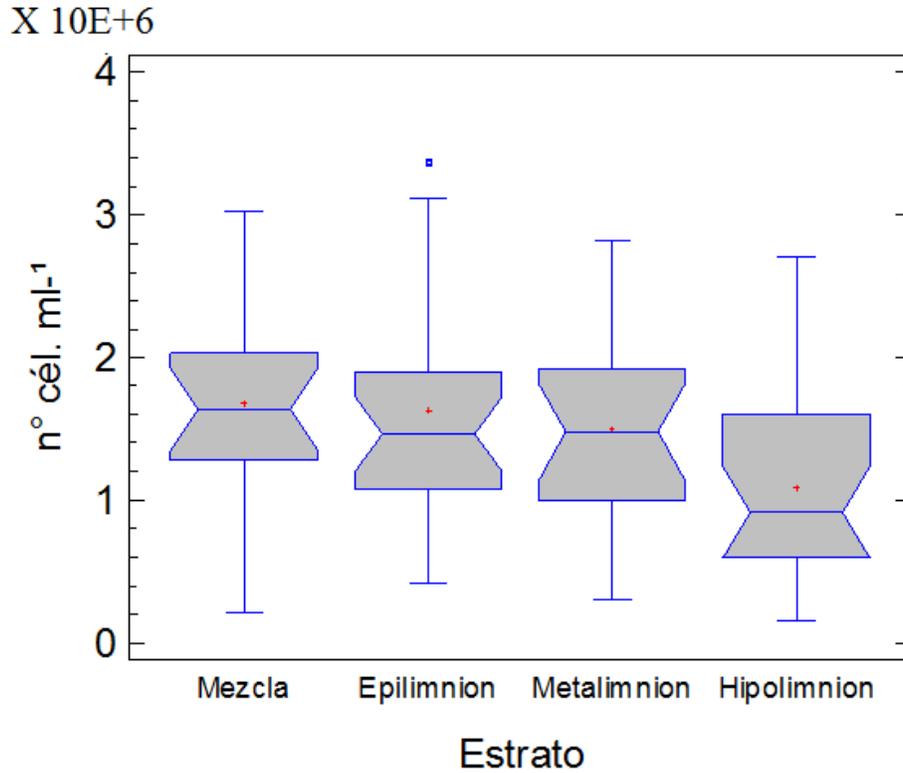


Fig. 21 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la abundancia del HPP por estrato.

Cuadro E. Prueba de rangos múltiples de Tukey para la abundancia del HPP por estrato, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Estrato	Mezcla	Epilimnion	Metalimnion	Hipolimnion
Mezcla				X
Epilimnion			X	X

## Contenido de carbono del picoplancton heterotrófico

El promedio de contenido de carbono orgánico fue de  $32.65 \text{ fg } C_{\text{org}}.\text{cel}^{-1}$  en el 2009, en los meses de mezcla fue de  $38.7 \pm 12.43 \text{ fg } C_{\text{org}}.\text{cel}^{-1}$  sin existir diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre enero y febrero ni entre enero y marzo pero sí entre febrero y marzo ( $p < 0.05$ ), esto de acuerdo con el diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 22).

Para los meses de estratificación los promedios mensuales de carbono orgánico descendieron gradualmente de  $34.2 \text{ fg } C_{\text{org}}.\text{cel}^{-1}$  en el inicio de la estratificación (abril) hasta  $8.84 \text{ fg } C_{\text{org}}.\text{cel}^{-1}$  en septiembre (estratificación bien establecida), cabe destacar que en estos meses la variabilidad fue mínima manteniéndose por debajo de  $\pm 5.8 \text{ fg } C_{\text{org}}.\text{cel}^{-1}$ , no mostrando diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) de un mes consecutivo a otro (excepto de junio a julio) pero sí entre meses no consecutivos ( $p < 0.05$ ) como abril y mayo. Por otra parte en la estratificación tardía se observaron las máximas concentraciones de contenido de carbono celular y las máximas variabilidades en

noviembre con  $76.31 \pm 42.50$  fg  $C_{org}$ .cel<sup>-1</sup>. Existieron diferencias significativas entre los meses de octubre, noviembre y diciembre ( $p < 0.05$ ).

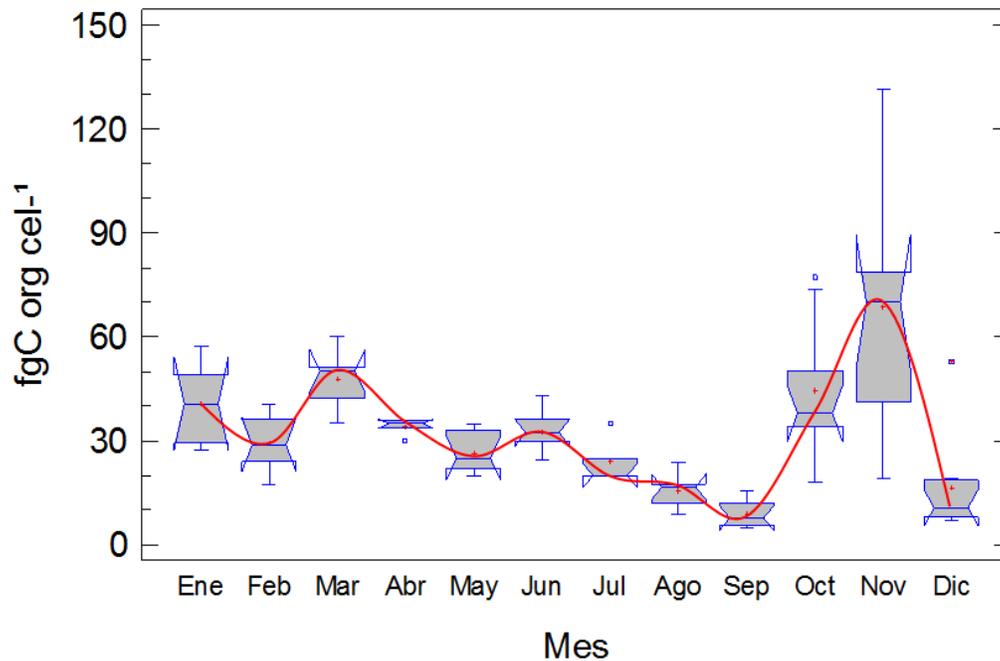


Fig. 22 Diagrama del análisis de cajas múltiples con bigote y muesca para el contenido de carbono del HPP por mes.

## Biomasa del picoplancton heterotrófico

Para la biomasa del picoplancton heterotrófico no se registraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) de acuerdo con el diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 23) entre los meses de mezcla (enero, febrero y marzo), es posible apreciar un máximo en febrero seguido de un descenso en las concentraciones medias y medias hasta la estratificación bien establecida, en donde encontramos otro máximo en Julio. Para la estratificación tardía se presenta un tercer máximo seguido de una disminución de las concentraciones en noviembre y diciembre. Esto se corroboró para la biomasa al encontrar diferencias temporales significativas ( $F_{11,68} = 10.00$ ,  $p < 0.05$ ). De acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey (Cuadro F) se registraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los meses de mezcla con junio, agosto, septiembre y diciembre, destacando que los meses de estratificación temprana (mediados de marzo, abril, mayo y junio) tuvieron diferencias significativas en general con los meses de estratificación bien establecida y tardía (de julio a diciembre).

De acuerdo con el diagrama de cajas múltiples con muesca se observan tres máximos en la biomasa del HPP uno durante la mezcla en el mes de febrero, otro en la estratificación bien establecida en el mes de julio y el último en la estratificación tardía en octubre.

La mayor variabilidad se presentó en noviembre (de 12.58 a 245.15  $\mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$ ) y la menor en septiembre (de 1.87 a 19.79  $\mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$ ).

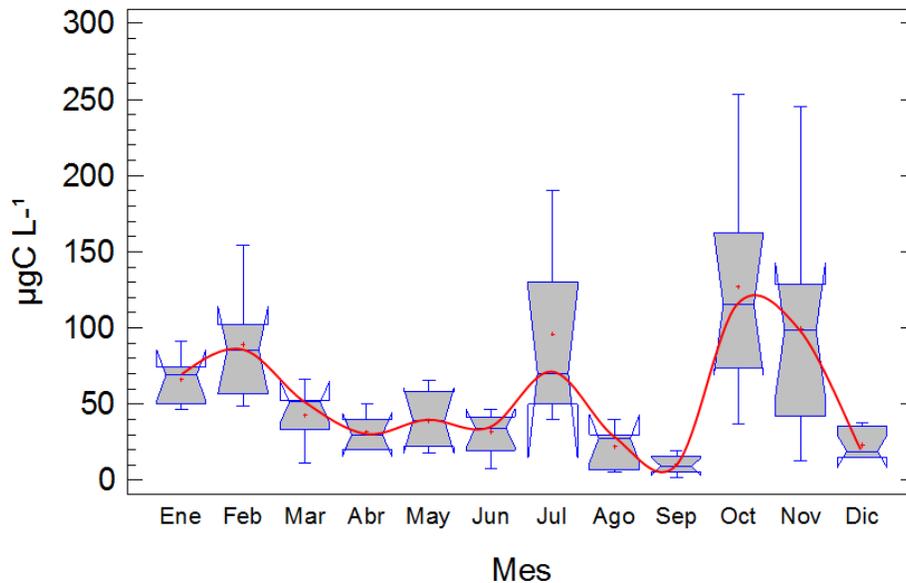


Fig. 23 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del HPP por mes.

Cuadro F. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de la biomasa del HPP entre meses, se marcan con una X donde hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene						X		X	X			X
Feb			X	X	X	X		X	X			X
Mar									X	X		
Abr							X		X	X	X	
May							X	X	X	X	X	
Jun							X		X	X	X	
Jul								X	X			X
Ago										X	X	
Sep										X	X	X
Oct												X
Nov												X

Según el diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 24), al comparar el período de mezcla con el epilimnion y el metalimnion no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), pero si las hubo con el hipolimnion ( $p < 0.05$ ). Esto se contradijo para el logaritmo de la biomasa al no encontrar diferencias significativas ( $F_{3,76} = 1.62$ ,  $p > 0.05$ ), lo que se atribuye a la presencia de casos extraordinarios como se observa en la Fig. 23.

La mayor variabilidad se registró en el período de epilimnion (de 5.58 a 162.68  $\mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$ ) y la menor en el hipolimnion (de 1.87 a 73.14  $\mu\text{g C}_{\text{org. L}^{-1}}$ ), aunque en este último estrato se observa la presencia de tres casos extraordinarios (Fig. 24).

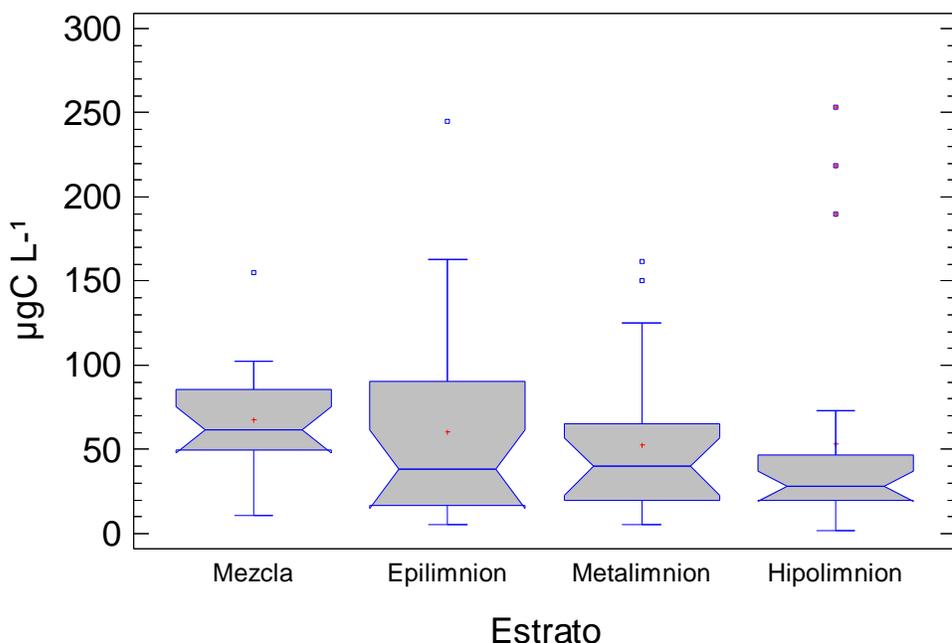


Fig. 24 Diagrama del análisis de cajas múltiples con muesca para la biomasa del HPP por estrato.

## Correlaciones entre variables biológicas y fisicoquímicas

Para los parámetros biológicos del APP se encontraron correlaciones positivas con la temperatura, nitratos y la salinidad. Mientras, fueron negativas para el contenido de carbono con la temperatura, fósforo total, salinidad y pH. No se presentaron correlaciones de los parámetros biológicos en general con el oxígeno disuelto, nitritos, amonio, fósforo total, fósforo soluble reactivo, conductividad y pH (Cuadro G).

Para los parámetros biológicos del HPP se obtuvieron correlaciones positivas entre la densidad y el oxígeno disuelto. Fueron negativas entre la densidad con los nitritos y en general con nitratos, amonio y salinidad. No se encontraron correlaciones de los parámetros biológicos con la temperatura, oxígeno disuelto, fósforo soluble reactivo, fósforo total, conductividad y pH (Cuadro H).

Cuadro G. Correlaciones de Spearman entre parámetros biológicos del APP y las variables físicas y químicas.

<b>Parámetros Químicos</b>	<b>Temperatura</b> °C	<b>Oxígeno Disuelto</b> mg/L	<b>Nitritos</b> NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<b>Nitratos</b> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>Amonio</b> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>Fósforo Total</b> PT	<b>Fósforo Soluble Reactivo</b> PSR	<b>Salinidad</b> g L <sup>-1</sup>	<b>Conductividad</b> mS cm <sup>-1</sup>	<b>pH</b>
<b>Densidad</b>	0.2896	NS	NS	0.3496	NS	NS	NS	0.2206	NS	NS
<b>Contenido de Carbono</b>	-0.2770	NS	NS	NS	NS	-0.2714	NS	-0.3536	NS	-0.3558
<b>Biovolumen</b>	0.2600	NS	NS	0.3296	NS	NS	NS	0.2271	NS	NS
<b>Biomasa</b>	0.3384	0.3095	NS	0.2355	NS	NS	NS	NS	NS	NS

n=85 Correlación significativa (p<0.05) NS= No significativo (p>0.05)

Cuadro H. Correlaciones de Spearman entre parámetros biológicos del HPP y las variables físicas y químicas.

Parámetros Químicos Parámetros Biológicos	Temperatura °C	Oxígeno Disuelto mg/L	Nitritos $\text{NO}_2^-$	Nitratos $\text{NO}_3^-$	Amonio $\text{NH}_4^+$	Fósforo Total PT	Fósforo Soluble Reactivo PSR	Salinidad $\text{g L}^{-1}$	Conductividad $\text{mS cm}^{-1}$	pH
<b>Densidad</b>	NS	0.2518	-0.2914	-0.4106	-0.3077	NS	NS	-0.3005	NS	NS
<b>Contenido de Carbono</b>	NS	NS	NS	-0.2396	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>Biovolumen</b>	NS	NS	NS	-0.4029	-0.3241	NS	NS	-0.2928	NS	NS
<b>Biomasa</b>	NS	NS	NS	-0.4127	-0.3272	NS	NS	-0.3113	NS	NS

n=85    Correlación significativa ( $p < 0.05$ )    NS= No significativo ( $p > 0.05$ )

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Parámetros físico-químicos Temperatura

Los diagramas profundidad-tiempo de isothermas del lago La Preciosa establecen una dinámica de monomixis cálida, con un periodo de mezcla en invierno (de finales de diciembre a finales de marzo) y un periodo de estratificación durante los meses restantes del año. Este comportamiento correspondió con la distribución mundial de patrones de mezcla propuesta por Hutchinson y Loffler (1956) que considera una clasificación térmica por la ubicación latitudinal y altitudinal de los lagos, así como del modelo de Lewis (1983) que considera una latitud ajustada por la altitud, e integra el parámetro morfométrico de la profundidad. Estos ambientes son típicos de lagos tropicales profundos (Lewis, 1996). Esta misma dinámica térmica se registra en los sistemas volcánicos maar vecinos de Alchichica (Oliva et al., 2001; Pérez y Rivera, 2011) y Atexcac (Arellano y González, 2011).

El año 2009 fue un año “Niño” (Australian Government, 2012) de mayo del 2009 a marzo del 2010, en La Preciosa las temperaturas superficiales fueron máximas en mayo, junio y julio del 2009 (meses de estratificación) con valores entre los 19.5 a 20 °C, las temperaturas del hipolimnion en ese periodo se mantuvieron alrededor de 14 °C, por lo que la diferencia entre la superficie y el fondo es de  $\pm 6$  grados, generalmente de menos de 6 °C se consideran diferencias de pequeña amplitud.

De acuerdo con Alcocer (2003) en los años de Niño se presenta un incremento de la temperatura del agua, por ejemplo en el lago Alchichica regularmente las temperaturas superficiales en los mismos meses de un año normal apenas alcanzan los 18.8 °C, mientras que en años de Niño se puede incrementar hasta 19.5 °C. También este autor menciona una anticipación de la estratificación, el epilimnion es más cálido y el gradiente de la termoclina es mayor, estas características pueden encontrarse para la dinámica presente en La Preciosa, (al comparar con el registro histórico de otro lago monomictico cálido Alchichica en la misma región).

## Oxígeno disuelto

Como bien es sabido la solubilidad del oxígeno en el agua depende de la salinidad (a menores salinidades mayor solubilidad de oxígeno) y principalmente de la temperatura (a menores temperaturas mayor solubilidad de oxígeno), por lo que en invierno los vientos en el Fetch mueven las masas de agua y las bajas temperaturas favorecen la disolución de este gas en la columna de agua. Los valores del oxígeno disuelto en La Preciosa fueron de 7 mg/L a 14 °C en la mezcla, como se mencionó en los resultados, el comportamiento de estos dos parámetros mostró un acoplamiento tanto en el 2009 como en el inicio de la estratificación de 2010. En la estratificación del 2009 la termoclina y oxiclina comienzan con una amplitud de 10 metros para abril, y ambos gradientes se muestran bien establecidos de agosto a noviembre en prácticamente 6 metros, con una variación de 7 mg/L a menos de 0.5 mg/L OD y de 18.5 a 15 °C.

El patrón del oxígeno disuelto describe un perfil clinógrafo (Wetzel 2001), donde el epilimnion tiende a la saturación debido probablemente al florecimiento explosivo de algunos grupos productores primarios del fitoplancton durante invierno y primavera, (Vinner-mozzini *et al.*, 2003) cianobacterias filamentosas *Nodularia sp.* (Oliva *et al.*, 2001, Adame *et al.*, 2008) en estratificación temprana y diatomeas (*Cyclotella alchichicana*) en el invierno (asociado con la mezcla) como sucede en Alchichica.

Por otra parte el hipolimnion permanece anóxico la mayor parte del periodo de estratificación como también ha sido reportado para el lago Alchichica (Alcocer *et al.*, 2000), esto se conoce como déficit de oxígeno hipolimnético (Lind, 1985). Los estados de anoxia hipolimnética se dan con el agotamiento del oxígeno en este estrato, generalmente debido a la descomposición bacteriana de materia orgánica, hundimiento de organismos muertos de las capas superficiales y la respiración heterotrófica bacteriana (Fuhrman y Azam, 1982; Ducklow, 2000). Se presentaron condiciones hipoxia-anoxia en el hipolimnion un poco antes de mayo, esta condición puede representar un retraso en la estratificación como lo reportado Alcocer (2003). También reporta que el ancho de esta capa se ve reducido cuando es un año niño, en La Preciosa las condiciones de anoxia se registraron después de los 19 metros de profundidad poco antes de mayo.

Con base en la visibilidad al disco de Secchi (VDS), y utilizando el criterio de Margalef *et al.*, (1983) en el cual se multiplica la profundidad VDS por 2.5, Arredondo *et al.*, (1984) estiman que la profundidad de la capa fótica es hasta donde incide el 1% de la luz solar. Sin embargo, el limnólogo Brasileño Estévez (1988) considera que el factor de multiplicación debe ser 3 para estudios latinoamericanos.

La visibilidad en el lago presenta fases turbias en la mezcla debido a que en esta etapa se remueven materiales y nutrientes del fondo, estos quedan suspendidos a lo largo de la columna de agua donde pueden ser utilizados por productores primarios que

generan florecimientos algales y por tanto se trata de una turbidez biogénica. El mes de abril se presentó como el mes más turbio en el estudio (VDS cercana a los 2 metros de profundidad). Al comenzar la estratificación los productores primarios también aprovechan la luz y disponibilidad de nutrientes para crecer y proliferar en la zona iluminada o fótica que corresponde con la zona trofógena. Los incrementos en densidad de los fototrófos pelágicos al morir entran en dinámica con la sedimentación con las demás partículas inertes, generando un límite fótico que se acopla en general con el tope de la termoclina de abril a poco antes de agosto. Este acoplamiento de la zona fótica a la termoclina se puede entender como la zona en la que el gradiente de densidad del agua representa una barrera para las partículas que se sedimentan, las atrapa y contribuye a la turbidez de esta zona.

En el resto de la estratificación la zona eufótica ganó profundidad no superando los 12.1 m, esta se puede considerar como una fase clara en el lago, que se asocia con un decremento sustancial de los nutrientes en el epilimnion que conllevan a una baja abundancia del fitoplancton. Cabe destacar que las dinámicas de la luz son un factor importante en la diferenciación de nichos de las picocianobacterias y puede modular el balance entre células libres y microcolonias (Callieri, 2010).

El límite fótico del 1% de PAR no siempre es una barrera para el picoplancton autotrófico ya que en zonas con 0.1% de PAR y que son aún más profundas que el metalimnion llegan a tener actividad fotosintética (Macek *et al*, en preparación).

## Salinidad, conductividad, alcalinidad y pH

Los lagos presentes en la región sub-árida de la Cuenca Oriental muestran una alta alcalinidad y elevado pH con dominancia de bicarbonatos-carbonatos, cloro, sodio y magnesio (Armienta *et al.*, 2008). Al registrar altas conductividades este sistema se caracteriza como uno de Tipo 2, típico de cuencas endorreicas en donde la ausencia de afluentes determina un proceso de concentración de iones que tienden a acentuarse por el déficit de lluvia, provocando un desbalance entre la precipitación anual (500 mm) y la evaporación (600 mm), de tal manera que la columna de agua solo puede perder materiales mediante la precipitación de sales, ya sea hacia el fondo o la zona litoral tal como lo reportan Torres y García (1995).

Según la salinidad promedio del sistema que es de  $1.2 \text{ gL}^{-1}$ , este se clasifica como subsalino ya que se encuentra dentro del intervalo de  $0.5$  a  $3 \text{ gL}^{-1}$  propuesto por Hammer (1987). Este lago se encuentra en un proceso de salinización del agua que se ha favorecido por la extracción de las aguas subterráneas (Alcocer y Escobar, 1990). Este tipo de sistemas acuáticos también son llamados atalásicos (Bayly, 1967) o atalasalino (Vilaclara *et al.*, 1993), término referente a las aguas continentales salinas con depósitos de sales minerales de origen continental.

De acuerdo con el pH ( $8.7 \pm 0.52$ ), indica que el cuerpo de agua es alcalino, existiendo una predominancia de los bicarbonatos sobre los carbonatos.

La presencia de magnesio y bicarbonatos puede resultar de la interacción agua-roca y de la precipitación-evaporación, donde el anión predominante fue el bicarbonato, mientras que el magnesio es el catión más abundante en La Preciosa (Fig. 25) de acuerdo con Armienta *et al.* (2008).

Durante el mes de abril del 2010 se presentó un cambio de coloración del lago entre turquesa y blanquecino además de un ligero aumento de pH en la superficie de 8.1 a 8.5 de marzo para abril a 1 m de superficie; este fenómeno se asocia a la precipitación de calcio o evento blanco (Dittrich y Obst, 2004), denominado así por la coloración lechosa que presenta el sistema.

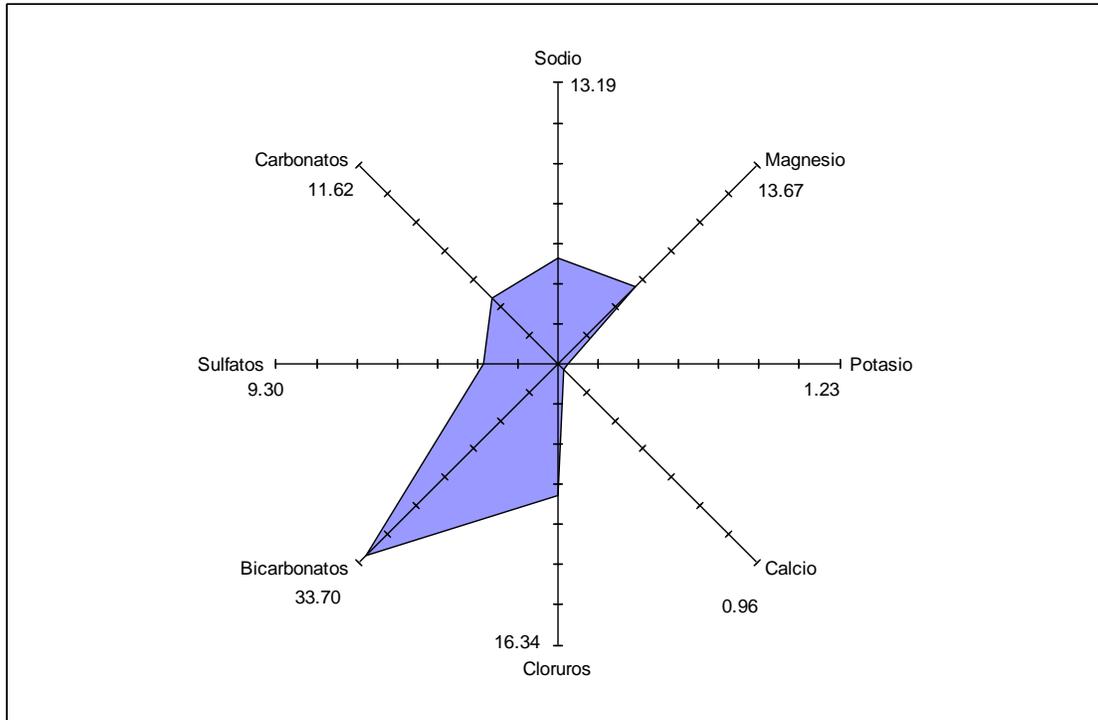


Fig. 25 Composición iónica de La Preciosa con base en Armienta et al. (2008).

## Nutrientes

El lago La Preciosa es un sistema que se puede clasificar como ultraoligotrófico por contar con menos de  $200 \text{ mg m}^{-3}$  para nitrógeno inorgánico disuelto (NID) epilimnético de acuerdo con la clasificación trófica propuesta por Wetzel (2001). Mientras que según la concentración de fósforo total epilimnético, el lago es hiper-eutrófico por presentar  $238.35 \text{ mg m}^{-3}$ , además de estar dentro del rango anual de  $750\text{--}1200 \text{ mg m}^{-3}$  de acuerdo con el mismo autor (Cuadro I). Los lagos tropicales monomíticos cálidos debido a su largo período de estratificación presentan una limitación por el agotamiento de nutrientes en el epilimnion (Alcocer y Lugo, 2003), mientras que durante la circulación las concentraciones tienden a ser homogéneas a lo largo de la columna de agua (Lewis, 1983).

Cuadro I. Concentraciones ( $\text{mg m}^{-3}$ ) promedio  $\pm$  desviación estándar de nutrientes en el lago La Preciosa durante un ciclo anual.

	Circulación	Estratificación			Rango (valor anual)
	Columna de agua	Epilimnion	Metalimnion	Hipolimnion	
$\text{NO}_2^-$	$0 \pm 0$	$0.0467 \pm 0.1246$	$0.0695 \pm 0.1904$	$0.9139 \pm 1.8969$	0 - 7.1101
$\text{NO}_3^-$	$80.38 \pm 54.99$	$82.34 \pm 41.67$	$100.69 \pm 57.12$	$88.81 \pm 49.12$	10.94 - 211.63
$\text{NH}_4^+$	$106.35 \pm 249.16$	$95.53 \pm 105.64$	$86.27 \pm 76.42$	$118.44 \pm 115.59$	18.86 - 435.91
<b>NID</b>	186.73	177.91	187.02	208.16	
<b>PSR</b>	$228.75 \pm 111.10$	$250.99 \pm 215.78$	$284.69 \pm 231.38$	$324.33 \pm 231.26$	6.94 - 799.97
<b>PT</b>	$91.61 \pm 69.38$	$238.35 \pm 184.91$	$199.95 \pm 205.30$	$297.97 \pm 259.58$	0.08 - 949.89

En el lago Alchichica la distribución de los nitratos al inicio de la estratificación se ha explicado como una consecuencia del florecimiento de *Nodularia spumigena* de acuerdo con el patrón reportado por Lugo *et al.*, (2000) y Arredondo *et al.*, (1983) donde la intensidad de crecimiento de *N. spumigena* se correlaciona con la concentración anual de este nutriente, indicando el papel de las cianobacterias como fuente de nuevo nitrógeno hacia el lago a través de la fijación de este gas de la atmósfera (Oliva *et al.*, 2009). *N. spumigena* requiere concentraciones de salinidad de 5 a 20 g L<sup>-1</sup> para estar presente. El crecimiento máximo se da en concentraciones de 5 a 10 g L<sup>-1</sup>, especialmente cuando el sulfato y el sodio son dominantes (Nordin y Stein, 1980). Sin embargo, en el lago La Preciosa las concentraciones de salinidad se encuentran en  $1.2 \pm 0.2$ , los iones dominantes son los bicarbonatos y el magnesio, además de presentar valores de pH de  $8.7 \pm 0.52$ ; lo que impide la presencia de *N. spumigena*, de tal forma que la dinámica de los nitratos puede responder a otros factores.

La importancia de la fijación del nitrógeno en ecosistemas acuáticos varía marcadamente, con fijación de nitrógeno planctónico contribuyendo de 0 a 82% de las entradas totales de nitrógeno en varios sistemas, esta aportación es mayor en lagos eutróficos pero generalmente más baja en lagos oligotróficos, mesotróficos y en la mayoría de los estuarios, incluyendo los estuarios eutróficos (Howarth *et al.*, 1988).

Cuando el oxígeno se agota, los nitratos podrían ser usados para la respiración bacteriana antes de que la reducción de sulfatos se vuelva el proceso dominante; esto podría explicar las bajas concentraciones de nitratos asociadas con las bajas concentraciones de oxígeno en el hipolimnion durante la estratificación bien establecida y tardía durante el 2009. Algunos grupos representativos asociados con la desnitrificación son bacterias respiratorias gram-negativas del género *Paracoccus* y gram-positivas *Actinobacteria* que han sido encontradas en una amplia distribución, abundancia y altas biomásas en lagos salinos y de agua dulce junto con bacterias anaeróbicas gram-positivas (Hernández-Avilés *et al.*, 2010).

Las altas temperaturas del agua en los lagos tropicales pueden ser un factor que trae como consecuencia la pérdida interna de nitrógeno a través de los procesos de desnitrificación, ya que estos ocasionan una menor disponibilidad de nitrógeno (Lewis, 2002).

La dinámica de los nitritos en que se registraron concentraciones bajas en el epilimnion y metalimnion durante la estratificación tardía y bien establecida, pueden ser debidas a las condiciones oxigenadas y a los procesos de desnitrificación, además de la asimilación y amonificación (Libes, 1992). Mientras que se presentaron altas concentraciones en el hipolimnion durante la estratificación temprana del 2009 y 2010 debido a que existe una mayor intensidad de los procesos de desnitrificación en ambientes con bajas concentraciones de oxígeno disuelto, en los cuales el nitrato es reducido a nitrito (Esteves, 1988).

Las concentraciones de amonio y nitratos pueden parcialmente controlar las tasas de fijación de nitrógeno, estas sustancias suprimen la síntesis de nueva nitrogenasa (Stewart, 1969; Horne y Goldman, 1972; Horne *et al.*, 1979; Carr y Whitton, 1982). Esto probablemente ocurre porque se necesita menos energía para asimilar amonio o nitratos que para sintetizar nitrogenasa y fijar nitrógeno; cultivos puros de cianobacterias crecen mucho más rápido sobre amonio o nitratos como fuentes de nitrógeno que cuando son forzados a fijar nitrógeno (Wolfe, 1954).

En el año 2009 durante la estratificación bien establecida, las concentraciones de amonio en el hipolimnion se pueden explicar a través de la acumulación de materia orgánica y de las tasas de amonificación que ocurren a esas profundidades (Payne, 1986).

Las concentraciones presentes de amonio durante la mezcla del 2009 y 2010 son producto de la descomposición de la materia orgánica acumulada en el hipolimnion durante ocho meses de estratificación como ha sido propuesto por Wetzel (2001). Durante la estratificación temprana se presentan concentraciones relativamente bajas en el epilimnion y metalimnion provocadas probablemente por el efecto barrera que produce la termoclina, ya que el amonio después de la mezcla es oxidado y queda disponible en forma de nitratos en el epilimnion mismos que permiten el desarrollo del fitoplancton y de las cianobacterias (Yamasaki *et al.*, 2002). Además, se observó que en condiciones de hipoxia-anoxia la concentración de amonio aumenta considerablemente, asociados a procesos de amonificación.

Los fosfatos se encuentran en función del oxígeno disuelto y del régimen térmico (Wu, 2000). Las concentraciones homogéneas presentes durante la mezcla del 2009 y 2010 son resultado de la alta descomposición de la materia orgánica en el hipolimnion durante el periodo de estratificación previa y su posterior redistribución en las capas superficiales al momento de la mezcla (Payne, 1986). También debido a su liberación desde los sedimentos hacia la columna de agua producto de las condiciones anóxicas del hipolimnion (Lampert y Sommer 1997).

La distribución vertical del PSR durante la estratificación bien establecida y tardía registró concentraciones altas a lo largo de la columna de agua. Mientras que para el PT las concentraciones fueron homogéneas con un rango de 2.0 a 13.85  $\mu\text{mol L}^{-1}$ .

En el caso del epilimnion durante la estratificación temprana la reducción del PSR fue resultado de la asimilación del ortofosfato por parte del fitoplancton, ya que el fósforo es un nutriente esencial que tiene un papel vital en el almacenamiento de energía y como transformador dentro de la estructura de la membrana (Björkman *et al.*, 2000), y las altas concentraciones del PSR registradas en el hipolimnion pueden deberse a la remineralización de la materia orgánica y a la relación que existe entre la baja disponibilidad de oxígeno disuelto y los sedimentos (Lampert y Sommer, 1997).

## Parámetros biológicos

### Abundancia del picoplancton autotrófico

Los lagos tropicales pueden presentar mayores abundancias picoplanctónicas en comparación con los lagos templados, posiblemente por diferencias latitudinales, mayor incidencia de luz a lo largo del año y mejor reciclamiento de materiales en la columna de agua que favorecen la actividad en el sistema (Kilham y Kilham., 1990, 1991). Asimismo en una misma latitud existen diferencias entre lagos con el mismo estado trófico (Lugo *et al.*, 2000), como variaciones en los sustratos orgánicos y nutrientes que determinan la distribución espacial y temporal de la abundancia planctónica y le confieren variabilidad interanual y entre lagos (Wetzel, 2001).

El APP generalmente se compone por formas unicelulares de tamaño pequeño y tienden a predominar en lagos oligotróficos y mesotróficos (Macek *et al.*, en preparación). Este grupo presenta adaptaciones para metabolizar en condiciones inferiores al PAR (Callieri *et al.*, 1997), inclusive cerca del 0.1% es este tipo de lagos (Macek *et al.*, en preparación) lo que explica parte de la distribución del APP en la termoclina e inclusive en la parte superior del hipolimnion del lago.

En la mezcla a pesar de la circulación de toda la columna de agua el APP presentó densidades altas en los primeros metros con respecto a las zonas más profundas, lo que se explica por la formación de agregados coloniales (fig. 2) observadas en el microscopio y a través del análisis de imágenes (Marcos, 2011) estrategia que utiliza el APP para reducir el hundimiento celular, asimismo las picocianobacterias tienen la facultad de migración vertical por el llenado y vaciado de sus vacuolas con gas, con esto se logra tener una baja tasa de hundimiento (Reynolds, 2006; Macek *et al.*, en preparación) y permanecer por un mayor tiempo en el área de incidencia de luz. Aunque el periodo de mezcla se caracteriza por la homogeneidad de condiciones a lo largo de la columna de agua (temperatura y oxígeno disuelto) y elementos (nutrientes y sustratos orgánicos), la luz es el factor que marca la diferencia en el estrato superficial al favorecer la actividad fotosintética asociada con la disponibilidad de nutrientes. Se corrobora por la profundidad donde se registró un máximo de APP que queda dentro del alcance de la zona fótica (5 a 9 m), ver figuras 3 y 9.

En profundidades mayores a la zona fótica la abundancia del APP no se ve favorecida por la limitación de este recurso y su constante movimiento a la largo de la columna de agua como resultado de la mezcla, lo que hace a las células desplazarse alternadamente entre las zonas de luz y oscuridad del lago.

Cabe mencionar que la aportación de agregados coloniales a la abundancia de APP a lo largo de la columna de agua fue mayor en la circulación que en la estratificación, (fig. 23) lo que implicó una estrategia de formación de estos en época de circulación para evitar el hundimiento por efecto de la mezcla de toda la columna de agua o el efecto de

la turbulencia producidas por los fuertes vientos en las capas superficiales del lago (Marcos, 2011). Contrariamente a lo que ha sido reportado por Passoni y Callieri (2000) en donde los agregados coloniales de APP tienden a predominar en condiciones de limitación de nutrientes, en el lago La Preciosa fueron predominantes en la circulación y en la termoclina donde existía mayor disponibilidad de los mismos o bien como una estrategia para evitar la depredación (Stockner, 1991).

El incremento del APP a través de la estratificación fue notable en el epilimnion y principalmente en el metalimnion, pese a la profundización gradual de la termoclina la distribución principal de abundancia de APP se mantuvo entre 10 y 20 metros, con lo que superó la profundidad de la zona fótica (12.5 metros) y se confirmó la actividad del APP en profundidades superiores al PAR (Macek *et al*, en preparación; Craig, 1987 y Malinsky-Rushansky *et al.*,1997) sugieren que el APP tiene una alta eficiencia fotosintética a bajas condiciones de radiación lumínica por lo que se encuentran bien aclimatadas. Camacho y Vicente (1998) indican que la profundidad del metalimnion se ve enriquecida por un espectro verde, donde el APP posee una ventaja al aprovechar esta luz (longitud de onda) por sus ficoeritrinas que absorben efectivamente este haz, de esta manera optimizan su fotosíntesis y predominan en aguas con poca luz (Stomp *et al.*, 2007). Esta distribución que fue registrada en La Preciosa y concuerda con lo reportado en los lagos maar vecinos Atexcac (Arellano y González, 2011), Alchichica (Pérez y Rivera, 2011) y en otros lagos estratificados en latitudes templadas (Camacho *et al.*, 2003).

En el lago La Preciosa se ha registrado al inicio de la estratificación el fenómeno del emblanquecimiento del sistema que está asociado con la precipitación de carbonato de calcio. Dittrich y Obst (2004) indican que la precipitación de calcio en lagos oligotróficos está altamente relacionada con afloramientos de picocianobacterias, estos autores sugieren que la precipitación de calcio es inducida por las picocianobacterias e influenciada por la toma de carbono inorgánico de las formas de bicarbonato cuando el CO<sub>2</sub> es limitante en el agua y la nucleación del carbonato en las estructura de las paredes celulares.

Múltiples eventos blancos han sido registrados en los lagos oligotróficos de aguas duras durante el verano (Küchler-Krischun, 1990) en estos sus aguas adquieren completamente una coloración lechosa alrededor de dos semanas (Strong y Eadie, 1978). El fenómeno también se asocia con un proceso de descalcificación epilimnética (Wetzel, 2001).

## Contenido de carbono del picoplancton autotrófico

La dinámica del carbono orgánico no ha sido estudiada ampliamente para el picoplancton ya que la información que se ha generado solo se limita para lagos templados (Karl *et al.*, 1991; Ittekkot *et al.*, 1996). En estudios bacterianos la cuantificación del contenido de carbono (CC) se toma en cuenta el tamaño celular y se usa un factor de conversión con base en el volumen celular (Posch *et al.*, 2001). El contenido de carbono presenta una relación cercana con la hidrodinámica del lago (Punning *et al.*, 2003).

El APP representa una fuente potencial del carbono para el circuito microbiano y el metazooplancton (Stockner *et al.*, 2000), teniendo como ventaja sobre otros organismos el presentar un tamaño pequeño en ambientes oligotróficos, haciéndolos menos limitados en el nivel molecular especialmente cuando se incrementa el cociente superficie-volumen (Raven, 1986; Chisholm, 1992).

En el cuadro G de correlaciones de Spearman se aprecia que el contenido de carbono se correlacionó directamente con el oxígeno disuelto y el PSR, el primero asociado con la actividad fotosintética del APP que genera como subproducto oxígeno disuelto y el segundo al ser un nutriente esencial para este proceso. Y de manera inversa con la conductividad y en general con el nitrógeno en sus diferentes formas, las formas de nitratos a través de la asimilación y el nitrógeno molecular como parte del proceso de fijación por este grupo particularmente cuando este es limitante en la columna de agua.

## Biomasa del picoplancton autotrófico

La evaluación de la biomasa demuestra que el APP es una forma muy importante de la biomasa total para el circuito microbiano en los lagos oligotróficos (Straškrabová *et al.*, 1999), donde la variación estacional de la biomasa del APP en ambientes oligotróficos se encuentra regularmente afectada por la temperatura; sin embargo, no se encontró correlación entre la temperatura y la biomasa en La Preciosa (Cuadro G). Cabe decir que las adiciones de materia orgánica disuelta, pueden ser la razón por la cual los ambientes oligotróficos como los Axalapascos registren máximos de biomasa durante el invierno (mezcla) y la primavera (inicio de estratificación), donde 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).

El APP es considerado como un importante reservorio de biomasa para la base de las redes tróficas en ambientes oligotróficos (Callieri y Stockner, 2002), sin embargo, en el lago este grupo no es el mayor contribuyente de biomasa en comparación con el HPP.

En La Preciosa se registraron los máximos de biomasa durante la circulación en febrero, lo que responde a una mayor disponibilidad de nutrientes, que son resuspendidos del fondo del lago y quedan disponibles para los productores.

Durante periodos de estratificación Kirchman y Richdl (1997) y Shia y Ducklow (1994) reportan para los lagos oligotróficos un declive en las biomásas en respuesta al agotamiento de nutrientes. En la Preciosa se registraron máximos de biomasa en el metalimnion durante la estratificación bien establecida y tardía, lo que coincide con lo reportado para este estrato por Camacho *et al.*, (2003) y Macek *et al.*, (en preparación). Las elevadas concentraciones de biomasa en el metalimnion en la estratificación bien establecida, se deben a su capacidad para sintetizar y acumular altas concentraciones de ficoeritrinas (Callieri y Stockner, 2002).

El declive de las biomásas durante la estratificación no solo puede ser explicado por el agotamiento de nutrientes, ya que durante la estratificación el pastoreo por el nano y microzooplancton implica el consumo probable del APP (Stockner y Shortreed, 1994; Callieri y Stockner, 2002) y también debido a que las picocianobacterias pueden verse afectadas por los piceucariontes ya que compiten con otras formas del picofitoplancton por la radiación de la luz en ambientes oligotróficos (Stockner *et al.*, 2000; Callieri y Stockner, 2002).

La biomasa se correlacionó de manera inversa con el amonio y el pH, pero presentó una mayor correlación con la conductividad y el fósforo total ya que el fósforo es un nutriente esencial que tiene un papel vital en el almacenamiento de energía y como transformador dentro de la estructura de la membrana (Björkman *et al.*, 2000).

## **Abundancia del picoplancton heterotrófico**

En el Lago La Preciosa hay una mayor diversidad de morfotipos cocos, bacilos, espirilos, vibrios y filamentos en comparación con los registrados en otros lagos de la Cuenca Oriental como Alchichica y Atexcac donde predominan los cocos y bacilos de tamaños pequeños (Hernández-Avilés, *et al.*, 2012 y Arellano y González, 2011). Asimismo, en este lago se encontraron agregados coloniales de APP en toda la columna de agua durante la mezcla y en la termoclina en la estratificación bien establecida y tardía, así como flóculos de HPP hasta los 30 m de profundidad en la mezcla y máximos en el metalimnion y el hipolimnion en las mismas fases de la estratificación. Fenómeno de agregación no se presenta ni en Alchichica ni en Atexcac donde son más comunes las formas unicelulares individuales.

La abundancia del HPP siguió un patrón vinculado a la hidrodinámica del lago (período de circulación y estratificación). Durante el período de circulación, el HPP se distribuyó homogéneamente en la columna de agua. A lo largo del período de estratificación, la distribución de HPP en profundidad siguió un patrón de disminución hacia el fondo

como lo reporta Izaguirre *et al.* (2003) para los lagos tropicales y un máximo en el hipolimnion durante la estratificación tardía; dinámicas similares fueron reportadas para los lagos Alchichica (Hernández-Avilés *et al.*, 2010; Pérez y Rivera, 2011) y Atexcac (Arellano y González, 2011) como respuesta a la disponibilidad de nutrientes y la variación estacional de la temperatura del agua (Campbell *et al.*, 1997).

Weisse (1993) determinó que la dinámica del picoplancton en los lagos oligotróficos depende de la distribución de los nutrientes, lo anterior se ratificó por la correlación entre la abundancia del HPP y los nutrientes que fue significativa (Cuadro H) con excepción de los nitritos y el PSR.

En el lago hubo presencia de flóculos picoplanctónicos heterotróficos, los cuales son colonias bacterianas encargadas de transferir su biomasa a microdepredadores y a niveles tróficos superiores. Se encontraron diferentes formas bacterianas como espirilos, filamentos, bacilos, cocos y vibrios. De los cuales las tres últimas formas fueron las que se encontraron en flóculos siendo las colonias de bacilos las más abundantes. Los valores máximos se observaron en la estratificación con valores de 18 mil flóc.mL<sup>-1</sup>, en la transición de mezcla a estratificación los valores fueron mínimos. En el periodo de circulación los valores no excedieron los 4mil flóc.mL<sup>-1</sup> a pesar de la disponibilidad de sustratos orgánicos en toda la columna de agua véase figura 24 (Marcos, 2011).

La distribución de los flóculos bacterianos heterotróficos se vio influenciada directamente por el periodo de estratificación del lago, ya que hacia el metalimnion y la parte superior del hipolimnion se mostraron las mayores abundancias, (figura 24) lo que se puede deber a la lenta precipitación de sustratos orgánicos hacia el fondo como resultado del gradiente de densidad en la termoclina (Marcos, 2011).

En relación con el oxígeno disuelto, se presentó mayor desarrollo de flóculos en zonas limitadas por este gas (menores a 1.5 mg L<sup>-1</sup>), mismas regiones en las que prevalecen los procesos de descomposición de la materia orgánica. Para el período de circulación la densidad máxima fue de 4mil flóc mL<sup>-1</sup> (en los primeros 25 metros) en comparación con los 18 mil flóc mL<sup>-1</sup> alcanzados en los meses de estratificación bien establecida en el hipolimnion (Marcos, 2011).

La abundancia del picoplancton heterotrófico en los sistemas acuáticos representa un equilibrio entre las tasas de crecimiento y pérdida (mortalidad y depredación), los cuales son regulados por los nutrientes inorgánicos, sustratos orgánicos, la luz ultravioleta, la depredación, la lisis, la temperatura y otros factores (Elser *et al.*, 1995; Wetzel, 2001), además de ser sensible a contaminantes e influir sobre el flujo de materia y energía (Schallenberg y Burns, 2001).

Cabe mencionar que Camacho *et al.* (2003) reportan que la profundidad del lago, el estado trófico y la mezcla o estabilidad de la superficie así como la profundidad de las

capas a lo largo de la columna de agua también pueden influir significativamente en las abundancias del HPP.

De acuerdo con Callieri *et al.* (2002) hay una relación inversa entre la contribución del picoplancton en la fijación de carbono y el estado trófico del lago.

## **Contenido de carbono del picoplancton heterotrófico**

Porter y Feig (1980) proponen que el HPP es una fuente importante de carbono para los niveles tróficos superiores en sistemas oligotróficos ya que este transfiere su contenido de carbono (CC) al zooplancton (Lampert y Sommer, 1997).

El HPP aportó menos CC que el APP, a diferencia de Atexcac (Arellano y González, 2011) en donde sucede lo contrario. Las concentraciones de CC se mantuvieron constantes durante la mezcla, debido al reciclamiento constante de la columna de agua favoreciendo la oxigenación por los procesos de circulación y permitiendo además una mayor disponibilidad de nutrientes para el picoplancton heterotrófico. Seguido de un decremento durante la estratificación temprana y bien establecida, con un notable aumento durante la estratificación tardía en el mes de noviembre.

El CC presentó una correlación positiva con nitritos de donde se puede inferir la presencia de bacterias desnitrificantes. Y correlaciones negativas con nitratos y fósforo total. Las bacterias en ambientes naturales, también pueden encontrarse limitadas por P o N en lugar de carbono orgánico. Esta limitación por nutrientes minerales se ha relacionado con el elevado contenido de las bacterias en P y N, en comparación a su contenido en C orgánico. Esta composición elemental implica que las bacterias tengan altos requerimientos de nutrientes minerales. Desde un punto de vista funcional, la limitación del bacterioplancton por P o por N puede llegar a ser un importante controlador de la cantidad de carbono orgánico que éste proceso (Rivkin & Anderson, 1997).

La tasa de producción bacteriana equivale alrededor de 20 a 30% de la tasa de producción primaria (Cole *et al.*, 1988) en las aguas epicontinentales. El picoplancton heterotrófico utiliza la materia orgánica disuelta (MOD) como una fuente de energía y carbón orgánico para incorporarlo a su biomasa, o de una manera más general convierte materia orgánica disuelta a materia orgánica particulada. La MOD proviene de los sistemas tróficos vía excreción y lisis. Se ha estimado que la exudación del picoplancton representa del 5 a 50% del carbón fijado por fotosíntesis (Azam *et al.*, 1983; Williams, 2000).

## **Biomasa del picoplancton heterotrófico**

El HPP es un importante enlace de transferencia de energía en los niveles tróficos superiores, donde la biomasa generada puede seguir una distribución asociada con los gradientes físicos y químicos de la columna de agua, los cuales pueden cambiar estacionalmente y contribuyen al incremento en los niveles de nutrientes (Fernández *et al.*, 1990).

En la circulación la biomasa presenta concentraciones bajas y homogéneas a lo largo de la columna de agua, seguido de un decremento generalizado para la estratificación temprana y bien establecida. Mientras que durante la estratificación tardía se registró un incremento considerable en la columna de agua siendo el hipolimnion donde se presentaron los valores máximos de biomasa del ciclo anual. De acuerdo con las correlaciones de Spearman, este incremento considerable es debido a las bajas concentraciones presentes de nitratos, amonio, fósforo total y salinidad (Cuadro H). Además la biomasa es calculada con base en la densidad y al volumen celular que al aumentar también lo hace el contenido de carbono; y precisamente en este último período de la estratificación se registró un incremento de la densidad y del contenido de carbono.

Como productores primarios el APP juegan un papel importante en la generación de biomasa en ambientes poco productivos, mientras el HPP es esencial en los ciclos biogeoquímicos y los circuitos microbianos (Sommaruga y Robarts, 1997).

## CONCLUSIONES

-En el lago La Preciosa la variación espacio-temporal de la abundancia y biomasa del picoplancton heterótrofo a través de un ciclo anual estuvo determinada en general con la dinámica de monomixis cálida del lago. Durante la estratificación térmica el epilimnion, el metalimnion y el hipolimnion cambiaron de amplitud y ubicación en la columna de agua a través del tiempo, definiendo tres etapas: temprana, bien establecida y tardía, que le confirieron un mayor dinamismo al sistema y por ende a la distribución del picoplancton procarionta.

-El gradiente de densidad establecido por la termoclina representó una barrera contra la transferencia de nutrientes hacia el fondo que favoreció su acumulación en el metalimnion, siendo este sitio adecuado para el desarrollo del picoplancton autotrófico al ser activos incluso con niveles de radiación fotosintéticamente activa menores al 1%.

-En el Lago La Preciosa hubo una mayor diversidad de morfotipos bacterianos como cocos, bacilos, espirilos, vibrios y filamentos en comparación con los registrados en los lagos Alchichica y Atexcac donde predominan los cocos y bacilos de tamaños pequeños, lo que responde a un menor grado de salinización del agua en este sistema.

-La biomasa de APP se vio favorecida por la disponibilidad de nutrientes y luz en las capas superficiales durante la circulación, gracias a sus estrategias para evitar el hundimiento al poseer vacuolas de gas constituidas por un número variable de vesículas de gas en el citoplasma, así como la formación de agregados coloniales unidos por mucilago.

-La abundancia del HPP individual y de flóculos presentaron sus valores máximos principalmente durante la estratificación bien establecida y tardía acoplándose con la termoclina e hipolimnion, presentándose tres veces más flóculos de HPP que los agregados coloniales de APP. Esta distribución se debe a la mayor disponibilidad de nutrientes acumulados en la termoclina e hipolimnion y a su carencia en el epilimnion durante estas fases de la estratificación.

-El HPP aportó más biomasa que el APP, por lo que esta fracción del picoplancton es sumamente importante como enlace de transferencia de energía en los niveles tróficos superiores a través del circuito microbiano y en especial en ambientes poco productivos como La Preciosa.

-Las observaciones *in situ* de los procesos de precipitación de calcio en las células del picoplancton bajo condiciones controladas o al menos de manera más puntual son necesarias para mejorar el entendimiento de la interacción picocianobacterias-minerales.

## LITERATURA CITADA

- Adame M. F., Alcocer J. & Escobar E. (2008) Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Fresh Biol* 53:22-31
- Alcocer D. J. & Escobar E. (1990) The drying up of the Mexican plateau axalapazcos. *Salinet* 4:34-36
- Alcocer D. J., Lugo A., Escobar E., Sánchez M. R. & Vilaclara G. (2000) Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verh.Internat.Verein.Limnol.* 27, 3166-3169.
- Alcocer J. & Lugo A. (2003) Effects of niño on the dynamics of lake Alchichica, Central México. *Ver Internat. Limnol* 27:3166-3169
- Alcocer D. J., Escolero O. & Marin L. E. (2005) Problemática del agua de la cuenca oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala In: Jiménez B., Marín L. (eds) *El Agua en México vista desde la Academia*, Edición digital, México, 403 Pág.
- Arellano J. A. & González E. (2011) Dinámica espacio-temporal del picoplancton procarionte y su relación con la variabilidad limnológica del lago volcánico Atexcac, Puebla, UNAM, Tesis de licenciatura.
- Armienta M. A., Vilaclara G., De la Cruz-Reyna S., Ramos S., Cenicerros N., Cruz O., Aguayo A. & Arcega-Cabrera F. (2008) Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *jvolgeores* 178: 249-258
- Arredondo F. J. L., Borrego L., Castillo R. & Valladolid M. (1983) Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca Oriental de Puebla. *Biótica* 8(1): 37-47.
- Azam F., Fenchel T., Field J., Gray J., Meyer-Reil L. & Tingstad F. (1983) The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar Ecol Prog Ser* 10:257-263.
- Bayly I. A. E. (1967) *The general biological classification of aquatic environments with special reference to those in Australian*. En: A. H. Weatherley (Eds.) *Australian inland waters and their fauna*. Aust. Nat. Univ. Press, Canberra: 287.
- Björkman K., Thomson-Bulldis A. L. & Karl D. M. (2000) Phosphorus dynamics in the North Pacific subtropical gyre. *Aquat Microb Ecol* 22: 185-198
- Bureau of Meteorology, Australian Government (2012) consultada el 09 de junio del 2012.  
<http://agencysearch.australia.gov.au/search/click.cgi>

- Callieri C. & Heinimaa S. (1997) Microbial loop in the large subalpine lakes. *Mem ist ital. Idrobiol* 56:1-8
- Callieri, C. & Pinolini, M.L. (1995). Picoplankton in Lake Maggiore, Italy. *International Revue der gesamten Hydrobiologie* 80, 491-501.
- Callieri C. & Stockner J. G. (2002) Freshwater autotrophic picoplankton: a review. *J. Limnol.*, 61: 1-14.
- Camacho A. & Vicente E. (1998) Carbon photoassimilation by sharply stratified phototrophic communities at the chemocline of lake Arcas (Spain). *Microbiol Ecol* 25:11-22
- Camacho A., Miracle R. M. & Vicente E. (2003) Which factors determine the abundance and distribution of picocyanobacteria in inland waters? A comparison among different types of lakes and ponds. *Arch Hydrobiol* 157:332-336
- Campbell L., Porter K. G., Paerl H., Hodson R., Pace M. L., Priscu J., Riemann B., Scavia D. & Stockner J. G. (1997) Microbial interactions in lake food webs. En Carpenter, S. R. (Ed.), *Complex Interactions in Lake Communities*. Springer-Verlag, New York. 209-227
- Carr N. G. & Whitton B. A. (1982) *The biology of cyanobacteria*. Univ. Calif
- Cervantes S. A. (1980) *Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos*, Departamento de Biología, Sección de limnología y contaminación, ENEP Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chisholm S. W. (1992) *Prochlorococcus marinus* nov. *Arch Microbiol* 21:15-26
- Cole J., Findlay S. & Pace M. (1988) Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems, a cross-system overview. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 43, 1-108.
- Comisión Nacional del Agua (2002) *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Libres-Oriental, Estado de Puebla*. Subdirección de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (2011) consultada el 24 de Enero del 2011.  
[http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp\\_070.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_070.html)
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992)  
<http://www.unfccc.de>

- Craig S. R. (1987) The distribution and contribution of picoplankton to deep photosynthetic layers in some meromictic lakes. Act of Acad Aboensis 47:55-81
- Dittrich M. & Obst M (2004) Are picoplankton responsible for calcite precipitation in lakes? Ambio 33:559-564
- Ducklow H. W. (2000) Bacterial production and biomass in the oceans. En D. L. Kirchman (Ed.), 1st ed. Wiley-Liss, Microb Ecol Oceans 85-120
- Elser J. J., Stabler L. B. & Hasset R. P. (1995) Nutrient limitation of bacterial growth and rates of bacterivory in lakes and oceans: a comparative study. Aquat Microb Ecol 9: 105-110.
- Ernst A., Marschall P. & Postius C. (1995) Genetic diversity among *Synechococcus* spp. (cyanobacteria) isolated from the pelagial of Lake Constance. Microbiol Ecol 17:197-204
- Esteves F. A. (1988) Fundamentos de limnología. Interciencia/Finep. Río de Janeiro. 575
- Fahnenstiel G. L. & Carrick H.J. (1992) Phototrophic picoplankton in lakes Huron and Michigan: abundance, distribution, composition and contribution to biomass and production. Can. J Fish aquat sci 49:379-388
- Falcón L., Escobar E. & Romero D. (2002) Nitrogen fixation patterns displayed by cyanobacterial consortia in Alchichica Crater Lake México. Hydrobiol 467:71-78
- Fernández M., Hidalgo R. M., López I., García E. & Periase L. (1990) Caracterización hidroquímica de la fosa de la Joga y la ZEE de Cuba. Arch Cient Inst Oceanol 17
- Fuentes A. L. (1972) Direc. De Publ. Regiones Naturales del Estado de Puebla. UNAM, 143 Pág.
- Fuhrman J. A., Azam F. (1982) Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton production in marine surface waters: Evaluation and field results. Mar Biol 66:109-120
- Gaedke U. & Weisse T. (1998) Seasonal and interannual variability of picocyanobacteria in Lake Constance (1987-1997), Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol. 53p. 143-158
- García E. (2004) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köpen. Serie de libros del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Quinta Edición, v. No. 6. 90 Pág.

- Gasca D. A. (1982) Génesis de los lagos cráter de la Cuenca Oriental. Colec.Inst. Nal.Antropol.Hist., México.45 Pág.
- Google Earth (2010) GeoEye, 2010., INEGI, 2010., Digital Globe 2010. Software Version 5.2.1.1588
- Hammer U. T. (1987) Saline lake ecosystems of the world, Kluwer Academic Publishers. Hingham.
- Hernández-Avilés J. S., Macek M., Alcocer J., López-Trejo B., Ibarra M. M. (2010) Prokaryotic Picoplankton dynamics in a warm-monomictic saline lake: temporal and spatial variation in structure and composition. *J Plankton Res* 27:1-14
- Horne A. J. & Goldman C. R. (1972) Nitrogen fixation in Clear Lake, California. 1. Seasonal variation and the role of heterocysts. *Limnol.Oceanogr.* 17: 678-692.
- Horne A. J., Sandusky J. C. & Carmiggelt C. J. W.(1979) Nitrogen fixation in Clear Lake, California. 3. Repetitive synoptic sampling of the spring Aphanizomenon blooms. *Limnol.Oceanogr.*24: 316-328.
- Howarth R. H. & Cole J. J. (1988) Nitrogen fixation in freshwater, estuarine and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls, *Limnol Oceanogr* 33 (4 part 2) 688-701
- Hutchinson G. E. & Löffler H. (1956) The thermal classification of lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 42: 84-86.
- Hutchinson E. (1957) A Treatise on Limnology Geography, physics and chemistry of lakes Vol. 1 John Wiley & Sons, Nueva York, 1015pp.
- INEGI SINFA (2006), Fotografía Aérea, Zona E14B Línea 360, Veracruz.
- Ittekkot V., Schafer P., Honjo S. & Depetris P. J. (1996) Particle Flux in the Ocean. Wiley. 396
- Izaguirre I., Allende L., Marinote M. C. (2003) Comparative study of the planktonic communities of three lakes of contrasting trophic status at Hope Bay (Antarctic Peninsula). *J Plankton Res* 25:1079-1097
- Juárez-Bustos D., Vilaclara-Fatjó G., Machaín-Castillo M. L., Caballero-Miranda M. & Rodríguez-Ramírez A. (2002) Los ostrácodos en sedimentos del lago La Preciosa, Puebla In: Delgado-Argote L. A., Zúñiga Dávila R. (eds) III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, GEOS, Unión Geofísica Mexicana A.C., Época II, Volumen 22, No. 2, Noviembre de 2002.

- Kalff J. B. T. (2001) The contribution of picophytoplankton in marine and freshwater systems of different trophic status and depth. *Limnol. Oceanogr.* 46:1243-1248
- Karl D. M., Hebel D. V. & Winn C. (1991) Procedures for particulate carbon, nitrogen, phosphorus and total mass analysis used in the US-JGOFS Hawaii ocean time series program. En: Hurd DC, Spencer DW (Eds.), *Marine particles: analysis and characterization*. American Geophysical Union, Washington DC. 71-77
- Kilham S. & Kilham P. (1990) Endless summer: internal loading processes dominate nutrient cycling in tropical lakes. *Freshwater Biology*, 23, 379–389.
- Kilham S. & Kilham P. (1991) Tropical limnology: do African lakes violate the ‘first law’ of limnology? *Verhandlungen der internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, 24:68–72.
- Kirchman D. L. & Richdl J. H. (1997) Regulation of bacterial growth by dissolved organic carbon and temperature in the Equatorial Pacific Ocean *Microb Ecol* 33:11-20
- Komárek J. & Komárková-Legnerová J. (2002) Contribution to the knowledge of planktic cyanoprokaryotes from central Mexico. *Preslia, Praha*, 74: 207-233
- Koterba M. & Oliveri B. S. (1983) Manejo actual de los recursos naturales en el Valle de Perote In: Golberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Cuadernos de Divulgación, Xalapa, 9: 33-41.
- Küchler-Krischun J. (1990) Nukleierung der calcitfallung durch phytoplanktonalgen, Constance University. *Arch Hydrobiol* 276:20-32
- Lalli & Parson (1993) *Biological oceanography: an introduction*. Second edition, Pergamon press, UK, 301 p
- Lampert W. & Sommer U. (1997) *Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams*. Oxford University Press. Oxford. 382 p
- Lehtimäki J. (2000) Characterisation of cyanobacterial strains originating from the Baltic Sea with emphasis on *Nodularia* and its toxin, nodularin. Department of Applied Chemistry and Microbiology University of Helsinki, Finland.
- Lewis W. M. (1983) A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40: 1770-1787
- Lewis W. M. (1996) Tropical lakes: how latitude makes a difference. En: F. Shiemer and Boland B. T. (Ed.), *Perspectives in Tropical Limnology*. Acad Publ, Amsterdam. 43-64

- Lewis W. M. (2002) Causes for the high frequency of nitrogen limitation in tropical lakes. *Verh international Limnol* 28:210-213
- Libes S. M. (1992) An introduction to marine biogeochemistry. *Mar Ecol Prog Ser.* 732
- Lind O. T. (1985) Handbook of common methods in Limnology. Kendall/Hunt, Dubuque, 199 p.
- Loferer-Krößbacher M., Klima J. & Psenner R. (1998) Determination of bacterial cell dry mass by transmission electron microscopy and densitometric image analysis. *Appl Environ Microbiol* 64:688–694
- Lugo A., Alcocer J., Sánchez M. R., Escobar E. & Macek M. (2000) Temporal and spatial variation of bacterioplankton abundance in a tropical, warm-monomictic, saline lake: Alchichica, Puebla, México. *Vert Int Limnol* 27: 2968-2971
- Macek M., Vilaclara G. & Lugo A. (1994) Changes in protozoan assemblage structure and activity in a stratified tropical lake. *Mar Microb* 8:235-249
- Macek M., Gonzalez A. G. J., Jezberová J., Rosiles G. G., Pešstová D., Hernandez-Avilés J. S., Pérez M. A. E., Durand J. A., Ibarra M. M. & Šimek K. (En preparación) Periodical pattern of picophytoplankton importance within microbial-loop in a warm-monomictic lake in semidesert area.
- Malinsky-Rushansky N. Z., Berman T. & Dubinsky Z. (1997) Seasonal photosynthetic activity of autotrophic picoplankton in lake Kinneret, Israel, *J Plankton Res* 19:979-993
- Marcos H. (2011) Papel de la salinidad y la salinización potencial en la estructura y funcionamiento de la red trófica planctónica en tres lagos vecinos a lo largo de un gradiente: Distribución espacio-temporal de la Abundancia y la Biomasa de Flóculos picoplanctónicos en el lago volcánico La Preciosa Puebla, UNAM, Reporte de servicio social.
- Margalef M. (1983) *Limnología Omega* (ed.), Barcelona, España.
- México desconocido No. 236, Versión en línea (1996) consultada el 24 de Enero del 2011. <http://www.mexicodesconocido.com.mx/lagos-crater-en-la-cuenca-oriental-puebla.html>
- Microsoft Excel (2007) Office, USA.
- Microsoft Power Point (2007) Office, USA.

- Mazur Marzec H., Krežel A., Kobos J. & Plínski M. (2006) Toxic *Nodularia spumigena* blooms in the coastal waters of the Gulf of Gdańsk: a ten-year survey. *Oceanologia* 48: 255–273.
- Musial A. & Plinski M. (2003) Influence of salinity of the growth of *Nodularia spumigena* Mertens. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 32: 45–52
- Nordin R. N. & Stein J. (1980) Taxonomic revision of *Nodularia* (Cyanophyceae/Cyanobacteria). *Canadian Journal of Botany* 58: 1211–1224.
- Oliva M. G., Lugo A., Alcocer J., Peralata L., & Oseguera L. A. (2009) Planktonic bloomforming *Nodularia* in the saline Lake Alchichica, Mexico, *Natural Resources and Environmental Issues*: Vol. 15, Article 22.
- Ordóñez E. (1905) Los Xalapascos del Estado de Puebla. Instituto Geológico de México; imprenta y fototipia de la Secretaría de Fomento. Callejón de Betlemitas No. 8 408 Pág.
- Paerl H. W. (1996) A comparison of cyanobacterial bloom dynamics in freshwater, estuarine and marine environments. *Phycologia* 35(6): 25–35.
- Passoni S. & Callieri C. (2000) Picocyanobacteria single forms, aggregates and microcolonies: survival strategy or species succession?, *Verhandlung. Int. Vereinig. Limnol.* 27:1879–1883.
- Payne A. I. (1986) *The Ecology of Tropical Lakes and Rivers*. Wiley, New York.
- Pérez M. A. & Rivera L. N. (2011) Análisis de la abundancia y la biomasa del picoplancton procarionte y su relación con parámetros limnológicos durante un ciclo anual en el lago cráter Alchichica (Puebla, México), UNAM, Tesis de licenciatura.
- Porter K. G., Feig Y. S. (1980) The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol Oceanogr* 25: 943-948.
- Posch T., Krößbacher L. M., Gao G., Alfreider A., Pernthaler J. & Psenner R. (2001) Precision of bacterioplankton biomass determination: a comparison of two fluorescent dyes, and of allometric and linear volume-to carbon conversion factors. *Aquat Microb Ecol* 25: 55-63
- Punning J. A., Janus T., Kof T. & Alliksaar T. (2003) Seasonal luxes of particulate matter in a small closed lake in northern Estonia. *Water Air Soil Pollut* 149:77-92
- Ramírez-García P. & Vázquez-Gutiérrez F. (1988) Contribuciones al estudio limnobotánico de la zona litoral de seis lagos cráter del Estado de Puebla, Contribución No. 640 del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

- Raven J. A. (1986) Physiological consequences of extremely small size for autotrophic organisms in the sea. *Aquat Science* 214:1-70
- Reynolds C. S. (2006) *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. 384
- Rivkin R. B. & Anderson M. R. (1997) Inorganic nutrient limitation of oceanic bacterioplankton. *Limnol Oceanogr* 42 (4) 730-740
- Rodríguez-Ramírez I., Caballero-Miranda M., Vilaclara-Fatjó G. & Juárez-Bustos D. (2002) Registro paleolimnológico de los últimos 5,000 años del lago La Preciosa, Puebla In: Delgado-Argote L. A., Zúñiga Dávila R. (eds) III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, GEOS, Unión Geofísica Mexicana A.C., Época II, Volumen 22, No. 2, Noviembre de 2002.
- Schallenberg M. & Burns C. W. (2001) Tests of autotrophic pico-plankton as early indicators of nutrient enrichment in an ultra-oligotrophic lake. *Freshwater Biol* 46:27-37
- Shia F. K. & Ducklow H. W. (1994) Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth rate in Chesapeake Bay. *Limnol Oceanogr* 39:1243-1250
- Sieburth Mc. J., Smetacek V. & Lenz J. (1978) Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.* 23:1256-1263
- Sommaruga R. & Roberts R. D. (1997) The significance of autotrophic and heterotrophic picoplankton in hypertrophic ecosystems, *FEMS Microbial Ecology* 24, 187-200.
- Statgraphics Centurion XV (2007) Stat Point, USA, Version 15.2.06
- Stewart W. D. P. (1969) Biological and ecological aspects of nitrogen fixation by free-living micro-organisms. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B* 172: 367- 388.
- Stockner J. G. (1991) Autotrophic picoplankton in fresh water ecosystems: A view from the summit. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 76: 483-492.
- Stockner J. G. & Shortreed K. S. (1991) Phototrophic picoplankton: community composition, abundance and distribution across a gradient of oligotrophic British Columbia and Yuko Territory lakes. *Int. Revue. Ges. Hydrobiol.* 76:581-601
- Stockner J. G. & Shortreed K. S. (1994) Autotrophic picoplankton community dynamics in a prealpine lake in British Columbia lakes. *Hydrobiol* 274: 133-142

Stockner J., Callieri C. & Cronberg G. (2000) Picoplankton and other non-bloom-forming Cyanobacteria in lakes. En: Whitton, BA, Potts, M (Eds). The Ecology of Cyanobacteria, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 195-231

-Stomp M., Huisman J., Vörös L., Pick F. R., Laamanen M., Haverkamp T. & Stal L. J. (2007) Colourful coexistence of red and green picocyanobacteria in lakes and seas. *Ecol Lett* 10:290-298

-Straškrabova V., Callieri C., Cruz-Pizarro L., Hartman P., Macek M., Nedoma J. & Simek K. (1999) Investigations on microbial food webs in mountain lakes – aims and methods. In: Straškrabova V., Callieri C. and Fott J. (eds) Pelagic food web in mountain lakes. Mountain Lakes Research Program. *J. Limnol.* 58, 77-87

-Strong A. E. & Eadie B. J. (1978) Satellite observations of calcium carbonate precipitation in the great's lakes. *Limnol Oceanogr* 23:877-887

-Surfer 8 (2002) Golden Software, USA.

-Tavera R. & Komárek J. (1996) Cyanoprokaryotes in the volcanic lake Alchichica, Puebla State, Mexico. *Algological Studies* 83: 511–538.

-Toledo V. M., Carabias J., Toledo C. & González-Pacheco C. (1989) La producción rural en México: alternativas ecológicas, Prensa de Ciencias, UNAM y Fundación Universo Veintiuno, Colección Medio Ambiente 6, 402 p.

-Torres G. J. & Garcia B. R. (1995) Canonical correspondence analysis: technique for multivariate gradient analysis *Microbiology*. San Francisco. 887

-Vilaclara G., Chavez M., Lugo A, Gonzalez H. & Gaytán M. (1993) Comparative description basic chemistry of crater-lakes in Puebla State, Mexico. *Ver Int Limnol* 25:435-440

-Vinner-Mozzini Y., Zohary T. & Gasith A. (2003) Dinoflagellate bloom development and collapse in lake Kinneret: A sediment trap study. *J Plankton Res* 25:591-602

-Williams P. J. (2000) Heterotrophic bacteria and the dynamics of dissolved organic material. *Microbial Ecology of the Oceans*. In Kirchman D. L., Wiley-Liss Inc 153-200.

-Weisse (1993) Dynamics of autotrophic picoplankton in marine and freshwater ecosystems. *Adv Microb Ecol* 13: 327-370

-Wetzel R.G. (2001) *Limnology: Lake and river ecosystems*. Third edition, Academic Press, Elsevier Science, 1006 Pág.

-Wolfe M. (1954) The effect of molybdenum upon the nitrogen metabolism of *Anabaena cylindrica*. 1. A study of the molybdenum requirement for nitrogen fixation, and for nitrate and ammonia assimilation. *Ann. Bot. N.S.* 18: 299-308

-Wu J. F., Sunda W., Boyle E. A. & Karl D. M. (2000) Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean. *Science* 289:759-762

-Yamasaki S., Uneshida H., Shimada T., Shimeka M & Seok-Kyong (2002) Factors controlling Hypolimnetic ammonia accumulation in a lake. *Limnol* 3:43-46

## ANEXO

### I. El lago La Preciosa durante el estudio 2009-2010



Foto 1. Lago La Preciosa perteneciente a la Cuenca Oriental, se observa el Pico de Orizaba al fondo.



Foto 2. Lago La Preciosa donde se aprecia la transparencia del agua típica de un lago oligotrófico.



Foto 3. Pérdida aparente del volumen del Lago La Preciosa, áreas desecadas alledañas a la zona litoral.



Foto 4. Evento blanco resultado de la biomineralización del carbonato de calcio en el Lago La Preciosa durante el mes de abril.



Foto 5. Imágen de La Preciosa en el evento blanco.



Foto 6. La Preciosa es una lago volcánico de tipo maar en donde se observan para la cresta noreste parte del cráter.



Foto 7. Zona litoral de entrada al lago.



Foto 8. La Preciosa.



Foto 9. Zona litoral en la que se logran apreciar macrofitas.

## II. Método de campo y laboratorio



Fotos. 10 y 11. Vehículo de material de campo y personal.



Fotos. 12 y 13. Armado de lancha Inflable.



Fotos. 14 y 15. Traslado al punto de muestreo y oxímetro YSI.



Fotos. 16, 17 y 18. Toma de muestra con botella Van Dorn.



Fotos. 19 y 20. Determinación de alcalinidad y botellas DBO.



Fotos. 20 y 21. Determinación de oxígeno disuelto por el método de Winkler.



Fotos. 22 y 23. Determinación de nutrientes por técnicas colorimétricas y espectrofotometría.

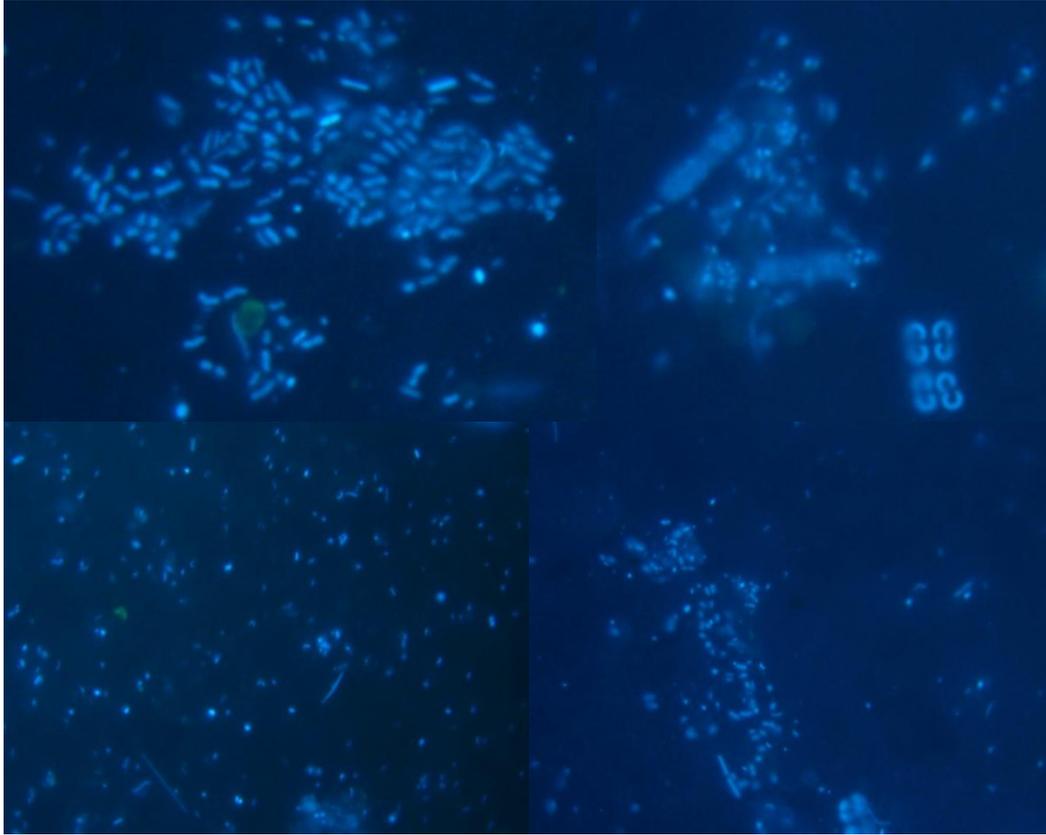


Fotos. 24 y 25. Material de filtrado para preparación de membranas.

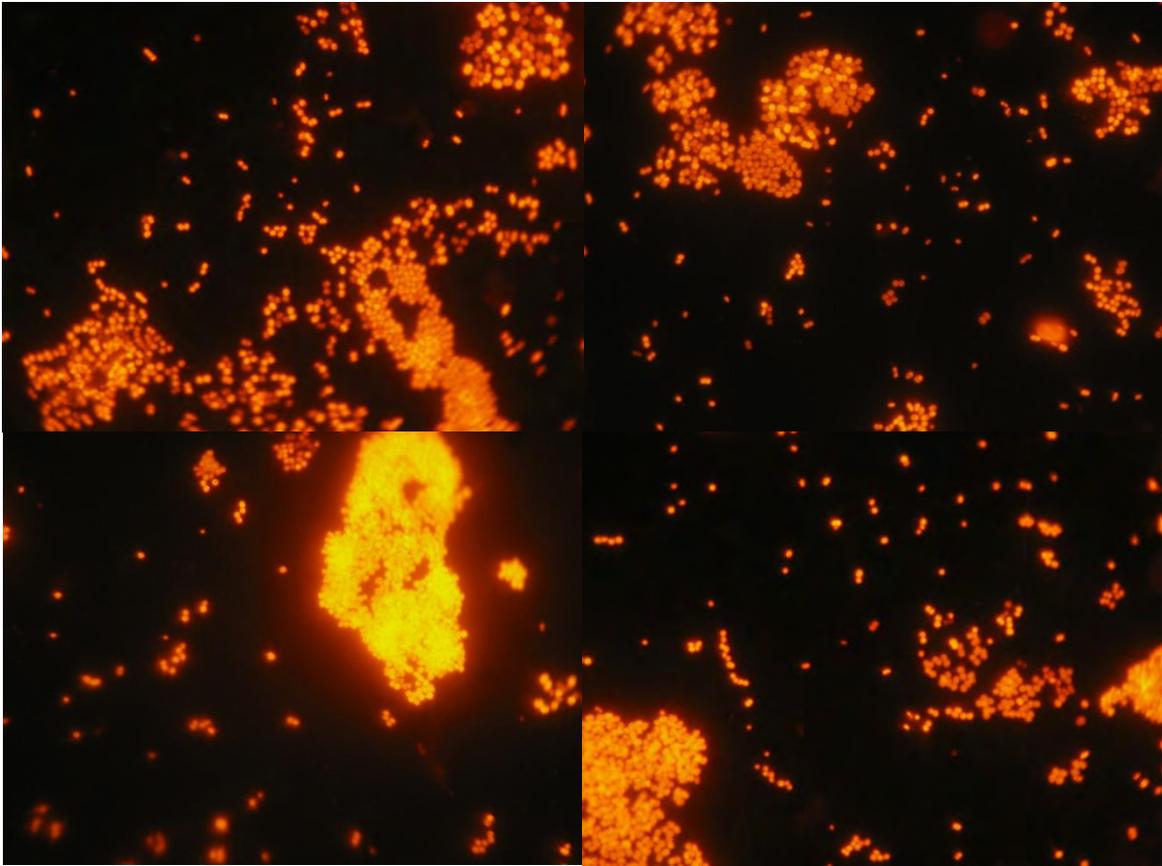


Fotos. 26y 27. Membranas de policarbonato montadas en portaobjetos y microscopio de epifluorescencia.

### III. Picoplancton heterotrófico y autotrófico



Fotos. 28, 29, 30 y 31. Fotografías de microscopia de epifluorescencia de picoplancton heterotrófico teñido con DAPI, bajo la excitación de un haz de luz UV. Se logran apreciar distintas formas celulares, formaciones floculares y células disgregadas.



Fotos. 32, 33, 34 y 35. Picoplancton autotrófico bajo excitación de luz verde.