



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



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).

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
BIOLOGO
PRESENTAN:

Miguel Ángel Pérez Bautista.
Laura Nataly Rivera García.

VoBo.
DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Justo Salvador Hernández Avilés.
Laboratorio de Limnoecología



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA.

DE LAURA RIVERA GARCÍA.

A Dios por darme la oportunidad de hacer lo que me gusta y de enviarme a una familia extraordinaria.

A mi madre Cristina García López que, quien con su esfuerzo y confianza en mi he logrado una meta mas.

A mi hermana Ana Karen García López por darme su alegría y compañía toda mi vida. A ellas dedico mi trabajo desde ahora.

A mi amigo y compañero Miguel Ángel Pérez Bautista que con la unión nos hicimos mas fuertes.

A todos los demás amigos que no por no mencionarlos individualmente, son menos importantes, por ayudarme cuando no tenia dinero y cuando tenia, gracias.

DEDICATORIA.

DE MIGUEL ÁNGEL PÉREZ BAUTISTA.

A Dios primero por mantenerme en este mundo, y darle luz y esperanza a mi vida en cada día, por las bendiciones otorgadas en esta experiencia, gracias.

A mi madre Asunción Bautista Cruz por darme la vida, educarme, amarme siempre y sobre todo por guiarme en este camino, gracias a ti ahora he llegado a lo más alto del éxito, te amo.

A mi padre Ricardo Pérez Osorio, por ser mi ejemplo a seguir, gracias por tus consejos, por amarme siempre y apoyarme en todo momento, por respetar mis decisiones y guiarme en esta vida, Te amo.

A mis Hermanos: Oscar Ricardo, Alma Gabriela y Rodrigo, los amo y siempre los llevare en el corazón, por que son y serán mis pilares para creer que todo es posible, debemos creer en nuestros sueños, Dios nos los obsequio para hacerlos realidad, Los amo Hermanos.

A mi amiga y compañera en esta tesis Laura Rivera García por ayudarme siempre, estar conmigo en todo momento, gracias por poner a prueba mi paciencia, en verdad con tú amistad gane mucho y por la enseñanza de vida que me obsequio, Te amo, gracias.

A Miguel Ángel Esparza, amor mío, gracias por llegar en el momento indicado a mi vida, por la felicidad que me entregas con tu mirada, por los suspiros que de mi alma salen cada noche al soñarte, por dejarme estar contigo y entrar en tú vida, que esto sea solo el principio de una historia juntos, Te amo.

“Si no tengo nada, te tengo a ti, si no tengo nada no me importa, porque llegué hasta aquí contigo, no sé mucho de álgebra, pero sé que uno más uno es dos. Tú y Yo, eso es todo lo que tendremos cuando el mundo esté en medio, porque nene, no tenemos nada sin amor, tienes lo necesario para los dos. Hey!! No sé mucho de armas pero he sido impactado por tí, & no sé cuándo es que voy a morir, pero espero morir por tí, & no sé como luchar, pero sé, sé que voy a luchar por tí, justo cuando empuño la mano me doy cuenta que estoy junto a tí, que estoy destinado a ti.”

1+1

Con amor y cariño Miguel Ángel Pérez Bautista.

AGRADECIMIENTOS.

A LA UNAM-FES ZARAGOZA POR SER NUESTRA CASA DE ESTUDIOS Y POR COBIJARNOS CON SU CONOCIMIENTO.

AL DR. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ ÁVILES, POR ENSEÑARNOS EL ARTE DE LA CIENCIA Y POR PERFECCIONARNOS COMO CIENTÍFICOS Y PERSONAS.

A NUESTROS SINODALES POR APOYARNOS EN ESTE PROYECTO Y AYUDARNOS A MEJORARLO.

A LA FES IZTACALA POR BRINDARNOS EL APOYO NECESARIO PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

A TODOS GRACIAS.

ÍNDICE

RESUMEN	4
1.- INTRODUCCIÓN	5
2.- ZONA DE ESTUDIO	12
3.- PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	21
4.- HIPOTESIS	21
5.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
6.- JUSTIFICACIÓN	22
7. OBJETIVO GENERAL	22
8.OBJETIVO PARTICULAR	22
9. MÉTODO	23
10.- RESULTADOS	25
11.- PARÁMETROS BIOLÓGICOS APP	43
12.- PARÁMETROS BIOLÓGICOS HPP	49
13.- ANALISIS ESTADISTICOS DE APP Y HPP	55
14.- CORRELACIONES ESTADISTICAS DE PEARSON APP	68
15.- CORRELACIONES ESTADISTICAS DE PEARSON HPP	69
16.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
17.- PARÁMETROS BIOLÓGICOS DEL APP	82
18.- PARÁMETROS BIOLOGICOS DEL HPP	87
19.- CONCLUSIONES	93
20.- REFERENCIAS	95
21.- ANEXO (ACERVO FOTOGRÁFICO)	106

INDICE DE FIGURAS Y CUADROS

Figura 1.- Ubicación geográfica: a) Eje Volcánico Trans-Mexicano; b) Cuenca Oriental; c) Lago Alchichica Puebla, México.	15
Figura 2.- Ubicación geográfica de la cuenca de Oriental y morfometría del lago Alchichica, Puebla	16
Figura 3.- Lago Alchichica, su nombre significa agua salada, foto tomada en el 2010	17
Figura 4.- Lago cráter Alchichica, estado de Puebla, México, foto tomada en el 2010	18
Figura 5.- Ubicación geográfica del lago Alchichica Puebla, México	20
Figura 6.- Batimetría de lago Alchichica	28
Figura 7.- Estromatolitos en la zona litoral del lago Alchichica, foto tomada en junio 2010	30
Figura 8.- Diagrama espaciotemporal de temperatura para el año 2009 y principios de 2010 en el lago Alchichica	31
Figura 9.- Diagrama espaciotemporal de oxígeno disuelto para el año 2009 y principios de 2010 en el lago Alchichica	34
Figura 10.- Dinámica temporal de la zona eufótica (Z_{EU}) y disco de Secchi, en el lago cráter Alchichica	36

Figura 11.- Diagrama espaciotemporal de nitratos para el lago Alchichica durante los años 2009-2010	38
Figura 12.- Diagrama espaciotemporal de nitritos para el lago Alchichica durante los años 2009-2010	40
Figura 13.- Diagrama espaciotemporal de amonio para el lago Alchichica durante 2009-2010	42
Figura 14.- Diagrama espaciotemporal de F.S.R. para el lago Alchichica durante 2009-2010	44
Figura 15.- Diagrama espaciotemporal de fósforo total para el lago Alchichica durante 2009-2010	46
Figura 16.- Variación espaciotemporal del contenido de carbono del picoplancton autotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual	48
Figura 17.- Variación espaciotemporal de la abundancia del picoplancton autotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual	50
Figura 18.- Variación espaciotemporal de la Biomasa del picoplancton autótrofico para el Lago Alchichica en un ciclo anual	52
Figura 19.- Variación espaciotemporal del contenido de carbono del picoplancton heterotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual	54
Figura 20.- Variación espaciotemporal de la abundancia del picoplancton heterotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual	55
Figura 21.- Variación espaciotemporal de la biomasa del picoplancton heterotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual	57
Figura 22.- Análisis de cajas múltiples con muesca para la variación temporal de la abundancia del APP en el lago Alchichica durante el año 2009	58
Figura 23.- Análisis de cajas múltiples con muesca para la variación espacial de la abundancia de APP en el lago Alchichica	59
Figura 24.- Análisis de cajas múltiples con muesca para el Contenido de Carbono de APP mensual	60
Figura 25.- Grafico de Cajas Múltiples de C.C. (Circulación y Estratificación)	61
Figura 26.- Grafico de Cajas Múltiples de Biomasa mensual	62
Figura 27.- Grafico de Cajas Múltiples por Circulación y Estratificación	65
Figura 28.- Análisis de Cajas Múltiples con Muecas para la variación temporal de la abundancia del picoplancton heterotrófico (HPP) en el lago Alchichica durante el año 2009	67
Figura 29.- Análisis de Cajas Múltiples con Muecas para la variación temporal de la biomasa del picoplancton heterotrófico (HPP) en el lago Alchichica durante el año 2009	67
Figura 30.- Análisis de Cajas Múltiples con Muecas para la variación temporal de la abundancia del picoplancton heterotrófico (HPP) por estratos de la columna de agua en el lago Alchichica durante el año 2009	70
Figura 31.- Análisis de Cajas Múltiples con Muecas para la variación temporal de la biomasa del picoplancton heterotrófico (HPP) por estratos de la columna de agua en el lago Alchichica durante el año 2009	71
Cuadro 1.- Ubicación geográfica, clima y características limnológicas relevante para el lago Alchichica	18
Cuadro 2.- Resumen de la prueba de rangos múltiples para las medias de las abundancia del APP, se muestras únicamente las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses marcados	32
Cuadro 3.- Resumen de la prueba de rangos múltiples para las medias de C.C. del APP, se muestras únicamente las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses marcados	56
Cuadro 4.- Resumen de la prueba de rangos múltiples para las medias de biomasa del APP, se muestras únicamente las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses marcados	58
Cuadro 5.- Prueba de Tukey donde se muestran diferencias significativas* ($P < 0.05$) entre diferentes meses para la abundancia de HPP	60
Cuadro 6.- Diferencias significativas ($P < 0.05$) entre meses para la biomasa de HPP	63
Cuadro 7.- Correlaciones de Pearson para parámetros biológicos del picoplancton autotrófico vs físicoquímicos del lago Alchichica	64
Cuadro 8.- Correlaciones de Pearson para parámetros biológicos del picoplancton heterotrófico vs físicoquímicos del lago Alchichica	68
Cuadro 9.- resultados promedio de pH, conductividad y alcalinidad de 2009	69

RESUMEN

Se analizó y discutió la dinámica del picoplancton procarionte en el lago cráter Alchichica durante un ciclo anual (2009), a través de la evaluación de parámetros biológicos como la abundancia, biovolumen, contenido de carbono y biomasa para el picoplancton autotrófico y heterotrófico denominado APP y HPP respectivamente por sus siglas en inglés, para tal fin se utilizó microscopía de epifluorescencia y análisis de imágenes, para el HPP se empleó DAPI (4,6-diamidino, 2-fenilindol) fluorocromo que tiñe el ADN bacteriano, mientras para el APP se cuantificó por autofluorescencia de ficopigmentos. La distribución espacio temporal del picoplancton estuvo determinada por la hidrodinámica del lago, el cual se clasifica como monomítico cálido, con un periodo de mezcla invernal y otro de estratificación el resto del año. La abundancia del APP fluctuó entre 1.4×10^6 cél mL⁻¹ a 9×10^5 cél mL⁻¹ y del HPP 0.2×10^6 cél mL⁻¹ a 3.2×10^6 cél mL⁻¹. La biomasa registrada del APP fluctuó de $1.03 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a $70.34 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ mientras para el HPP fluctuó de $5 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a $100 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$. Durante el periodo de mezcla e inicios de la estratificación presentó un aumento, registrando las máximas biomásas debido a la mayor disponibilidad de nutrientes encontrados durante estos periodos. Para el resto del periodo de estratificación se registró un descenso gradual de los parámetros biológicos como resultado de la limitación de nutrientes en el epilimnion y las condiciones de anoxia en el hipolimnion.

1

INTRODUCCIÓN

Dentro de un ecosistema ya sea terrestre o marino; micro o macro tanto la interacción de la unidad biológica y los factores externos se encuentran dinámicamente activos. Los integrantes bióticos fundamentales de un ecosistema son los productores primarios, consumidores y desintegradores. Un ecosistema se puede estudiar en cuanto a su estructura y engloba: redes tróficas, biomasa, contenido energético y mineral. Y en cuanto a su función: flujo de energía, productividad, y contenido de carbono (Farnworth, 1980).

Las cadenas tróficas están conformadas en la base por los productores primarios, seguidos por los consumidores primarios y secundarios, llegando a la cima con los depredadores de primer orden, con este modelo “simple” no se consideraban a los organismos más pequeños, tales como el bacterioplancton que son formas de vida unicelulares o coloniales que presentan como característica principal su tamaño que va desde 0.2-2 μm , quedando caracterizados dentro de la fracción que se denomina picoplancton, al ser parte importante su componente autotrófica de los productores primarios en sistemas acuáticos poco productivos, mientras su componente heterotrófica desempeña un papel relevante en la oxidación de la materia orgánica y diversos ciclos biogeoquímicos dentro del cuerpo acuático. El descubrimiento de formas específicas en la interacción de los microorganismos generó una red más compleja, denominándose actualmente red trófica microbiana (Sherr y Sherr, 1988).

En el caso del plancton se establecieron tres órdenes de magnitud respecto al tamaño de los microorganismos que lo forman: el picoplancton de 0.2-2 μm ; el nanoplancton de 2-20 μm ; y el microplancton de 20-200 μm (Sieburth *et al.*, 1978).

1.1

BACTERIOPLANCTON

Si se exceptúan los virus, las bacterias son los organismos más pequeños del plancton. Forman parte, junto con los flagelados de menor tamaño, de la fracción llamada picoplancton. Con el término bacterioplancton se designan a microorganismos procariotas pertenecientes a dos de los tres dominios de la clasificación actual de los seres vivos, las bacterias propiamente dichas (dominio Bacteria) y las arqueas (dominio Archaea) (Ville, 2010).

Dentro del picoplancton se encuentran dos grupos: los procariontes que no tienen un núcleo bien definido (Sieburth *et al.*, 1978), que a su vez se dividen en dos grupos funcionales los heterótrofos (bacterias y arqueas) y los autótrofos (cianobacterias) y dentro de los eucariontes: que contienen el material genético dentro de una doble membrana, que delimita un núcleo celular, que están definidos en autotróficos y heterotróficos (Wetzel, 2001).

Cuando se habla de bacterias planctónicas generalmente se refiere a organismos heterotróficos, es decir, que consumen materia orgánica sintetizada por las algas, existen también bacterias fotosintéticas como las cianobacterias *Synechococcus* y *Prochlorococcus*, ampliamente distribuidas en el océano y predominantes en sistemas oligotróficos. La importancia de las bacterias en el ecosistema pelágico está relacionada con su enorme abundancia: a modo de ejemplo, las bacterias heterotróficas pueden encontrarse en concentraciones superiores al millón de células por mililitro.

Este trabajo está centrado en el picoplancton procarionte heterotrófico y autotrófico, (HPP y APP por sus siglas en inglés) respectivamente, y los factores limnológicos que determinan su dinámica y biomasa en el lago cráter Alchichica.

1.2

Antecedente y Papel ecológico del bacterioplancton.

Durante varias décadas se confirmó la hipótesis de que el bacterioplancton juega un papel importante en los ciclos del carbono y nitrógeno, siendo uno de los principales componentes en la dinámica del ecosistema acuático (Williams, 1981; Azam et al., 1983). Se ha reportado que la biomasa bacteriana generalmente excede a la del fitoplancton en cuerpos de agua oligotróficos (Fuhrman et al., 1989; Carlson et al., 1996; Kirchman y Rich, 1997). El conocimiento sobre el papel de las bacterias heterotróficas en el aprovechamiento de nutrientes orgánicos e inorgánicos, permite modelar adecuadamente los ciclos energéticos y los flujos biogeoquímicos en el medio acuático (Baddanda et al., 1994; Fakuda et al., 1998).

El bacterioplancton es responsable de mineralizar la materia orgánica y contribuir a la producción primaria a través de la fotosíntesis y la quimiosíntesis, además es uno de los grupos dominantes en aguas oligotróficas de todo el mundo (Le Bouteiller et al., 1992), entre las que se incluyen a los lagos templados oligotróficos (Stockner, 1988). Sin embargo, la falta de estudios en las zonas tropicales no permite saber con certeza si el picoplancton también es el dominante en los lagos poco productivos en esta región. Es así que en últimos años se ha incrementado el interés por el conocimiento del bacterioplancton como un componente importante y dinámico de los ecosistemas pelágicos, en particular a través de la evaluación de su abundancia y biomasa por ser un método preciso y reproducible. Asimismo, las bacterias y otros microorganismos heterotróficos juegan un papel importante en los ecosistemas acuáticos al tener una función clave en los flujos de materia orgánica dentro de la red trófica “contribuyendo a los componentes” del “microbial loop” o también conocido como circuito microbiano (Elser et al., 1995; Pomeroy 1999; Church et al., 2000).

El bacterioplancton utiliza la materia orgánica disuelta (M.O.D.) como fuente de energía y carbono orgánico para la obtención de biomasa, o de una manera más general convierte la M.O.D. en materia orgánica particulada (M.O.P.). La M.O.D. proviene de los sistemas tróficos vía excreción, exudación y lisis (Azam et al., 1983; Williams, 2000). En cuanto su importancia en los ciclos biogeoquímicos, se tiene por ejemplo que el bacterioplancton en el

metalimnion de la columna de agua, juega un papel importante en el ciclo del nitrógeno, ya que el amonio producido en la mineralización de la materia orgánica es utilizado inmediatamente por las bacterias nitrificantes (produciendo nitritos y nitratos) en condiciones aerobias, mientras que en el metalimnion microaerobio, con alta actividad heterotrófica, algunas bacterias utilizan los nitratos para su respiración y convierten los nitritos producidos en óxidos de nitrógeno o gas nitrógeno (desnitrificación) (Abe et al., 2003).

Para evaluar el papel ecológico del bacterioplancton, la variable básica a considerar es la biomasa, con la cual se puede determinar la actividad potencial poblacional en el ambiente; así como su potencial, como fuente alimenticia para niveles tróficos superiores en cuerpos de agua (Azam et al., 1983; Bratbak, 1993).

El efecto principal del consumo del carbono orgánico por el bacterioplancton es la producción de biomasa y la generación de CO₂. La productividad de cualquiera de estas dos variables tiene una importante influencia en el ciclo del carbono, pero una de las limitaciones para poder determinar la biomasa es que las características de las bacterias no permiten estimarla por los métodos tradicionales ya que son células muy pequeñas (Kalf, 2001). Por otra parte, las bacterias son numerosas, pueden cambiar rápidamente en abundancia y células del mismo tamaño pueden incluir diferentes grupos tróficos (autotróficos o heterotróficos) (Verity y Sieracki, 1993; Li, 1998; Robertson et al., 1998 todos en Wetzel, 2001).

1.3

Picoplancton procarionte autotrófico (APP) y picoplancton procarionte heterotrófico (HPP)

El APP se ha reconocido como un componente muy importante dentro de las comunidades pelágicas en hábitats de escasos recursos, tanto de agua dulce (Stockner 1991; Weisse 1993; Stockner et al 2000) como marinos (Li 1995; Partensky et al 1996; Agawin et al 2000). La importancia del plancton más pequeño ha sido explicada por las variables tales como nutrientes (Stockner 1991; Drakare et al 2003.), la estabilidad de la temperatura en la columna de agua (Weisse y Kenter 1991; Padisák et al 1997; Callieri y Piscia 2002; Camacho et al. 2003). El APP muestra gran adaptación a niveles bajos de radiación fotosintéticamente activa, %PAR (Photosynthetic Activity Radiation por sus siglas en inglés) (Callieri et al 1996; Gervais et al 1997). Esto se ha comprobado en cuerpos de agua con abundante APP en epilimnion relativamente poco profundas (Weisse y Kenter 1991 (por ejemplo, Camacho et al, 2003.); Callieri y Piscia 2002), y con los lagos con un máximo de clorofila en profundidad que no sigue exactamente un patrón de estratificación de temico (Padisák et al 1997; Pérez et al 2002.; Modenutti et al 2004; Callieri et al 2007).

Los lagos profundos tropicales de México situados en el Estado de Puebla son generalmente cálidos-monomícticos, es decir, se mezclan una vez al año a la temperatura mínima registrada en el año, en comparación con los lagos templados, la relación entre los períodos de circulación y estratificación, la actividad microbiana y la estratificación de oxígeno disuelto en metalimnion no ha sido completamente entendido (Macedo et al 1994.; Lewis 1996; Oliva et al 2001).

La mayoría de la información disponible que describe picoplancton total (PPT) de ambientes no contaminados proviene de latitudes templadas (Pernthaler et al 1998). Se ha encontrado que el APP podría constituir una parte importante de la biomasa total del picoplancton en ambientes oligotróficos (Weisse 1993; Stockner 1991; Callieri 2008). Asimismo pocos estudios han examinado el picoplancton del hipolimnion anóxico, en particular, la importancia de las bacterias sulfato reductoras (Campbell et al., 1997). En general, los sustratos secundarios controlan la biomasa del HPP, junto con la dinámica de la disponibilidad de nutrientes inorgánicos.

En las aguas con baja concentración de nutrientes y de carbono, el APP, podrá competir contra el HPP (Drakare 2002) o el fitoplancton, ya que puede utilizar bajas concentraciones de nutrientes y además intensidades de luz muy baja para su desarrollo (Vadstein 2000; Callieri et al. 2007).

1.4

Biomasa.

La evaluación de la biomasa microbiana es comúnmente realizada por estimación del biovolumen, por observación directa al microscopio y conteo (Romanenko y Kuznetsov, 1974 citado en Wetzel, 2001), cuantificando así a las células en cada muestra directamente de los ecosistemas acuáticos. Técnicas recientes como la microscopía de epifluorescencia con marcadores específicos fluorescentes permiten estimar los biovolúmenes y la biomasa de manera análoga al fitoplancton.

La biomasa del picoplancton autotrófico tiene igual o menos de una micra de diámetro, entonces puede usarse el mismo método que para las bacterias. Si su tamaño fuera superior, se seguirían otros criterios usados para el fitoplancton (Furtado et al., 2001).

1.5

Factores limnológicos asociados con la dinámica del picoplancton

1.5.a

Fenómeno de mezcla en la columna de agua.

El fenómeno de mezcla deriva en última instancia de las relaciones tierra-sol y opera a través de la radiación solar incidente (i.e., directamente a través de la temperatura e indirectamente a través de la circulación de la atmósfera y del balance de agua), como el agente último del cambio intra-anual o estacional. La dinámica estacional incide a su vez en los ciclos biogeoquímicos, por ejemplo, el desarrollo de un florecimiento de diatomeas a lo largo de la columna de agua durante el periodo de mezcla invernal del lago, cuando la disponibilidad de nutrientes y la turbulencia favorecen la aparición del plancton, afectando la distribución del picoplancton a través de la columna de agua (Wetzel, 2001).

1.5.β

Temperatura.

La relación del crecimiento del bacterioplancton y la temperatura es positiva, particularmente a temperaturas bajas (10-15°C) (Scavia y Lard 1987). Además la temperatura es un regulador en el metabolismo de todos los organismos ya sea en temperaturas extremadamente altas, como a temperaturas muy bajas. En ambientes acuáticos se ha determinado una correlación significativa ($p < 0.05$) de la temperatura con la abundancia y la actividad del bacterioplanctón heterotrófico (Newbold et al., 1981). Aunque estas observaciones se dan principalmente en ambientes templados, por lo cual es importante hacer relaciones para sistemas tropicales.

1.5.γ

Nutrientos.

El bacterioplancton está frecuentemente limitado por la disponibilidad de sustratos orgánicos y nutrientes particularmente fósforo (Wetzel, 2001). Dentro de los nutrientes principales además del fósforo se encuentran otros nutrientes como el nitrógeno, el carbono y el azufre importantes para las bacterias en un cuerpo de agua. Existen antecedentes que indican que las bacterias y el fitoplancton compiten por los nutrientes inorgánicos en aguas continentales y marinas; al mismo tiempo, la liberación de materia orgánica por parte del fitoplancton estimula la incorporación de compuestos carbonados y nutrientes en las comunidades bacterianas heterotróficas (Fuhrman y Noble, 1991).

Las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales son por orden decreciente de su estado de oxidación, nitrato, nitrito, amoníaco y nitrógeno orgánico. Todas esas formas del nitrógeno al igual que el nitrógeno gaseoso (N_2) son interconvertibles bioquímicamente y forman parte del ciclo del nitrógeno que es fundamentalmente bacteriano (Kalff, 2001).

El nitrógeno oxidado total es la suma del nitrógeno en forma de nitrito y nitrato. El nitrato se presenta generalmente como trazas en el agua de superficie pero también alcanza niveles elevados en el fondo. El nitrito es un estado intermedio en la oxidación del nitrógeno, tanto en la oxidación del amoníaco a nitrato como en la reducción del nitrato (Kalff, 2001).

Los fosfatos se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados piro, meta y otros polifosfatos y los ligados orgánicamente. Se presentan en solución, partículas o detritus, o en los restos de organismo acuáticos. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser un nutriente limitante en la productividad primaria en cuerpos acuáticos. Se encuentran en los sedimentos de fondo tanto en formas inorgánicas precipitadas como incorporados a compuestos orgánicos. Los fosfatos que responde a las pruebas colorimétricas sin hidrólisis o digestión oxidante, previas en la muestra, se denominan fósforo reactivo.

Aunque este es una medida de los ortofosfatos, es inevitable una pequeña fracción de fosfatos condensados presentes en la muestra de agua (Jenkins, 1965).

El reciclamiento de nutrientes depende en gran medida de la mezcla (regeneración en los sedimentos en contacto con la columna de agua y transferencia de nutrientes a la capa de mezcla desde la otros estratos) la cual controla la carga y disponibilidad de nutrientes (Lewis, 2001).

1.5.8

Oxígeno disuelto.

El oxígeno disuelto es el parámetro más importante de los lagos. Esencial para el metabolismo de todos los organismos acuáticos que presentan respiración aerobia. Por tanto, las propiedades de solubilidad y, sobre todo, la distribución, el compartimiento y el crecimiento fisiológico de los organismos acuáticos dependen en gran medida de la concentración de oxígeno disuelto procedentes de la atmósfera y de los procesos fotosintéticos, y la distribución hidromecánica del oxígeno, son compensados por el metabolismo de consumo (Wetzel, 2001).

La distribución resultante del oxígeno influye en gran manera sobre la solubilidad de muchos nutrientes inorgánicos. Los cambios de accesibilidad de nutrientes están regulados por las variaciones estacionales sufridas en las regiones lacustres de un ambiente aerobio o anaerobio. Estos cambios provocan un crecimiento rápido de muchos organismos capaces de aprovechar los nutrientes, como el picoplancton (Wetzel, 2001). Si el lago es muy poco productivo u oligotrófico, como el lago Alchichica (pobre en nutrientes y con escasa producción orgánica), la concentración de oxígeno con respecto a la profundidad está ampliamente regulada, durante estratificación, por procesos de descomposición (Adame *et al.*, 2008).

El oxígeno disuelto ha sido uno de los constituyentes no-conservativos (su concentración es variable) más estudiados en ecosistemas acuáticos (Olivia *et al.*, 2002). Este es un recurso esencial para la mayoría de los organismos vivos, dada su dependencia del proceso de respiración aeróbica para la generación de energía y para la movilización del carbono en la célula. Además, es importante en los procesos de: fotosíntesis, oxidación-reducción, solubilidad de minerales y la descomposición de materia orgánica. Los niveles de oxígeno disuelto necesarios para sostener la vida de organismos acuáticos varían de una especie a otra.

La distribución del oxígeno en cuerpos de agua naturales está determinada por el intercambio gaseoso a través de la superficie del agua, la producción fotosintética, el consumo respiratorio y por procesos físicos de advección (movimiento horizontal del aire causado principalmente por variaciones de la presión atmosférica cerca de la superficie) y difusión. Siendo el oxígeno un recurso esencial para la mayoría de los organismos, es importante medir las variaciones por unidad de tiempo de los procesos bióticos (fotosíntesis y respiración celular) y abióticos que se desarrollan *in situ*, que afectan su concentración y distribución. Es

conveniente conocer dichas variaciones, si se esta interesado en construir modelos dinámicos del funcionamiento de comunidades acuáticas.

1.5.ε

Salinidad.

Normalmente la salinidad total de las aguas continentales es determinada completamente por cuatro aniones principales, calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^{+1}), y potasio (K^{+1}); y por aniones carbonato (CO_3^{-}), sulfato (SO_4^{-}) y cloruros (Cl^{-}). Su concentración mundial media es de 120 mgL^{-1} , pero varía considerablemente de un continente a otro y según la litología de las masas de tierra. Esta determinada por los aportes debidos al lavado de las rocas de la cuenca de drenaje, por la precipitación atmosférica, y por el equilibrio entre evaporación y precipitación (Wetzel, 2001).

La distribución de los organismos en las aguas dulces, se ha determinado por una larga historia evolutiva de adaptaciones fisiológicas a un amplio rango de salinidades o de mecanismos para la regulación osmótica. El picoplancton tiene una relación muy estrecha con las concentraciones de salinidad alta en lagos, es por esto que una característica principal de estos organismos es establecerse en lagos poco productivos y con salinidades altas (Armienta et al., 2008).

2.

ZONA DE ESTUDIO

2.1

CUENCA DE ORIENTAL

El lago Alchichica se encuentra ubicado en la cuenca de Oriental, del estado de Puebla (Arredondo et al., 1983); es una cuenca endorreica que comprende los estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala (Figs. 1,2 y 4), está comprendida entre el polígono que forman las coordenadas: $x_1 = 694,396.36$ m, $y_1 = 2, 181,212.85$ y $x_2 = 601,745.71$ m $y_2 = 2, 090,692.10$ m, y posee una extensión de 4713.69 km². Esta se caracteriza por su campo de volcanes monogénéticos que comprenden: (1) domos riolíticos aislados (de norte como Las águilas, Cerro Pizarro, Cerro Pinto y las Derrumbadas, (2) conos de escoria y de lava de composición basáltica que están localmente agrupados en forma de campos volcánicos pequeños, (3) cráteres de explosión fratomagmática o estructuras maar incluyendo anillos de toba, algunos maar *sensu strictu* y algunos conos de toba (Carrasco-Núñez, 2003).

2.2

Geología regional

La planicie de la cuenca de Oriental alcanzó su elevación debido al plegamiento de rocas de origen marino en el Mesozoico, a la acumulación de rocas, derrames volcánicos y a la enorme cantidad de sedimentos piroclásticos, afectados posteriormente por movimientos tectónicos que, en última instancia, han dado la configuración actual a la cuenca. Las formas fisiográficas volcánicas se han producido desde principios del Cenozoico hasta el Cuaternario y de esta manera se configura la clásica fisiografía del Malpaís (Gasca, 1981). En el área del lago Alchichica, las rocas del Mesozoico se encuentran junto con acumulaciones de material volcánico, tefras (material expulsado a través de la columna eruptiva tras una erupción volcánica) y lavas (Atlas Nacional de México, 1990).

Desde el punto de vista geomorfológico, en la cuenca dominan los procesos exógenos, determinados por acumulación de tipo fluvial y lacustre, y procesos de erosión en áreas semiáridas, principalmente de depósitos aluviales (Atlas Nacional de México, 1990). El lago Alchichica está situado en la parte media de la Región de los Llanos o Valle del Seco, influenciado por una mezcla de depósitos aluviales y lacustres, material piroclástico y derrames lávicos con posterior fracturamiento; en general, este tipo de material es de alta permeabilidad.

El basamento regional está compuesto principalmente por roca caliza del Cretácico y algunas pizarras que se observan en afloramientos aislados dentro de la Cuenca Libre de Oriental, como por ejemplo la Sierra de Soltepec (Yañes-García y García Duran, 1982; citados por Rodríguez et al., 2002). Este basamento fue intrucionado por rocas granodioríticas de composición sienítica durante el Oligoceno y Mioceno (Yañes y García 1982; citados por Carrasco-Núñez, 2003).

La cuenca de Oriental, es una depresión limitada hacia la parte oriental por una cadena de estrato volcanes andesíticos del Cuaternario, que mencionados de norte a sur: Nauhcampalpetl o Cofre de Perote, La Gloria, Las Cumbres y el Citlaltépec o Pico de Orizaba los cuales forman una extraordinaria topografía que divide el altiplano de la planicie costera del golfo de México. Al norte está limitada por el Cerro Xalapazquillo y la caldera de Los Húmeros. Hacia el sur, se encuentra limitada por la Sierra de Soltepec, constituida por rocas sedimentarias del mesozoico, y al Occidente por el complejo andesítico, Cerro Grande y el estrato volcán, La Malinche (Carrasco-Núñez, 2003).

Fisiográficamente, la cuenca Libre de Oriental se encuentra ubicada en la parte Oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, atraviesa la República Mexicana de oeste a este. En esta zona Volcánica, se localizan, grandes estratovolcanes, domos riolíticos, calderas y complejos de domos andesítico-riolíticos, volcanes monogénéticos de composición basáltica, volcanes escudo de composición basáltica o basáltico andesítica, volcanes maar, sierras y cadenas montañosas, entre las cuales se encuentran valles intermontanos (Cano C., 2007).

2.3

Hidrología

Hidrológicamente, la cuenca de Oriental, se ubica dentro de las regiones hidrológicas 18 y 28, denominadas “Balsas” y “Papaloapan”, respectivamente. Igualmente, le corresponden las subregiones hidrológicas 18-A–Alto Balsas-, 28-A–ríos Actopan, La Antigua y Jamapa y 28-B río Papaloapan (INEGI, 2002). Sus recursos hídricos principales se dividen en:

Lénticos: lagos Totolango, Alchichica, San Luís Atexcac, La Preciosa, Aljojuca, San Miguel Tecuitlapa, Quechulac, Totolcinco y Ovando, pantanos de Tepeyahualco y presas.

Lóticos: ríos permanentes e intermitentes La Caldera, Xonecuila, Quetzalapa, Piedra Grande, manantiales temporales El Carmen, Vicencio, Ojo de Agua, Lara Grajales. Un volumen considerable de aguas subterráneas (CONABIO, 2006,). Las corrientes principales son el arroyo Xonecuila y el río Barranca La Malinche, que nacen en Tlaxcala y vierten sus escurrimientos en forma intermitente al lago de Totolcingo o El Carmen. El escurrimiento superficial es transitorio y escaso, ya que se trata de una cuenca cerrada, sin salidas superficiales (CNA, 2002).

Sus sedimentos lacustres están compuestos desde su base por fragmentos de roca de todos tamaños (Bloques–arena, limo y arcilla) provenientes de la erosión tan intensa a la que han estado expuestas las calizas y las rocas ígneas intrusivas y extrusivas que circundan a la cuenca. Durante la etapa de actividad volcánica se emplazaron una gran cantidad de depósitos piriclásticos cuyos productos están interestratificados con los sedimentos lacustres (SARH, 1981).

2.4

LAGO ALCHICHICA

En México, muchos lagos son de origen volcánico o tectónico, la mayoría asociados con la Franja Volcánica Transmexicana (Fig. 1), como la zona de los axalapascos (“ollas de arena con agua”, lengua Nahuatl), cuya formación se remonta al Pleistoceno de la cuenca de Oriental (de la Lanza y García, 2002). En esta zona se encuentran seis lagos-cráter; el más grande de ellos es el lago Alchichica. Su alimentación hídrica se da principalmente a partir de la red hidrográfica subterránea de la región que aflora a poca profundidad y secundariamente por el agua de lluvias (Meneses, 2002).

Es muy conocido debido a que la Carretera Federal 140 (El Empalme–Acatzingo–Veracruz), pasa por su borde oriental y la hace fácilmente visible. Su historia geológica se remonta a la existencia del un volcán monogenético formado por escoria y un derrame asociado, que se encuentra como testigo en la parte oeste de la lago, constituyendo su parte más alta (Fig. 2 y Fig. 36 [anexo 1](#)) (SARH, 1981). Sobre esta se observa una masa y brechas de lapilli que existían antes de la formación del cráter y que la erosión, ha descubierto. Sus depósitos, en su extremo oriental, son capas de tobas grises intercaladas de ceniza suelta de lapilli y de pómez, que se ven casi horizontales o con muy débil pendiente, tanto en el interior como hacia el exterior (Ordóñez, 1905). Sus bordes muestran diferentes horizontes constituidos por ceniza fina, lapillí, fragmentos líticos, ceniza fina y líticos (en gradación normal y gradación inversa); así como bombas volcánicas (Alcalá, 2004).

La hidrodinámica (mezcla y estratificación de la columna de agua) del lago Alchichica la cual sigue un patrón de calentamiento monomítico (Alcocer et al., 2000), se observa con frecuencia en los lagos tropicales profundos (Lewis, 1996). Esto significa que el lago se mezcla con un cambio mínimo de temperatura, mientras que la estratificación se pronuncia a temperaturas cálidas durante toda la temporada de lluvias, con una temperatura superficial regularmente por encima de los 20°C. Sin embargo, las diferencias de temperatura a lo largo de la columna de agua son pequeñas, propias de lagos monomíticos cálidos, ubicados en zonas tropicales a semiáridas.

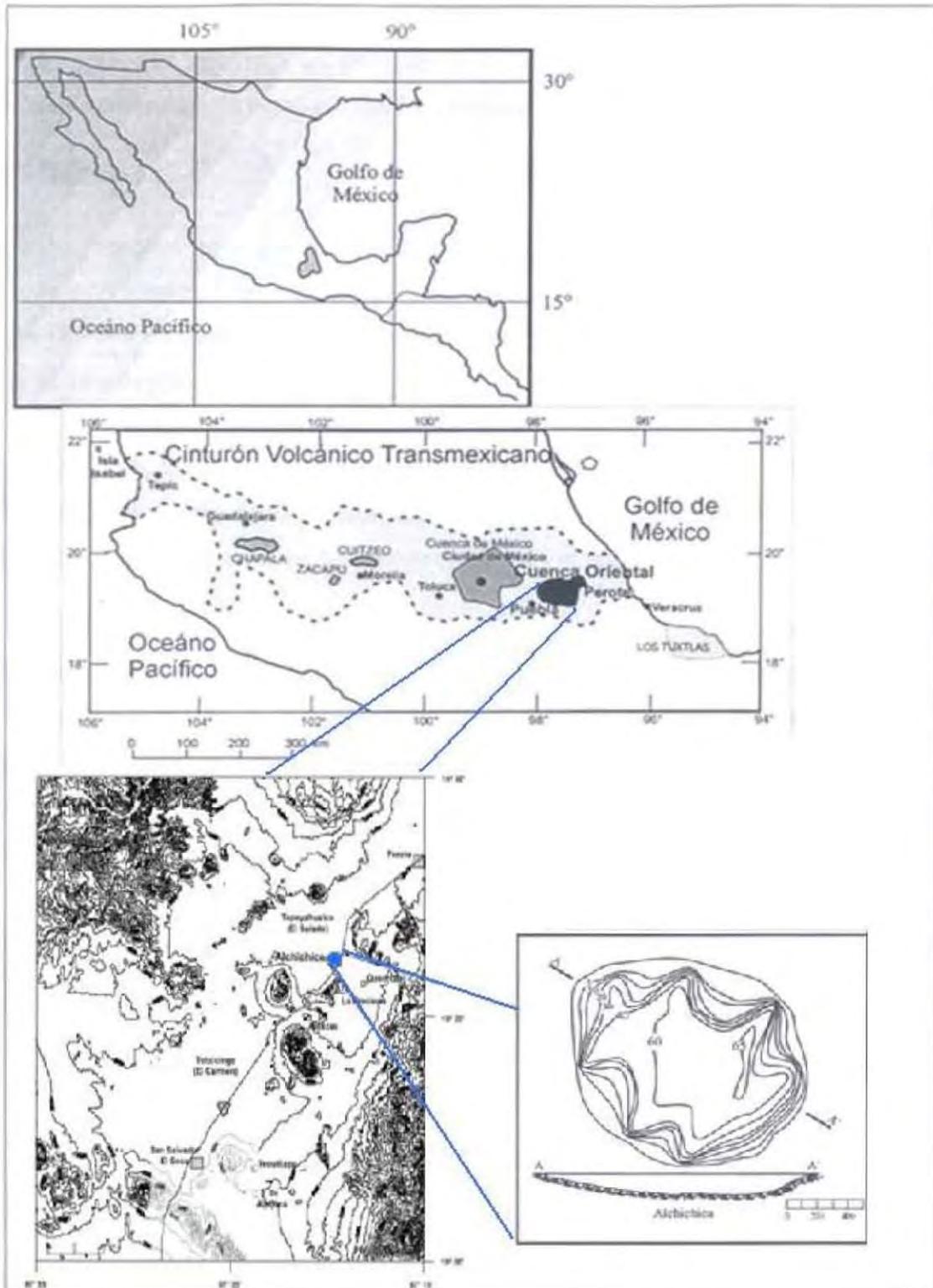


Fig. 1.- Ubicación geográfica a) Eje Volcánico Trans-Mexicano; b) Cuenca Oriental; c) Lago Alchichica Puebla, México (Vilaclara *et al.*, 1993 modificado de Arredondo *et al.*, 1983) tomado de Caballero *et al.*, 2003) y morfometría del lago Alchichica, Puebla, tomado de Arredondo *et al.* (1983).

El lago Alchichica pertenece a un grupo de lagos denominados “maar”. Hutchinson (1957) indica que este tipo de lagos presentan forma circular, un área superficial que va desde las 16.8 hasta 92 hectáreas, con un desarrollo de línea de costa de 1.04-1.15 m y profundidad de 21 y 108 metros, tomando en cuenta estas evidencias morfológicas y morfométricas, Arredondo et. al., (1983) ubican el lago dentro del tipo 11 de la clasificación de Hutchinson (1957), como un lago formado por una erupción volcánica simple, es decir, tipo “maar”. Los lagos de este tipo en la región se originaron por 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 paso del tiempo, llenaron los cráteres de agua (Gasca, 1981, Arredondo et al., 1983).

El cráter del lago Alchichica (fig.2) está situado en los paralelos 19° 24´ 44.90”N y 19° 25´ 15.16”N y los meridianos 97° 23´ 40” W y 97° 24´ 41.15” W, en la cuenca oriental en la frontera de los estados de Puebla y Veracruz (Fig.4), a una altitud de 2,300 m sobre el nivel del mar, es conocido como un lago natural profundo (es decir Z_{máx} 62 m, profundidad media, 38.6 m), con una superficie de 1,81 km² (cuadro 1), y un volumen de 69, 920,000 m³ (Filonov et al., 2001).

La temperatura media anual fluctúa de un -5.5°C a 30°C, con un valor medio de 14.4°C. Cuenta con un clima árido seco BS1kw (i’ w” (García, 2004) (cuadro 1), con régimen de lluvias en verano, el menos seco de los BS (seco-árido) con temperatura mayor a 22.9°C. Presenta una temperatura media anual menor a 18°C, media mensual mayor a 18°C en el mes más cálido (subtipo frío), % de lluvia invernal menor a 5%, lluvioso en verano (García, 2004), Isotermal con poca oscilación entre 5 y 7°C un régimen de precipitación anual de menos de 400 mm y una tasa anual de evaporación 500-600 mm, está situado en la alta meseta de Los Llanos de San Juan, puede ser descrita como un desierto frío (Alcocer et al., 2000).



Fig. 2.- Lago Alchichica, su nombre significa agua salada.

Alchichica, desde un punto de vista hidrodinámico, muestra una ciclicidad anual típica de los lagos monomícticos cálidos tropicales, el lago se mezcla en un momento particular y predecible del año a fines de diciembre hasta principios de marzo (invierno hemisférico, estación fría y seca); al irse enfriando, las aguas superficiales se hacen más densas, se hunden y mezclan debido a la circulación epilimnética inducida por los vientos del norte para después permanecer estratificado el resto del tiempo (Alcocer *et al.*, 2000), el patrón de estratificación ocurre de abril a diciembre durante la estación cálida-lluviosa; al calentarse las capas superiores del lago por radiación y conducción, se otorgan al lago una estratificación térmica, debido a la elevación de la temperatura (marzo) y a la disminución de la fuerza del viento. Desde ese momento y hasta finales de diciembre, la columna de agua está dividida en tres regiones con distintas temperaturas, que son muy resistentes a mezclarse entre sí: el epilimnion, el metalimnion (o zona clinograda de transición entre epilimnion e hipolimnion) y el hipolimnion. En los meses de julio a principios de diciembre se presentan condiciones de microaerobias a anaerobia en las capas del fondo (Alcocer *et al.*, 2000).

La temperatura máxima de Alchichica está alrededor de los 20°C, en la parte superior de 10 m de profundidad de junio a septiembre, y fluctúa en el rango de 15-18°C para el resto del año, en aguas profundas desde 50 m hasta el fondo, es ligeramente superior a 14.5°C todo el año. El máximo cambio térmico registrado en el perfil vertical (superficie inferior) de mayo a septiembre es 3.5-4°C y el mínimo es de 0.2°C a 0.7°C, de enero a febrero (Alcocer *et al.*, 2000).



Fig. 3.- Lago cráter Alchichica, estado de Puebla, México.

Cuadro 1.- Ubicación geográfica, clima y características limnológicas relevante para el lago Alchichica con base en Alcocer *et al.* (2000), ¹(García, 2004), ²(Filonov *et al.*, 2001).

Alchichica	
Latitud (°N)	19° 24' a 19° 25'
Longitud (°W)	97° 23' a 97° 24'
Altitud (m s.n.m.)	2,350
Clima	Seco o árido BS1kw(i'w'' ¹
Origen	Volcánico (maar)
Área superficial (km ²)	2.3
Profundidad (m)	62 máx. 38.6 prom. ²
Clasificación térmica	Monomítico cálido
Salinidad (g L ⁻¹)	8.5
Iones dominantes	Na+ > Mg++ Cl- > HCO ₃ -
Estado trófico	Oligotrófico

El lago Alchichica presenta características únicas de un sistema acuático tipo maar, tales como alta concentración de sales, que se relacionan con el pH y el oxígeno disuelto, además hay un gradiente de temperatura a lo largo de la columna de agua (Alcocer *et al.*, 2000).

2.4.α

Características morfométricas y batimétricas del lago Alchichica

Es el lago más grande en área superficial y volumen de los lagos de la Cuenca de Oriental, se encuentra alojado en el cráter del volcán con una forma subcircular, una longitud máxima de 1700 metros con orientación sureste-noroeste, y una gran cresta al oeste (Fig. 2, 3 y Fig. 36 [anexo 1](#)), de 100 metros de altura sobre el nivel del agua. Las paredes de la cubeta lacustre tienen una acentuada pendiente, por lo que la profundidad se incrementa bruscamente conforme se aleja de la orilla (Fig. 4 y Fig. 31 [anexo 1](#)). Esta marcada inclinación finaliza en una plataforma a los 60 metros desplazada ligeramente hacia el NE y cortada por la parte más profunda, que alcanza aproximadamente los 64 metros. En la zona litoral, a lo largo de toda la orilla, se presentan bajos o salientes de roca volcánica, que configuran una pequeña plataforma sobre todo hacia el noreste, norte y oeste. Por su parte la batimetría refleja seis

paredes opuestas simétricamente en sentido noreste-suroeste, que llegan hasta la plataforma central.



Fig. 4.- Curvas de nivel del lago Alchichica, (Arredondo, 1983 tomado de la Lanza et al., 2002).

La provincia florística presente en el lago Alchichica es pastizal halófito de *Distichlis spicata* formada por pastos rizomatosos (Fig. 31 [anexo 1](#)). Esta comunidad que se encuentra en los alrededores del lago Alchichica está condicionada por la alta salinidad del suelo (limoso-arcilloso) que suele inundarse durante los períodos de lluvias (agosto, septiembre y octubre). Los principales componentes florísticos de esta comunidad son: *Distichlis spicata* (zacate salino), *Bouteloua curtipendula*, *B. gracilis*, *Chloris submutica*, *Eriagrostis sp.*, *Hordeum vulgare*, *Mammillaria magnimamma*, *M. rhodantha*, *Sanvitalia procumbens*, *Sphaeralcea angustifolia*, *Stipa ichu* y *S. tenuísima* (Sandoval et al., 2000).

La vegetación acuática del lago se caracteriza por la presencia en el litoral y mesolitoral de dos especies de macrófitas enraizadas sumergidas *Ruppia marítima* y *Cyperus laevigatus* (Ramírez-García y Novelo 1984, Ramírez-García y Vázquez Gutiérrez, 1989).

El lago Alchichica presenta en sus orillas estromatolitos calcáreos (Fig. 5, 3 y Fig. 32 [anexo 1](#)), los cuales lo hacen un lago único y especial, a diferencias de los demás lagos de la cuenca de Oriental.

Los estromatolitos son, por definición, estructuras órgano-sedimentarias laminadas (típicamente de CaCO_3) que crecen adheridas al sustrato y emergen verticalmente del mismo, produciendo estructuras de gran variedad morfológica, volumétrica y biogeográfica. Su inicial

formación y desarrollo a lo largo del tiempo, se debe a la actividad de poblaciones microbianas (típicamente dominadas por cianobacterias), que pasivamente facilitan la precipitación de carbonatos (Beraldi-Campesi, 2000).

Además de las cianobacterias, en estromatolitos actuales la microflora puede incluir algas (especialmente verdes y diatomeas), hongos, crustáceos, insectos, esporas, polen, rodofitas y fragmentos y sedimentos de todo tipo, que pueden llegar a calcificar dentro de la estructura. La variedad biológica de cada comunidad estromatolítica dependerá de condiciones ambientales e hidrológicas: hipersalino, dulceacuícola, intermareales, submareales, fuertes corrientes, moderadas, nulas, cálido, templado, altitud (afecta a la exposición de luz UV). En la superficie, que es generalmente rugosa, porosa y cubierta por mucílago, filamentos. Partículas de carbonato (y a veces también terrígenos) van quedando atrapadas, hasta que la cementación por crecimiento de cristales forma una capa más. De esta manera la estructura aumenta en tamaño. Por su naturaleza rocosa, los estromatolitos tienen mucho potencial para perdurar como un fósil (Beraldi-Campesi, 2000).

Se presentan en sistemas de agua con una condición oligotrófica, pobre en nutrientes y, por ello, sirven como indicadores de salud ambiental (Beraldi-Campesi, 2000).



Fig. 5.- Estromatolitos en la zona litoral del lago Alchichica, foto tomada en junio 2010.
Acervo fotográfico Pérez Bautista.

3

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Qué efectos tienen la dinámica de los parámetros limnológicos en la estructura del picoplancton en el lago cráter Alchichica durante un ciclo anual?
2. ¿Como influyen los cambios en la concentración de nutrientes durante el periodo de mezcla y estratificación en la biomasa picoplanctónica a lo largo de la columna de agua?
3. ¿Como influyen los parámetros químicos como el oxígeno, pH, alcalinidad y salinidad en la biomasa celular a lo largo de un ciclo anual en el lago cráter de Alchichica?

4

HIPÓTESIS

Si las condiciones ambientales como la temperatura y concentración de nutrientes en el lago son suficientemente favorables en la etapa de mezcla, entonces se dará una mayor concentración de biomasa picoplanctónica en el sistema acuático durante este periodo, en cambio si las condiciones ambientales presentes en el lago favorecen la formación de estratos y la generación de gradientes químicos, entonces habrá una respuesta diferencial de la biomasa del picoplancton autotrófico y heterotrófico asociado con los mismos.

5

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los lagos de la cuenca Oriental se encuentran en un proceso creciente de salinización favorecido por la extracción de agua de los mantos freáticos, por la construcción de pozos profundos.

El clima cálido seco (semiárido) favorece la evaporación del lago, al haber menor precipitación, la concentración de sales aumenta por efecto de un déficit de agua. A su vez al ser una cuenca endorreica o cerrada y al no existir efluentes se propicia también un aumento de la salinidad.

La salinización tiene un impacto negativo en el ecosistema al reducir la diversidad de especies y hacer más simple la estructura de la comunidad del bacterioplancton.

Actualmente se presenta un conocimiento incipiente del procarioplancton en lagos salinos, a su vez no se conoce con precisión como es la abundancia y la biomasa en lagos tropicales salinos poco productivos.

Los lagos monomícticos, cálidos, hiposalinos, como el caso del lago Alchichica, son poco productivos y el picoplancton autotrófico puede jugar un papel importante en la dinámica de los productores primarios.

6

JUSTIFICACIÓN

La belleza escénica del lago Alchichica es incomparable, la diversidad y procesos de evolución, presentes en el lago aumentan la importancia en la investigación, su ubicación añade más interés por ser sitios de diversificación de especies y centros biogeográficos al comportarse de acuerdo con la teoría de islas por su aislamiento geográfico. Con esta investigación se pretende conocer de la estructura, abundancia y biomasa picoplanctónica con base en la dinámica limnológica del sistema y analizar su papel dentro del circuito microbiano en cuerpos de agua poco productivos como es el caso del Lago Alchichica.

7

OBJETIVO GENERAL

Determinar la biomasa picoplanctónica en el lago Alchichica y su relación con los parámetros limnológicos del sistema durante un periodo anual.

8

OBJETIVOS PARTICULARES

I. Evaluar la abundancia del picoplancton autotrófico y heterotrófico a lo largo de la columna de agua en un ciclo anual.

II. Cuantificar la biomasa de ambos grupos funcionales del picoplancton.

III. Evaluar la concentración de nutrientes en el lago y establecer su asociación con la biomasa del picoplancton.

IV. Relacionar la abundancia y biomasa del picoplancton con la temperatura, concentración de oxígeno disuelto, disponibilidad de luz, salinidad y pH durante los periodos de mezcla y estratificación.

9

METÓDO

9.1

Trabajo de Campo

9.1.a

Muestreo

De enero a diciembre del 2009, se tomaron muestras de agua para la cuantificación de bacterias, fijándolas con formol al 2% y se conservaron en una hielera con hielo a una temperatura de 4°C, y de enero del 2009 a junio del 2010, se tomaron muestras de agua mensuales a diferentes profundidades (de acuerdo con la dinámica térmica del sistema), en una estación de muestreo (centro del lago) durante el periodo de mezcla se tomaron entre 5 y 6 muestras a lo largo de la columna de agua mientras que para el periodo de estratificación fueron tomadas en superficie (0 metros), y en las zonas del epilimnion, metalimnion (termoclina) y el hipolimnion siendo 5 muestras en total, para el análisis de nutrientes se utilizó una botella Van Dorn (WILCO INSTRUMENTS, Michigan USA de 2.5L) a la cual se le fijo una pesa para evitar el movimiento con el viento y posteriormente se conservaron en una hielera con hielo con sal a una temperatura menor a los 4°C.

En el muestreo se midieron parámetros físicos como: visibilidad al disco de Secchi (agosto 2009 a junio 2010) (Margalef, 1983), temperatura ambiente y del agua superficial, % de nubosidad; y parámetros químicos: salinidad, oxígeno disuelto con un oxímetro (YSI modelo 57, Ohio USA) con precisión de $\pm 0.05 \text{ mg L}^{-1}$ calibrado con la salinidad específica del lago, y con la técnica de Winkler, la temperatura del agua se midió cada metro con el mismo aparato con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$, la alcalinidad con el método de indicadores y el pH con un potenciómetro (conductronic) con precisión de ± 0.01 , conductividad eléctrica con un aparato Check mate 90 (marca CORNING, New York, USA) con una precisión para conductividad eléctrica $\pm 0.01 \text{ mS cm}^{-1}$ y para salinidad de $\pm 0.01 \text{ g L}^{-1}$

Para el picoplancton se tomaron muestras de agua en botellas de 150 mL las cuales contenían un volumen de 7.5 mL de formol al 40% libre de bacterias lo que permitió tener una concentración final de este fijador al 2% de acuerdo con lo propuesto por Porter y Feig (1980),

9.2

Trabajo de Laboratorio

9.2.a

Determinación de nutrientes

A dos días después de tomar las muestras se analizaron en laboratorio se determinando los nutrientes siguientes: nitratos por el método del ácido fenoldisulfónico, nitritos por el

método del ácido sulfanílico, amonio por el método del fenato y el fósforo soluble reactivo por el método del fosfomolibdato (Cervantes, 1980).

9.2.β

Recuentos del HPP

De acuerdo con el protocolo propuesto por Pernthaler *et al.* (2001) se llevó a cabo la preparación de las muestras en membranas de policarbonato.

9.2.β.1

Filtración y tinción con DAPI:

Se montó el material de filtración con una membrana blanca de policarbonato (de 0.2 μm de diámetro de poro y acoplada al sistema de vacío). Se añadió agua destilada pre filtrada por 0.2 μm y se agitó la botella de la muestra antes de tomar una alícuota. Se añadió el volumen de la muestra apropiado (variable dependiendo del origen de la muestra; entre 1 a 3 mL en la mayoría de los casos) con una pipeta automática.

Posteriormente se añadió el colorante una cantidad de 50 μl de DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindol) y se esperaron dos minutos y se aplicó vacío suavemente. Una vez filtrado el volumen de la muestra, se retiró la membrana de policarbonato con unas pinzas, y se lavo en alcohol al 80% por 15 minutos, posteriormente en agua hasta su montaje. Evitando la incidencia de luz en la preparación.

Se montó sobre un portaobjetos y se añadió una nueva gota de VECTAshield (Fluorescent Mounting Media, Vector Labs) sobre el cubreobjetos (sin que el gotero toque el cubreobjetos), colocando suavemente el cubreobjetos. En el borde del portaobjetos se rotuló el nombre de la muestra y el volumen filtrado. Se guardaron los filtros en congelación hasta el momento de su observación al microscopio.

9.1.β.2

Observación de las bacterias teñidas al microscopio de epifluorescencia:

Se utilizó un microscopio de epifluorescencia de la marca Leica (modelo DFC300 FX). Se enfocó la preparación con luz ultravioleta. En principio, la mayoría de las células se verían de color azul. Se tomaron 10 a 15 fotografías por profundidad, dependiendo de la cantidad de células, en las muestras, para posteriormente analizar al menos 1000 células por profundidad.

Por medio del microscopio de epifluorescencia y luz UV se logró la observación y la toma de fotografías del HPP con la ayuda de una cámara digital (marca CANON) y con el programa Zoom Browser, registrando fecha de muestreo y el volumen filtrado.

9.1.β.3

Recuentos de APP

Para el montaje de muestras de APP se realizó el mismo procedimiento pero sin la aplicación del DAPI (4,6-diamidino-2-phenylindole) ya que las células tienen una autofluorescencia de las ficocianinas y ficoeritrinas bajo una excitación de luz verde (510-560) (Stockner *et al.*, 2000) y con volumen filtrado de 10mL por muestra. Además de cambiar el tipo de luz con el filtro de luz Cy3, la cual emite una luz verde que genera una fluorescencia naranja o roja de las células del APP.

9.3

Trabajo de gabinete

9.3.α

Análisis de Imágenes

Para la toma de fotografías se empleó el programa Zoom Browser ejecutable, versión 4.1 Copy Right. Cannon Inc. 2009. Las fotos tomadas se procesaron con el programa Image J con él que se editó las fotografías (para eliminar materia orgánica y componentes inorgánicos), tomadas con una cámara Cannon modelo Power Shot 545, este programa cuenta las células así como el área, perímetro y máximo feret, para la selección de las células de un tamaño de 0.05 μm^2 , para el HPP y el APP un tamaño de 0.1 μm^2 .

Los biovolúmenes celulares de bacterias pueden calcularse mediante análisis de imágenes, si se dispone de él o, en su defecto, puede medirse la longitud y la anchura de las células en fotografías ampliadas de las preparaciones microscópicas. Es necesario fotografiar un micrómetro objetivo para tener una referencia del tamaño real. Las formas geométricas a las que más habitualmente se asemejan las bacterias son la esfera para los cocos y un cilindro acabado en dos semiesferas para los bacilos.

Se elaboró una base de datos, los datos anteriores fueron llevados a una hoja de Excel (Microsoft office Excel 2007) , con macros realizados por el instituto de Hidrobiología de la Academia de Ciencias de República Checa, las cuales calculan los parámetros bacterianos (longitud, ancho, volumen celular y contenido de carbono) con macros para el cálculo del largo, ancho, volumen y contenido de carbono.

9.3.β

Abundancia

Para el cálculo de la abundancia se contaron en el microscopio las células en diferentes campos (tratando de cubrir toda la muestra hasta llegar a 600 células, de la cuadrícula del microscopio), se seleccionaron campos al azar y se consideró el número de células en un cuadro de 384 μm^2 de área observado con un objetivo de 100x, este conteo se transfirió a una

hoja de cálculo la cual determinó una aproximación de la densidad, tomando en cuenta el área del cuadro y el volumen filtrado de las muestras (2-4ml).

9.3.γ

Biomasa

Para el cálculo de la biomasa, abundancia y biovolumen, se realizó una base de datos en la cual se tomo en cuenta el ancho, largo, volumen, contenido de carbono, densidad y se calcula biomasa y biovolumen. Para cada uno de los grupos, APP y HPP.

$$\text{BIOMASA} = (\text{Abundancia}) \times (\text{Contenido de Carbono})$$

Se tomó en cuenta que para HPP el contenido de carbono (CC) se expresa por la relación alométrica del volumen celular (V) de Loferer-Krößbacher $CC = 218 \times V^{0.086}$ (Loferer-Krößbacher *et al.*, 1998 en Posch, *et al.*, 2001), y para el APP a través de $CC = V \times 200$, (Weisse, 2002).

Para analizar la variación espacio-temporal del contenido de carbono, abundancia y biomasa del APP y HPP se utilizó el programa Surfer versión 9 (Golden Software, Inc. 1997-2010), también se graficaron tridimensionalmente las concentraciones de nutrimentos y la biomasa, contenido de carbono, biovolumen de las bacterias con este programa.

9.3.δ

Análisis estadísticos

Para comparar si existían diferencias significativas entre las abundancias, contenido de carbono y biomasa por mes, se realizó un análisis de cajas múltiples con muesca (Salgado-Ugarte, 1992), se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, haciendo transformaciones logarítmicas a los datos que lo requieran y realizando un análisis de varianza y pruebas de Tukey (Márquez, 1991). Para encontrar relaciones funcionales entre los parámetros limnológicos y biológicos del picoplancton se realizaron correlaciones (Márquez, 1991) a través del programa STATGRAPHICS centurión XV.I (Statpoint Technologies, Inc., 2009).

10

RESULTADOS

10.1

Parámetros Físico-químicos

10.1.α

Temperatura (°C) y Oxígeno disuelto (mg L⁻¹)

En el ciclo anual correspondiente al año 2009 y primer semestre del 2010, se registró un patrón general de variación de monomixis cálida en la dinámica térmica del lago cráter Alchichica, identificándose para el año 2010 dos periodos, uno de mezcla durante los meses de enero hasta principios de marzo registrando temperaturas que oscilaron entre los 14°C a los 17°C, encontrando la máxima temperatura en la superficie, mientras que en el resto de la columna de agua se mantuvo a una temperatura constante; el segundo período se dio una estratificación térmica que comprendió de finales de marzo hasta finales de diciembre.

La máxima temperatura alcanzada en el lago Alchichica fue de 20.5°C y la mínima registrada de 14°C (Fig. 6). Para el período de circulación (enero-marzo 2009) la temperatura varió de 14°C a 17°C. Mientras para el período de estratificación, la temperatura fluctuó de 18°C a 20°C, siendo en la estratificación bien establecida (julio-septiembre) donde se registró la temperatura máxima del lago con 20.5°C, los mínimos de temperatura de 14°C se encontraron en el período de circulación y en el hipolimnion durante la estratificación (Fig. 6).

La termoclina (isoterma de 16.3°C, que separa las capas más superficiales del lago de las más profundas) se presentó a los 14 m de profundidad a finales del mes de marzo y conforme avanzó la estratificación en la termoclina se profundizó hasta alcanzar los 35 m de profundidad para el mes de diciembre, mostrándose el mayor gradiente de temperatura en la estratificación bien establecida, fluctuando una diferencia de temperaturas de 1°C por metro de profundidad.

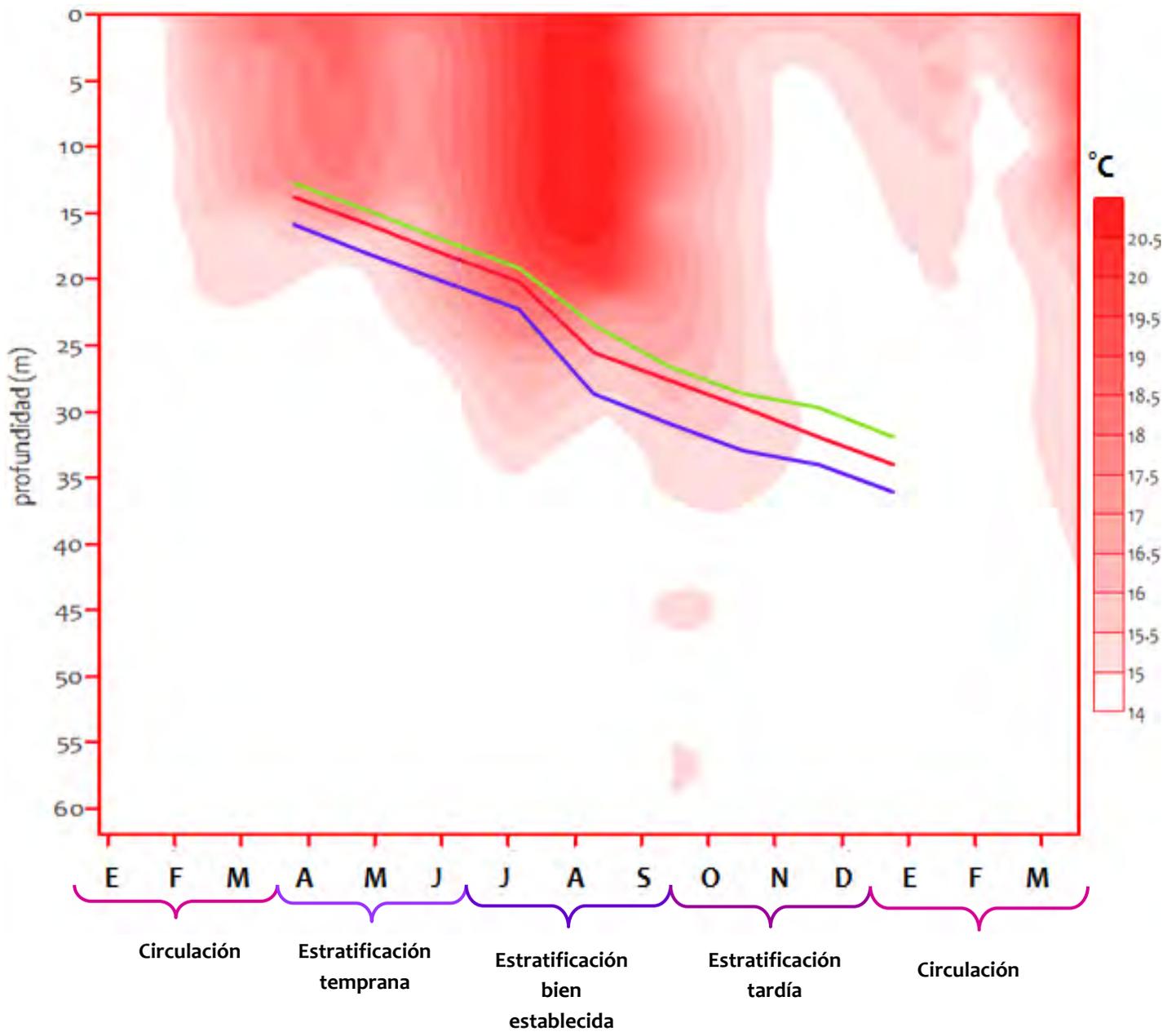


Fig. 6.- Diagrama espaciotemporal de isoterma de temperatura para el año 2009 y principios de 2010 en el lago Alchichica (con líneas azul y verdes se marca la ubicación de la termoclina y con línea roja más intensa la termoclina planar).

- epilimnion
- metalimnion
- hipolimnion

Para el lago Alchichica las concentraciones máximas de oxígeno disuelto (O.D.) 8 mg L^{-1} , se registraron en la superficie y el epilimnion durante los meses de enero a octubre (Fig. 7). Para el período de circulación la superficie presentó 8 mg L^{-1} de oxígeno disuelto con temperaturas de $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y el fondo 60 m de profundidad con $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y 6 mg L^{-1} . Durante el período de estratificación, el oxígeno disuelto disminuyó en la columna de agua (marzo-mayo) hasta llegar a ser anóxico (hipolimnion) durante el resto de la estratificación (junio-diciembre), elevándose nuevamente la concentración a finales de este período e inicio del período de circulación (enero-febrero 2010).

La termoclina aparece en abril a los 14 m de profundidad con una temperatura de 16.3°C y 5 mg L^{-1} de oxígeno disuelto, y comienza a descender a finales de noviembre a los 31 m de profundidad con 16°C de temperatura y 3 mg L^{-1} de O.D.

La oxiclina aparece a mediados de marzo a los 15 m de profundidad con una concentración de 4 mg L^{-1} de O.D., por debajo de la termoclina (14 m de profundidad). Durante el período de estratificación bien establecida la oxiclina gradualmente se profundiza hasta llegar a 33 m de profundidad con 4 mg L^{-1} .

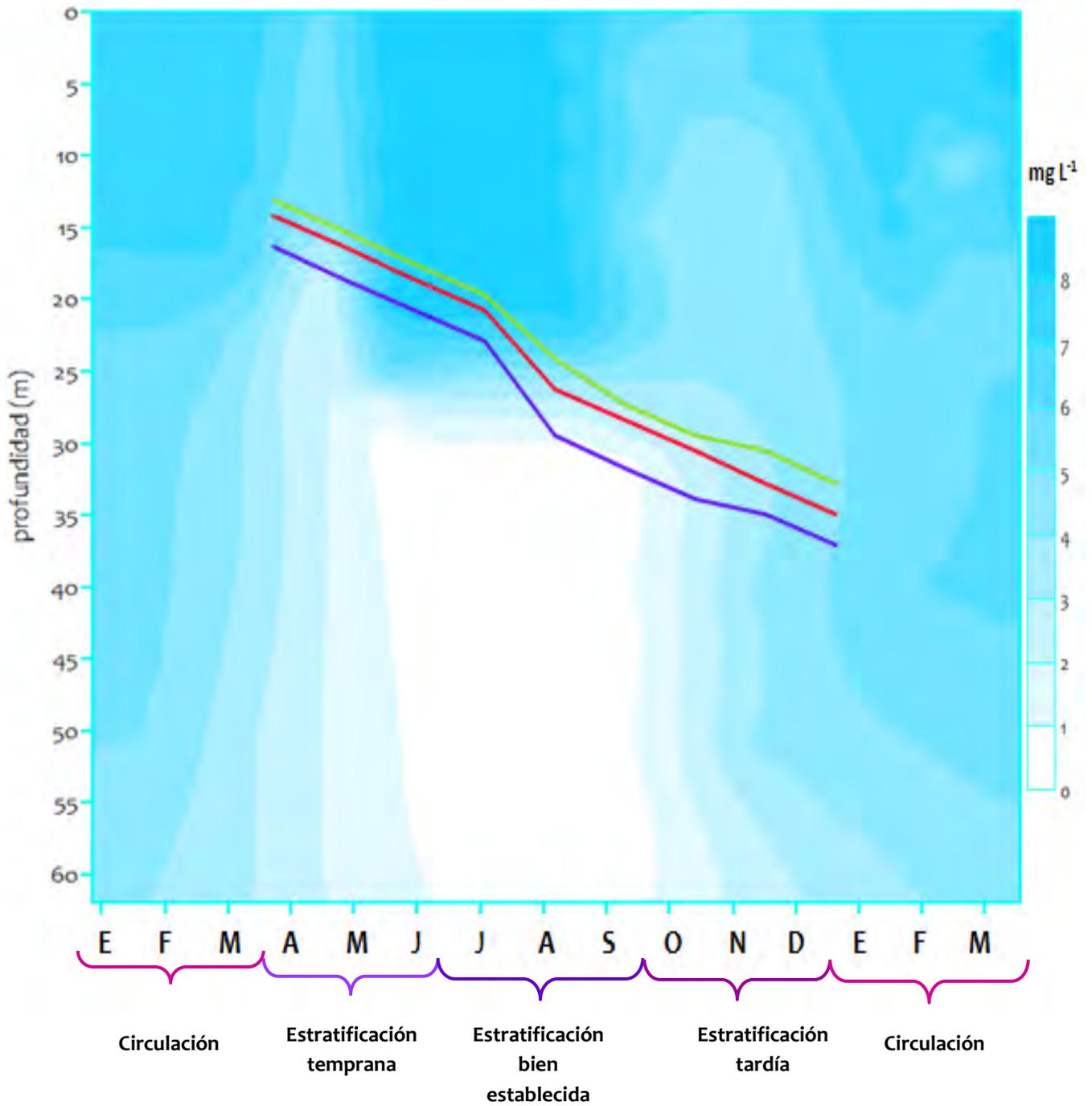


Fig. 7.- Diagrama espaciotemporal de isopletas de oxígeno disuelto para el año 2009 y principios de 2010 en el lago Alchichica.

- epilimnion
- metalimnion
- hipolimnion

10.1.β

ZONA FÓTICA (Z_{EU}).

La zona fótica donde la tasa fotosintética es mayor que la tasa respiratoria (Lalli, 1993) está delimitada por la profundidad a la que se encuentra el 1% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR por su siglas en inglés) superficial. La Z_{EU} en Alchichica presentó una fluctuación entre 14 y 18 m.

La Z_{EU} fue menor (12 m de profundidad) durante la época de estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) que durante el período correspondiente a la época de circulación (enero-marzo 2010) (17 m de profundidad) con base en lo anterior se pueden reconocer una fase de aguas claras con mayor Z_{EU} durante el período de circulación y una fase de aguas turbias con menor Z_{EU} durante la época de estratificación tardía (Fig. 8).

Esta se ubicó dentro de la región aerobia del sistema, cubriendo tanto el epilimnion como el tope del metalimnion, mientras que la región afótica abarcó la región anaerobia o de microaerofila. Se registró un acoplamiento entre la evolución de la termoclina y del PAR durante los periodos de estratificación temprana y bien establecida, ya que la base de la termoclina se ubicó hasta donde logró penetrar la luz, de manera que la zona fótica alcanzó la base de la termoclina. Durante la época de estratificación tardía, el PAR se localizó por encima de la termoclina (Fig. 8).

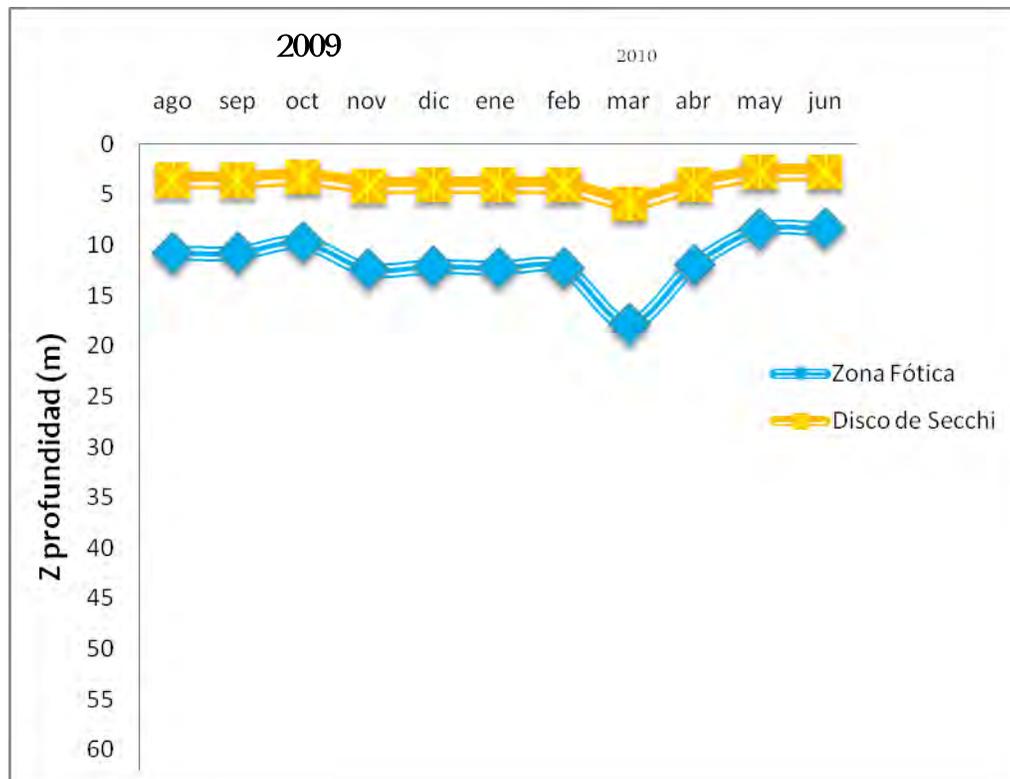


Fig.- 8.- Dinámica temporal de la zona eufótica (Z_{EU}) y disco de Secchi, en el lago cráter Alchichica.

10.1. y

Alcalinidad, pH, Conductividad y Salinidad

Cuadro 2. Resultados promedio de pH, conductividad y alcalinidad de 2009, para el lago Alchichica.

	Alcalinidad	pH	Conductividad	Salinidad	
	Ca CO ₃ mg L ⁻¹		mS cm ⁻¹	ppm	‰
2009	2555.0	9.09	13.2633	8621.2	8.6
	2081.8	9.13	13.3267	8662.3	8.7
	2346.7	9.09	13.155	8550.8	8.6
	1908	9.07	13.158	8552.7	8.6
	2062	9.07	13.158	8552.7	8.6
	2260	9.01	17.278	11230.7	11.2
	2230	9.01	17.278	11230.7	11.2
	2256	8.45	17.252	11213.8	11.2
Media	2212.4	9.0	14.7	9576.9	9.6
σ	197.20	0.22	2.10	1365.41	1.37
c.v	0.09	0.02	0.14	0.14	0.14

La alcalinidad en el lago Alchichica fluctuó entre 1908 y 2555 mg L⁻¹ ± 197.20 y una media de 2212.4 mg L⁻¹. Para el pH se observó uniformidad en los valores a través del tiempo con valores de 8.45 a 9.13 ± 0.22 y un promedio de 9 de pH. La conductividad varió de 13.15 a 17.27 mS cm⁻¹ ± 2.10, registrando un promedio de 14.7 mS cm⁻¹. En cuanto a la salinidad está osciló entre 8.6 y 11.2 ‰ ± 1.37 y un promedio de 9.36‰ (cuadro 2).

10.1.8

NUTRIMENTOS

10.1.8.1 NITRATOS

Se observó durante el periodo de circulación (enero-marzo 2009) homogeneidad a lo largo de la columna de agua con concentraciones que fluctuaron entre $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $5.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, a comienzos del período de circulación (enero) las concentraciones fluctuaron hasta los $5.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ a 30 m de profundidad (Fig. 9).

Consecuentemente la columna de agua tendió a estratificarse a comienzos del período de estratificación temprana (abril-junio 2009), las concentraciones fluctuaron de $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $4.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, aumentando considerablemente las concentraciones en la zona del epilimnion (0-13 m de profundidad) a $4.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, y manteniéndose homogéneas por debajo de la termoclina (15 m de profundidad). Conforme avanzó la estratificación se observaron aumentos considerables en las concentraciones de nitratos, llegando al período de estratificación bien establecida o máxima (julio-septiembre 2009), teniendo en el epilimnion (0-26 m profundidad) concentraciones de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $7 \mu\text{mol L}^{-1}$, donde se presentó la máxima concentración de nitratos para el lago Alchichica, mientras que en el hipolimnion (22-62m de profundidad) las concentraciones fueron homogéneas de los $4.5 \mu\text{mol L}^{-1}$. Para finales del período de estratificación (octubre-diciembre 2009), las concentraciones de nitratos disminuyeron gradualmente llegando a ser homogéneas en el hipolimnion (35 m de profundidad) o $\mu\text{mol L}^{-1}$ a $3.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y manteniéndose altas en el epilimnion de $3.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $4 \mu\text{mol L}^{-1}$, notándose claramente una disminución de nitratos para comienzos del período de circulación (enero-marzo 2010) estratificándose la columna de agua de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $5.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, observándose en la superficie (0 m de profundidad) una concentración de $3.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y en el fondo del lago (62 m de profundidad) de $5.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, para comienzos del período de estratificación temprana (abril-junio 2010) se observó homogeneidad en toda la columna de agua con concentraciones que fluctuaron de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, notándose un aumento en las concentraciones conforme avanzó el período de estratificación alcanzando los $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ para finales e inicios del período de estratificación bien establecida.

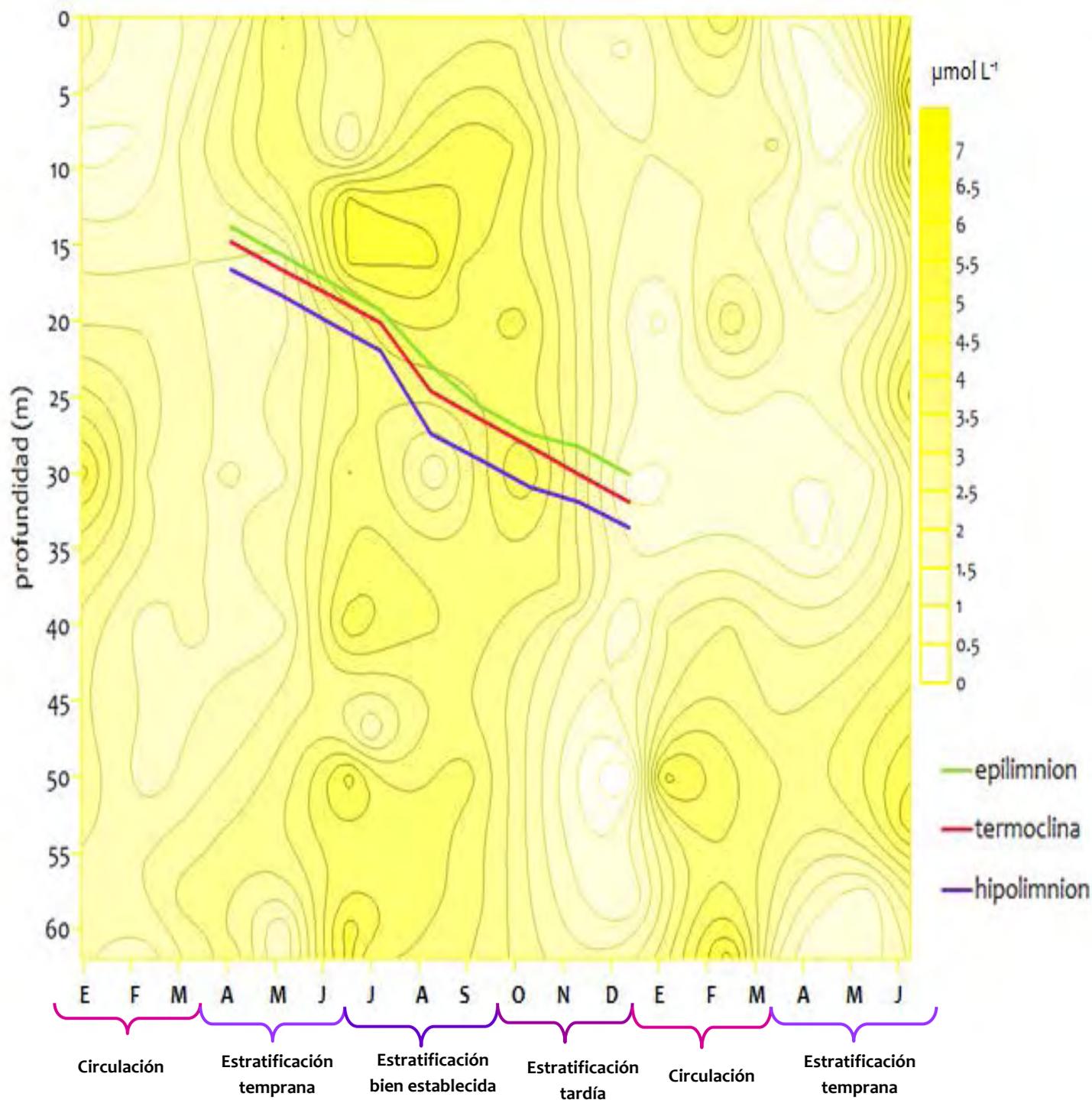


Fig. 9.- Diagrama espaciotemporal de nitratos para el lago Alchichica durante los años 2009-2010.

10.1.8.2 NITRITOS

Las concentraciones de nitritos observadas en el lago Alchichica fluctuaron de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $1.1 \mu\text{mol L}^{-1}$, (Fig. 10).

Para el período de circulación (enero-marzo 2009) se observó homogeneidad en toda la columna de agua con concentraciones que fluctuaron entre $0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $0.2 \mu\text{mol L}^{-1}$, conforme terminó este período se observó un aumento gradual en comienzos del período de estratificación temprana (abril-junio 2009), donde se obtuvieron concentraciones de $0.25 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $1.1 \mu\text{mol L}^{-1}$. En el epilimnion concentraciones no mayores a $0.45 \mu\text{mol L}^{-1}$ tendieron a ser homogéneas, con un incremento en la termoclina (12 m de profundidad) con $0.55 \mu\text{mol L}^{-1}$, en el hipolimnion (16-62 m de profundidad) se registraron las mayores concentraciones de $1.1 \mu\text{mol L}^{-1}$ de nitritos en el lago Alchichica.

En el período de estratificación bien establecida (junio-septiembre 2009), las concentraciones disminuyeron de $0.2 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $0 \mu\text{mol L}^{-1}$, donde se observó una uniformidad entre los estratos formados en el lago, sin existir un aumento considerable de nitritos. Para la estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) se observó el mismo patrón, con diferencia en la termoclina de octubre registrada a 39 m de profundidad, donde la concentración incrementó a $0.35 \mu\text{mol L}^{-1}$, disminuyendo en el hipolimnion (32-62 m de profundidad) a $0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$.

Para el año 2010 durante el período de circulación (enero-marzo 2010) se observó un patrón uniforme sin diferencias a lo largo de la columna de agua con concentraciones que fluctuaron entre $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $0.15 \mu\text{mol L}^{-1}$, conforme finalizó este período se observó un aumento a finales de marzo, siendo así que en la estratificación temprana (abril-junio 2010) las concentraciones aumentaron considerablemente, siendo la más alta de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ a los 57 m de profundidad.

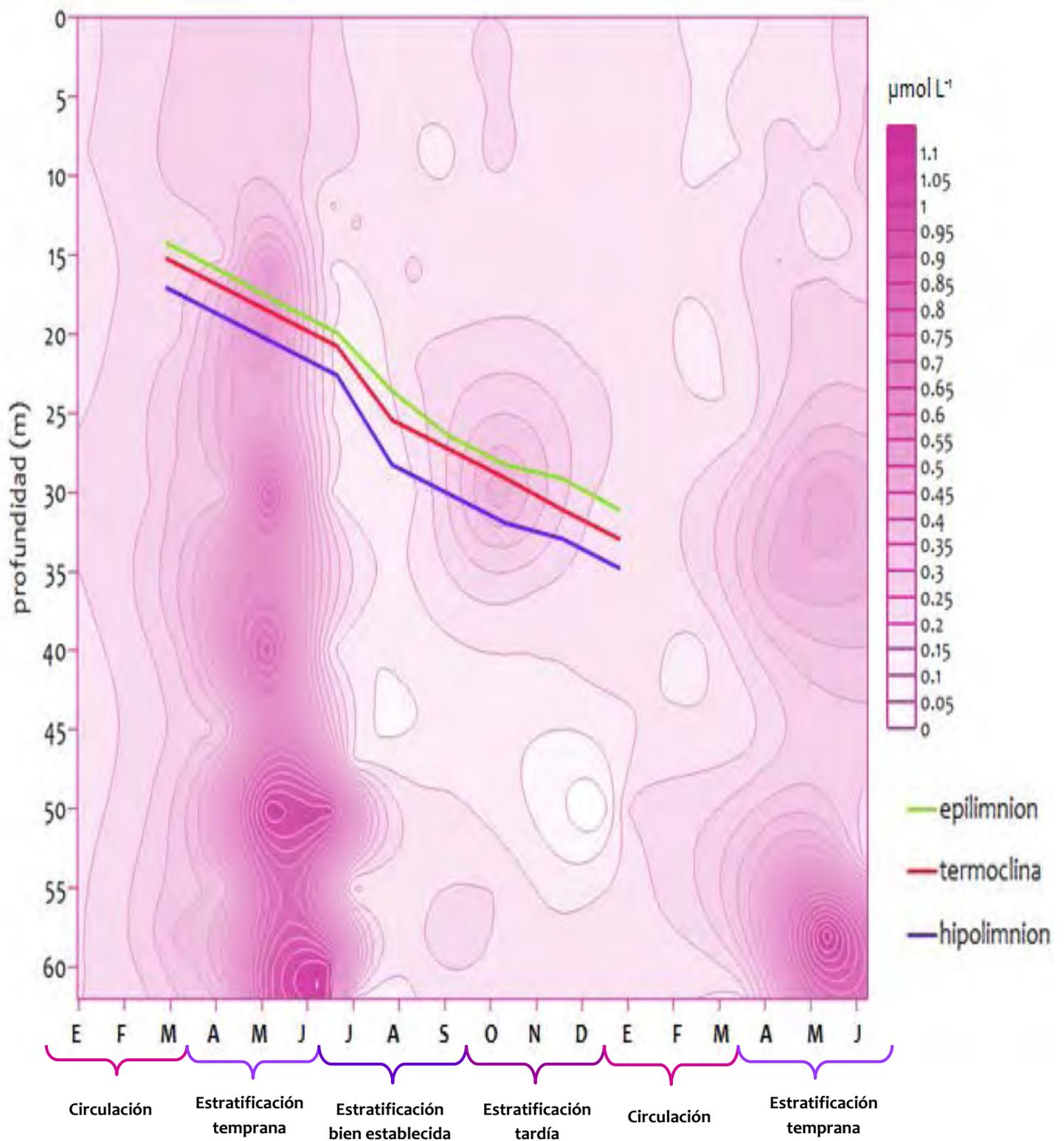


Fig. 10.- Diagrama espaciotemporal de nitritos para el lago Alchichica durante los años 2009-2010.

10.1. 8.3 AMONIO

Las concentraciones de amonio observadas en el lago Alchichica fluctuaron entre $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $13 \mu\text{mol L}^{-1}$. Durante el periodo de circulación (enero-marzo 2009) se registraron de $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $13 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Fig. 11), siendo las máximas concentraciones observadas en la superficie del lago de 2-8 m de profundidad, conforme terminó el período de circulación se noto una disminución gradual de amonio a lo largo de la columna de agua, para inicios del periodo de estratificación temprana (abril-junio 2009) se observó una estratificación de amonio que coincide con la estratificación de la columna de agua, para el epilimnion (0-13 m de profundidad) las concentraciones fluctuaron de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $5 \mu\text{mol L}^{-1}$, notándose un incremento en la termoclina a los 15 m de profundidad con $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ para después disminuir a $3 \mu\text{mol L}^{-1}$ a los 23 m de profundidad, mientras en el hipolimnion (16-62 m de profundidad) se encontró un gradiente de variación de amonio con concentraciones de $0 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $10 \mu\text{mol L}^{-1}$, las concentraciones máximas se registraron entre los 30, 55 y 62 m de profundidad con $10 \mu\text{mol L}^{-1}$, conforme avanzó el período de estratificación las concentraciones disminuyeron uniformemente de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $1 \mu\text{mol L}^{-1}$, ya en la estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) se noto homogeneidad para el epilimnion (0-28 m de profundidad) con concentraciones no mayores a $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ y en el hipolimnion (32-62 m de profundidad) concentraciones menores a $1 \mu\text{mol L}^{-1}$.

A comienzos del periodo de circulación de 2010 (enero-marzo), se encontró uniformidad de amonio de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y una pequeña concentración de amonio a los 10 m de profundidad con $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ disminuyendo a $2 \mu\text{mol L}^{-1}$ a los 17 m de profundidad. Para el periodo de estratificación temprana (abril-junio 2010) se mantuvo una total homogeneidad con concentraciones no superiores a $4 \mu\text{mol L}^{-1}$.

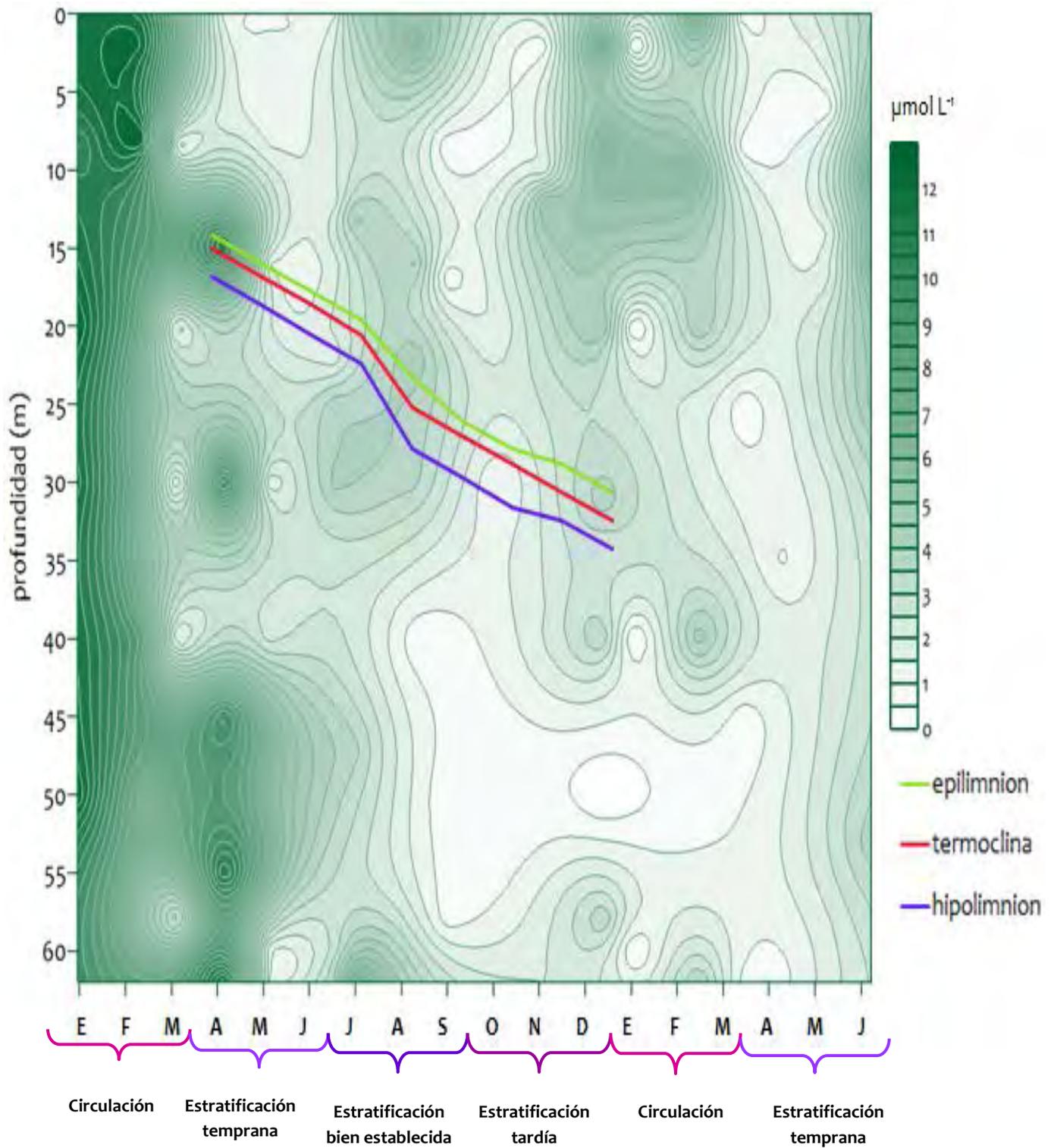


Fig. 11.- Diagrama espaciotemporal de amonio para el lago Alchichica durante 2009-2010.

10.1.8.4 FÓSFORO SOLUBLE REACTIVO (P.S.R.)

Las concentraciones de P.S.R. que se registraron en el periodo de circulación fueron de $0.05 \mu\text{mol L}^{-1}$ a lo largo de los primeros 40 m de profundidad, notándose un de los 45 a 55 m de profundidad con concentración de $0.25 \mu\text{mol L}^{-1}$. (Fig. 12).

Al inicio de la estratificación temprana (abril-junio 2009) se persivio con mayor precisión en el mes de abril una estratificación química de los fosfatos delimitada por la termoclina (14 m de profundidad), mientras en el epilimnion se noto un aumento de la concentraciones a $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ al igual que en el hipolimnion a los 40 m de profundidad hubo una acumulación de P.S.R. En la estratificación bien establecida (junio-septiembre 2009) disminuyo a $0.25 \mu\text{mol L}^{-1}$ en el epilimnion (0-26 m de profundidad), mientras en el hipolimnion (22-62 m de profundidad) las concentraciones fluctuaron entre $0.25 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $0.45 \mu\text{mol L}^{-1}$.

Entre las etapas de inicio del período de estratificación y estratificación bien establecida se encontró una notorio incremento del P.S.R. en epilimnion hacia la superficie con las concentraciones más altas en el lago de $0.85 \mu\text{mol L}^{-1}$, al igual que en el hipolimnion a los 62 m de profundidad se presentó una concentración de $0.85 \mu\text{mol L}^{-1}$. Para el período de estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) se observó una disminución en la concentración de P.S.R. en los estratos del epilimnion e hipolimnion, en el epilimnion (0-28 m de profundidad) hubo concentraciones de $0.05 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $4 \mu\text{mol L}^{-1}$, en cuanto en el hipolimnion tuvo concentraciones de $0.3 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $4.5 \mu\text{mol L}^{-1}$. En el año 2010, en el periodo de circulación (enero-marzo) mantuvo una uniformidad a lo largo de la columna de agua con una concentración de $0.25 \mu\text{mol L}^{-1}$.

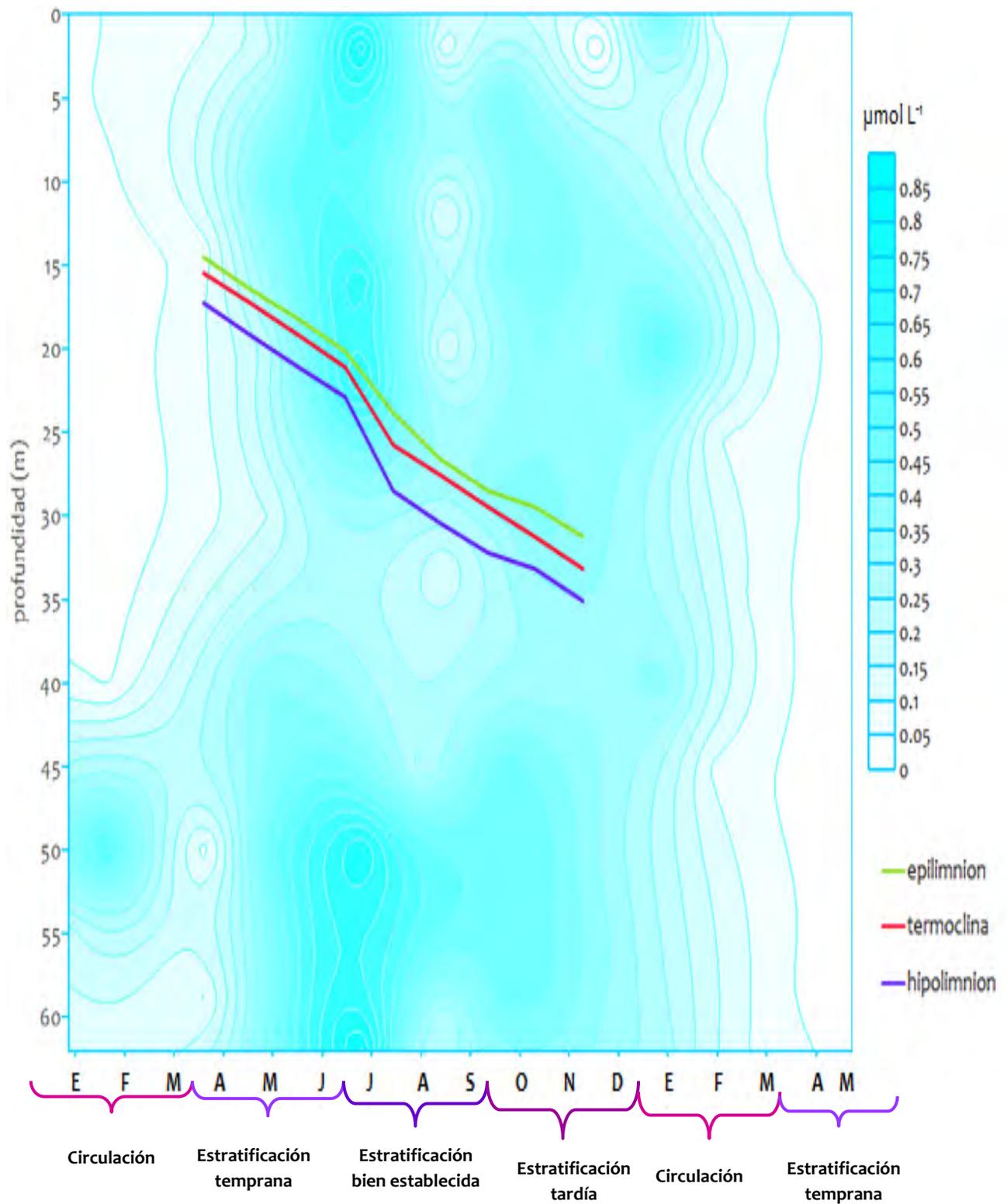


Fig. 12.- Diagrama espaciotemporal de fosforo soluble reactivo para el lago Alchichica durante 2009-2010.

10.1.8.5 FÓSFORO TOTAL (P.T.)

Para el periodo de circulación las concentraciones registradas de P.T. no rebasaron los $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ con una homogeneidad a lo largo de la columna de agua, aumentando hacia el fondo a $3.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Fig. 13).

A inicios de la estratificación (abril-junio 2009) el P.T. aumentó a lo largo de la columna de agua, en el epilimnion fueron de $3 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $5 \mu\text{mol L}^{-1}$, en tanto en el hipolimnion fueron notables dos máximos, uno entre los 28 y 33 m de profundidad, con concentración de $9 \mu\text{mol L}^{-1}$, y el otro, que fue de los 57 a 62 m de profundidad, donde se registraron entre $7.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ de P.T.

Para la estratificación bien establecida se registraron las concentraciones más altas de Alchichica en los dos estratos extremos, para el epilimnion (0-26 m de profundidad) fueron de $6 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $11 \mu\text{mol L}^{-1}$, en el metalimnion las concentraciones se encontraron entre $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $3.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y por último en el hipolimnion (30-62 m de profundidad) que fluctuaron gradualmente hacia el fondo de $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $11 \mu\text{mol L}^{-1}$. En la estratificación tardía la concentración de fósforo total bajó, hasta $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ en el epilimnion (0-28 m de profundidad), al igual que en el hipolimnion (35-62 m de profundidad) hubo una disminución de fósforo total a $6 \mu\text{mol L}^{-1}$.

Para la circulación del 2010 no hubo una homogenización notable del fósforo total, como la observada en el 2009, con concentraciones entre $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $4 \mu\text{mol L}^{-1}$ a través del tiempo.

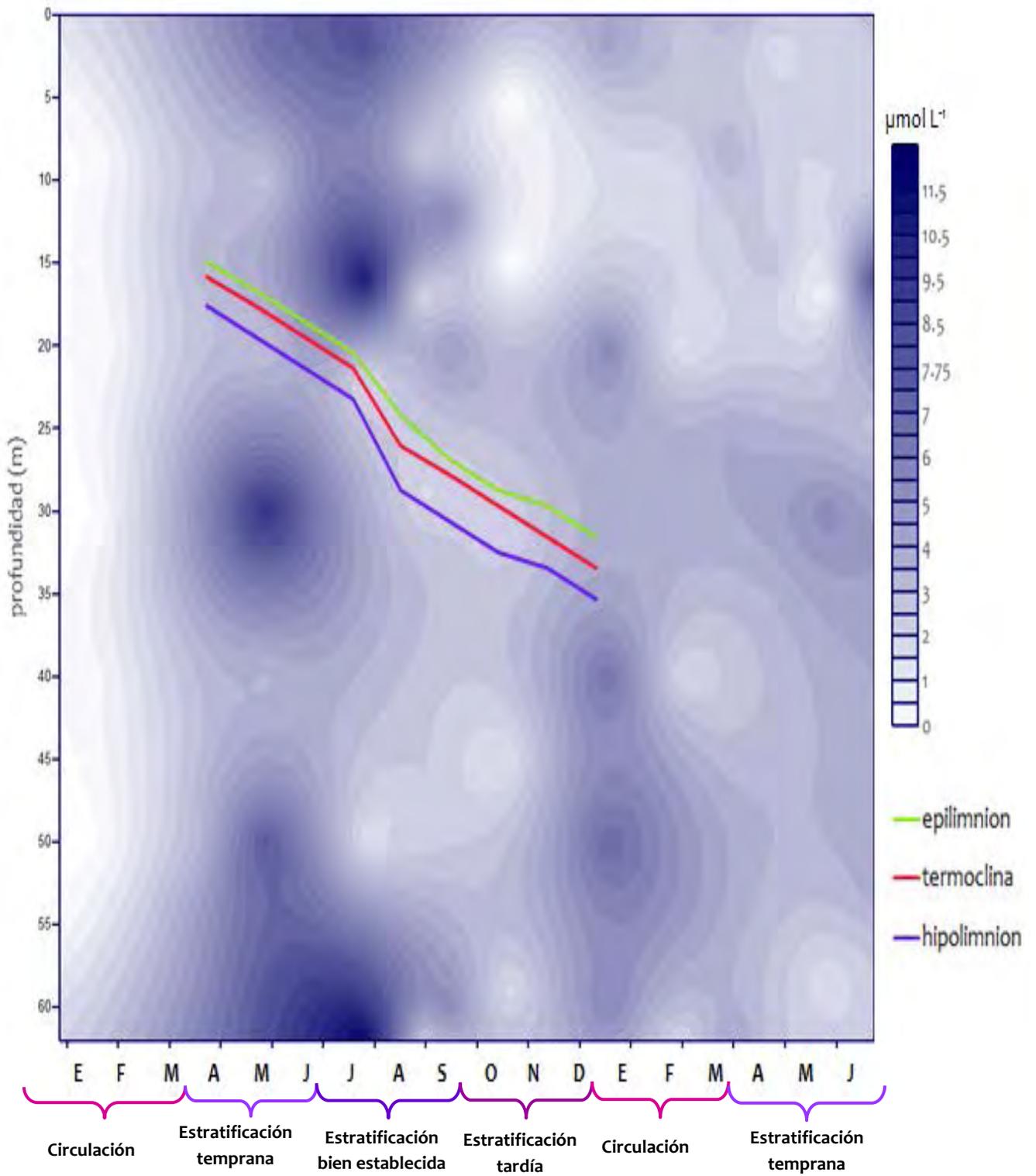


Fig. 13.- Diagrama espaciotemporal de fósforo total para el lago Alchichica durante 2009-2010.

11.1 Contenido de Carbono APP (Weiss)

El contenido de carbono (C.C.) del APP durante el 2009 tuvo concentraciones de 15 fgC cél^{-1} a 115 fgC cél^{-1} ubicando estas concentraciones en la circulación (enero-marzo 2009) en el mes de enero arriba de los 30 m de profundidad, se registro C.C. de 70 fgC cél^{-1} , mientras alrededor de los 40 metros se ubico concentración de 115 fgC cél^{-1} , y al fondo decrece a valores de 10 fgC cél^{-1} , para marzo se presentó una disminución mayor hasta 15 fgC cél^{-1} . En la estratificación temprana (abril-junio 2009) aumentó en el metalimnion (14-18 m de profundidad) registrando valores de 106 fgC cél^{-1} , a la vez, hacia el hipolimnion (19-62 m de profundidad) hubo uniformidad del C.C. con valores no mayores a 50 fgC cél^{-1} (Fig. 14).

Para le estratificación bien establecida (julio-septiembre 2009) comenzó con una disminución del C.C. en toda la columna de agua con valores de 70 fgC cél^{-1} bajaron a 28 fgC cél^{-1} y conforme este periodo avanzó el C.C. se va en aumento hacia el final de agosto con valor de 81 fgC cél^{-1} . En la estratificación tardía las concentraciones de C.C. tendieron a un crecimiento que va de 110 fgC cél^{-1} a 150 fgC cél^{-1} alcanzando los 150 fgC cél^{-1} en el epilimnion (0-28 m de profundidad) y en la parte superior del hipolimnion (35-62 m de profundidad), mientras tanto en el metalimnion se presentó una baja hasta los 10 fgC cél^{-1} .

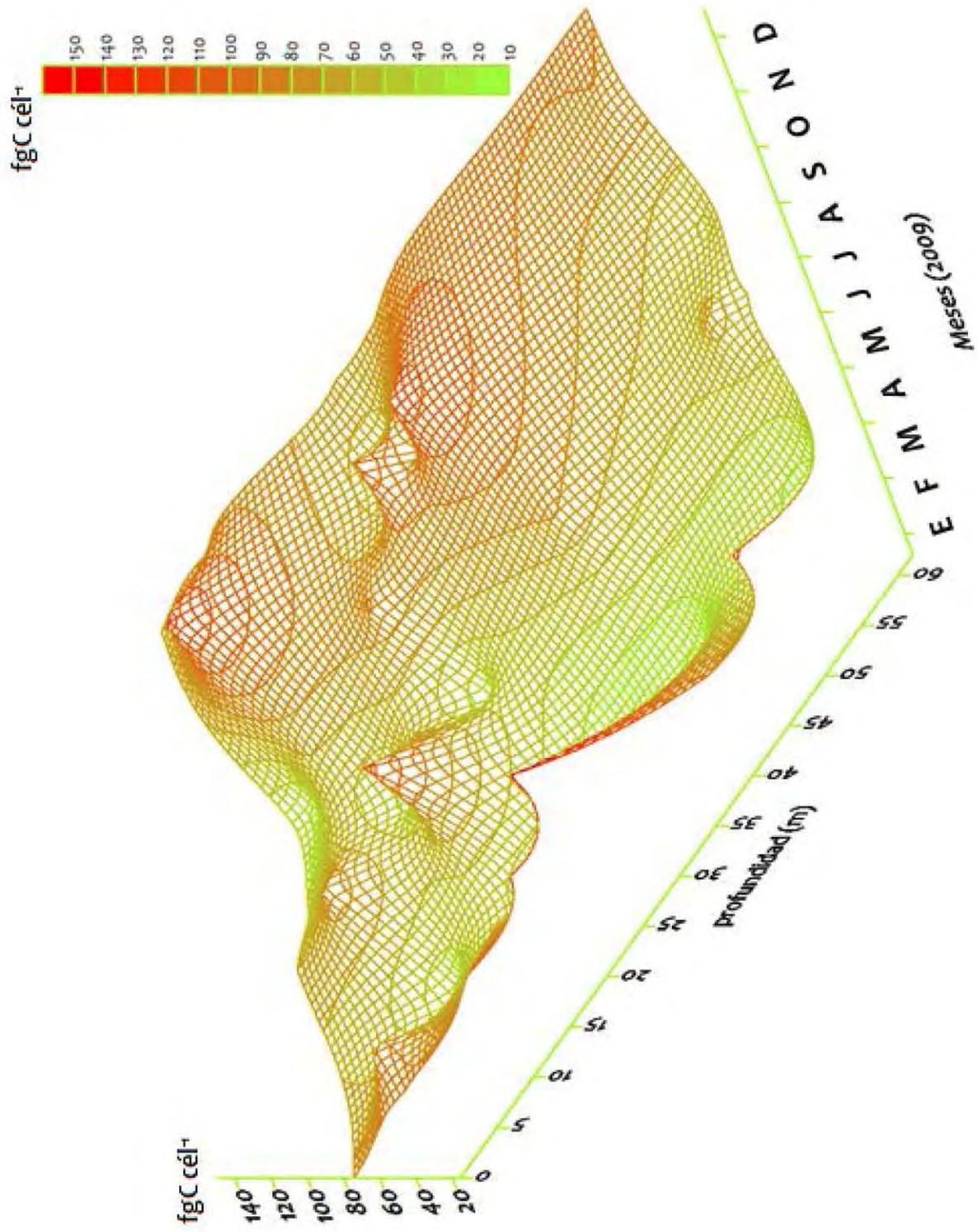


Fig.14.- Variación espaciotemporal del contenido de carbono (C . C .) del picoplancton autotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual, Diagrama en 3D.

11.2 Abundancia APP

Como se muestra en la Fig. 15, la densidad del picoplancton autotrófico en la circulación (enero-marzo 2009) se distribuyó homogéneamente a través de la columna de agua, hasta finales de febrero obteniendo ciertos aumentos de la densidad, entre los 5-10 m de profundidad con densidades de 400 000 cél L⁻¹ a 550 000 cél L⁻¹, a los 20 m de profundidad se presentó de 400 000 cél L⁻¹ y en los 30 m de profundidad con valor de 400 000 cél L⁻¹.

Para la estratificación temprana (abril-junio 2009) observaron densidades similares a las registradas a las mismas profundidades del periodo de circulación (enero-marzo 2009), justo a final de esta, conforme avanzó la estratificación temprana la densidad disminuyó en los tres estratos de la columna, en el epilimnion la densidad se registró de 300 000 cél L⁻¹ a 150 000 cél L⁻¹, respecto al hipolimnion se redujo en las mismas densidades que en el epilimnion.

En la estratificación bien establecida se registró un aumento de la densidad, en la parte inferior del epilimnion fue de 750 000 cél L⁻¹, la termoclina, mientras en el hipolimnion el aumento fue 450 000 cél L⁻¹.

A partir de la estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) se observó una disminución de la densidad dentro del epilimnion con densidades de 200 000 cél L⁻¹ a 50 000 cél L⁻¹, por tanto en el hipolimnion se encontraron los valores de densidad más altos del lago, con un intervalo de 50 000 cél L⁻¹ a 900 000 cél L⁻¹ aumentando hacia los 50 m de profundidad.

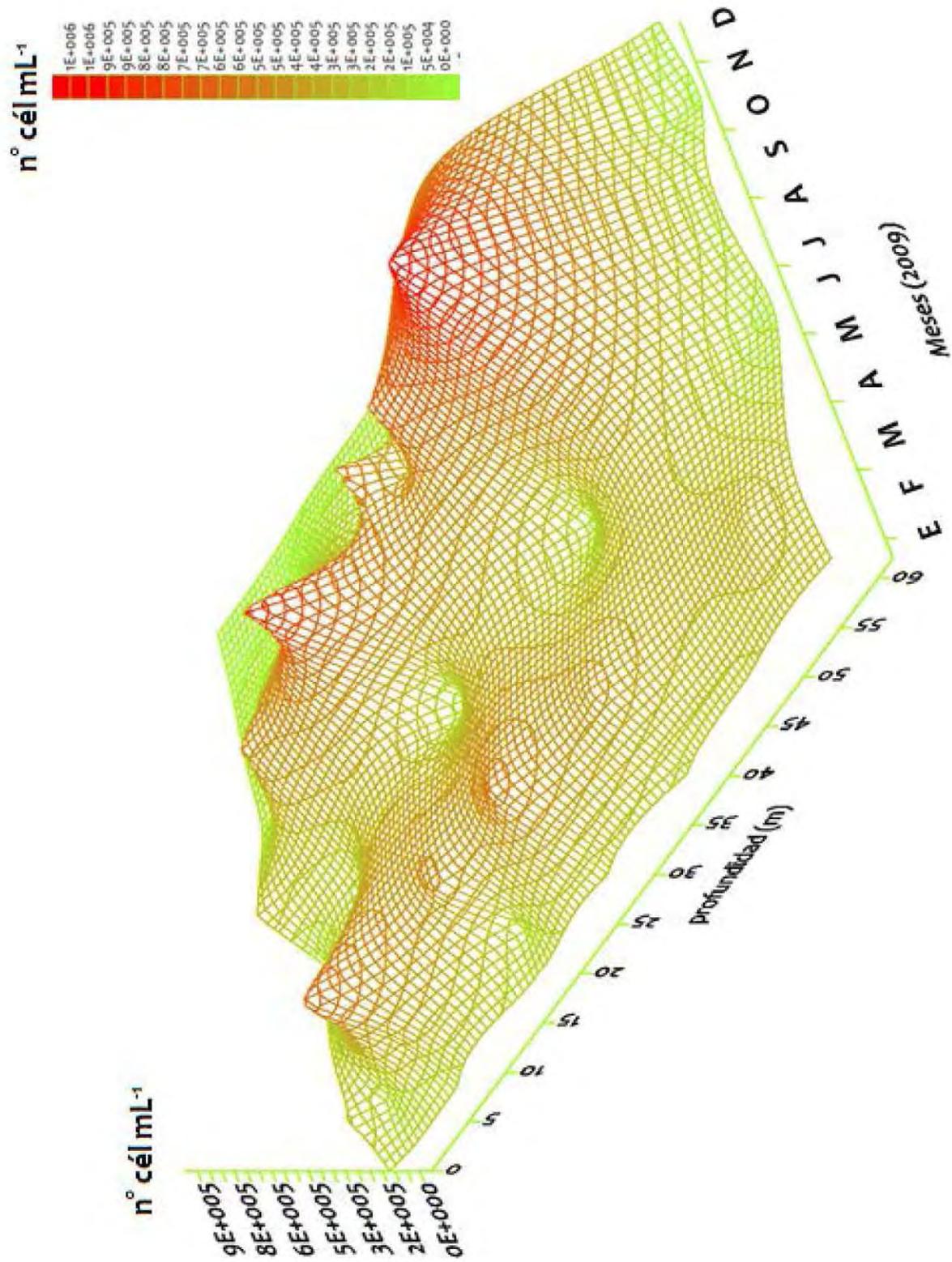


Fig. 15.- Variación espaciotemporal de la abundancia del picoplancton autotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual, Diagrama en 3D.

11.3 Biomasa APP

Con respecto a la biomasa del picoplancton procarionte autotrófico las concentraciones fluctuaron de $1.03 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a $70.34 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$. Durante el periodo de circulación (enero-febrero 2009) del lago se presentó una homogeneidad en la distribución de la biomasa a lo largo de la columna de agua con una concentración de $10 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ (Fig. 16).

Para el periodo de estratificación temprana (abril-junio 2009) las concentraciones de biomasa en el epilimnion permanecieron iguales como en la circulación, donde se observó una acumulación de biomasa fue en la parte de la termoclina en donde se pudo diferenciar un aumento de biomasa que fue de $15 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a $25 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, mientras en el hipolimnion se observó una disminución de la biomasa con $5 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$.

En la estratificación bien establecida (julio-septiembre 2009) se encontró un aumento de biomasa en los tres estratos; en el epilimnion (0-26 m de profundidad) se incrementó hasta $60 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, a 22 metros de profundidad, mientras en el metalimnion (26-30 m de profundidad) hubo un aumento, respecto a la circulación, con concentraciones de $40 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, hacia finales de esta etapa, a los 29 metros de profundidad aproximadamente hubo un máximo de biomasa de $50 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, en tanto que en, el hipolimnion (30-62 m de profundidad) fue notable observar un incremento de la concentración de biomasa más importante de $70.3 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$.

En la estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) se observó una disminución en la biomasa de APP siendo más evidente en el epilimnion (0-28 m profundidad) con concentraciones de $5 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ y después en el hipolimnion (35-62 m de profundidad) con concentraciones de $45 \mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, comparadas con el periodo anterior.

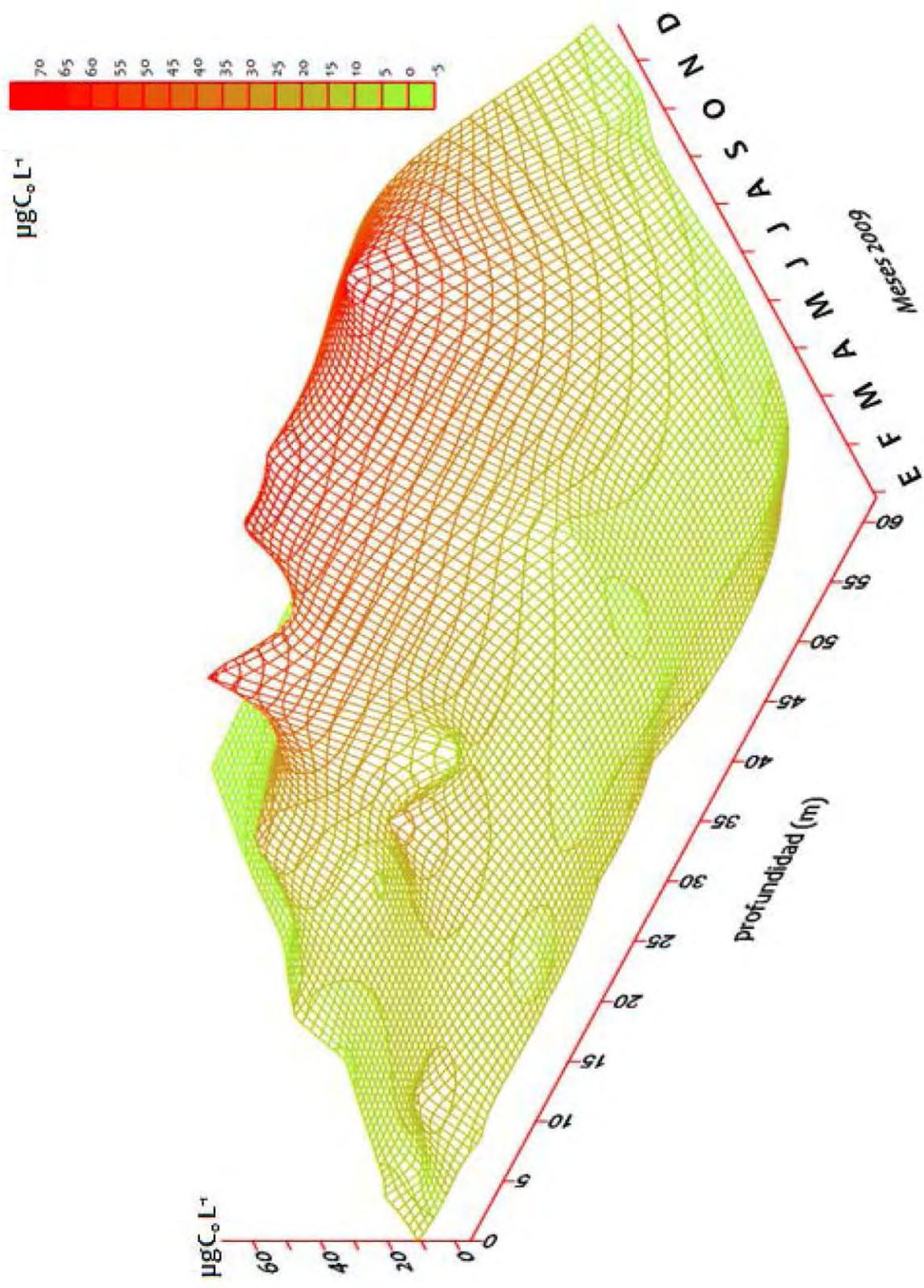


Fig. 16.- Variación espaciotemporal de la Biomasa del picoplancton autótrofico para el Lago Alchichica en un ciclo anual, Diagrama en 3D.

PARÁMETROS BIOLÓGICOS HPP

12.1 CONTENIDO DE CARBONO (C.C.) DEL PICOPLANCTON HETEROTROFICO (HPP)

Para el contenido de carbono del HPP se encontraron concentraciones que van de los 5 a $100 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$ (Fig. 17).

Duarnte el período de circulación (enero-marzo 2009) el contenido de carbono fluctuó homogéneamente a lo largo de la columna de agua con $10 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$, manteniendose uniforme para comienzos de la estratificación temprana (abril-junio 2009), donde se registro el maximo contenido de carbono con $100 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$ en el epilimnion (13 m de profundidad) disminuyendo para los estratos mas profundos, comportándose homogéneamente hasta el fondo del lago (62 m de profundidad).

En la estratificación bien establecida (julio-septiembre 2009), el contenido de carbono disminuye en el epilimnion (19 m de profundidad) a $15 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$, mostrando una distribución homogénea en todos los estratos de la columna de agua. El contenido de carbono aumenta en la estratificación tardía (octubre-diciembre) con $15 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$ hasta $45 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$, para finales de este periodo (diciembre) e inicios de la temporada fría-seca se observó un patrón uniforme en toda la columna de agua $45 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$.

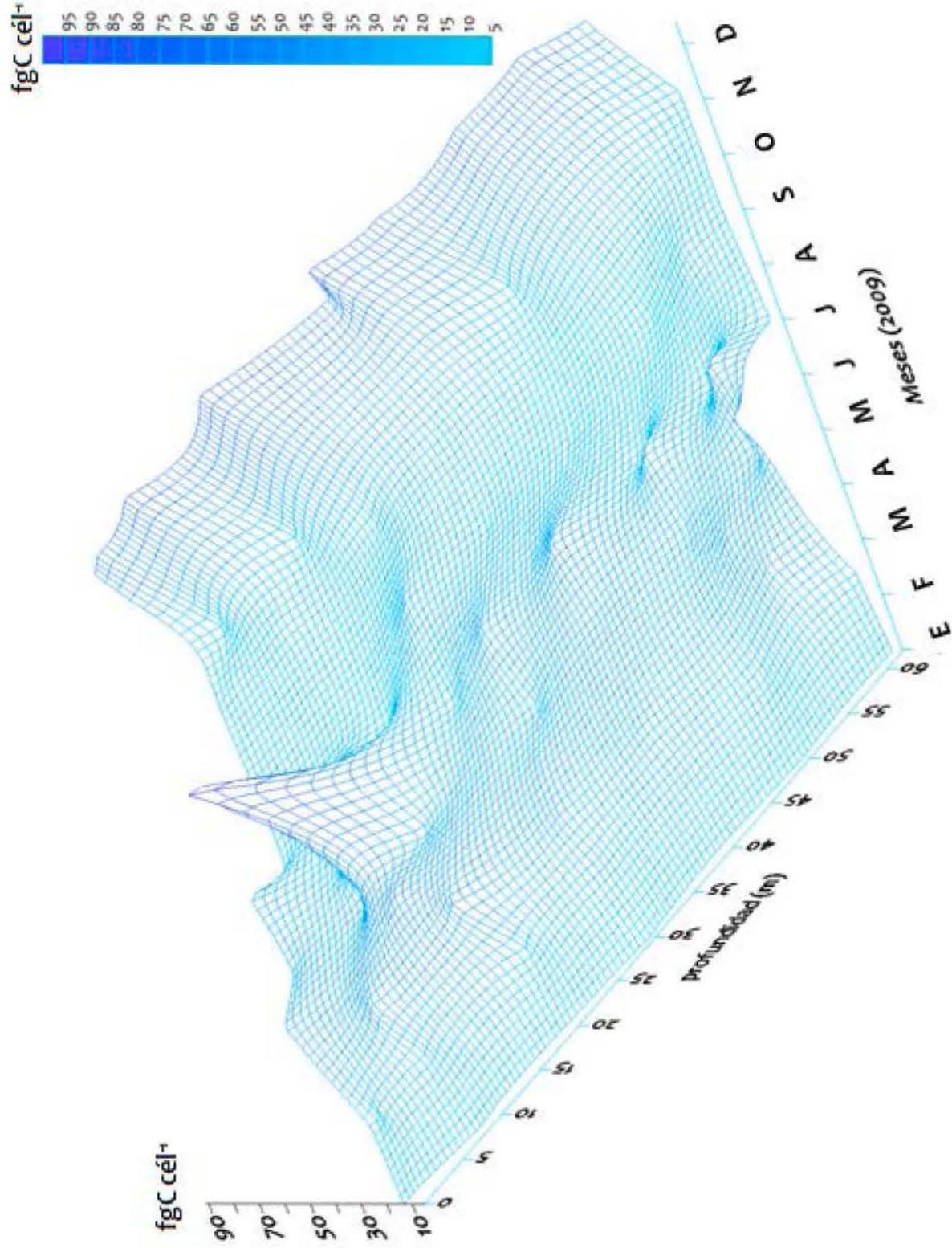


Fig. 17.- Variación espaciotemporal del contenido de carbono del picoplancton heterotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual, Diagrama en 3D.

12.2 ABUNDANCIA DEL PICOPLANCTON HETEROTRÓFICO (HPP)

La abundancia del picoplancton heterotrófico fluctuó entre 2×10^5 a 3.2×10^6 cél mL⁻¹ (Fig. 18). Se observó uniformidad a lo largo de la columna de agua en el periodo de circulación (enero-marzo 2009), con abundancias de 2×10^5 a 3.0×10^6 cél mL⁻¹, conforme terminó este período la abundancia del HPP aumentó para el mes de abril en el período de estratificación temprana (abril-junio 2009) donde se observaron abundancias de 4×10^5 a 3.2×10^6 cél mL⁻¹, en el epilimnion (0-13 m de profundidad) la abundancia fue 5×10^5 cél mL⁻¹ incrementándose en la termoclina (14 m de profundidad) con 1.8×10^6 cél mL⁻¹ observando un patrón uniforme en el hipolimnion (20-62 m de profundidad) con abundancias entre 10×10^5 a 2.9×10^6 cél mL⁻¹ observándose una disminución conforme avanzó la estratificación.

Para el período de estratificación bien establecida (julio-septiembre 2009) se observó uniformidad a lo largo de la columna de agua con abundancias no mayores a 4×10^5 cél mL⁻¹, las abundancias en el epilimnion (0-26 m de profundidad) fueron similares a las del hipolimnion (30-62 m de profundidad), este mismo patrón se encontró en el período de estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) con abundancias no mayores a 6×10^5 cél mL⁻¹.

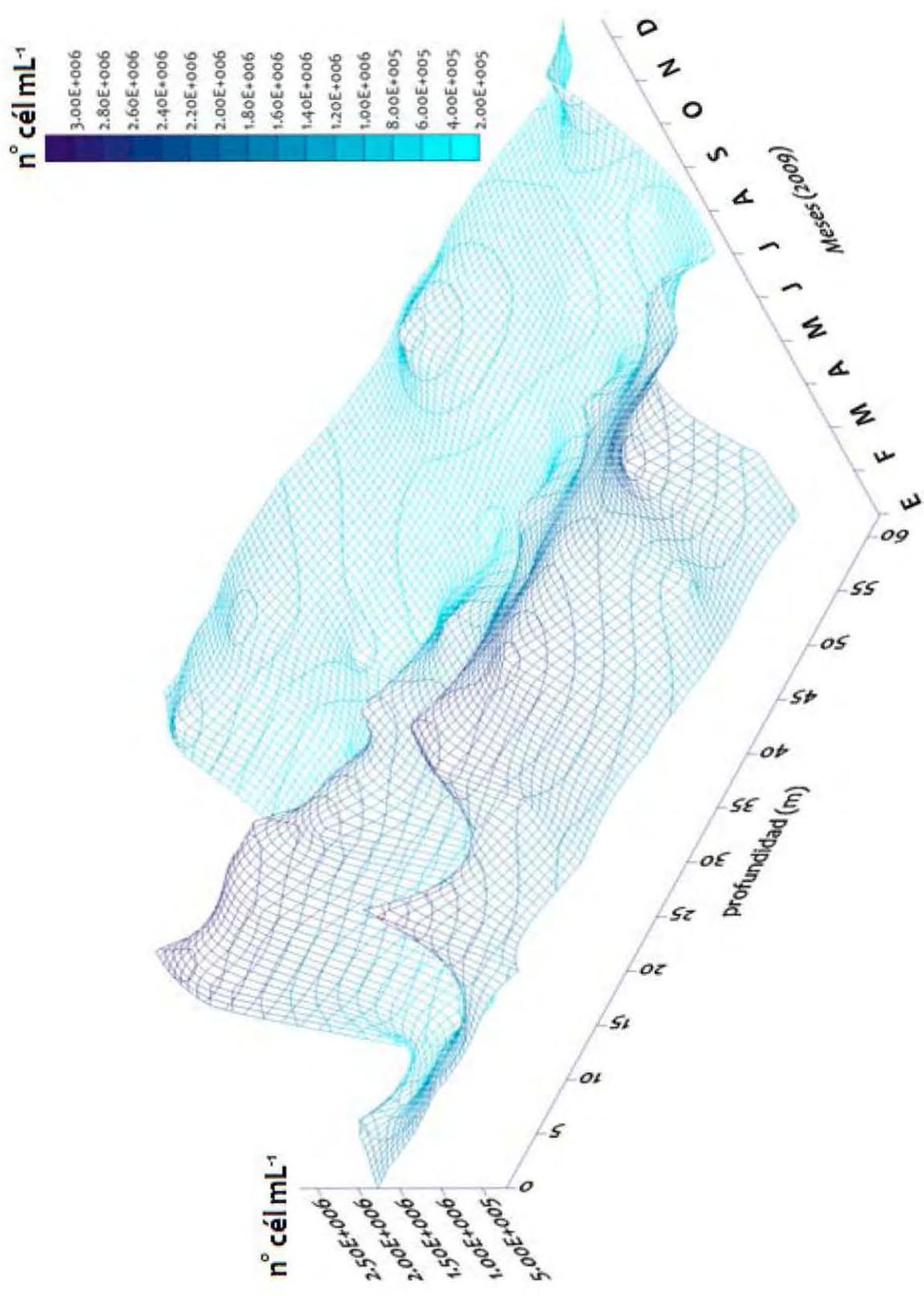


Fig. 18.- Variación espaciotemporal de la abundancia del picoplancton heterotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual, Diagrama en 3D.

12.3 BIOMASA DEL PICOPLANCTON HETEROTRÓFICO (HPP)

La biomasa del picoplancton heterotrófico en el lago Alchichica fluctuó de $0.2 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a $100 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ (Fig. 19).

Para el periodo de circulación (enero-marzo 2009) que concuerda con la temporada fría seca del año (invierno hemisférico) la biomasa de HPP se mantuvo homogénea en toda la columna de agua $5 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, conforme termina este período e inicia la temporada cálida-seca (primavera) comienza el período de estratificación temprana (abril-junio 2009) donde se marcan los gradientes de temperatura y oxígeno disuelto en el lago, formándose así la termoclina y oxiclina en el lago generando una distribución de la biomasa HPP heterogénea y mostrándose las mayores concentraciones en el epilimnion (hasta los 3 m de profundidad) de la columna de agua con $95 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, manteniéndose hasta el tope de la termoclina (16 m de profundidad) con $90 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, disminuyendo en el hipolimnion (20 m de profundidad) con $70 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, hasta llegar en el fondo del lago (62 m de profundidad) con $80 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$.

Durante la temporada cálida-lluviosa (verano) se presenta en el lago Alchichica el máximo gradiente de temperatura en la columna de agua, formándose la termoclina más marcada generando así la estratificación bien establecida (julio-septiembre 2009), donde se presentaron biomásas HPP de $15 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a $50 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, observándose una disminución en toda la columna de agua en el mes de agosto siguiendo un patrón homogéneo en el mes de agosto hasta llegar a la estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) donde se registró biomásas de $5 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a $10 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ para todo el período.

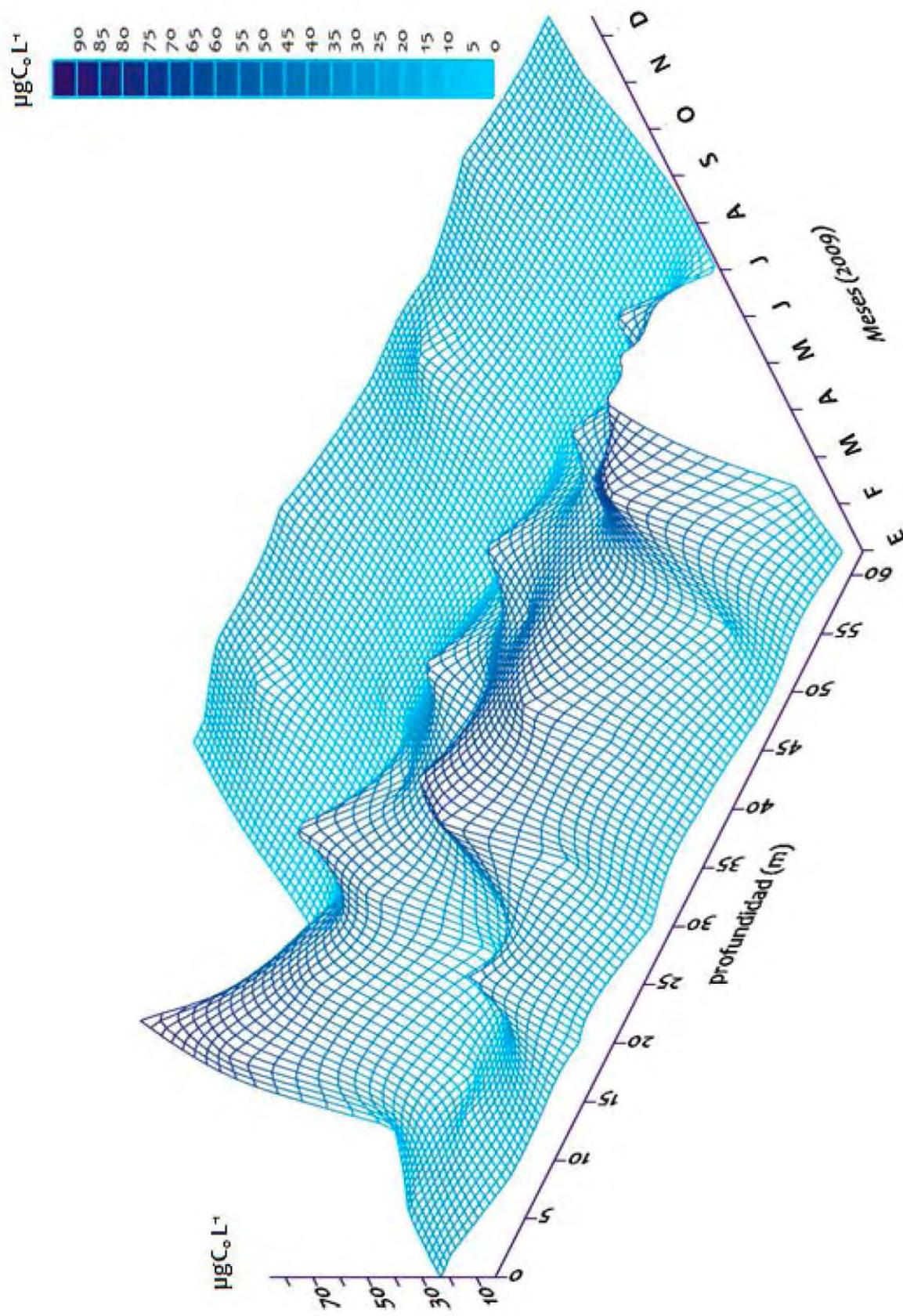


Fig. 19.- Variación espaciotemporal de la biomasa del picoplancton heterotrófico para el Lago Alchichica en un ciclo anual, Diagrama en 3D.

13.1 Abundancia APP

La abundancia del APP presentó una variabilidad temporal registrando concentraciones máximas al inicio de la estratificación temprana (marzo) y en la estratificación bien establecida (agosto y septiembre). Asimismo, se observó que la variabilidad mensual en la abundancia fue mayor durante la estratificación temprana y bien establecida en comparación con la tardía y el período de mezcla como se puede observar por el tamaño de las cajas de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig. 20).

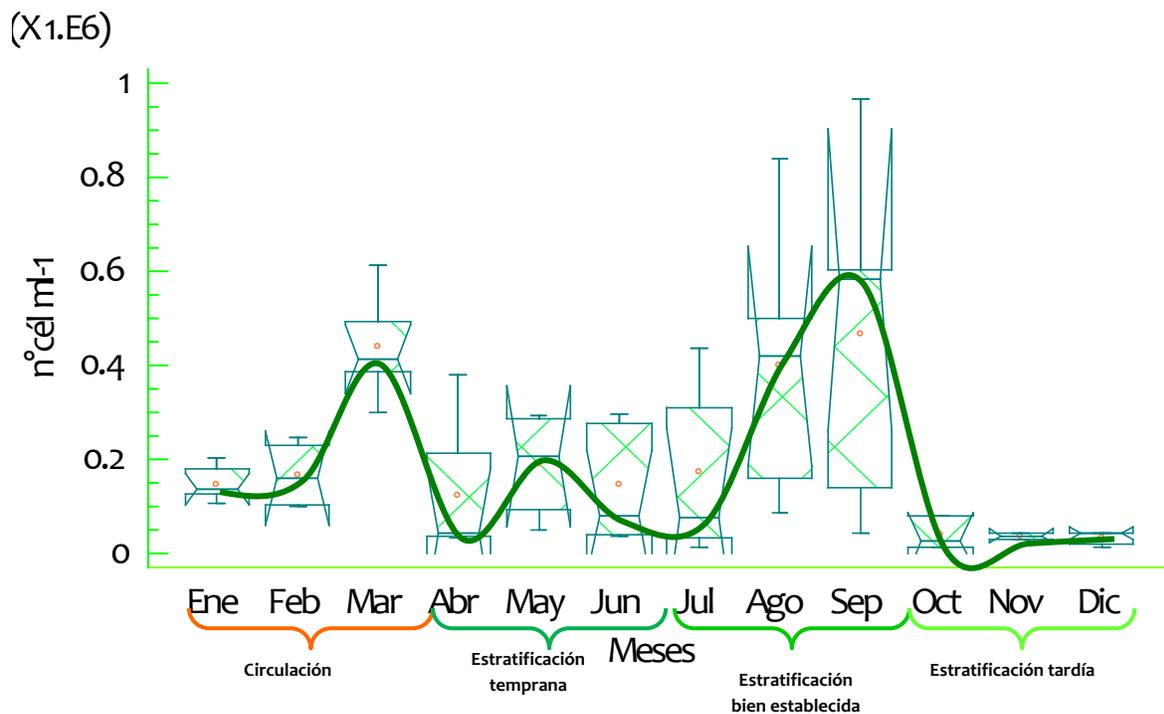


Fig.20.- Análisis de cajas múltiples con muesca para la variación temporal de la abundancia del APP en el lago Alchichica durante el año 2009.

Los datos de abundancia de APP se linealizaron logarítmicamente para cumplir con el supuesto de normalidad. Además de tener una homocedasticidad comprobada por la prueba de Levene obteniendo un valor de 0.4350, $p > 0.05$, lo que mostró que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas entre meses.

De acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), entre los meses octubre, noviembre y diciembre (finales de la estratificación) con todos los restantes meses del año excepto con abril (Cuadro 3).

Cuadro 3.- Resumen de la prueba de rangos múltiples para las medias de las abundancia del APP, se muestran únicamente las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses marcados.

Meses	Mar	Abr	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene	*			*			*	*	*
Feb				*			*	*	*
Mar		*	*	*			*	*	*
Abr				*	*	*			
May				*			*	*	*
Jun				*	*	*	*		*
Jul					*	*	*	*	*
Ago							*	*	*
Sep							*	*	*

13.2 Abundancia por estrato de APP

De acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muestra para la abundancia del APP no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre la mezcla con el metalimnion y el hipolimnion, difiriendo solo con el epilimnion (Fig. 21). Aunque entre los tres estratos no hubo diferencia significativa durante el período de estratificación térmica.

(X100000)

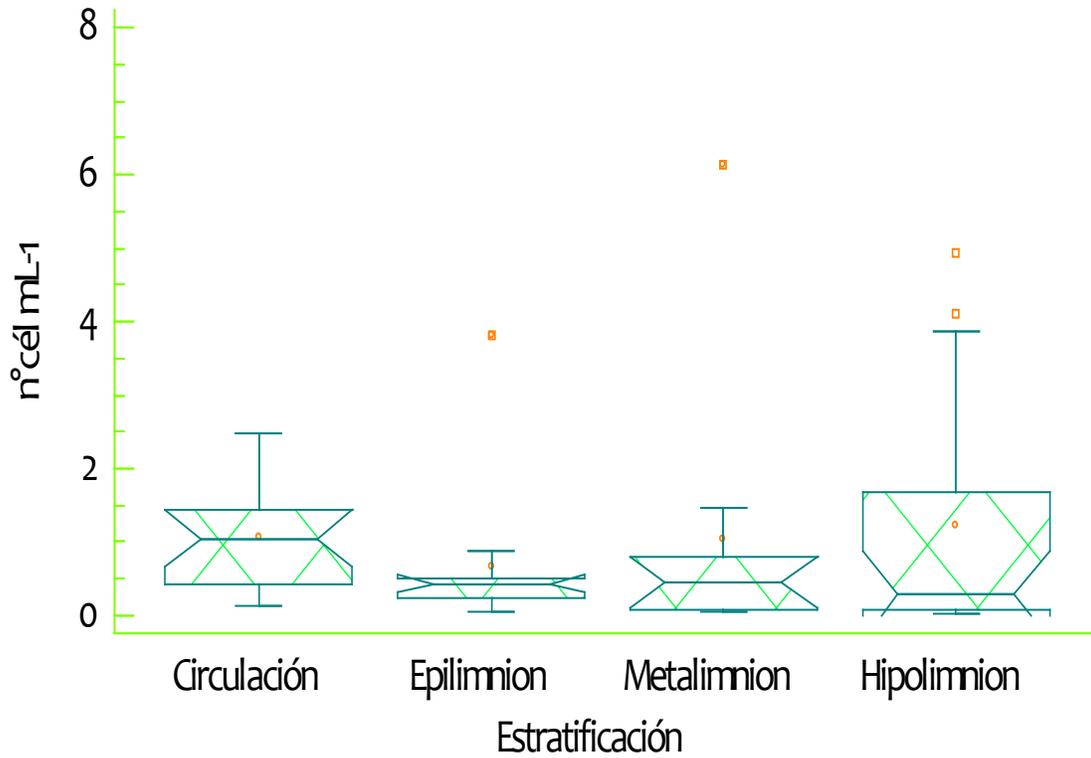


Fig. 21.-Análisis de cajas múltiples con muesca para la variación espacial de la abundancia de APP en el lago Alchichica.

Al igual que la variación temporal de la abundancia, su comportamiento por estratos fue normal y homocedastica una vez que se realizó la transformación logarítmica.

13.3 Contenido de Carbono de APP

El C.C. tuvo un comportamiento normal ajustándose a la curva de probabilidad normal con los datos reales de contenido de carbono (C.C.), cumplió con la homocedasticidad de los datos, tomando una concentración de 0.21 $P > 0.005$. Se observa con el análisis exploratorio de cajas múltiples (Fig. 22) que si hubo diferencias entre meses en el C.C. celular, mismas que fueron corroboradas con el análisis de varianza.

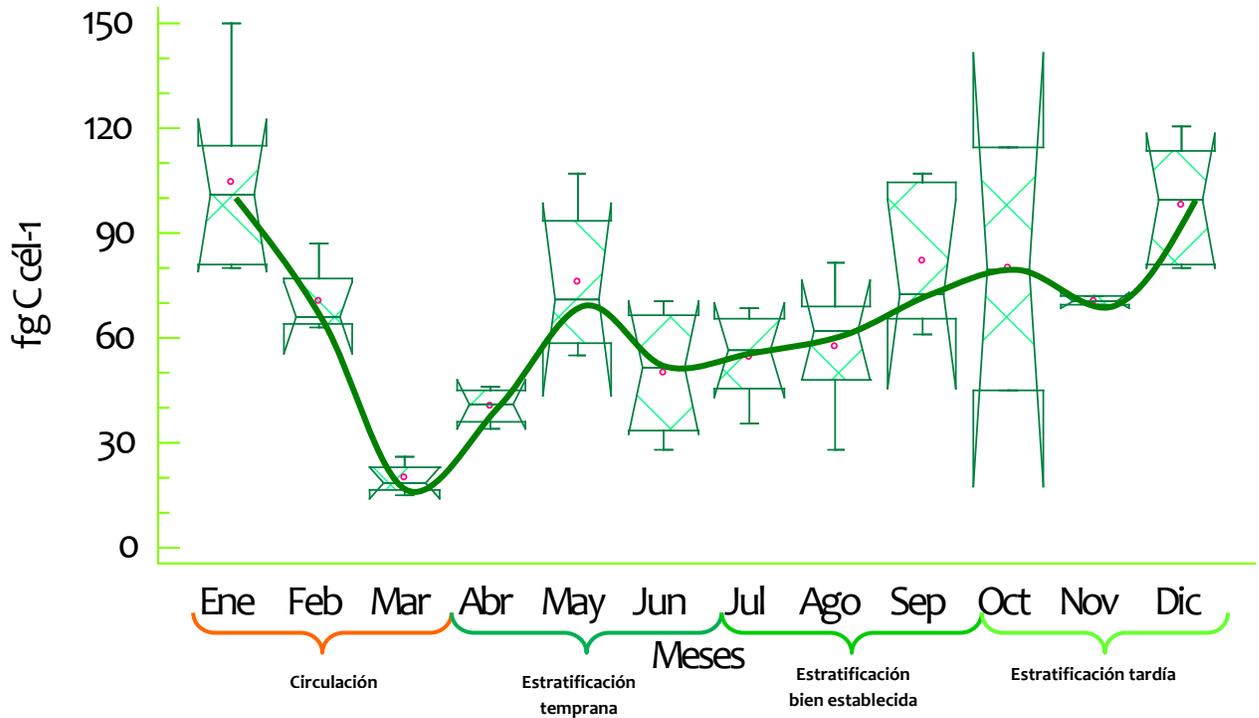


Fig. 22.- Análisis de cajas múltiples con muesca para el Contenido de Carbono de APP mensual.

Al corroborar las diferencias observadas con la prueba de Rangos Múltiples Cuadro.- 2, se encontró que el mes de enero tuvo diferencias con casi todos los meses del año, mientras marzo mostró diferencias con el resto de los meses de la estratificación.

Cuadro.4.- Resumen de la prueba de rangos múltiples para las medias de C.C. del APP, se muestran únicamente las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses marcados.

Meses	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene	*	*	*	*	*	*	*			*	
Feb		*	*								*
Mar				*	*	*	*	*	*	*	*
Abr								*	*		*
May					*						
Jun								*	*		*
Jul								*			*
Ago											*

Para el contenido de carbono se encontraron diferencias significativas con el análisis exploratorio de cajas múltiples, para las medianas entre la capa de mezcla durante la circulación con los tres estratos del periodo de estratificación (Fig. 23). Lo que se corroboró con el análisis de varianza y la prueba de Rangos Múltiples de Tukey.

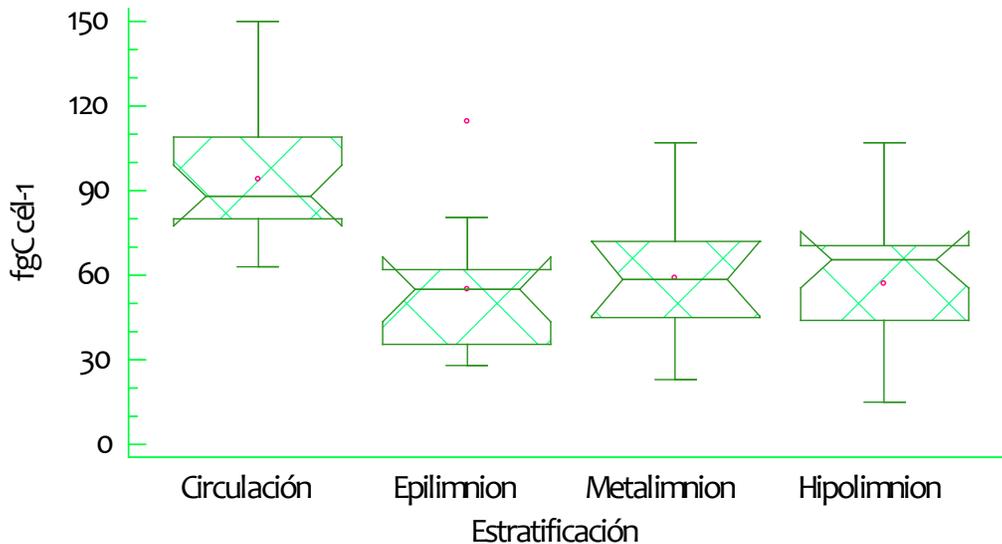


Fig. 23.- Grafico de Cajas Múltiples de C.C. (Circulación y Estratificación)

13.4 Biomasa de APP

La biomasa del APP tiene un comportamiento normal aplicando la conversión logarítmica, además de comprobar que cumplen con el principio de homocedasticidad, según Levene al obtener un valor de P igual a 0.5733. Con el análisis de varianza se observó que hubo diferencias significativas entre los meses de estratificación y mezcla Fig. 24.

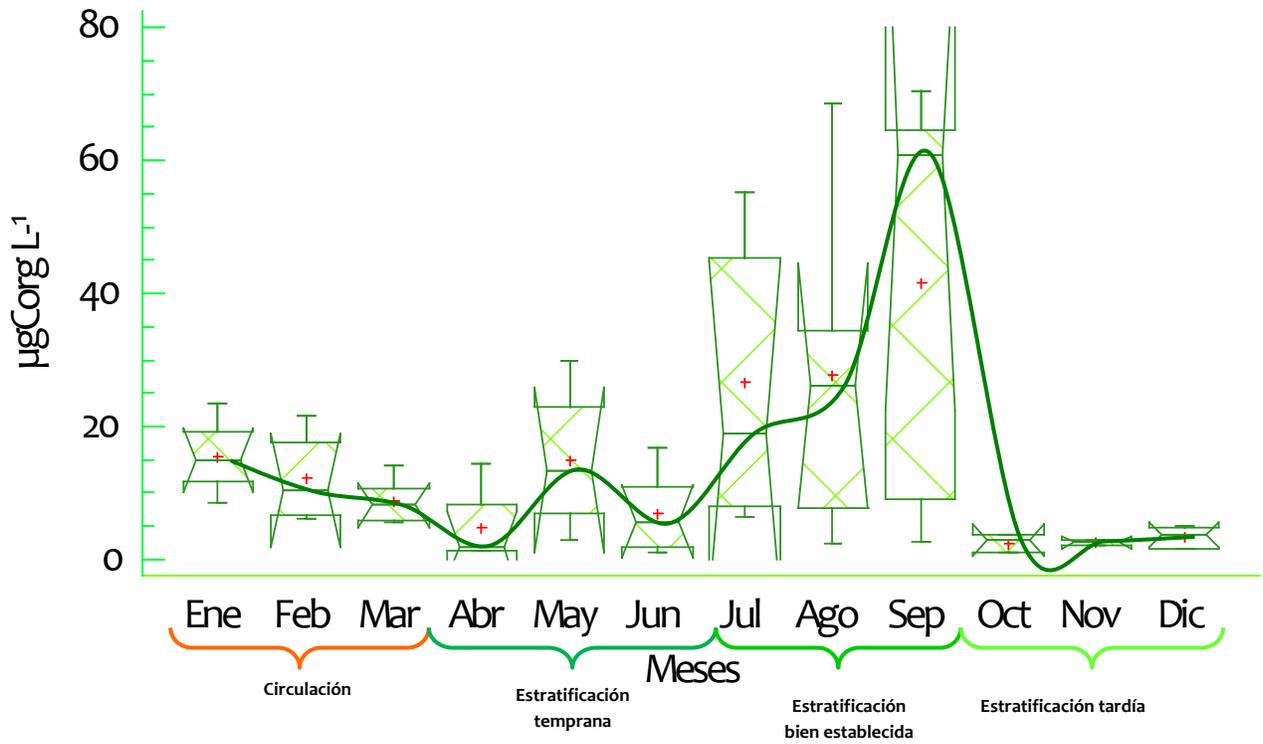


Fig.24.- Análisis de Cajas Múltiples para la Biomasa mensual del APP.

Cuadro 5. Resumen de la prueba de rangos múltiples para las medias de biomasa del APP, se muestran únicamente las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los meses marcados.

Meses	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene	x		x				x	x	x
Feb	x						x		x
Mar									
Abr		x		x	x	x			
May							x		x
Jun				x	x	x			
Jul							x	x	x
Ago							x	x	x
Sep							x	x	x

13.5 Biomasa por estrato de APP

En el comportamiento de la biomasa entre los estratos de la columna de agua se observa que no hubo diferencias significativas entre ellos, y tampoco se encontraron diferencias entre la mezcla y las capas de la estratificación (Fig. 25).

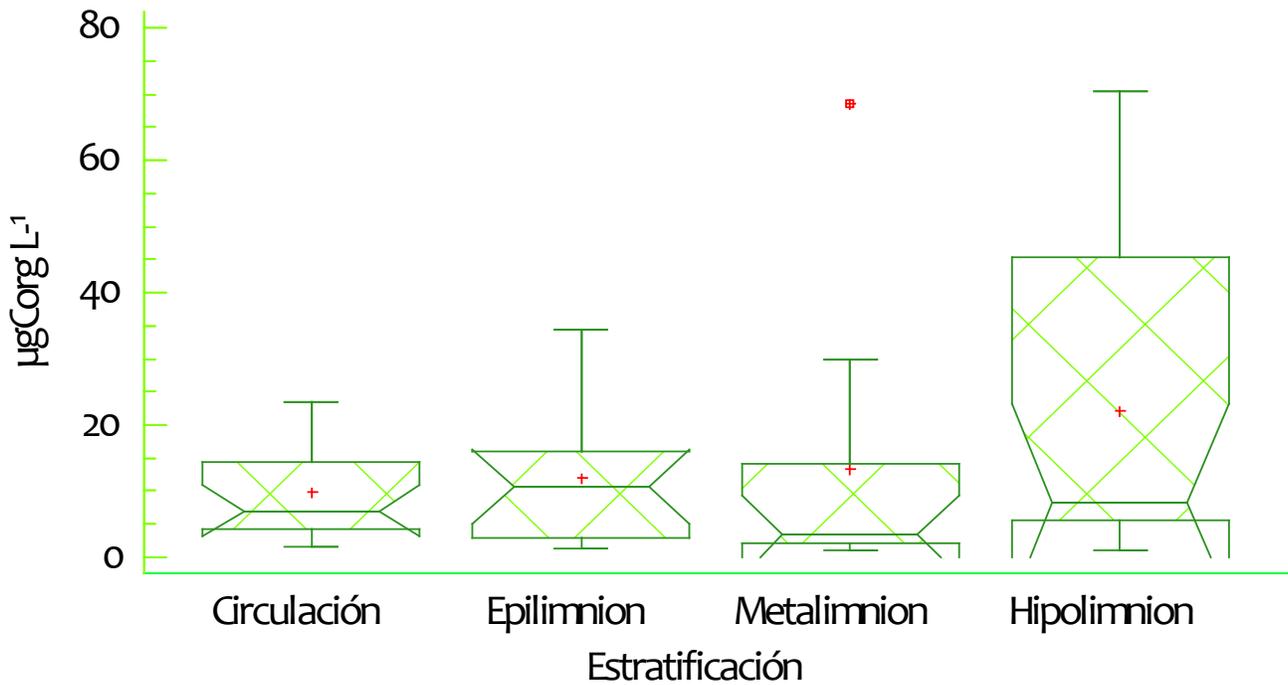


Fig.25.- Análisis de Cajas Múltiples con muescas para la Circulación y para los diferentes estratos térmicos para la Biomasa del APP.

13.2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS PARA HPP

Para determinar la normalidad se analizó con el gráfico de probabilidad de esta distribución y la homocedasticidad se corroboró con la prueba de Levene. Se elaboró un análisis de varianza (ANOVA), para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre meses de muestreo. En el caso de los datos no paramétricos (Biomasa), se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis.

13.2. α Abundancia del Picoplancton Heterotrófico (HPP)

Para la abundancia del HPP se presentó una variabilidad temporal registrando valores máximos a finales de la mezcla (marzo) y en toda la estratificación temprana (abril-junio). Asimismo, se observó que la variabilidad mensual en la abundancia fue mayor durante la estratificación temprana en comparación con la estratificación bien establecida y tardía, como se puede observar por el tamaño de las cajas de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig.- 26).

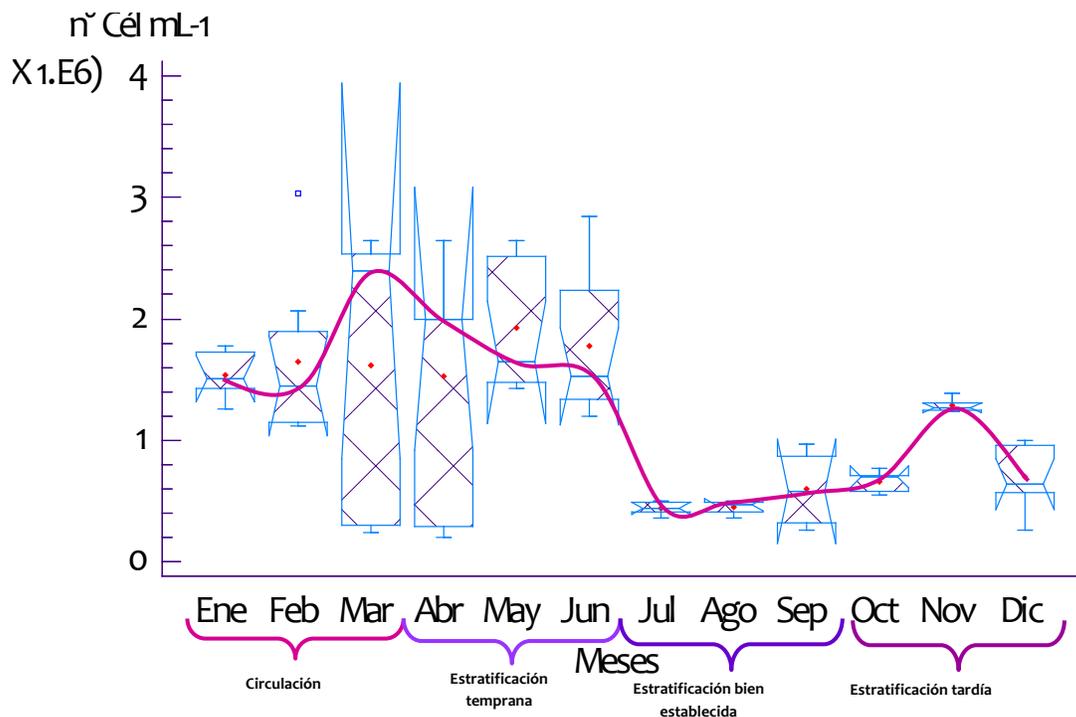


Fig. 26.- Análisis de Cajas Múltiples con Muecas para la variación temporal de la abundancia del picoplancton heterotrófico (HPP) en el lago Alchichica durante el año 2009.

Para la abundancia del picoplancton heterotrófico se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre dos grupos de meses ($P < 0.05$) (Fig. 26), el primero enero-

junio y el segundo de julio-diciembre. Estas diferencias fueron corroborados con un análisis de varianza ($F= 2.60$).

Sin embargo, dentro del primero grupo de meses no se encontraron diferencias significativas entre ellos. Se observó que hubo una mayor dispersión de los datos hacia abundancias pequeñas en los comienzos de la estratificación (marzo-abril), disminuyendo las abundancias de manera significativa hacia la estratificación bien establecida y la tardía (Fig. 26).

De acuerdo con el análisis de Tukey se encontró que para los meses de la mezcla, las diferencias significativas se presentaron entre inicios del período de circulación y principios de la estratificación con respecto a la estratificación bien establecida y con algunos meses de la estratificación tardía (cuadro 5).

Cuadro 6.- Prueba de Tukey donde se muestran diferencias significativas* ($P<0.05$) entre diferentes meses para la abundancia de HPP.

Meses	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
ene							*	*	*	*		*
feb							*	*	*	*		*
mar							*	*	*	*		*
abr							*	*	*	*		*
may							*	*	*	*	*	*
jun							*	*	*	*		*
jul											*	
ago											*	
sep												
oct												
nov												
dic												

13.2.β Biomasa del picoplancton heterotrófico (HPP)

Para la biomasa del HPP presentó una variabilidad temporal registrando concentración es máximas a finales de la mezcla (marzo) y en toda la estratificación temprana (abril-junio).

Asimismo, se observó que la variabilidad mensual en la abundancia fue mayor durante la estratificación temprana y finales del período de estratificación tardía (diciembre) en comparación con la estratificación bien establecida, como se puede observar por el tamaño de las cajas de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig.- 27).

Para la biomasa del picoplancton heterotrófico hubo también diferencias significativas entre el primer semestre del año con respecto al segundo semestre ($P < 0.05$) (Fig. 27), estas diferencias se corroboraron con el análisis de varianza ($F = 2.79$, $p < 0.05$). En el análisis de Tukey se observaron diferencias significativas entre los meses de estratificación tardía (septiembre-octubre) y los meses de circulación (enero-febrero) (cuadro. 6).

Cuadro 7.- Diferencias significativas ($P < 0.05$) entre meses para la biomasa de HPP.

Meses	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
ene							*					
feb							*					
mar										*	*	
abr							*					
may							*					
jun							*					
jul								*	*	*	*	*
ago												
sep												
oct												
nov												
dic												

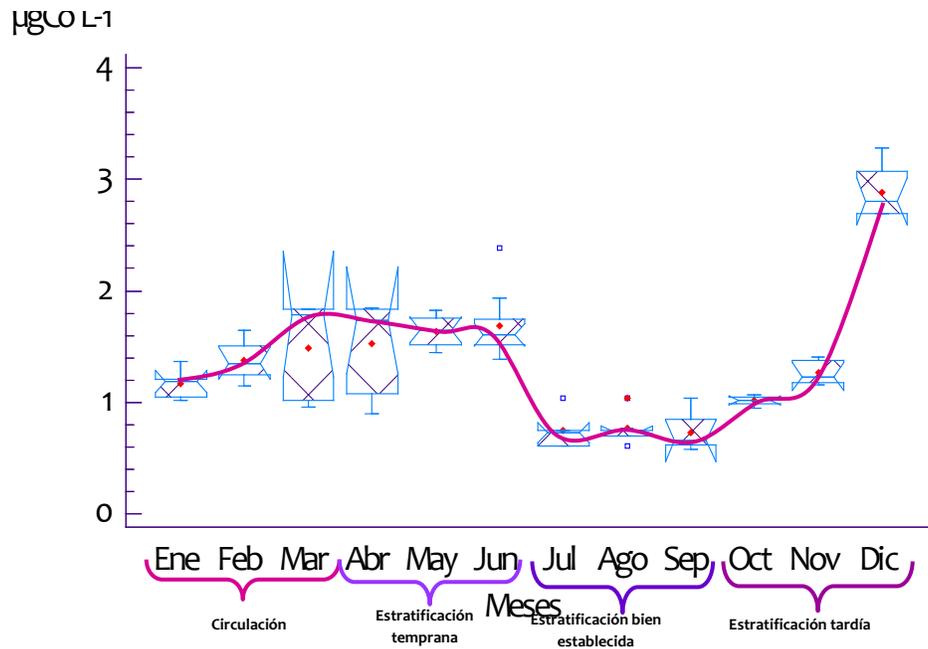


Fig. 27.- Análisis de Cajas Múltiples con Muecas para la variación temporal de la biomasa del picoplancton heterotrófico (HPP) en el lago Alchichica durante el año 2009.

13.2. y Abundancia por estratos de la columna de agua para el picoplancton heterotrófico (HPP)

La abundancia del HPP se presentó una variabilidad por estratos de la columna de agua registrando valores máximos en el epilimnion. Se observó que la variabilidad de la abundancia entre estratos fue mayor en el epilimnion y el metalimnion en comparación con el hipolimnion y la mezcla, como se puede observar por el tamaño de las cajas de acuerdo con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig.- 28).

Para la abundancia del HPP a lo largo del año 2009, no se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre la capa de mezcla con respecto a los estratos de la columna de agua (Fig. 30), ni entre ellos. Aunque se observó una mayor variabilidad en la dispersión de la abundancia en los estratos con respecto a la mezcla (Fig. 28).

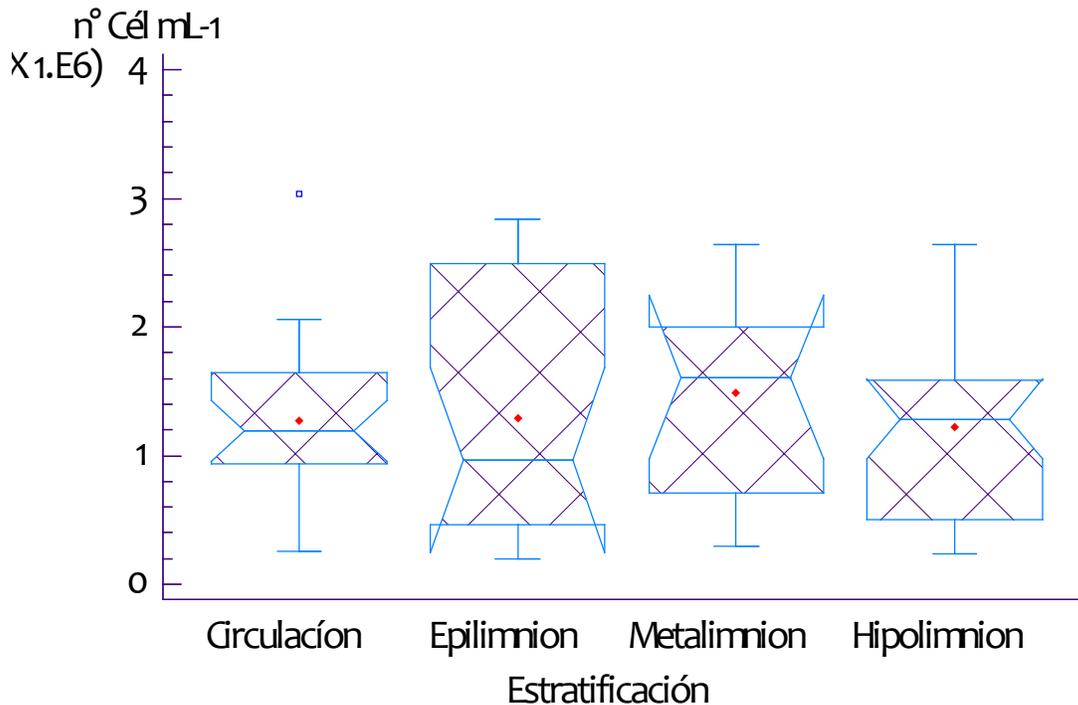


Fig.- 28. Análisis de Cajas Múltiples con Muecas para la variación temporal de la abundancia del picoplancton heterotrófico (HPP) por estratos de la columna de agua en el lago Alchichica durante el año 2009.

13.2.8 Biomasa por estratos de la columna de agua para el picoplancton heterotrófico (HPP)

Para la biomasa del HPP se presentó una variabilidad por estratos de la columna de agua registrando valores máximos durante la circulación de la columna de agua. Se observó que la variabilidad de la biomasa fue mayor en la circulación en comparación con el epilimnion, el metalimnion y el hipolimnion, como se puede observar por el tamaño de las cajas con muesca (Fig.- 29).

Para la biomasa del picoplancton heterotrófico se encontró que tampoco hubieron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los estratos establecidos en la estratificación con respecto al periodo de mezcla (Fig. 29). En general para la abundancia y biomasa del HPP, se encontró que hubo diferencias significativas temporales pero no espaciales.

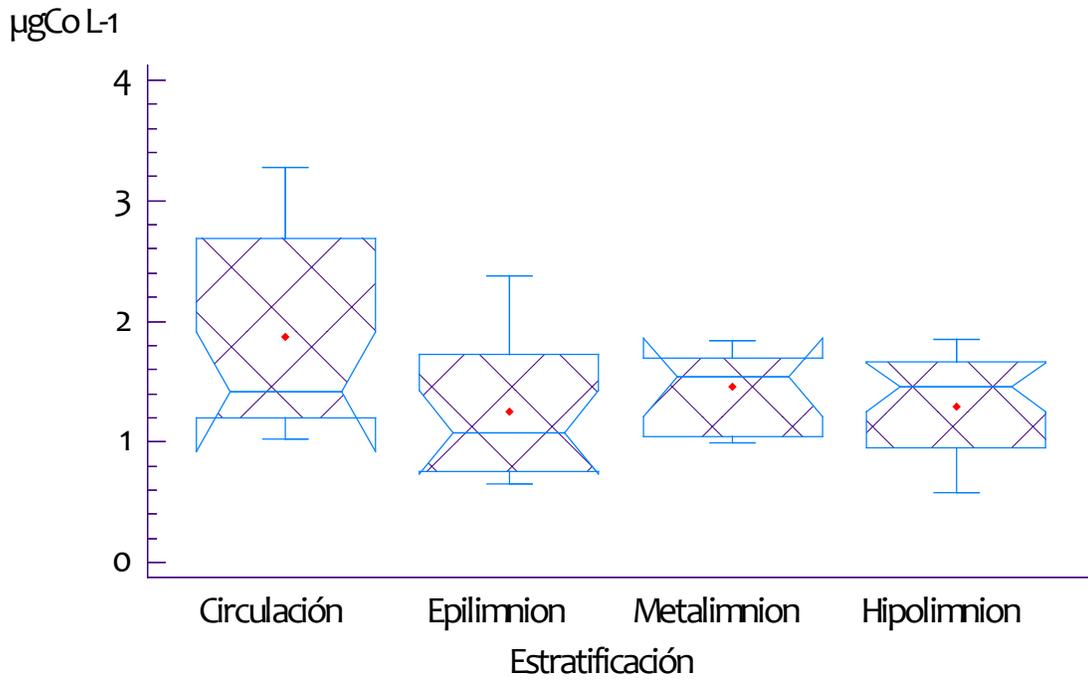


Fig. 29.- Análisis de Cajas Múltiples con Muestras para la variación temporal de la biomasa del picoplancton heterotrófico (HPP) por estratos de la columna de agua en el lago Alchichica durante el año 2009.

CORRELACIONES ESTADÍSTICAS DE PEARSON PARA APP

Dentro del análisis estadístico la correlación de los parámetros es importante de realizar dado que se observan las relaciones entre parámetros ya sean directas o indirectas en el caso del presente estudio se muestran en el cuadro de correlaciones.

Donde se observa a la abundancia con una relación inversa con la temperatura y la alcalinidad. Por otra parte la abundancia presentó una relación significativa con los nitratos y con el amonio.

Cuadro8.- Correlaciones de Pearson para parámetros biológicos del picoplancton autotrófico vs físicoquímicos del lago Alchichica.

	Temperatura	O.D	Alcalinidad	pH	Conduc.
Abundancia	-0.3239 ^α	0.3456 ^β	-0.2695 ^α	0.0735	0.4166 ^β
Biomasa	-0.3834 ^β	NS	NS	0.1841	-0.0973
Biovolumen	-0.3391 ^β	NS	NS	0.1594	-0.0736
Weiss (C.C.)	NS	NS	-0.3085 ^α	-0.1278	-0.4291

	Nitratos	Nitritos	Amonio	PSR	PT
Abundancia	-0.2970 ^α	NS	0.5885^β	NS	NS
Biomasa	NS	NS	NS	NS	0.2817 ^α
Biovolumen	NS	NS	NS	NS	NS
Weiss (C.C.)	-0.2702 ^α	NS	-0.4913 ^β	-0.2729 ^α	0.3981 ^α

α p<0.05

β p<0.01

NS= No Significativas

La biomasa se relacionó solo con la temperatura de forma negativa, y con el fósforo total. El biovolumen tuvo una relación significativa inversa con la temperatura, y el contenido de carbono (C.C.) presentó relaciones negativas con la alcalinidad, nitratos, amonio y el fósforo soluble reactivo (P.S.R.).

CORRELACIONES ESTADÍSTICAS DE PEARSON PARA HPP

Cuadro 9.- Correlaciones de Pearson para parámetros biológicos del picoplancton heterotrófico vs físicoquímicos del lago Alchichica.

	Temperatura	Oxígeno Disuelto	Alcalinidad	pH	Conductividad
Abundancia	NS	NS	-0.3724 ^β	NS	0.2935 ^β
Biomasa	NS	0.3119 ^β	NS	NS	NS
Biovolumen	NS	-0.4110 ^β	NS	0.2560 ^α	0.3238 ^β
Loferer-Krößbacher (C.C.)	NS	NS	NS	-0.4616 ^β	0.3510 ^β

	Nitratos	Nitritos	Amonio	P.S.R.	P.T.
Abundancia	NS	0.2406 ^α	NS	NS	NS
Biomasa	-0.3846 ^β	NS	-0.2491 ^α	NS	NS
Biovolumen	0.3589 ^β	0.2818 ^α	NS	NS	NS
Loferer-Krößbacher (C.C.)	NS	NS	NS	NS	NS

α (p<0.05)

β (p<0.01)

NS= No Significativas

El análisis estadístico de correlaciones de Pearson muestra el grado de asociación entre variables diferentes (Cuadro 9), donde se encontró que para la abundancia del picoplancton heterotrófico hubo asociaciones significativas positivas con la conductividad y los nitritos y relaciones negativas con la alcalinidad (Cuadro.- 7).

La biomasa del picoplancton heterotrófico presentó asociaciones significativas con el oxígeno disuelto y el amonio, relaciones negativas con amonio y nitratos. El biovolumen del picoplancton heterotrófico se asoció significativamente con nitratos, oxígeno disuelto, conductividad y el pH, presentando relaciones negativas con oxígeno disuelto. El contenido de carbono se asoció con el pH y la conductividad y presentó relaciones negativas con el pH, siendo el parámetro biológico con menor grado de asociación con las variables del sistema.

16.1 Temperatura y oxígeno disuelto (O.D.)

En el lago Alchichica los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto (O.D.) se asociaron con una hidrodinámica de monomixis cálida que corresponde con el comportamiento térmico reportado en la literatura (Oliva et al., 2001) que comúnmente se observa para los lagos tropicales profundos (Lewis, 1996). Alchichica con 62 m de profundidad máxima mostró una temperatura superficial que sobrepasó los 20°C durante la estratificación tardía. Según el Climate Prediction Center, el año 2009 es un año Niño comprendiendo un periodo que va de junio del mismo año a abril del 2010.

La termoclina registrada para el lago comienza a partir de los 14 m de profundidad en el mes de abril y conforme avanza la estratificación se profundiza hasta llegar a los 31 m en el mes de noviembre. Este estrato define la ubicación y la amplitud del epilimnion que tiende a aumentar conforme avanza la estratificación. El hipolimnion que inicia por debajo de la termoclina, también muestra una variación asociada en cuanto a su amplitud y profundidad a través del tiempo, dicho patrón coincide con el desplazamiento del oxígeno disuelto en el período de estratificación. De acuerdo a los gráficos de temperatura, en el estudio de Alcocer y Lugo (2003) en el año Niño (1998) se observó un patrón progresivo en el deslizamiento de la termoclina hacia el fondo conforme avanza la estratificación, al igual que en el 2009. Mientras que en un año normal esto no se ve evidenciado.

En el mes de agosto 2009 se considera que el lago se encuentra en la fase de máxima estratificación. La diferencia entre la temperatura superficial y la profunda es de 6 °C y en septiembre aumenta a 6.5 °C, Lewis (1996) menciona diferencias de temperatura notables en lagos tropicales (de 0.5 a 1 °C), con estas diferencias la variación del oxígeno disuelto es apreciable, presentándose condiciones anóxicas a partir de los 30 m de profundidad, asociados con los procesos de descomposición de materia orgánica que se acumula en este estrato con el tiempo.

Durante el período de circulación las temperaturas se mantuvieron entre los 14°C hasta los 17.5°C con variaciones de oxígeno disuelto entre 2 mg L⁻¹ y hasta 7 mg L⁻¹, datos reportados por Alcocer et al., (2002) registran que la temperatura máxima alcanzada para el lago Alchichica durante la mezcla en la columna de agua están alrededor de los 20°C en la superficie a 10 m de profundidad de enero a marzo, y fluctúa en el rango de 15-18°C para el resto del año, a 50 m de profundidad hasta el fondo (62 m de profundidad), es ligeramente superior: 14.5°C todo el año, mientras que en el presente estudio se registraron temperaturas de 14°C para esas mismas profundidades, siendo la diferencia de 0.5°C en comparación con las registradas en Alcocer et al., (2002). En el estudio de Alcocer y Lugo (2003) el aumento de temperatura en 1998 fue de 18.8- 19.5 °C, y en el presente estudio fue de 19-20.5 °C en ambos casos son temperaturas

registradas en el epilimnion. Con estos datos se notó un aumento de temperatura entre estos dos años Niño, que como lo advierten Alcocer y Lugo (2003) el Niño afecta en la dinámica limnológica del lago Alchichica.

El lago Alchichica se encontró totalmente estratificado desde mediados de la época cálida-lluviosa (junio) hasta la época en donde disminuyen la precipitación y la temperatura (octubre). El final de la época cálida-lluviosa y principios de la seca y fría constituyen una etapa de cambio hacia la periodo de circulación en la columna de agua.

Como ha sido encontrado en los lagos monomícticos cálidos tropicales (Lewis, 2002), en el largo periodo de estratificación característico del lago Alchichica, el oxígeno disuelto en el hipolimnion se consume, teniendo como consecuencia el rápido desarrollo de una capa anóxica y un periodo prolongado en que predominan estas condiciones.

El patrón de circulación durante el invierno hemisférico y estratificación por el resto del año corresponde a los lagos de tipo monomíctico cálido. El período de mezcla se presenta durante los meses más fríos de acuerdo con García (2000), en el lago Alchichica son finales de diciembre, enero, febrero mientras que el período de estratificación comienza en los meses cálidos. De acuerdo con Wetzel (2000) los lagos monomícticos cálidos se caracterizan porque la temperatura en los lagos nunca disminuye por debajo de los 4°C, circulan en la época de invierno y se estratifican durante el verano. Este patrón de estratificación y circulación es común en lagos de áreas montañosas de latitudes subtropicales, de acuerdo con Wetzel (2000).

Por su parte Arredondo et al. (1984) concluyeron que, en base en su patrón de circulación, el lago Alchichica es polimíctico cálido, lo cual significa que circula la mayor parte del año, contrario a lo mencionado en esta investigación donde coincidimos con Alcocer et al. (2000) y Wetzel (2000), este último indica que los patrones de circulación de los lagos según su distribución altitudinal y latitudinal, el lago Alchichica (2300 m.s.n.m., 19° de latitud N) le corresponde la zona donde se presentan diversas variantes de los lagos tipo monomícticos cálido.

Alchichica cumple el patrón del lago tropical de latitud menor a 20° que muestran ciclos relativamente regulares de estratificación en los cuales las diferencias de temperatura en la columna de agua son de pequeña amplitud, generalmente de menos de 6°C (Talling y Lemoalle 1998).

La comparación del comportamiento del lago Alchichica con otros lagos monomícticos tropicales presenta fuertes semejanzas, por ejemplo se encuentra el lago Dom Helvecio (lago tropical de 32.5m) ubicado en Brasil, muestra comportamientos similares, se estratifica durante la época cálida-lluviosa y circula en la época seca-fría (Henry, 1995).

El lago Alchichica se ubica en la cuenca de Oriental (Puebla), donde también se encuentran otros lagos de origen volcánico como Atexcac, Quechulac, La Preciosa. Garzón

(1990) considera que Alchichica y los demás lagos cráter de la cuenca de Oriental, con excepción de Tecuitlapa, son monomícticos cálidos aunque únicamente realizó muestreos estacionales. Macek et al. (1994) llegan a la misma consideración para el lago de Atexcac, muy cercano a Alchichica. Bernal-Brooks (1998) también concluye lo mismo del lago de Zirahuén, en Michoacán. Este lago comparte con Alchichica la característica de ser bastante profundo ($Z_m=40\text{m}$) y su período de estratificación térmica abarca desde el mes de abril hasta el mes de noviembre. El lago circula durante la época fría y lo hace a una temperatura ligeramente superior (16.5°C) a la que lo hace Alchichica.

Parece ser que de acuerdo a la literatura citada, los cuerpos de agua mexicanos ubicados en el Altiplano Mexicano y con una profundidad elevada ($> 20\text{m}$) tienden a presentar un régimen térmico monomíctico cálido (Alcocer et al., 2000).

El patrón hidrodinámico del lago indicado por los perfiles de temperatura y O.D. confirma su naturaleza monomíctica cálida establecida por Alcocer et al. (2000). El periodo de mezcla (también llamado circulación de la columna de agua) del lago comenzó a finales de diciembre o principios de enero y se extendió hasta principios de marzo durante la época seca fría, mientras que el lago permaneció estratificado el resto del año (finales de marzo a principios de diciembre) durante la época cálida de lluvias.

La concentración de oxígeno disuelto fue elevada y heterogénea a lo largo de la columna de agua durante la circulación. Una vez iniciada la estratificación la concentración de oxígeno disuelto en el hipolimnion disminuye rápidamente hasta agotarse de forma tal que, para mediados de año, todo el hipolimnion (de los 29 m de profundidad y hasta el fondo) se torna anóxico permaneciendo así hasta inicios de la estratificación tardía. Por otro lado, el epilimnion (de los primeros diez metros y hasta ocupar los 25 m superficiales en diciembre 2009) se encontró bien oxigenado, cercano a la saturación en la capa más superficial. En años Niño según Alcocer y Lugo (2003) las condiciones de Hipoxia/ anoxia suelen presentarse mas tarde, estrictamente en Junio, como se muestra en la fig y debido a que el año 2009 se registra como Niño la anoxia en el hipolimnion se observó en el mes de Junio.

La ausencia de oxígeno disuelto en el hipolimnion durante la estratificación bien establecida (junio-septiembre 2009), parece indicar que la producción primaria de materia orgánica en el lago es elevada. Esta materia, al depositarse en el fondo y demandar oxígeno para su descomposición, colabora al abatimiento de este gas en las profundidades. Parece claro que una parte importante de esa materia orgánica es generada durante el período de mezcla que ocurre en la época fría-seca.

Alcocer et al., 2002, registraron concentraciones menores a 1 mg L^{-1} en el hipolimnion hasta una saturación máxima de 137% en la superficie que coincide con un florecimiento de cianobacterias en la etapa de estratificación a principios de mayo 2001.

Las concentraciones de oxígeno disuelto (O.D.) fluctuaron de 0 mg L⁻¹ a 8mg L⁻¹ durante el presente estudio, siendo las concentraciones mínimas encontradas en la parte profunda de la columna de agua (29 m de profundidad) a comienzos de la estratificación bien establecida y tardía y las concentraciones máximas en la capa superficial (0 a 18 m de profundidad) para el periodo de mezcla y durante el período de estratificación (0 a 23 m de profundidad), marcándose un gradiente de oxígeno disuelto a los 24 m de profundidad durante la estratificación bien establecida, originándose una oxiclina por debajo de la termoclina, a una profundidad de 30 m, comenzando en marzo 2009 y hasta finales de octubre 2009. A lo largo del resto de la estratificación el oxígeno disuelto comienza a recircular entre las capas mezclándose a inicios del período de mezcla. Datos reportados por Alcocer y Lugo 2003 mostraron una oxiclina (29 m de profundidad) que se forma desde el mes de marzo y hasta finales del periodo de estratificación.

Para las primeras etapas de la estratificación hubo una disminución consecutiva de las concentraciones de oxígeno disuelto en el hipolimnion, iniciando con una anoxia cerca del fondo hasta que este agotamiento de oxígeno disuelto se dio en todo el hipolimnion conforme avanzó la estratificación, lo que corresponde con lo publicado por Macek *et al.*, 2009 y que se conoce como déficit de oxígeno hipolimnético (Lind, 1985). Este patrón se asocia con una tendencia a la acumulación de la materia orgánica, asociado con los procesos de descomposición bacteriana, así como del incremento consecutivo de nutrimentos en el hipolimnion y a su agotamiento en el epilimnion como lo ha reportado Alcocer *et al.*, 2000.

Alcocer *et al.*, 2000, mencionan que el patrón de O.D. en el lago Alchichica durante el período de estratificación desarrolla un perfil de tipo clinogrado, en el que el epilimnion permanece saturado de oxígeno, mientras que el hipolimnion queda anóxico la mayoría del período de estratificación, ya que tanto la temperatura como la salinidad producen una reducción en la capacidad de almacenamiento de oxígeno en el agua, además de los procesos de oxidación de la materia orgánica anteriormente citados (Alcocer *et al.*, 2000).

El análisis de los perfiles verticales de oxígeno disuelto mostraron que su concentración en el lago Alchichica osciló desde condiciones anóxicas en el hipolimnion hasta saturación (8.5mg L⁻¹) en el epilimnion. Durante el periodo de circulación el oxígeno disuelto se distribuyó de manera homogénea a lo largo de toda la columna de agua, con valores cercanos a la saturación. Al terminar este periodo en el mes de marzo durante el periodo de estratificación temprana, se registraron las diferencias verticales máximas en la concentración de oxígeno disuelto.

Una vez formada la termoclina, el oxígeno disuelto no puede ser reemplazado en el hipolimnion desde el epilimnion oxigenado, por su incapacidad de difusión a través de la termoclina. Adicionalmente y durante la época de estratificación, la acumulación y descomposición bacteriana de la materia orgánica en la capa profunda, contribuyeron a que el hipolimnion adquiera condiciones anóxicas. De manera opuesta, el contenido de oxígeno

disuelto en el epilimnion fue alto, debido a principalmente al contacto e intercambio con la atmosfera y la actividad fotosintética.

El mayor grosor de la capa anóxica registrado en el 2009 (32 m profundidad), probablemente está asociado con una mayor producción de biomasa picoplanctonica como lo menciona Alcocer y Lugo (2003). La biomasa picoplanctonica posteriormente se exporta debajo de la termoclina, tal como lo menciona Escobar et al. (1998), para finalmente ser remineralizada en el hipolimnion, ocasionando una capa anóxica de mayor grosor (mayor a 30m).

Otros lagos tropicales en los cuales se ha observado una capa anóxica profunda son el lago Eyre en Australia, el lago Lanao en Brasil, el lago Magadi, y el lago cráter Green localizados en Kenia (Alcocer y Lugo, 2003).

El intervalo de temperatura en la columna de agua registrado durante la investigación varió desde 14°C, siendo la más baja en el hipolimnion de enero a diciembre 2009, hasta 20.5°C en el epilimnion de 0 a 18 m de profundidad durante la estratificación bien establecida (junio a septiembre). Los meses más cálidos registrados fueron junio, agosto y septiembre (estratificación bien establecida), en contraste con García (1988) los meses de mayo y junio son los más cálidos en el lago. Arredondo et al. (1984) con base en los datos de la estación meteorológica ubicada en el lago, también afirman que junio es el mes más cálido. Estos autores encontraron que el intervalo de variación anual (muestreos estacionales) de la temperatura del agua en Alchichica en el año de 1978 y enero 1979 fue de 14.0 a 19.2 °C, valores encontrados también en el presente estudio. Por su parte, Díaz y Guerra (1979) midieron un intervalo de temperatura de 14.0 a 19.2 °C. Ambos intervalos son aproximadamente de 0 a 1.3 grados inferiores al medido en la presente investigación, así se confirma que la temperatura, al igual que el O.D. en el Lago Alchichica varían entre años y probablemente por las condiciones ambientales y climáticas dados por años Niño y Niña (Alcocer y Lugo, 2003), los cuales pueden afectar el comportamiento de las comunidades ecológicas en el lago.

El perfil de oxígeno disuelto arriba descrito es de tipo clinogrado de acuerdo con Wetzel (2000), perfil característico de lagos que permanecen estratificados la mayor parte del año, tal como es el caso del lago Alchichica, donde el epilimnion y el tope del metalimnion exhibieron condiciones aerobias, mientras que la base del metalimnion y el hipolimnion registraron condiciones anaerobias.

Como ha sido encontrado en los lagos monomícticos cálidos tropicales (Lewis, 2002), en el largo periodo de estratificación característico de Alchichica, el oxígeno disuelto en el hipolimnion se consume, teniendo como consecuencia el rápido desarrollo de una capa anóxica y un periodo prolongado en que predominan estas condiciones.

La capa de mezcla tuvo condiciones óxicas durante todo el año, mientras en la estratificación la oxiclina se registró en la zona del metalimnion y se presentaron condiciones anóxicas en el hipolimnion durante la estratificación bien establecida.

En el epilimnion la dinámica del oxígeno disuelto se da por el balance fotosíntesis-respiración y el efecto de mezcla del viento sobre el lago, mientras que en el hipolimnion este disminuye por la respiración y los procesos de oxidación de la materia orgánica lo que favorecen a que se forme un hipolimnion anóxico la mayor parte de la estratificación.

16.2 ZONA FÓTICA

La variación en la profundidad de la visibilidad del disco de Secchi durante el período de muestreo se presenta en la Fig. 8. El valor más bajo (2.79 m de profundidad) en el mes de junio 2010, asociado al florecimiento de *Nodularia cf. spumigena*. El valor más alto de la profundidad (5.9 m) se obtuvo en el mes marzo 2010. Arredondo et al. (1984) también midieron la transparencia del disco de Secchi. A diferencia que en el presente estudio, el valor menor (3.6 m de profundidad) lo observaron en la primavera (mes de abril), aunque el valor es mayor que el medido en este estudio.

El valor más alto medido por ellos (6.4 m de profundidad) se presentó durante el mes de enero y fue mayor al valor medido en el presente estudio. Con base en la profundidad del disco de Secchi, y utilizando el criterio de Margalef et al. (1976) quienes multiplican Z_{ds} por un factor de 2.3, Arredondo et al. (1984) estiman que la profundidad de la capa fótica (1% de la luz incidente en superficie) en Alchichica varío entre 8.3 y 14.8 m de profundidad. Estos valores subestiman la verdadera profundidad de la zona fótica por los siguientes factores:

El valor de 2.3 por el cual se multiplica la profundidad del disco de Secchi para calcular la profundidad de la zona fótica, es un valor que fue obtenido para un embalse en España, y aún en México, son muy diferentes a las de un lago de agua clara como es Alchichica.

Según el mismo Margalef (1983) el factor más generalmente utilizado para el cálculo de la zona fótica a partir de la profundidad del disco de Secchi en cuerpos de agua es de 2.7. Cole (1979) ha propuesto que el mejor factor es 3.0 Estévez (1988) menciona que 3.0 es el factor más empleado por limnólogos latinoamericanos como Brasil. De acuerdo con nuestros resultados, la zona fótica en el lago Alchichica puede abarcar aproximadamente desde 6 m de profundidad (florecimiento de *Nodularia cf. spumigena* en el mes de abril) hasta unos 23 m de profundidad (mes de marzo, inicio de la época cálida y lluviosa del año 2010).

16.3 Alcalinidad, pH, Conductividad y Salinidad

Los parámetros de alcalinidad y pH están íntimamente relacionados entre sí, ya que si uno de ellos se altera, el otro se ve afectado.

El pH que se reporta en Alchichica en el año 1994 con valores de 8.6 a 9.15 (Lugo, 2000), en 2001 valores de 8.8-8.9 (Armienda et al, 2008) y en el presente estudio el pH alcanza valores no menores de 9 hasta 9.13 en el año 2009.

Una forma indirecta de conocer la concentración de sólidos totales es medir la conductividad, salinidad y total de sólidos disueltos, pero por la complejidad del análisis iónico completo para la salinidad se usó la conductividad la cual se presenta en el lago con un rango alto de 13.158 - 17.27 mS a 18°C debido a los altos rangos de alcalinidad y pH.

En cuanto a la conductividad el lago presenta una conductividad alta de 13.158 a 17.27 mS cm⁻¹ debido a los altos intervalos de salinidad, los que se pueden atribuir a un déficit hídrico que se presenta en la cuenca de esta región árida. Si se toma en cuenta que la precipitación en el lago es de 400 mm por año y una tasa de evaporación de 1652.3 mm anual (Díaz, 2007).

La conductividad según Arredondo *et al.* (1984) varía entre los 11 870 y 13 700 S cm⁻¹, después en el trabajo de Lugo (2000) reporta rangos de 12 676 a 13 727 S cm⁻¹, mostrando también un ligero incremento de la conductividad en el lago.

De acuerdo a Torres y García 1995, los ambientes con conductividades mayores de 6 mS cm⁻¹, son poco productivos y con procesos de evaporación-cristalización. Aunado a la acción de un año Niño, que implica el aumento de la temperatura ambiental, propiciando una mayor evaporación y por último una disminución de la precipitación.

Por otro lado la alcalinidad es considerablemente alta, de acuerdo con Kevern (1989) de un intervalo de 1908 a 2555 mg L⁻¹, en comparación con otros lagos tipo maar localizados en la misma cuenca, Quechulac con rangos de 323 a 326 mg L⁻¹, y en el otro extremo Lago Verde con una alcalinidad de 79 mg L⁻¹. Y con respecto a otros lagos volcánicos como el lago Zirahuén, la Luna y el Sol con concentraciones de 5 a 55 mg L⁻¹ respectivamente (Armienta *et al.*, 2008).

Para la salinidad se hallan datos de Arredondo *et al.* (1984) quienes señalan una salinidad en Alchichica de 7.1 ‰. Vilaclara *et al.* (1993) presentan en su escrito valores de 8.5 ± 0.2 g L⁻¹ y Lugo en (2000) indican una salinidad de 8.3- 9 g L⁻¹.

Con predominancia de iones carbonato-bicarbonato, cloro, sodio y magnesio característicos en ambientes con una menor precipitación en comparación con la evaporación. La hidrólisis de bicarbonatos y carbonatos, puede ser un mecanismo de regulación, producida por la interacción con el agua y calizas lo que puede causar el aumento de la concentración de OH⁻ que resulta en el aumento del pH observado en el lago (Armienta *et al.*, 2008)

En tanto los valores de conductividad, alcalinidad y salinidad de acuerdo a sus implicaciones se indica consistentemente que en el lago hay un déficit pluvial el cual afecta los procesos de dilución y concentración de los iones que están presentes de acuerdo a la composición geológica del lago Alchichica en este caso HCO₃⁻, CO₃²⁻ y Cl⁻.

Los altos rangos de alcalinidad, pH y conductividad; se pueden atribuir a un déficit hídrico que se presenta en la cuenca de esta región árida. Tomando en cuenta que la precipitación en el lago es de 400 mm por año (SMN, 2005) y una tasa de evaporación de 1652.3 mm anual (Díaz, 2007). Aunado con predominancia de iones carbonato-bicarbonato, cloro, sodio y magnesio característicos en ambientes con una menor precipitación en comparación con la

evaporación. Debido al origen del lago el cual es tipo maar y la composición geológica del mismo, la cual se reporta conformada por calizas y dolomitas principalmente. En este caso se da una hidrólisis de bicarbonatos y carbonatos, que puede ser un mecanismo de regulación, producida por la interacción con el agua y calizas lo que puede causar el aumento de la concentración de OH-que resulta en el aumento del pH observado en el lago. En este caso se da una hidrólisis de bicarbonatos y carbonatos, que puede ser un mecanismo de regulación, producida por la interacción con el agua y calizas lo que puede causar el aumento de la concentración de OH-que resulta en el aumento del pH observado en el lago. Sin embargo la liberación iónica del lecho rocoso se da más fácilmente a pH bajos, lo cual, nos indica un mayor peso causal al proceso de evaporación.

La alcalinidad, pH, conductividad y salinidad tienden a un ligero incremento que se observa desde años atrás, al contrario los procesos de evaporación que llevan a una concentración de iones a modificar los valores de los parámetros químicos.

16. 4 NITRATOS

A lo largo del periodo de estudio (2009-2010), las concentraciones verticales de nitratos oscilaron de 0.06 a 6.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Durante el período de circulación se registraron concentraciones de 2.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$, siendo la mínima 0.8 $\mu\text{mol L}^{-1}$, mientras que en la época de estratificación, las concentraciones de nitratos fueron altas tanto en el epilimnion (2.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 4.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$) como en el hipolimnion (3.8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 4.8 $\mu\text{mol L}^{-1}$), presentándose en el hipolimnion anoxia durante la época de estratificación, registrándose para el metalimnion concentraciones de 2.8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 3.8 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

Las concentraciones mínimas (0.06 $\mu\text{mol L}^{-1}$) se registraron en los meses de enero y febrero del 2009 (período de circulación), junio-diciembre (estratificación) en el hipolimnion del lago (40 m de profundidad) y enero, febrero, marzo y abril del 2010, mientras que las máximas concentraciones (6.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$) se observaron durante el periodo de estratificación temprana en los meses de mayo-agosto en el epilimnion entre 10-15 m de profundidad en la columna de agua, probablemente como consecuencia del florecimiento de *Nodularia spumigena* registrada durante este periodo (Lugo *et al.*, 2000, Arredondo *et al.*, 1984), de la acumulación de materia orgánica y de altas tasas de nitrificación-desnitrificación que ocurren, y que por lo tanto definen altas concentraciones características dentro de esta región, como lo menciona Payne (1986) y Esteves (1988).

Las concentraciones de nitratos registradas en el fondo del cuerpo de agua durante todo el periodo de estratificación son menores a las observadas en el epilimnion del lago, ya que el nitrógeno liberado mediante los procesos de descomposición, al encontrarse en un ambiente anóxico predomina en su forma reducida, como lo menciona Payne (1986). Se observó una disminución de *Nodularia spumigena*, y con esto la disminución gradual de nitratos en el epilimnion, tal como lo menciona Oliva (2001), se menciona que estos organismos son los responsables de llevar a cabo la fijación de nitrógeno atmosférico, introduciendo al sistema

amoníaco, el cual bajo condiciones oxigenadas del epilimnion y del tope del metalimnion constituyen la materia prima para la obtención de nitratos mediante los procesos de nitrificación.

El periodo de circulación se caracterizó por presentar concentraciones homogéneas a lo largo de toda la columna de agua ($1.0 \mu\text{mol L}^{-1}$).

El análisis de la distribución vertical de nitratos establece que a lo largo del período de estudio, el lago Alchichica exhibió bajas concentraciones tanto en el epilimnion durante las etapas de estratificación temprana, bien establecida y tardía (por la utilización fitoplanctónica y por encontrarse aislado de las capas inferiores) como en el hipolimnion, debido a que las condiciones anóxicas promueven que el nitrógeno liberado mediante los procesos de descomposición se encuentre en su forma reducida; por otro lado, en el periodo de circulación del lago se registraron concentraciones homogéneas y no tan elevadas en comparación durante el periodo de estratificación.

En el presente estudio se registró valores mínimos de $0.6 \mu\text{mol L}^{-1}$ encontrados durante el periodo de circulación, en contraste Alcocer *et al.*, 2008 registraron concentraciones de $0.21 \mu\text{mol L}^{-1}$ para la capa de mezcla, estas diferencias interanuales pueden deberse a la presencia de la niña en el 2008 causando cambios en el comportamiento del lago.

La concentración de nutrientes en un lago está asociada a los períodos de circulación y estratificación de la columna de agua, en el presente estudio las concentraciones de nitratos medidas en el lago Alchichica fueron más altas durante el periodo de estratificación de la columna de agua, en contraste Alcocer *et al.*, 2008 registraron concentraciones de nitratos más altas durante el periodo de circulación. Esto responde a que durante la estratificación se establece un gradiente de densidad en la columna de agua, el cual reduce el flujo de nutrientes a los estratos superiores del lago (Camacho *et al.*, 2003), situación que permite mantener condiciones de oligotrofia durante la mayor parte del año.

16.5 NITRITOS

Durante el periodo de estudio (2009-2010), los nitratos registraron una variación de $0.15 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $1.05 \mu\text{mol L}^{-1}$.

Durante el periodo de circulación (enero-marzo 2009) se registraron concentraciones heterogéneas y altas a lo largo de la columna de agua ($0.4 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $1.05 \mu\text{mol L}^{-1}$) al igual que en los primeros meses de la estratificación temprana (abril y mayo 2009), mientras que en la época de estratificación bien establecida y tardía, el perfil vertical de nitritos se caracterizó por registrar concentraciones mínimas y homogéneas en el epilimnion ($0.15 \mu\text{mol L}^{-1}$). Durante el periodo de circulación del 2010 las concentraciones fueron mínimas y homogéneas ($0.15 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $0.25 \mu\text{mol L}^{-1}$).

Las concentraciones observadas a lo largo del periodo de estudio están en el intervalo de 0.01 a 2.2 $\mu\text{mol L}^{-1}$ registrado para la mayoría de los cuerpos acuáticos sin presencia de contaminantes, ya que por su inestabilidad química esta forma de nitrógeno suele estar en concentraciones bajas (Esteves 1988, Wetzel 2000).

Las concentraciones de nitritos fueron más bajas que las registradas para los nitratos y el amonio ya que, son una fase de transición entre estas dos formas de nitrógeno, lo cual tienen que ver con la cantidad de oxígeno disuelto y potencial redox (Wetzel. 2000).

El perfil vertical de nitritos encontrado para el lago Alchichica en la presente investigación es diferente al registrado para el lago D. Helvécio en Brasil, en el cual se observa un incremento importante en la concentración de esta forma de nitrógeno hacia el fondo del lago (0.16 $\mu\text{mol L}^{-1}$) registrándose en superficie (2-10 m de profundidad) una concentración de 0.04 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Tundisi, 1994).

16.6 AMONIO

A lo largo del periodo de estudio, el amonio presentó una oscilación de 0.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 13 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

Se registraron concentraciones elevadas y homogéneas de amonio (11 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 13 $\mu\text{mol L}^{-1}$), durante el inicio de la época de circulación en el año de estudio 2009, como consecuencia de la distribución a lo largo de toda la columna de agua del amonio acumulado en el hipolimnion ocurrido durante la estratificación (junio-julio 2009) (Eppley *et al.*, 1969; McCarthy *et al.*, 1977; Ault *et al.*, 2000; todos en Satho 2002).

El epilimnion se caracterizó por presentar bajas concentraciones de amonio (de 0.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 8 $\mu\text{mol L}^{-1}$) en el periodo de estratificación debido probablemente a los procesos de nitrificación, al consumo por parte del fitoplancton y su aislamiento del hipolimnion. Por el contrario, el ambiente anóxico de este estrato, característico de la época de estratificación establecida y tardía, favoreció la acumulación de amonio (13 $\mu\text{mol L}^{-1}$) solo para los meses de junio y julio (62 m de profundidad), como lo menciona Wetzel (2000, en Satoh 2002) y Esteves (1988), en contraste el hipolimnion también registró concentraciones por debajo de los 9 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

En 2010, las concentraciones de amonio oscilaron de 0.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 4 $\mu\text{mol L}^{-1}$. En el inicio de la época de circulación se registraron concentraciones mínimas y homogéneas en toda la columna de agua iniciando en el mes de mayo (estratificación temprana), se observaron bajas concentraciones (0.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$) a lo largo de la columna de agua.

Las concentraciones máximas se registraron durante el periodo de circulación (2009) a profundidades de 29 a 55 m de profundidad, lo cual contrasta con la hipótesis de que en la estratificación las concentraciones de amonio son más altas debido a las condiciones de anoxia prevalecientes en el hipolimnion del lago, lo cual no sucedió en el presente estudio.

El intervalo de variación ($0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $13 \mu\text{mol L}^{-1}$) en la concentración de amonio observado en el lago Alchichica a lo largo del periodo de estudio se encuentra dentro de las concentraciones registradas para las aguas continentales no contaminadas ($0\text{-}230 \mu\text{mol L}^{-1}$) y con una tendencia relativa a ser bajas (Oliva et al. 2001).

El amonio acumulado en el hipolimnion durante el periodo de estratificación temprana en Alchichica se distribuye homogéneamente a lo largo de toda la columna de agua durante el periodo de mezcla, oxidándose y quedándose disponible en forma de nitratos en el epilimnion, aunque no es la especie química más favorable, constituye una fuente de nitrógeno que permite el desarrollo del fitoplancton durante la circulación, adquiriendo de este manera gran importancia para la producción primaria, tal como lo mencionan Satoh et al. (2002).

Se observó en las graficas de nitratos, nitritos y amonio (Figs.) una ciclicidad anual a lo largo de la columna de agua, donde el movimiento de las especies químicas del nitrógeno respondieron a los periodos de circulación y estratificación del lago, este comportamiento observado durante el año 2009 coincide con cambios climáticos debido a la presencia de “La Niña”, por lo que es importante destacar una relación entre el comportamiento químico del lago con el medio ambiente.

16.7 FÓSFORO SOLUBLE REACTIVO (P.S.R.)

Se observa gráficamente en el periodo de circulación concentraciones de $0.05 \mu\text{mol L}^{-1}$, y un cúmulo de fosfatos en el fondo de la columna de agua, según Sánchez (2006) reporta que en el lago ocasionalmente se presenta un pequeño incremento de la concentración de fosfatos hacia el fondo de la columna de agua, en los años 1999, 2001 y 2002. Si se toma en cuenta el intervalo de concentración del fósforo soluble reactivo anual en el lago se define una concentración mínima lo que se podría deber al florecimiento de diatomeas de la especie *Cyclotella alchichicana* (Oliva et al., 2006) principalmente que se da en el comienzo de la circulación (diciembre) aprovechando la disponibilidad de los nutrientes, los cuales fueron redistribuidos en la columna de agua.

A partir de los meses de marzo y abril el inicio de la estratificación, el comportamiento del PSR, fue acumulándose en el epilimnion y en el hipolimnion inferior, ambos con concentraciones de $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, notablemente divididos por la termoclina, suponiendo una barrera para el fosfato que se encontraba en los dos estratos extremos, cuando comenzó la estratificación, en tanto el metalimnion tiene una baja concentración de fósforo soluble reactivo. En este periodo se distingue otro florecimiento, en este caso es de *Nodularia spumigena* (Oliva et al., 2001).

La acumulación del fósforo soluble reactivo en el hipolimnion durante la estratificación temprana y establecida concuerda con otros lagos tropicales como el lago Amvrakia en Grecia y el lago Carioca en Brasil (Danielidis et al., 1996), sin embargo no hay datos anteriores en el lago

Alchichica, que verifiquen o correspondan a una acumulación en el epilimnion durante este periodo.

Al paso de la estratificación establecida a la tardía, la concentración de fósforo soluble reactivo empieza a distribuirse verticalmente, observando una disminución de la concentración en el epilimnion, metalimnion y en el hipolimnion, lo cual es contrastante con lo reportado con Sánchez 2006, donde el epilimnion y el metalimnion se encuentran pobres de P.S.R., y el hipolimnion se encuentra con la mayor concentración de PSR. En esta etapa la termoclina ha bajado hasta los 28 m y un debilitamiento de la misma, dando como resultado una exportación de fósforo soluble hacia el hipolimnion.

16.8 FÓSFORTO TOTAL (P.T.)

El fósforo total se define como el fósforo en suspensión de la materia particulada y en forma disuelta (Juday *et al.*, 1927). Mostrando una mayor concentración del fósforo total en comparación con la del fósforo soluble reactivo.

El fósforo total se distribuye de manera homogénea a lo largo del lago, en la etapa de circulación sin una acumulación en el fondo del lago. En la etapa de inicio de la estratificación también se acumula una parte en el epilimnion y otra en el hipolimnion, a diferencia de los fosfatos este se fracciona en dos partes del hipolimnion inferior y superior, suponiendo un descenso de la materia que quedo del florecimiento de *Cyclotella alchichicana* (Oliva *et al.*, 2006).

El fósforo no emigra hacia el epilimnion por su comportamiento sedimentario al adsorberse a compuestos orgánicos e inorgánicos (apatita) en este caso dependiendo de la concentración del calcio se forma este compuesto, aunado con un pH mayor a 7, la solubilidad del fosfato se ve reducida (Wetzel, 1981). Como este es el caso en el lago Alchichica donde se presenta un pH promedio de 9 y con anteriores datos que indican que en lago hay una composición iónica, con una predominancia aniónica de HCO_3^- y CO_3^- .

Al igual que el fósforo soluble reactivo al inicio de la estratificación hay una concentración mayor en el epilimnion e hipolimnion, en el estrato epilimnetico se va reduciendo por la captación de *Nodularia spumigena* (Oliva *et al.*, 2001).

Se supone que al avanzar la estratificación en el lago la concentración de fósforo total en el hipolimnion inferior se acrecentaría, sin embargo en el presente estudio se manifiesta una disminución de fósforo total en la estratificación tardía.

El comportamiento de los nutrientes se ven influidos por la dinámica de monomixis del lago habiendo diferencias interanuales por el fenómeno del Niño y de los procesos (ecológicos y químicos) del ciclo de cada uno de ellos.

DISCUSIÓN DE PARÁMETROS BIOLÓGICOS APP

17.1 Contenido de Carbono APP

En estudios bacterianos la cuantificación del contenido de carbono (C.C.) se toma en cuenta el tamaño celular y se usa un factor de conversión con base en el volumen celular (Posch *et al.*, 2001).

De acuerdo con esto el C.C. en la circulación se observó un mayor tamaño y volumen celular debido a que en este periodo se da una mayor disponibilidad de nutrimentos a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, llamó la atención dos agregados uno entre 5m y 10m con C.C. menor que el de los 40m, considerando en este punto, que la zona fótica en la circulación fue menor que en la estratificación, y la luz es un factor limitante para el APP.

La relación del C.C. se relacionó con el oxígeno disuelto ya que en el epilimnion se observaron los tamaños celulares más grandes, mientras que en el hipolimnion se registraron tamaños más pequeños donde escasea esta gas, lo que hace suponer una actividad fotosintética del APP en la superficie siendo las cianobacterias del 10 al 70% del picoplancton autotrófico en diferentes lagos (Vuorio *et al.*, 2003; Descy *et al.*, 2005). Por lo tanto en la circulación se dan máximos en diferentes puntos de la columna de agua, asociados con concentraciones altas de oxígeno.

Según la correlación estadística del APP con los parámetros químicos el contenido de carbono tuvo relación indirecta con el oxígeno disuelto y los nitratos. El primero como un subproducto de su actividad fotosintética y el segundo como un macro nutrimento, pero no esencial para su desarrollo. De manera tal que el tamaño y volumen incrementaron en relación directa con la concentración de nitratos y a su vez la actividad del APP favoreció el incremento en la concentración de oxígeno disuelto.

Por otra parte la correlación del C.C. mantuvo una relación inversa con la alcalinidad, conductividad, amonio y fósforo total, esto representa que cuando los valores de alcalinidad y conductividad; las concentraciones de amonio y fósforo total fueron elevados el contenido de carbono de las células fue menor. Probablemente el fósforo sea un factor limitante para el desarrollo de este grupo. Además las concentraciones de amonio se relacionan como un producto que libera este grupo.

En una comparación entre los gráficos del C.C. con la abundancia en el periodo de circulación se puede observar que en la circulación los contenidos de carbono son considerablemente altos al resto del año y con picos importantes, mientras que la abundancia en el mismo periodo se distribuyen sus valores de manera baja y homogénea en la columna de

agua. De acuerdo con esto se puede inferir en el aumento de tamaño y volumen de las células bacterianas, no están sujetos al comportamiento de la abundancia bacteriana y viceversa.

17.2 Abundancia de APP

El APP tiene adaptaciones a niveles bajos del PAR (Callieri et al, 1997) esto explica una parte del comportamiento en la distribución del APP en el lago.

En el periodo de circulación la abundancia del APP se conservó homogénea a lo largo de la columna de agua, se notó valores de concentraciones bajas, durante el año. Si se considera los movimientos del agua que recorren de manera circular, en la mezcla del lago. Lo anterior concuerda con lo publicado por Maceck et al., 2009 con resultados del 2001 y 2002, obtuvieron concentraciones mínimas de abundancia de 10^4 células mL^{-1} . Durante la circulación (diciembre-marzo) el APP se distribuyó a lo largo de la columna de agua, no habiendo una relación observable con la disponibilidad de la luz.

Para la estratificación se observa un patrón entre la estratificación temprana, establecida y tardía, con un incremento, después un decremento y de nuevo se incrementa, respectivamente. En el caso de la estratificación temprana se registró el intervalo de concentración de 4.5×10^6 cél mL^{-1} a 7.5×10^5 cél mL^{-1} , dentro de este intervalo, en el epilimnion (0-14m) se encontró la concentración más alta, esto concuerda con la formación de los estratos en la columna ya que en cada uno de los tres se ve un cúmulo de abundancia, mientras que en el año 2001 la concentración máxima del año fue de 1×10^6 cél mL^{-1} .

Al inicio de la estratificación se pudo observar una acumulación en los tres estratos, notando una concentración mayor en el epilimnion. Si se toma en cuenta que las concentraciones de los nutrientes en este periodo están disponibles aunado con la luz, son las condiciones ideales para el APP, que difieren un poco con respecto a los cúmulos que se dieron en el metalimnion y en el hipolimnion superior.

Se observan altas abundancias en el metalimnion en parte de la estratificación bien establecida y tardía, por otra parte, no se encontraron abundancias considerables en el epilimnion, lo que concuerda con lo reportado por Macek et al (2009) durante los años 2001 y 2002, para el lago Alchichica donde hubo una mínima abundancia de APP durante la estratificación establecida (septiembre-octubre) sin embargo en el 2010 hay una disminución generalizada en los estratos, mientras que en el 2001 y 2002 se dio un aumento en el metalimnion.

En la estratificación tardía el aumento considerable de la abundancia en un tamaño considerable del hipolimnion, que va de los 35 a 45m aproximadamente, tomando en este punto las abundancias más altas de este año. Si se toma en cuenta que el APP tiene adaptaciones a niveles bajos del %PAR (Radiación fotosintéticamente activa, por sus siglas en

inglés) (Callieri *et al.*, 1997) lo que explica en parte el comportamiento en la distribución del APP en el lago Alchichica.

En el análisis estadístico correspondiente con el APP se determinó la correlación que hubo de la abundancia con un solo parámetro el amonio, encontrando una correlación negativa de -0.3125. Así al aumentar las concentraciones de amonio hubo una disminución de este grupo bacteriano, lo que puede indicar procesos de decaimiento de sus poblaciones.

En el estudio realizado por Macek *et al.*, (2009) los intervalos de abundancia encontrados en el lago Alchichica en el año 2002 fluctuaron de 1×10^3 a 1.4×10^6 cél m L⁻¹. Con diferencia en los valores de abundancia del APP en el presente estudio abundancias entre 2×10^5 células mL⁻¹ a 9×10^5 cél mL⁻¹, comparado con Brian *et al.*, (1996) en su estudio en el pacifico ecuatorial, obtuvo abundancias entre 1.34×10^5 cél mL⁻¹ y 1.47×10^5 cél mL⁻¹.

Como era de esperarse en la literatura, sobre el picoplancton autotrófico (Agawin *et al.*, 2000; Bell y Kalff, 2001), en un sistema cálido oligotrófico como el lago Alchichica la abundancia es relativamente alta en una parte de la estratificación bien establecida pese a los diferentes cambios estacionales de la exposición de luz (Z_{eu}) y de nutrimentos. En el último caso, corresponde con lo obtenido en las correlaciones estadísticas de la abundancia del APP, ya que no hay ninguna significancia entre los nutrimentos y la abundancia.

Sarmiento *et al.*, 2007 reporta para el lago Kivu abundancias mayores de APP (4×10^5 cél mL⁻¹ a 12×10^5 cél mL⁻¹) a las encontradas en el lago Tanganika (3.4×10^5 cél mL⁻¹ a 10×10^5 cél mL⁻¹), siendo estas similares a las del lago Alchichica 2×10^5 cél mL⁻¹ a 9×10^5 cél mL⁻¹. La elevada abundancia de APP en lagos tropicales a diferencia de los lagos templados, se puede deber a las diferencias latitudinales como gran transparencia y mejor reciclamiento en la columna de agua, favorecen una buena actividad en la columna de agua (Kilham y Kilham., 1990,1991). Sin embargo como menciona Lugo 2000, existen diferencias entre lagos del mismo estado trófico señalando al lago Kivu como un lago oligotrófico (Hecky y Kling, 1987) al igual que Alchichica.

Datos reportados por Callieri *et al* (2007) registran abundancias para el lago Mascardi de 1.3×10^5 cél mL⁻¹, para el lago Moreno de 8.1×10^4 cél mL⁻¹, lago Gutiérrez de 9.4×10^4 cél mL⁻¹, lago espejo de 6.5×10^4 cél mL⁻¹, en lago Correntoso abundancias de 1.34×10^5 cél mL⁻¹ y el lago Nahuel Huapi con 6.9×10^4 cél mL⁻¹. En este caso los lagos mencionados son lagos de la Patagonia argentina del “Parque Nacional Nahuel Huapi”, con $Z_{max} > 90m$ y una área $> 5Km^2$ además de ser lagos monomícticos cálidos con una estratificación de primavera a verano considerados lagos ultraoligotróficos (Quirós y Drago, 1985; Morris *et al.*, 1995) por tanto se muestran abundancias menores, que en el presente estudio del lago Alchichica, lo cual corresponden a su diferente estado trófico.

17.3 Biomasa de APP

La biomasa bacteriana no se mide directamente, se obtiene de la "abundancia" y del "tamaño" de los componentes (Cole *et al.*, 1993). En el caso del picoplancton la biomasa se obtuvo del contenido de carbono que depende del biovolumen celular multiplicado por la abundancia.

La biomasa del APP en el lago Alchichica en el periodo de circulación presentó concentraciones similares en la columna de agua, de igual manera, que la abundancia, dado, por la homogeneización de los la columna de agua en este período. Si se observa gráficamente la relación de la biomasa con la abundancia es importante prestar atención en la influencia de la abundancia en los resultados de biomasa. Con un pequeño cúmulo en el epilimnion, si se toma en cuenta, una disponibilidad de nutrimentos, además de la afectación de los movimientos del agua.

Para el inicio de la estratificación se dio una pequeña acumulación de biomasa del APP en el metalimnion (13-18m), hacia el hipolimnion se distribuyó de forma homogénea pero con concentraciones menores. En la estratificación bien establecida hubo un descenso de la biomasa del APP en todos los estratos. Para la estratificación tardía fueron notables las mayores biomásas del año en el área del metalimnion, incluyendo al hipolimnion alrededor de los 40m. Si se toma en cuenta la disponibilidad de los recursos luz y nutrimentos en la parte del epilimnion al inicio de la estratificación por que la biomasa no es alta en este punto, debido al florecimiento de *N. spumigena*, la cual reduce la entrada de luz, por esta cianobacterias filamentosas y además la competencia de nutrimentos.

Si se toma en cuenta esto con la baja biomasa del APP, como en el caso del lago Alchichica, durante los dos florecimientos en el año donde los nutrimentos disueltos de origen no algal se convierten en la mayor fuente de energía para bacterias (del Giorgio y Gasol, de 1995; Petrucio *et al.*, 2005).

La baja tasa de aumento del total de bacterias medido en término de sus abundancias, puede implicar que la biomasa total de bacterias tiende a ser más uniforme entre los sistemas lacustres, y su contribución relativa a la biomasa de la comunidad disminuye con el aumento de la productividad del sistema (Fuhrman *et al.*, 1989).

En el lago Jiquí (Brasil) la media de la biomasa bacteriana fluctuó entre 123 $\mu\text{g C L}^{-1}$ a 269 $\mu\text{g C L}^{-1}$ la cual se situó por debajo de los ya registrado en una región tropical de agua dulce por Erikson *et al* (1999) encontraron una biomasa entre 240 $\mu\text{g C L}^{-1}$ y 930 $\mu\text{gC L}^{-1}$ en un lago tropical al igual que Farjalla *et al.*, (2001) el registro biomásas obtenidas entre 480 $\mu\text{g C L}^{-1}$ y 1432 $\mu\text{gC L}^{-1}$ en lagunas costeras del sureste de Brasil.

En el caso del lago Alchichica los intervalos de biomasa van de 1.03 $\mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ a 70.34 $\mu\text{g C}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, se puede observar la baja biomasa que se registro en Alchichica, debido a que los sistemas anteriormente mencionados son sistemas eutróficos es decir con una alta productividad. Si se toma en cuenta una dependencia en el comportamiento espacial y

temporal del APP con los nutrimentos esto no quiere decir que no haya una influencia de otros en el crecimiento bacteriano, sin embargo no son limitantes directos en la distribución del APP.

Otro parámetro importante característico en Alchichica que se debe tomar en cuenta en el crecimiento de la biomasa, es la salinidad. Estudios previos indican que a salinidades de 0.5 a 2 ups es inhibidora del crecimiento y fijación del CO₂ y el N₂ (Paerl, 1983; Séller, 1988). Sin embargo hay especies adaptadas a salinidades considerables, las cuales se presentan en ambientes hiposalinos como Alchichica.

El APP aparentemente está limitado por la concentración de nutrientes inorgánicos y la disponibilidad de luz en la columna de agua esto sugiere que las correlaciones encontradas con las variables limnológicas y el APP se relacionan de forma negativa con los nitratos y la concentración de oxígeno.

Al observar la distribución espacio temporal del APP se infiere en una coincidencia de los nutrimentos y de la luz, de los dos, si uno de ellos falta la biomasa del APP se ve afectada. Según la literatura, el papel de los nutrimentos el APP cianoprocarionte se ve generalmente favorecido en ambientes con bajas concentraciones (Callieri y Stockner, 2002). Sin embargo es importante mencionar los óptimo crecimiento a elevadas tasas de la relación N:P, en este caso si se puede tener una relación en la estratificación temprana y establecida debido a que no hay una disposición de fósforo en el epilimnion, mientras en la estratificación tardía la mayor biomasa se establece en una parte muy profunda pero recordando que ahí se encuentra el metalimnion (22-35 m de profundidad) y más abajo, en una región del hipolimnion si se considera que en estudios posteriores las altas biomasa de APP fueron encontradas por debajo del nivel del 0.1 % del PAR. (Camacho *et al.*, 2003).

Según Wetzel, 2001 registro en lagos oligotróficos como el lago Lawrence en Michigan, biomasa de 0.28 g m⁻³ (Coveney y Wetzel, 1995), en el lago Toolik en Alaska de 0.01 a 0.04 g m⁻³ (Hobbie *et al.*, 1983,1999), el lago Kriwoye en Rusia con biomasa de 0.21 g m⁻³ (Wetzel, 2001) y en el lago Zelenteskoye en Rusia con biomasa de 0.06 g m⁻³ (kuznetsov, 1970 en Wetzel, 2001), en este caso los valores de biomasa de Alchichica entran en los valores de biomasa de lagos de su misma condición trófica.

Wetzel, 2001 registro biomasa de picoplancton total para lagos oligotróficos, tales como: el lago Krivoye en Rusia de 0.21 g m⁻³ y el lago Lawrence en Michigan con biomasa de 0.28 g m⁻³, y para lagos eutróficos como el lago Batorin en Rusia con 3.20 gm⁻³ y el lago Valencia en Venezuela con biomasa de 1.0 g m⁻³ (Lewis *et al.*, 1986 en Wetzel, 2001), comparando las biomasa de los lagos oligotróficos por Wetzel con la biomasa obtenida en el Lago Alchichica.

En las aguas con baja concentración de nutrimentos y de carbono, el APP, podrá competir contra el HPP (Drakare 2002) o el fitoplancton, ya que puede utilizar bajas concentraciones de nutrimentos y además intensidades de luz muy baja para su desarrollo (Vadstein 2000; Callieri *et al.* 2007).

18.1 CONTENIDO DE CARBONO HPP

El picoplancton y otros microorganismos heterotróficos juegan un papel importante en los ecosistemas marinos y aguas epicontinentales y tienen una función clave en los flujos de materia orgánica dentro de la red trófica contribuyendo a los componentes del “microbial loop” o circuito microbiano (Elser et al. 1995; Pomeroy 1999; Church et al 2000).

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 (M.O.D.) 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 M.O.D. 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).

El contenido de carbono para el picoplancton heterotrófico fluctuó a lo largo del período de estudio de 5 a 100 $\text{fgC}_{\text{org}} \text{cél}^{-1}$, presentándose en el período de circulación una distribución homogénea con 10 $\text{fgC}_{\text{org}} \text{cél}^{-1}$, cuando se registraron concentraciones de oxígeno disuelto de 6-8 mg L^{-1} , y temperaturas de de 14°C a 15.5°C, para este período se esperaría una distribución homogénea por el 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 (Turk y Turk, 2003,2006). Con el calor de la primavera el agua de la superficie del lago adquiere mayor temperatura, comenzando la estratificación temprana (abril-junio 2009), donde el C.C. mantuvo homogéneo a lo largo de la columna de agua, siendo su concentración máxima de 15 $\text{fgC}_{\text{org}} \text{cél}^{-1}$, con concentraciones de oxígeno disuelto no mayores a 7 mg L^{-1} y mínimas de 1 mg L^{-1} , registrándose para este periodo temperaturas de 14°C a 17°C. Al ser el comienzo de la estratificación, los gradientes de temperatura comienzan a delimitar los límites entre el epilimnion y el metalimnion, al hacer esto el oxígeno disuelto también se estratifica.

Mientras que en el verano se genera el mayor gradiente de temperatura para el lago Alchichica llegando así a la estratificación bien establecida (julio-septiembre 2009) donde se registró un aumento considerable del C.C. de HPP para todo el lago, presentando el epilimnion concentraciones de 15 $\text{fgC}_{\text{org}} \text{cél}^{-1}$ a 100 $\text{fgC}_{\text{org}} \text{cél}^{-1}$ con el mayor gradiente de oxígeno con 8 mg L^{-1} y temperaturas de 20.5 °C, conforme se profundiza la termoclina la concentración de C.C. disminuye en el resto de los estratos, en el metalimnion se registró una concentración de 10 $\text{fgC}_{\text{org}} \text{cél}^{-1}$ con O.D. de 3 mg L^{-1} , y en el hipolimnion anóxico y temperaturas de 14 °C el C.C. fue menor a 10 $\text{fgC}_{\text{org}} \text{cél}^{-1}$.

El aumento de suministros de materia orgánica libera nutrientes en las aguas oxigenadas superiores (epilimnion), el oxígeno disuelto es reemplazado, a medida que se necesita, por el intercambio gaseoso de la atmósfera favorecido por la acción del viento y a partir de la producción por la fotosíntesis de algas y bacterias autotróficas (picoplancton autotrófico), generando mayor actividad en esta región, provocando pulsos de bacterias en el agua, aunque algunos residuos orgánicos tienden a sedimentar a profundidades mayores, así en el hipolimnion por procesos de oxidación de la materia orgánica las bacterias heterotróficas van agotando el oxígeno disuelto hasta volverse anóxico en el lago Alchichica afectando la distribución y las formas de nutrientes presentes para el mismo picoplancton.

En la estratificación tardía (octubre-diciembre 2009) se registró un contenido de carbono homogéneo a lo largo de la columna de agua con concentraciones bajas en comparación con el epilimnion de la estratificación bien establecida menores a $10 \text{ fgC}_{\text{org}} \text{ cél}^{-1}$, registrándose para este periodo concentraciones de oxígeno disuelto de 6 mg L^{-1} a mínimas de 1 mg L^{-1} , y temperatura en el epilimnion de 17°C y en el hipolimnion de 14°C .

Las bacterias en ambientes naturales, también pueden encontrarse limitadas por P o N en lugar de carbono orgánico (Currie, 1990; Pace, 1993). 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 (Vadstein & Olsen, 1989; Reche et al., 1997). 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 procesa (Zweifel et al., 1995; Rivkin & Anderson, 1997).

18.2 ABUNDANCIA HPP

La abundancia del picoplancton heterotrófico en el lago Alchichica siguió un patrón regular, vinculado con la hidrodinámica del lago (período de estratificación y circulación). Durante el período de circulación, el HPP se distribuyó homogéneamente en la columna de agua, sin un patrón distintivo. A lo largo del período de estratificación, la distribución de HPP en profundidad siguió un patrón regular con un máximo en la capa más profunda del epilimnion.

La variación temporal de la abundancia del picoplancton heterotrófico generalmente esta caracterizada por presentar un máximo en los inicios de la primavera en lagos tropicales y abundancias relativamente bajas durante el resto del año (Izaguirre et al., 2003), correspondientes a los cambios ambientales (estaciones cálidas, frías, secas y lluviosas) y de temperatura en la columna de agua, lo que coincidió con las densidades y la variación temporal del HPP durante el ciclo anual. En donde la dinámica del picoplancton en el lago Alchichica sigue un patrón regular ligado a su hidrodinámica (periodos de circulación y estratificación) y a la variación temporal de los estratos en cuanto su amplitud y distribución en la columna de agua como lo sugieren Macek et al., (2009) y Hernández Avilés et al., (2010).

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 depredación, la lisis, la temperatura y otros factores (Elser *et al.*, 1995; Gurung *et al.*, 2001; Løvdal *et al.*, 2007). La abundancia bacteriana en los lagos está a menudo estrechamente vinculada con la concentración de clorofila-a (Bird & Kalff 1984; Cole *et al.*, 1988; Thorpe & Jones, 2005), este modelo implica la disponibilidad de carbono orgánico disuelto (C.O.D.) de la producción autotrófica que es un recurso importante para las bacterias (Kirchman & Rich, 1997; Tanaka *et al.*, 2009).

El patrón estacional de HPP fue heterogéneo en todo el año 2009, Los mayores valores de abundancia de 3.2×10^6 cél mL⁻¹ se registraron en la estratificación bien establecida (julio-septiembre) y los más bajos de 2×10^5 cél mL⁻¹ en el periodo de estratificación tardía (octubre-diciembre).

En el presente estudio se observó un patrón de distribución homogéneo de la abundancia durante el periodo de circulación (enero-marzo, 2009), similar a lo reportado para el lago en el año 2000 por Macek *et al.*, (2002). La máxima abundancia durante la circulación (enero-marzo 2009) fue de 2.2×10^6 cél mL⁻¹, disminuyendo conforme concluyó este periodo. Hernández-Avilés *et al.*, (2010) reportaron densidades de 2.5 a 5.5×10^6 cél mL⁻¹ para el período de circulación, siendo diferentes a las encontradas en el presente estudio, esto podría deberse a cambios interanuales en la dinámica físico-química del lago Alchichica. Al inicio del período de estratificación el HPP aumentó considerablemente, registrando una máxima abundancia durante el período de estratificación bien establecida 3.2×10^6 cél mL⁻¹ y una mínima entre octubre y diciembre 2009 junto con la profundización y el debilitamiento de la termoclina a 2×10^6 cél mL⁻¹. La abundancia mínima para el HPP se observó durante la estratificación tardía (septiembre-octubre 2009) y permaneció homogéneo cuando el metalimnion se debilitó al final del año y la capa de mezcla se hizo más amplia.

Las abundancias del HPP en el lago Alchichica pueden ser comparables con las abundancias de sistemas marinos-costeros, por ser ambientes salinos pero a diferencia de esto es que presentan alta productividad, además Alchichica que es hiposalino y poco productivo la abundancia del HPP alcanzó las 3.2×10^6 cél mL⁻¹ como máximo. Datos reportados por Mitbavkar (2009) para la bahía de Sagami en Japón, presenta abundancias de HPP entre 0.1×10^6 cél mL⁻¹ a 36.2×10^6 cél mL⁻¹ para todo un ciclo anual, quedando los extremos de este intervalo fuera de las abundancias encontradas en el lago Alchichica.

Sarmento (2007) encontró abundancias de 22×10^6 cél mL⁻¹ a 40×10^6 cél mL⁻¹ para el lago Tanganyika, dado que este es un lago tropical muy productivo, siendo mayores a las abundancias del lago Alchichica al ser poco productivo u oligotrófico.

En el período de circulación (enero-marzo, 2009), la abundancia del HPP es homogénea, conforme avanza el tiempo y entra la primavera, las abundancias comienzan a aumentar casi paralelamente con la formación de una termoclina, corroborando este comportamiento

Alcocer *et al.*, (2002), fenómeno similar a lo que se ha reportado en el lago monomítico cálido Kivu (Sarmiento *et al.*, 2007).

Hernández-Avilés *et al.*, (2010) en el lago Alchichica reportaron abundancias para el HPP de 1.5×10^6 cél mL⁻¹ a 8×10^6 cél mL⁻¹ para la capa de mezcla (epilimnion) mismas que fueron parecidas a las registradas en el presente estudio.

Tek Bahador *et al.*, (2010) registraron para el lago Phewa, Nepal, abundancias de 3.2×10^6 cél mL⁻¹ a 9.9×10^6 cél mL⁻¹ claramente mayores a las obtenidas en el presente estudio, debido a que el lago Phewa es un lago eutrófico pero mantiene una similitud con el lago Alchichica al ser monomíticos cálidos. Para el lago Biwa también lago monomítico cálido se han registrado abundancias entre 1.1×10^6 cél mL⁻¹ a 5.48×10^6 cél mL⁻¹ para todo el ciclo anual (Gurung y Urabe 1999), siendo mayores a las encontradas para el lago Alchichica, más específicamente en el período de estratificación del lago Biwa la abundancia registrada fue de 5.48×10^6 cél mL⁻¹, mientras que para el lago Alchichica la máxima registrada fue de 3.2×10^6 cél mL⁻¹, manteniéndose mayores en lagos oligotróficos y con temperaturas mayores para este período.

En los sistemas acuáticos donde se limita el crecimiento de bacterias por los nutrimentos inorgánicos (Smith y Pradera 2004; Spears y Lesack 2006), se ha demostrado que el fósforo (P) con más frecuencia limita la abundancia de bacterias (Toolan *et al* 1991; Caron, 1994). El fósforo es un nutrimento esencial requerido en pequeñas cantidades (Karl 2000; Carlsson y Caron, 2001). Estudios recientes sugieren que los factores climáticos, tales como temperatura, precipitación y escorrentía (Jones & Young, 1998; Jansson *et al.*, 2000), juegan un papel importante en la regulación de los patrones temporales en la abundancia bacteriana en los sistemas acuáticos, de ahí la importancia del estado trófico.

La abundancia del picoplancton heterotrófico mantuvo una correlación positiva baja con los nitritos de 0.24 aunque significativa ($p < 0.05$). La abundancia del picoplancton heterotrófico se ve particularmente afectada por la temperatura y la disponibilidad de nutrimentos (Agawin *et al.*, 2000), siendo al parecer más relevante la influencia de la variación de nitritos en la columna de agua.

De acuerdo con Callieri *et al.*, (2002) hay una relación entre la abundancia del picoplancton heterotrófico y el estado trófico del lago, debido principalmente a los nutrimentos, principales limitantes en la distribución del HPP. Así por ejemplo en el epilimnion se llevan a cabo la fijación de nitrógeno molecular por las cianobacterias y la asimilación de nitratos por el fitoplancton. El nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico gaseoso en él participan diferentes grupos bacterianos, que dependiendo de las condiciones presentes en los diferentes estratos del lago, predominaran por ejemplo los procesos de nitrificación hacia el epilimnion, la desnitrificación en la termoclina propiciado por condiciones de microaerobia y la amonificación hacia el hipolimnion como resultado de las condiciones de anoxia y reducidas como lo han propuesto para el lago Alchichica Hernández-Avilés *et al.* (2010).

En el lago Alchichica los nutrientes son importantes para sostener las comunidades picoplanctónicas, éstos son distribuidos en el agua y en la interfase agua-sedimentos en forma disuelta y particulada los cuales son utilizados para los procesos metabólicos del picoplancton heterotrófico. La abundancia del picoplancton heterotrófico está determinada principalmente por la disponibilidad de carbono orgánico y particulado así como por la dinámica de los nutrientes (Wetzel, 2001).

18.3 BIOMASA HPP

La distribución de la biomasa del picoplancton heterotrófico coincidió con el comportamiento del oxígeno disuelto en el lago Alchichica, a su vez la biomasa presentó un comportamiento heterogéneo en la mayor parte del ciclo anual, siendo únicamente a principios y finales del 2009 cuando se homogeneizó verticalmente.

Durante el período de circulación (enero-marzo 2009) (Fig. 33 [anexo 1](#)) cuando la columna de agua presentó temperaturas menores y homogéneas (14°C) y el oxígeno disuelto (6 mg L^{-1} a 8 mg L^{-1}) la biomasa se distribuyó homogéneamente ($5 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$). Este comportamiento se debe al movimiento constante que homogeniza a toda la columna de agua, siendo así que la biomasa del picoplancton heterotrófico siga el mismo patrón. Al finalizar la temporada fría-seca (invierno hemisférico) comenzó a cambiar la distribución de la biomasa, indicando también por cambios en las de temperatura y concentraciones de oxígeno disuelto.

Al inicio de la temporada cálida-seca del lago, se observó un comportamiento heterogéneo en la distribución de la biomasa del picoplancton heterotrófico, debido a la formación de una termoclina a los 13 m de profundidad y a la generación de una oxiclina por debajo de la termoclina, a su vez el epilimnion formado en el lago genera un microambiente ideal para el florecimiento de *Nodularia cf. spumigena* (Oliva, 2001), asociado con un incremento en la concentración de nutrientes, lo que favorece también el desarrollo del picoplancton. Así la biomasa aumentó considerablemente ($95 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$), por debajo de la termoclina y se mantuvo $90 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$ debido al gradiente de oxígeno por debajo de la termoclina, manteniendo una alta biomasa, lo contrario sucedió en el hipolimnion recién formado donde se observó una clara disminución de la biomasa heterotrófica de $80 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$.

Para comienzos de la temporada cálida-lluviosa (julio-septiembre 2009) cuando los gradientes de temperatura y oxígeno en el lago están bien marcados generando una perfecta estratificación del lago (Fig. 34 [anexo 1](#)) los nutrientes se distribuyen en los diferentes estratos, estableciéndose también una estratificación química, así la biomasa en el lago disminuyen ($50 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$ a $15 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$) en relación con la disminución de nutrientes. En el hipolimnion donde se presentó anoxia la biomasa disminuyó considerablemente ($15 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$).

Para el período de estratificación tardía (octubre-diciembre 2009), el gradiente térmico del lago comenzó a debilitarse y el epilimnion presentó su mayor profundidad marcando así un hipolimnion pequeño con biomasa homogénea ($5 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$ a $10 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{ L}^{-1}$), también en este período se presentó una clara disminución de la concentración de los nutrientes en el

epilimnion y un incremento en la concentración de oxígeno disuelto, terminando con la anoxia del lago.

La biomasa del HPP mantuvo correlaciones estadísticas con el oxígeno disuelto de 0.3119 ($p < 0.01$) y con los nitratos de -0.3846 ($p < 0.01$) y nitritos de -0.2491 ($p < 0.05$). La dinámica temporal del oxígeno disuelto en el lago Alchichica, fue un factor limnológico que favoreció la estratificación de la biomasa del HPP, mientras que para el caso de los nitratos y nitritos se consideraron como factores que limitaron la biomasa heterotrófica en el lago Alchichica.

Wetzel (2001) hace un resumen de las biomásas de picoplancton total tanto para lagos oligotróficos como: el lago Krivoye en Rusia de $210 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ y el lago Lawrence en Michigan con biomásas de $280 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$, como para lagos eutróficos como el lago Batorin en Rusia con $3200 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ y el lago Valencia en Venezuela con biomásas de $100 \mu\text{gC}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ (Lewis *et al.*, 1986 en Wetzel, 2001), comparando las biomásas de los lagos oligotróficos por este autor con la biomasa obtenida en el Lago Alchichica se encontró que estas son pequeñas, mientras que para los lagos eutróficos se observó una diferencia significativa, corroborando que el estado eutrófico influye en la biomasa del bacterioplancton.

Este estudio presentó una relación directa del APP y del HPP una relación con la hidrodinámica del lago de monomixis cálida, disponibilidad de nutrientes y con la transición entre las condiciones oxicas y anóxicas de la columna de agua.

Las variaciones de la abundancia de HPP se relacionaron directamente con los nutrientes en la columna de agua. En la mezcla con una distribución homogénea de los nutrientes a lo largo de la columna de agua se encontró una abundancia baja en comparación con el periodo de estratificación para el APP y el HPP.

Durante el periodo de estratificación la concentración de nutrientes se agotó en el epilimnion disminuyendo el HPP. La oxiclina pronunciada y la condición de anoxia en el hipolimnion causaron una distribución heterogénea del APP y HPP.

CONCLUSIONES

La distribución de APP y HPP siguen una distribución asociada con los gradientes físicos y químicos de la columna de agua en el lago Alchichica durante la estratificación térmica.

El gradiente más importante en el lago es la temperatura que favorece la formación de gradientes químicos como el del oxígeno disuelto y los nutrientes y que a su vez establecen una distribución diferencial del picoplancton.

La alcalinidad, pH, conductividad y salinidad tendieron a un incremento, observado años atrás, coincidiendo con los procesos de evaporación.

Los nutrientes presentaron bajas concentraciones durante el ciclo anual, confirmando que el lago Alchichica es de naturaleza oligotrófico, característica de los lagos tipo maar.

Se observó un desplazamiento de las especies químicas de Nitrógeno a lo largo de la columna de agua, que se relaciona con los cambios en la temperatura y las concentraciones de APP y HPP.

El APP tiene una influencia directa de los nutrientes, intensidades de luz bajas y de la competencia de otros grupos fitoplanctónicos y de manera indirecta e importante, la temperatura.

El C.C. de APP mantuvo una distribución espacio temporal homogénea durante el ciclo anual.

La abundancia de APP respondió a los periodos de circulación y estratificación, manteniendo su distribución uniforme en el primer periodo y estratificándose en el segundo periodo.

La Biomasa del APP respondió a los cambios de temperatura y oxígeno disueltos que imperan en el lago, manteniendo concentraciones más altas a finales del periodo de estratificación y en las zonas más profundas del lago.

El C.C. de HPP fue homogéneo a lo largo del ciclo anual, manteniendo concentraciones menores a las del APP.

La abundancia de HPP fue heterogénea durante todo el ciclo anual, relacionándose con los gradientes térmicos & químicos de la columna de agua.

La biomasa de HPP mostró cambios en su concentración a inicios del periodo de estratificación coincidiendo con la temperatura, los nitratos y nitritos, esta relación impera en la mayor parte del ciclo anual.

Durante el periodo de estudio el comportamiento APP y el HPP no se observó un patrón de distribución entre los dos grupos debido a sus diferentes requerimientos.

La dinámica térmica y por lo tanto los demás parámetros se ven afectados por fenómenos ambientales a nivel global, como el fenómeno del Niño, en este año, identificado a partir de los perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto, así también en los aumentos y descensos de los parámetros biológicos del bacterioplancton en el caso del lago Alchichica.

REFERENCIAS

- Abe DS, Matsamura-Tundisi T, Rocha O, Tundisi JG (2003) Denitrification and bacterial community structure in the cascade of six reservoirs on a tropical river in Brazil. *Hydrobiologia* 504: 67-76
- Adame M F, Alcocer J, Escobar E (2008) Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53: 22-31.
- Agawin N, Duarte C, Agustí S (2000) Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnol Oceanogr* 45:591-600
- Alcalá R (2004) Estudio Hidrogeológico de Alchichica, Estado de Puebla. Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura, 52p.
- Alcocer J, Lugo A, Escobar E, Sanchez M, Vilaclara G (2000) Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologie* 27: 3166-3169.
- Alcocer, J., A. Lugo, M.R. Sánchez, M. Chávez & E. Escobar. 2000. Threats to the saline lakes of the Oriental basin, Mexico, by human activities. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*
- Alcocer J, Lugo A, Escobar E, Sanches M, Vilaclara G (2002) Water column strattification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27 (5): 3166-3169.
- Alcocer J, Lugo A (2003) Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central Mexico. *Geofísica Internacional* 42(3): 523-528.
- Alcocer J, Filonov A E (2007) A note on the effects of an individual large rainfall event on saline Lake Alchichica, Mexico. *Environ. Geol.*, doi: 10.1007/s00254-007-0690-1
- Armienta M (2008) Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (178): 252,253.
- Armienta M, Sanchez M y De la Cruz-Reyna, (2008) Some hydrogeochemical fluctuations observed in México related to volcanic activity. *Appl. Geochem.* 10, 215-227.
- Arredondo F J, Borrego E, Castillo D R, Valladolid L M (1983) Batimetria y morfometría de los lagos “maars” de la cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biotica* 8 (1): 37-47.
- Arredondo F J, Vera O, Ortiz A (1984) Análisis de componentes principales y cúmulos, de datos limnológicos, en el lago Alchichica, Puebla *Biotica* 9(1): 23-39.

Arredondo F J (2002) Los Axalapascos de la cuenca de Oriental, Puebla. In De la Lanza E G, García J L (comp) AGT Editor S. A. 81-91.

Atlas Nacional de México (1990) Naturaleza vol. 2. Instituto de Geografía UNAM, México.

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.

Avit (2000) *Current Limnology*. *Limnol Oceanogr* 49: 62-123.

Baddanda B, Opasahl S, Benner R (1994). Plankton respiration and carbon flux through bacterioplankton on the Louisiana shelf. *Limnol Oceanogr* 39: 1259-1275.

Bell T, Kalff J (2001) The contribution of picophytoplankton in marine and freshwater systems of different trophic status and depth. *Limnol Oceanogr* 46:243–1248.

Beraldi-Campesi, H. 2000. Microfósiles permineralizados asociados a estromatolitos Cretácicos de Sonora. Tesis licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México.

Bernal-Brooks F W, Caron D, Sandres R (1998) The Lakes of Michoacán (Mexico): a brief history and alternative point of view. *Freshwater Forum* 10: 20-34.

Bernal-Brooks, F W, MacCrimmon H (2000) Lake Zirahuén (Mexico): A natural reservoir visually insensitive to cultural eutrophication pp. 77-88. In: Munawar M, Lawrence S.

Bernal-Brooks, FW, Gómez-Tagle, Alcocer J (2002) Lake Patzcuaro (Mexico): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. *Hydrobiologia* 467: 187-197.

Binder B, Chisholm S, Olson R, Frankel S, Worden A (1996) Dynamics of picophytoplankton, ultraphytoplankton and bacteria in the central equatorial Pacific. *Deep Sea Res* 43: 907-931.

Bird D.F., Kalff F. (1984) Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 41: 1015-1023.

Bratbak G. (1985) Bacterial biovolume and biomass estimations. *Appl Environ Microb* 49: 1488-1493.

Camacho M (1996) Análisis de nutrientes en lagos cráter, Puebla México. Tesis de licenciatura (Biología). F.E.S. Iztacala, UNAM. México.

Campbell L, Lui H, Nolla HA y Vault D (1997) Annual variability of phytoplankton and bacteria in the subtropical North Pacific Ocean at station ALOHA during the 1991-1994 ENSO event. *Deep-Sea Res. I* 44: 167-192.

Callieri C, Amicucci E, Bertoni R, Voros L (1996) Fluorometric characterization of two picocyanobacteria strains from different underwater light quality. *Int Revue ges Hydrobiol* 81:13–23.

Callieri C, Heinimaa S (1997) Microbial loop in the large subalpine lakes. *Mem ist ital. Idrobiol* 56:1-8

Callieri C, Stockner J (2002) Freshwater autotrophic picoplankton: a review. *J. Limnol.*, 61: 1-14

Callieri C, Modenutti B, Queimaliños C, Bertoni R, Balseiro E (2007) Production and biomass of Picophytoplankton and larger autotrophs in Andean ultraoligotrophic lakes: differences in light harvesting efficiency in deep layers. *Aquatic Ecology*, 41: 511-523

Callieri C (2008) Picophytoplankton in freshwater ecosystems: the importance of small-sized phototrophs. *Freshwater Reviews*, 1, doi: 10.1608/FRJ-1.1.1

Callieri C, Piscia R (2002) Photosynthetic efficiency and seasonality of autotrophic picoplankton in Lago Maggiore after its recovery. *Freshwater Biology*, 47: 941–956.

Camacho A, Miracle M R, Vicente E (2003) Which factors determine the abundance of picocyanobacteria in inland waters? A comparison among different types of lakes and ponds. *Arch. Hydrobiol.*, 3, 321–338.

Carlson CA, Ducklow HW (1996) Bacterioplankton and consumption of Dissolved organic in the Sargasso Sea. *Aquat Microb Ecol* 6:39-46.

Carlson CA, Caron DS, Ducklow HW (2001) Growth of bacterioplankton and consumption of dissolved organic in the Sargasso Sea. *Aquat Microb Ecol* 10:69-85.

Cervantes SA (1980) Manual de técnicas básicas para el análisis de ambientes acuáticos, Departamento de Biología, Sección de limnología y contaminación, Universidad Nacional Autónoma de México

Comisión Nacional del Agua (C. N. A, 2002) Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Libres–Oriental, Estado de Puebla”. Subdirección de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

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.

Cole J Michel L, Pace M, Caraco N, Gail S (1993) Bacterial biomass and cell size distributions in lakes: *Limnol Oceanogr*, 16:271- 632.

Coveny MF, Wetzel RG (1992) Effects of nutrients on specific growth rate of bacterioplankton in oligotrophic water cultures. *Appl Environ Microbiol* 58:150–156.

Church MJ, Hutchins DA y Ducklow HW (2000) Limitation of bacterial growth by dissolved organic matter and iron in the southern ocean. *Appl Environ Microb* 66:455-466.

Danielidis d, Spartinou M, Economou A (1996) limnological survey of lake Amvrakia, western Greece. *Hidrobiologia* 318: 207-218.

del Giorgio P, Gasol J (1995) Biomass distribution in freshwater plankton communities. *The American Naturalist* 146: 135-152.

de la Lanza G, García-Calderón J L (2002) Lagos y presas de México AGT editor, S.A. pp 80-105

Díaz E, Guerra C (1979) Estudio limnológico de los axalapascos del estado de Puebla. Resultados preliminares. *Memorias del Seminario de Ecología, I.P.N., La Paz, México.* 20 pp.

Descy J.-P., Hardy M.-A., Stenuite S., Pirlot S., LeporcqB., Kimirei I., Sekadande B., Mwaitega S. & Sinyenza D. (2005) Phytoplankton pigments and community composition in Lake Tanganyika. *Freshwater Biology*, 50, 668-684.

Drakare S (2002) Competition between picoplanktonic cyanobacteria and heterotrophic bacteria along crossed gradients of glucose and phosphate. *Microb. Ecol.*, 44: 327-335.

Ducklow HW, Hill SM (1985) The growth of heterotrophic bacteria in the surface waters of warm core rings. *Limnol Oceanogr* 30:239-259

Eckert W, Truper H G (1990) Microbially-related redox changes in a subtropical lake 1. In situ monitoring of the annual redox cycle. *Biogeochemistry*, 21, 1-19.

Elser JJ, Stabler LB y Hasset RP (1995) Nutrient limitation of bacterial growth and rates of bacterivory in lakes and oceans: a comparative study. *Aquat Microb Ecol* 9: 105-110.

Erikson R, Vammen K, Zelaya A, Bell R (1999) Distribution and dynamics of bacterioplankton production in a polymictic tropical lake (Lago Xolotlán, Nicaragua). *Hydrobiologia* 382, 27-39.

Escobar Briones E, Alcocer J, Cienfuegos E, Morales (1998) Carbon stable isotopes ratios of pelagic and littoral communities in Alchichica crater-lake, México. *Int. J. Salt lake Res.* 7, 345-355.

Esteves F (1988) *Fundamentos de Limnología*. Interciencia/Frinep. Río de Janeiro. 575 pp.

Fakuda R, Ogawa H, Nagata T, Koike I (1998) Direct determination of carbon and nitrogen contents of natural bacterial assemblages in marine environments. *App Environ Microb* 64: 3352-3358.

Farjalla V, Faria B, Esteves F, Bozelli R (2001), Bacterial density and biomass, and relations with abiotic factors, in 14 coastal lagoons of Rio de Janeiro state. *Ecologia brasiliensis*, 12: 65-76.

Farnworth E (1980) *Ecosistemas Frágiles: Evaluación de la investigación y aplicaciones en los neotropicos*. 1º Edición, Fondo de Cultura Económica, México, pp.116, 120-125.

Filonov A y Alcocer J (2001) Internal waves in tropical crater lake: Alchichica, Central México. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28:1857-1860.

Fuhrman J, Sleeter T, Carlson C, Proctor L (1989) Dominance of bacterial biomass in the Sargasso Sea and its ecological implications. *Marine Ecology Progress Series* 57: 207–217.

Fuhrman J, Noble R (1991) Viruses and protists cause similar bacterial mortality in coastal seawater. *Limnol Oceanogr* 40(7):1236-1242

Furtado A, Casper P, Esteves F (2001) Heterotrophic bacterial production in a Brazilian humic coastal lagoon. *Verh internat verein Limnol* 26: 123-129

García E (1988) Primeras Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. E. García, México, D.F. 217 pp.

García E (2000) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. E. García, México, D.F. 225 pp.

García E (2004) Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de geografía , Universidad Nacional Autónoma de México 5ta edición. pp30-35.

García Gil, Camacho A (2001), *Anaerolimnología*. *Limnetica* (20): 184

Gasca A (1981) Algunas notas de la génesis de los lagos cráter de la cuenca Oriental Puebla, Tlaxcala y Veracruz. *Inst. Nat. Antropol. Hist. Departamento de Prehistoria México*, sspp.

Garzón M A (1990) Caracterización Saprotrofica de los lagos cráter de la Región de los Llanos, Puebla. Tesis de licenciatura (Biología). F.E.S. Iztacala, UNAM. México. 102 pp.

Henry R (1995) The Thermal Structure of Some Lakes and Reservoirs in Brazil. En Tundisi. J.G., Bicudo, C.E.M. y Matsumura Tundisi, T. (eds.) *Limnology in Brazil*. ABC/SBL. Río de Janeiro. pp. 351-363.

Hernández-Avilés JS, Miroslav M, Alcocer J, Lopez-Trejo B y Merino-Ibarra m (2010) Prokaryotic picoplankton dynamics in a warm-monomictic saline lake: temporal and spatial variation in structure and composition. *Journal of Plankton Research* 32: 1301-1314.

Hecky R E, Kling H J (1987) Phytoplankton ecology of the great lakes in the rift valleys of Central Africa. *Archiv für Hydrobiologie. Beihefte Ergebnisse der Limnologie* 25: 197–228.

Hobbie J, Cole J (1984) Response of detrital foodweb to eutrophication. *Bull. Mar. Sci.* 35: 357-363.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears

Hutchinson E (1957) *A Treatise on Limnology Geography, physics and chemistry of lakes* Vol. 1 John Wiley & Sons, Nueva York 1015pp.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2002, Veracruz E14 – 3, Carta Hidrológica a escala 1:250,000; Veracruz, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2003, Guadalupe Victoria E14b35, Carta Topográfica a escala 1:50,000; Veracruz, INEGI.

Izaguirre I, Allende L, Marinote MC (2003) Comparative study of the planktonic communities of three lakes of contrasting trophic status at Hope Bay (Antarctic Peninsula). *Journal of Plankton Research* 25: 1079-1097.

Jenkins D (1965) A study of methods suitable for the analysis and preservation of phosphorus forms in an estuarine environment. SERL rep n° 6518, Sanitar Engineering Research Lab Univ. California Berkeley.

Kalff JA (2001) Comparison of the abilities of freshwater algae and bacteria to acquire and retain phosphorus. *Limnol Oceanogr* 25: 298-310.

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 DL, Rich JH (1997) Regulation of bacterial growth by dissolved organic carbon and temperature in the Equatorial Pacific Ocean. *Microb Ecol* 33: 11-20.

Lewis W Jr (1973) The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnology and Oceanography*, 18: 200-217.

Lewis W Jr (1976) Surface/volume ratio: Implications for phytoplankton morphology. *Science*, 192: 885-887.

Lewis W Jr (1978) A compositional, phytogeographical and elementary structural analysis of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philippines. *Journal of Ecology*, 66: 213-226.

Lewis W Jr (1986) Phytoplankton succession in Lake Valencia, Venezuela. *Hydrobiologia*, 138: 189-203.

Lewis W Jr (1996) Tropical lakes: how latitude makes a difference. Pp 43-64. En: F. Schimer y K.T. Boland (eds) *Perspective in tropical limnology*. SPB.Holanda 347 pp.

Lewis W Jr (2002) Causes for the high frequency of nitrogen limitation in tropical lakes. *Verh. International. Verein Limnol* 28: 210-213.

Lewis AJ, Palmer MA, Sturchio NC y Kemp AJ (2001) The rare earth element geochemistry of acid-sulphate and acid-sulphate-chloride geothermal systems from Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 61, 695-706.

Li WKW (1995) Composition of ultraphytoplankton in the central North Atlantic. *Mar Ecol Prog Ser* 122:1–8.

Li WKW (1998) Annual average abundance of heterotrophic bacterial and *Synechococcus* in surface ocean waters. *Limnol Oceanogr* 43: 1746-1753.

Lind OT (1985) *Handbook of common methods in Limnology*. Kendall/Hunt, Dubuque, 199 p.

Lugo A (2000) Variación espacial y temporal de la estructura de la comunidad planctónica del lago de Alchichica, Puebla, con algunos aspectos de interacciones tróficas. Facultad de Ciencias. UNAM.

Lugo A, Alcocer J, Sánchez R, Escobar E, Macek M (2000) Temporal and spatial variation of bacterioplankton abundance in tropical warm-monomictic, saline lake: Alchichica, Puebla, México. *Vehr. Internat. Verein. 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. Food Webs* 8: 235-249.

Macek M, Alcocer J, Lugo-Vazquez A (2009) Long term picoplankton dynamics in a warm-monomictic, tropical high altitude lake. *J. Limnol.*, 68, 183–192.

Margalef M (1983) *Limnología Omega* (ed.), Barcelona, España.

Márquez S M J (1991) *Probabilidad y estadística para ciencias químico-biológicas*. McGraw-Hill. México. 657 p.

Meneses L (2002) Exploración geofísica e hidrogeológica en la Laguna de Alchichica, Cuenca de Oriental, Estado de Puebla. Tesis de licenciatura (Ingeniero geofísico) Facultad de Ingeniería UNAM México 67pp.

Morris D, Zagarese H, Williamson C, Balseiro E, Hargreaves B, Modenutti B, Moeller R, Queimaliños C (1995) The attenuation of UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon. *Limnol Oceanografía* 1381-1391.

Munawar I, Malley D (eds.) *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status & Scope*. *Ecovision World Monograph Series*. Backhuys Publishers, Holanda.

Newbold J D, Elwood J W, O'Neil R V, Van Winkle W (1981) Measuring nutrient spiralling in streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38:860-863.

Oliva M, Lugo A, Alcocer J, Peralta L, Sánchez R (2001) Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia* 466: 299-306.

Ordóñez E (1905) *Los Xalapazcos del Estado de Puebla*. Instituto Geológico de México; imprenta y fototipia de la Secretaría de Fomento. Callejón de Betlemitas 8: 408.

Oren A (2000) Salts and brines. In: BA Whitton, M Potts (eds) *The ecology of Cyanobacteria*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp 281.

Paerl H, Bland P, Tucker J, Blackwell J (1983) The effects of salinity on the potential of a green algal (*Mycrocystis aeruginosa*) bloom in the Neuse river estuary, NC. NC Sea Grant report 83:1 p 84.

Padisak J, Krienitz L, Koschel R, Redoma J (1997) Deep-layer autotrophic picoplankton maximum in the oligotrophic Lake-Stecklin, Germany - Origin, activity, development and erosion. *Europ. J. Phycol* 32: 403-416.

Payne A I (1986) *The ecology of tropical lakes and rivers*. Wiley. Chichester. 301

Pernthaler J, Glöckner F, Unterholzner S, Alfreider A, Psenner R, Amann R (1998) Seasonal community and population dynamics of pelagic Bacteria and Archaea in a high mountain lake. *Appl. Environ. Microbiol* 64: 4299-4306.

Petrucio M, Barbosa F, Thomaz S (2005) Bacteria and phytoplankton production rates in eight rivers stretches of the middle Rio Doce. Hydrographic basin (Southeast Brazil). *Brazilian Archives of Biology Technology* Vol. 48, 487 – 496.

Porter K G, Feig Y S (1980) The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol Oceanogr* 25:943-948.

Pomeroy LR (1999) Food Web Connections: Link and sinks. *Microbial Biosystems: New Frontiers*. Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology. Bell CR, Brylinsky M y Johnson-Green P (Eds) Atlantic Canada Society for Microbial Ecology, Halifax Canada 1999.

Posch T, Loferer-KröbBacher 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 conversions factors. *Aqua Microbiol Ecol* 25:55-58.

Quirós R, Drago E (1985) Relaciones entre variables físicas, morfométricas y climáticas en lagos patagónicos. *RevAsoc Cienc Nat Lit* 16:181-199.

Ramírez-García P y Novelo A (1984) La vegetación acuática vascular de seis lagos cráter del estado de Puebla, México. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 46: 75-88.

Ramírez-García P y Vázquez-Gutiérrez F (1989) Contribución al estudio limnobotánico de la zona litoral de seis lagos cráter del estado de Puebla. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. Méx.* 16(1):1-16.

Rodríguez S, Siebe R, Komorpwski J (2002) The quetzalapa Pumice: a voluminous late Pleistocene rhyolite deposit in the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113: 177-212.

Romanenko V I, Kuznetsov S I (1974) Ekologia mikroorganizmosmov presnykh vodocmov. Laboratonornoe rudovod stop. Izdatel'stvo nauta. Lenningrand. 194pp

Salgado-Ugarte, IH (1992) El análisis exploratorio de datos biológicos, fundamentos y aplicaciones. ENEP Zaragoza, UNAM. Ediciones Marc. México. 243 p.

Sánchez S R (2006) Dinámica vertical y temporal de los nutrimentos (N,P,Si) en un lago monomictico cálido tropical: Alchichica, Puebla, México. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología.UNAM.

Sandoval J, Harris K (2000) Región florística del estado de Puebla, CONABIO, UNAM. México 200p.

Sarmiento H, Unrein F, Isumbisho M, Estenuite E, Gasol J, Descy J (2008) Abundance and distribution of Picoplankton in tropical oligotrophic Lake Kivu, eastern Africa. *Journal of Plankton Research* 28: 815–829.

Satho Y, Hitomi U, Takehiro T, Madoka S, Seok-kyoung S (2002) Factors controlling hypolimnetic ammonia accumulation in a lake. *Limnology* 3: 43-46.

Scavia D, Laid G (1987) Bacterioplankton in lake Michigan: dynamics, controls and significance to carbon flux. *Limnol. Oceanogr* 32:1017-1018.

Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1981) Informe Geohidrológico del Valle de Perote. Jefatura del Programa Hidráulico Residencia de Geohidrología. Delegación General del Estado de Veracruz.

Sellner K, Lacouture R, Parrish C (1988) Effects of increasing salinity on a cyanobacteria bloom in the Potomac River stuary. *J Plakcton Res* 10:49-61.

Sherr E B, Sherr B E, Albright L (1988) Bacteria. *Link os Sink Science* 235:88.

Sieburth J McN (1978) Convener's report on the informal session on biomass and productivity of microorganisms in planktonic ecosystems. *Helgol. Wiss. Meeresunters* 30: 697-704.

SMN (2005) Servicio Metereológico Nacional, México, D.F, <http://www.smn.gob.mx>.

Sondergaard M (1991) Phototrophic picoplankton in temperate lakes: seasonal abundance and importance long a trophic gradient. *Internationale Revue DerGesamten Hydrobiologie*, 76:505–522.

Stockner J (1988) Phototrophic picoplankton: an overview from marine and freshwater ecosystems. *Limnology and Oceanography* 33: 765–775.

Stockner J, Shortreed K S (1991) Autotrophic picoplankton community composition, abundance and distribution across a gradient of oligotrophic British- Columbia and Yukon-territory lakes. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie* 76: 581–601.

Stockner J (1991) Autotrophic picoplankton in freshwater ecosystems: the view from the summit. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie* 76: 483–492.

Stockner J, Callieri C, Cronberg G (2000) Picoplankton and other Non-Bloom-Forming Cyanobacteria in Lakes. In Whitton B, Potts M (eds) Kluwer Academic Publishers 197,198.

Surfer (2002) Version 8.01. Software for Surface Mapping System. Copyright © 1993 - 2002. Golden Software Inc.

Taras M J (1953) Efecto of free residual chlorinatron of nitrogen compound in wáter. *J. Amer, Water Works Asso.* 45:47.

Thalling J, Lemoalle J (1998) Ecological dynamics of tropical inland waters. Cambridge University Press, Cambridge. 441 pp.

Toolan T, Wehr JD, Findlay S (1991) Inorganic phosphorus stimulation of bacterioplankton production in a mesoeutrophic lake. *Appl Environ Microbial* 57:2074–2078.

Tundisi J (1994) Tropical South America: Present and Perspectives. En: Margalef, R. (ed.) *Limnology now: A paradigm of planetary problems.* Elsevier Science B.V. pp 553.

Verity P y Sieracki E (1993) Use of color image analysis and epifluorescence microscopy to measure plankton biomass. En *Handbook of Methods in Aquatic Microbial Ecology.* Kemp PF, Sherr BF, Sherr EB y Cole JJ (Eds) Lewis Publishers 327-338.

Vilaclara G, Chavez M, Lugo A (1993) Comparative description basic chemistry of crater—lakes in Puebla State, Mexico. *Verh. Int. Ver. Limnol* 25: 435–440.

Vuorio K, Nuottajarvi M, Salonen K, Sarvla J (2003) Spatial distribution of phytoplankton and picocyanobacteria in Lake Tanganyika in March and April 1998. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 6, 263–278.

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

Weisse T, Kenter U (1991) Ecological characteristics of autotrophic picoplankton in a prealpine lake. *Int Revue ges Hydrobiol* 76:493–504.

Weisse I, Mindl B (2002) Picocyanobacteria sensitive bioindicators of contaminant stress in a alpine lake. *Water, Air, and Soil pollution, Focus* 2: 191-210.

Wetzel R (2000) *Limnology.* CBS. Collage Publishing. Pp 753.

Wetzel R (2001) *Limnology, 3ª Edicion,* Academic Press, USA California. pp 20, 22, 150-156.

Williams PJ, Leeb J (1981) Incorporation of microheterotrophic processes into the classical parading of the planktonic food weeb. *Kiel Meeresforsch* 5: 1-28.

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

Wu Q, Zwart G, Schauer M (2006) Bacterioplankton community composition along a salinity gradient of sixteen highmountain lakes located on the Tibetan Plateau, China. *Appl. Environ. Microbiol* 72: 5478–5485.

Xing P, Hahn M, Qinglong L W (2009) Low taxon richness of bacterioplankton in high-altitude lakes of the Eastern Tibetan Plateau, with a predominance of Bacteroidetes and *Synechococcus* spp. *Appl. Environ. Microbiol* 75: 7017–7025.

ANEXO

LAGO CRÁTER ALCHICHICA, PUEBLA MÉXICO



Fig. 30.- vegetación cercana al lago Alchichica 2010.

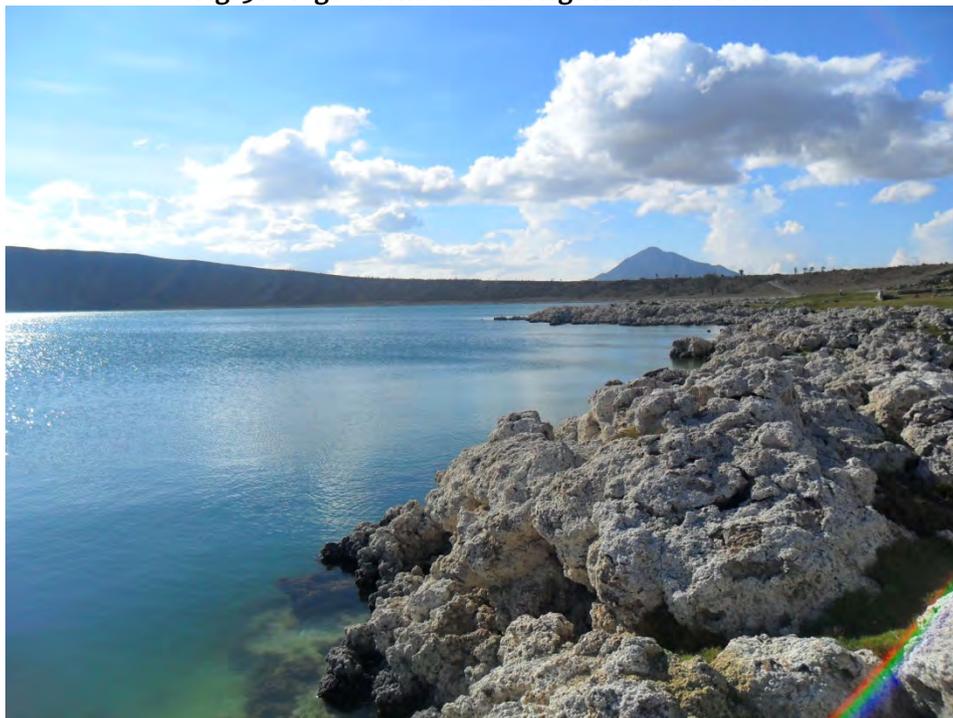


Fig. 31.- estromatolitos en el litoral del lago Alchichica 2010.



Fig. 32.- espejo de agua del lago Alchichica durante el período de circulación, enero 2010.



Fig. 33.- espejo de agua del lago Alchichica en el periodo de estratificación bien establecida, julio 2010.



Fig. 34.- espejo de agua del lago Alchichica en el periodo de estratificación tardía, noviembre 2009.



Fig. 35.- espejo de agua del lago Alchichica durante el periodo estratificación temprana abril 2010.



Fig. 36.- cresta del lago Alchichica, vista sur, 2010.

ANEXO 2



METODOLOGÍA DE CAMPO & LABORATORIO (2009–2010)

Fig. 37 y 38.- Toma de muestras de agua con la botella van Dor.



Fig. 39.- medición de parámetros insitu (temperatura, O.D., salinidad) en el lago Alchichica.



Figs. 40, 41, 42, 43.- medición insitu de alcalinidad, pH y conductividad del lago Alchichica 2009-2010.



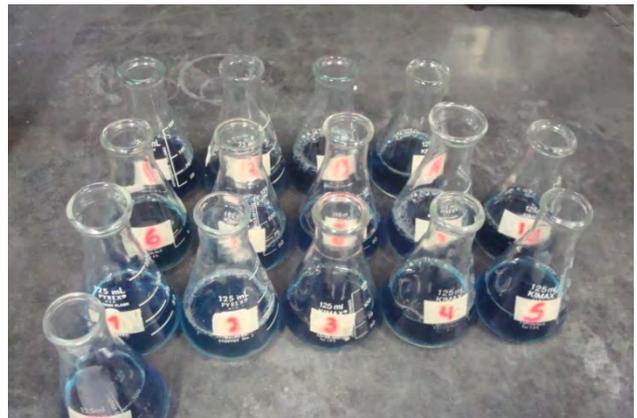
Fig. 44.- medición de oxígeno disuelto por el método de winkler, julio 2009.
Fig. 45.- medición de oxígeno disuelto por el método de Winkler, agosto 2009.



LABORATORIO: NUTRIMENTOS.



Figs. 46, 47, 48, 49, 50.- medición y filtración de muestras de agua del lago Alchichica para cuantificación de nutrientes.





Figs. 51 y 52.- Equipo de Filtración para muestras bacterianas.



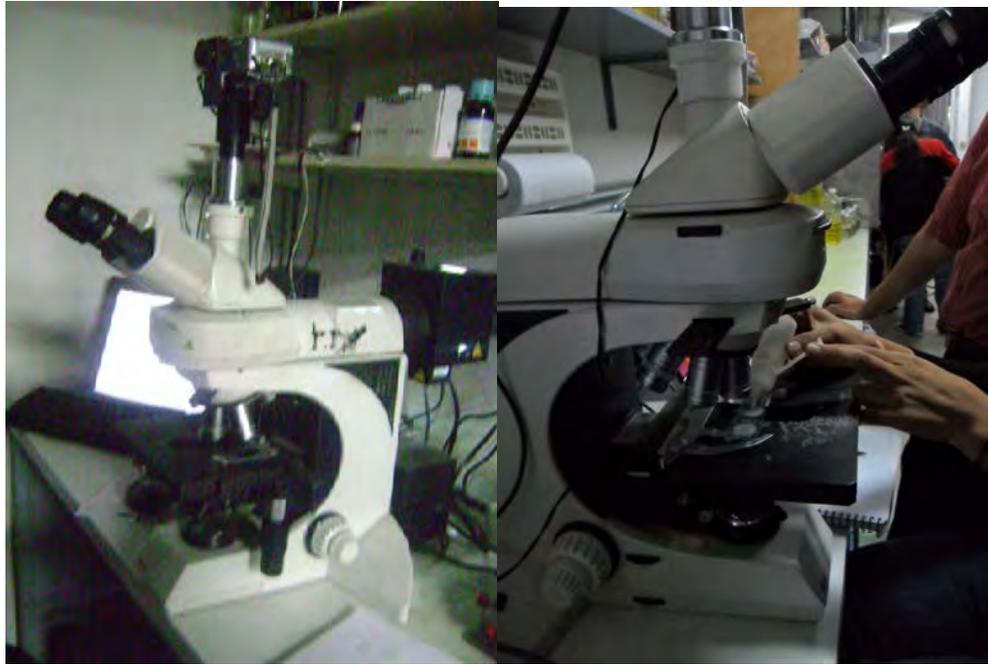


Fig. 53 y 54.- Microscopio de epifluorescencia, toma de fotografías de bacterias.

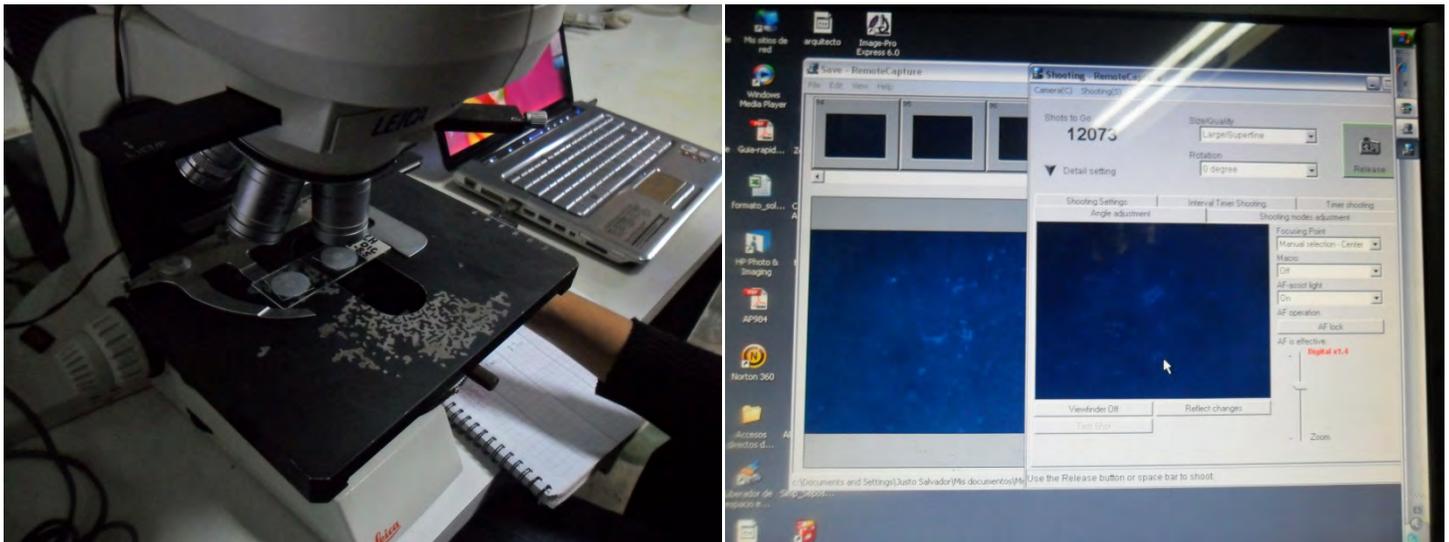


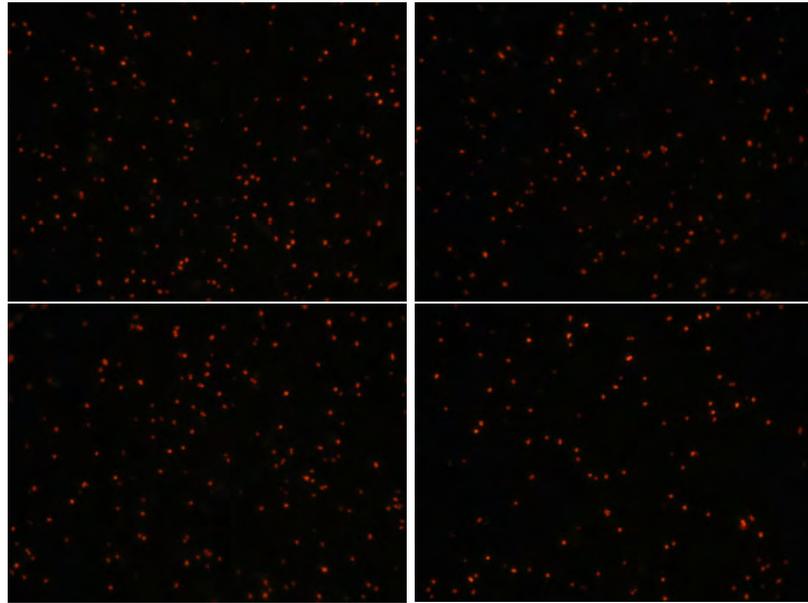
Fig. 55 y 56.- Observación en el microscopio de epifluorescencia de bacterias y fotografías obtenidas de bacterias.

ANEXO 3

IMÁGENES DE BACTERIOPLANCTON (APP & HPP)

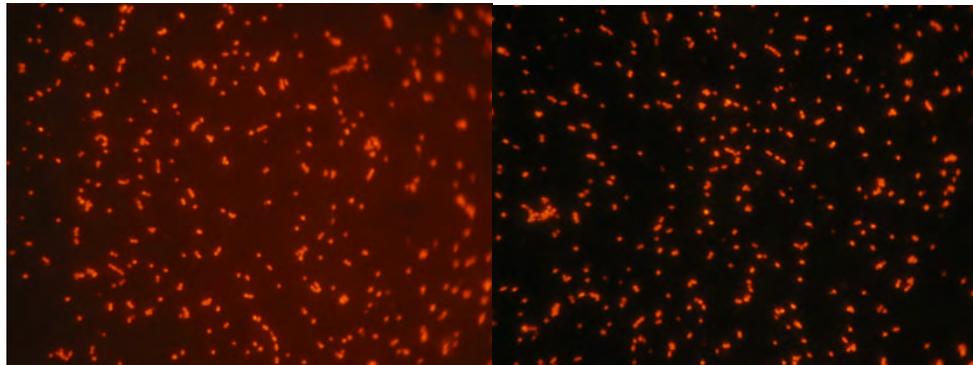
APP

PERÍODO DE CIRCULACIÓN.-

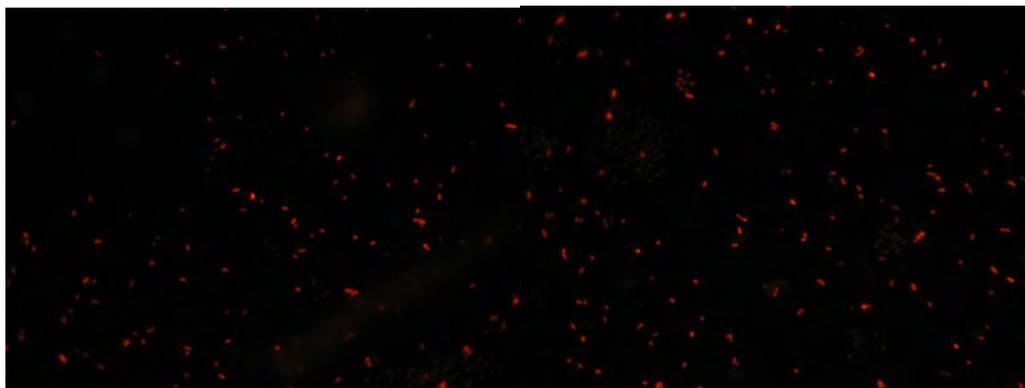


PERÍODO DE ESTRATIFICACIÓN.-

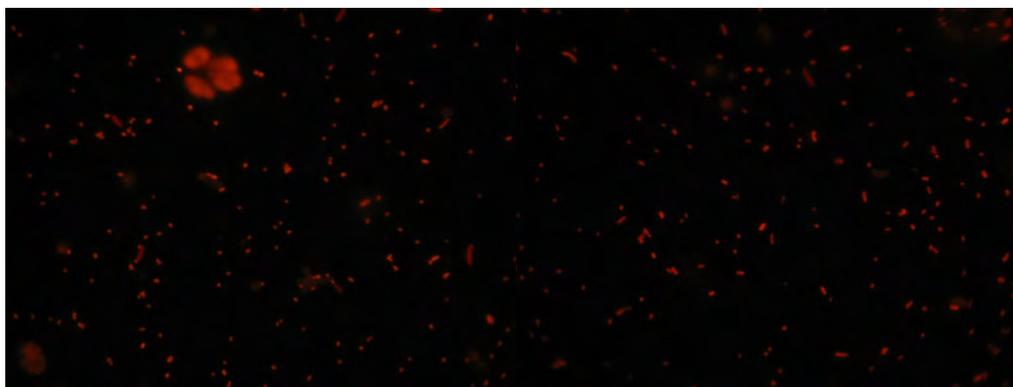
A) TEMPRANA



B) BIEN ESTABLECIDA

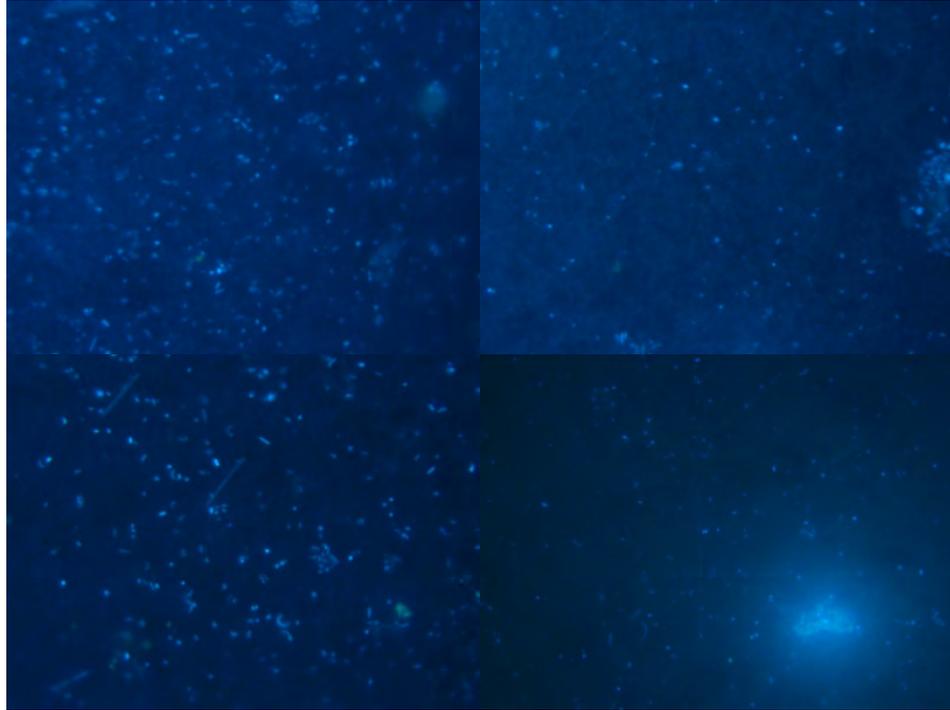


C) TARDÍA



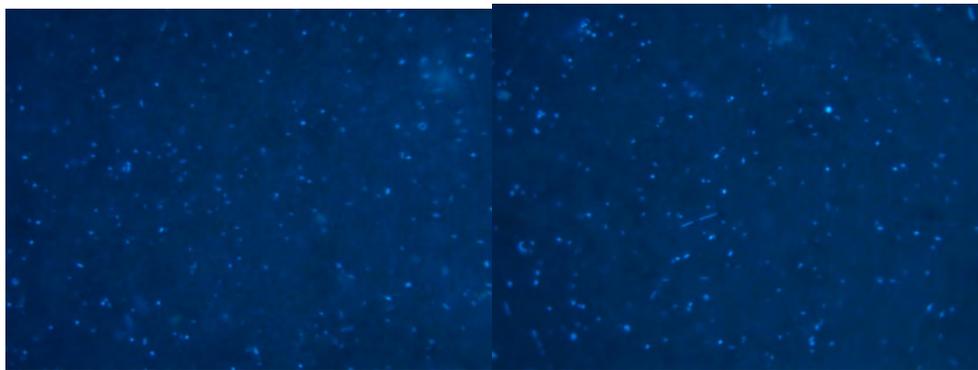
HPP

PERÍODO DE CIRCULACIÓN.—

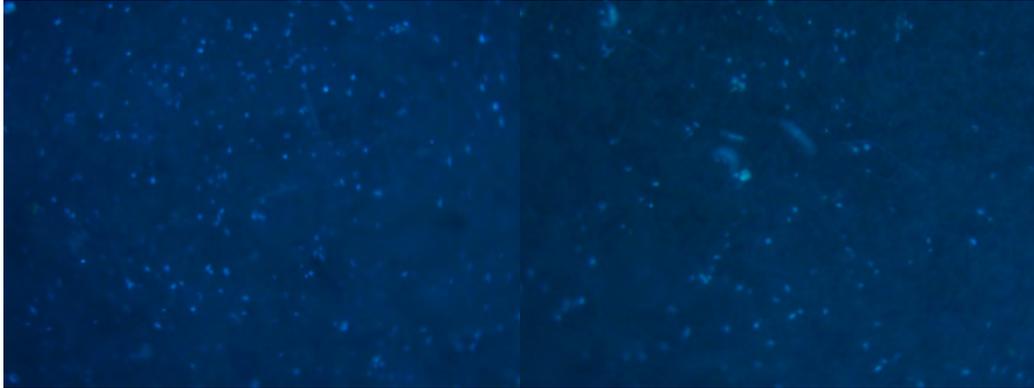


PERÍODO DE ESTRATIFICACIÓN.—

A) TEMPRANA



B) BIEN ESTABLECIDA



C) TARDÍA

