

03096



**Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología**

Universidad Nacional Autónoma de México



ESTUDIO COMPARATIVO DEL PICOFITOPLANCTON Y  
FITOPLANCTON DE TALLA MAYOR EN EL LAGO ALCHICHICA.

T E S I S

que para obtener el grado académico de

**Maestra en Ciencias del Mar y Limnología  
(Limnología)**

p r e s e n t a

GABRIELA ROSILES GONZÁLEZ

Director de Tesis : DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ

Comité tutorial: DR. MIROSLAV MACEK

DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ

DR. JAVIER ALCOCER DURAND

DR. GUSTAVO MONTEJANO ZURITA

México D. F., 2005

m343315



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.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la doctora Gloria Vilaclara Fatjó, por darme la oportunidad de ser su alumna, por brindarme su confianza, por compartir conmigo su experiencia y por contagiarme de su eterno entusiasmo y energía a lo largo del presente trabajo.

Al Dr. Miroslav Macek por darme la oportunidad de formar parte de su proyecto pese a la enorme carga de trabajo que esto representó, por su gran paciencia, valioso tiempo, consejos y principalmente por crear en mi una enorme fascinación por estos pequeños organismos.

Al Dr. Javier Carmona Jiménez por su gran disponibilidad, por guiarme hasta lograr combinar la parte taxonomía y la ecológica, dejando una gran satisfacción por el trabajo realizado.

Al Dr. Javier Alcocer Durán por enriquecer el presente trabajo con sus valiosos comentarios y por compartir conmigo su amplia experiencia en el lago de Alchichica.

Al Dr. Gustavo Montejano Zurita por sus comentarios siempre valiosos creando muchas más nuevas e interesantes preguntas.

Las facilidades del PILT (Laboratorio de Limnología Tropical, UIICSE, División de Investigación y Posgrado, FES-Iztacala), especialmente a los Dres. Javier Alcocer, Jorge Ciros y Elizabeth Mayagoitia. A Laura Peralta y a Luis Oseguera, del PILT-FES.Iztacala, por el apoyo técnico en campo.

A la Dra. Margarita Caballero, del Laboratorio de Paleolimnología en el Inst. de Geofísica, al Dr. Martín Merino, del Laboratorio de Biogeoquímica del Inst. de Ciencias del Mar y Limnología (ICMYL), por las facilidades prestadas para el uso de las instalaciones y equipo en la realización del presente trabajo.

A la M. en C. Silvia Espinosa Matías, del Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de la Fac. de Ciencias, UNAM, por su apoyo en el proceso de observación e impresión de las imágenes. A los Serveis Científico-Tècnics de la Universidad de Baercelona, España, por las fotografías obtenidas en el MEB Cambridge-Leica 360.

A la Biól. Martha Gaytán del PILT, FES-IZTACALA, y al Hidrobiólogo Sergio Castillo, del Laboratorio de Biogeoquímica, ICMYL, por el soporte técnico en el laboratorio y por las constantes muestras de interés para que el presente trabajo terminara de la mejor manera.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Dirección General de Estudios de Posgrado por el apoyo económico brindado durante el desarrollo del presente trabajo a través de la otorgación de la beca de maestría y su complemento.

A los apoyos financieros otorgados a la investigación por los proyectos DGAPA-PAPIIT IN208502, DGAPA-PAPIIT IN209102, CONACYT-41667 y UNAM-FES-IZTACALA (PAPCA).

## Dedicatoria

A mis padres por las diversas formas en las que me han demostrado a lo largo de mi vida su amor, por todo el tiempo, los sacrificios y las múltiples enseñanzas que me brindaron y por borrar de mi ser, la distancia que ahora nos separa.

A Damián por ser una gran fuente de energía en mi vida, por perdonar mis errores, por darme su ternura y por compartir sus juegos conmigo.

A Francisco por aceptarme tal como soy y compartir cada instante de su vida y apoyarme incansablemente en todas las decisiones tomadas.

A mis hermanos porque a pesar de los caminos tan diferentes que elegimos, siempre existe un lazo mucho más fuerte que nos une y nos hace alegrarnos de los logros personales que tiene cada uno.

A todos mis amigos, los que seguimos en este camino y a los que marcharon por lugares desconocidos aún por nosotros, sin enumerar porque en mi mente no hay primeros, ni últimos, ni tampoco están en medio, el recuerdo de la gran amistad brindada por cada uno viene a mi mente al escribir estas palabras.

## CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Problemática taxonómica.....  | 4         |
| <b>2. ANTECEDENTES.....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>3. PREGUNTAS Y HIPÓTESIS.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>4. OBJETIVOS.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>5. ÁREA DE ESTUDIO.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>6. METODOLOGÍA.....</b>  | <b>18</b> |
| <b>7. RESULTADOS.....</b>   | <b>23</b> |
| 7.1 Comportamiento de los descriptores físicos y químicos.....                                  | 23        |
| i) Temperatura.....   | 23        |
| ii) Oxígeno disuelto.....   | 25        |
| iii) Nutrientes.....  | 27        |
| iv) Radiación fotosintéticamente activa (PAR) y zona fótica.....                                | 32        |
| v) pH, conductividad y sólidos disueltos totales.....   | 32        |
| 7.2 Comportamiento de los descriptores fitoplanctónicos.....                                    | 33        |
| i) Composición de la comunidad fitoplanctónica.....   | 33        |
| ii) Descripción de especies.....  | 37        |
| iii) Variación temporal y vertical de la densidad fitoplanctónica<br>(Utermöhl).....            | 52        |
| iv) Variación temporal y vertical del biovolumen fitoplanctónico.....                           | 55        |
| v) Variación temporal y vertical de la densidad del picofitoplancton<br>(epifluorescencia)..... | 58        |
| vi) Variación temporal y vertical de la clorofila <i>a</i> .....                                | 60        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>8. DISCUSIÓN.....</b>  | <b>63</b> |
| 8.1 Comportamiento de los descriptores fisicoquímicos en columna..... | 63        |
| 8.2 Comportamiento de los descriptores fitoplanctónicos.....          | 67        |
| <b>9. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>78</b> |
| <b>10. PERSPECTIVAS.....</b>  | <b>81</b> |
| <b>11. LITERATURA CITADA.....</b>                                     | <b>82</b> |
| <b>12. APÉNDICE I.....</b>  | <b>95</b> |
| <b>13. LÁMINAS.....</b>   | <b>96</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y LÁMINAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Ubicación geográfica de la Cuenca de Oriental y morfometría del Lago Alchichica, Puebla.....  | 13 |
| Figura 2. Modelo hidrogeológico (Meneses 2002).....   | 15 |
| Figura 3. Mapa de elevaciones indicando el posible flujo del agua subterránea (Meneses 2002).....   | 15 |
| Figura 4. Perfiles verticales de la temperatura (° C, arriba) y diagrama profundidad-tiempo de isotermas (° C, abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.....  | 24 |
| Figura 5. Perfiles verticales de la concentración de oxígeno disuelto (mg L <sup>-1</sup> , arriba) y diagrama profundidad-tiempo de oxígeno disuelto (mg L <sup>-1</sup> , abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004..... | 26 |
| Figura 6. Diagrama profundidad-tiempo de isoplefas PRS (µM, arriba) y DIN (µM, abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.....  | 28 |
| Figura 7. Diagrama profundidad-tiempo de isoplefas N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µM, arriba) y N-NH <sub>3</sub> (µM, abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.....   | 29 |
| Figura 8. Diagrama profundidad-tiempo de isoplefas SiO <sub>2</sub> (µM) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.....   | 30 |
| Figura 9. Variación vertical de la relación DIN/PRS= 16, metalimnion, oxiclina y 1% PAR en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.....  | 31 |
| Figura 10. Número de especies por división.....   | 33 |
| Figura 11. Variación vertical de la densidad del fitoplancton por fracción (%), metalimnion, oxiclina y 1% PAR, durante el lapso 2003/2004.....   | 53 |
| Figura 12. Variación vertical de la densidad (cél mL <sup>-1</sup> ) fitoplanctónica por fracción (valor absoluto), metalimnion, oxiclina y 1 % PAR, durante el lapso 2003/2004.....  | 54 |
| Figura 13. Variación vertical del biovolumen por fracción (%), metalimnion, oxiclina y 1 % PAR, durante el lapso 2003/2004.....   | 56 |
| Figura 14. Variación vertical del biovolumen (µm <sup>3</sup> mL <sup>-1</sup> ) por fracción (valor absoluto), metalimnion, oxiclina y 1 % PAR, durante el lapso 2003/2004.....  | 57 |
| Figura 15. Máximas concentraciones de biovolumen (mayo, septiembre, octubre y noviembre) y su relación con la concentración de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....   | 58 |
| Figura 16. Diagrama profundidad-tiempo de la densidad (cél mL <sup>-1</sup> ) de células menores a 2 µm, obtenida por epifluorescencia.....   | 59 |



Figura 17. Variación vertical de la concentración de clorofila *a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) por fracción, metalimnion, oxiclina y 1 % PAR, durante el lapso 2003/2004.....62

## TABLAS

Tabla 1. Composición iónica del lago Alchichica.....17

Tabla 2. Nutrientes.....27

Tabla 3. Relación DIN/PRS: >16, limitación por fósforo (P); < 16 limitación por nitrógeno (N); la limitación de ambos nutrientes en el mismo estrato se muestra como N/P.....30

Tabla 4. Parámetros conservativos.....32

Tabla 5. Especies fitoplanctónicas en el lago Alchichica; se muestra su presencia en el tiempo, superficie, metalimnion y hipolimnion.....34

Tabla 6. Características del picofitoplancton individual y picofitoplancton colonial.....36

## LÁMINAS

Lámina 1. Figura 1 a-b) *Synechococcus nidulans*. Figura 2 a-b) *Synechocystis* sp. Figura 3 a-b) *Cyanodictyon* cf. *planctonicum*.....96

Lámina 2. Figura 4 a-f) *Epigloeosphaera* cf. *glebulenta*.....97

Lámina 3. Figura 5 a-f) *Lemmermanniella* cf. *flexa*.....98

Lámina 4. Figura 6 a-b) *Eucapsis* cf. *starmachii*. Figura 7 a-b) *Nodularia* cf. *spumigena*. Figura 8 a) *Ochromonas* sp. Figura 9 a) *Cryptomonas* sp.....99

Lámina 5. Figura 10 a-f) *Cyclotella* sp.....100

Lámina 6. Figura 11 a-f) *Cyclotella choctawhatcheeana*.....101

Lámina 7. Figura 12 a-d) *Chaetoceros elmorei*.....102

Lámina 8. Figura 13 a) *Monoraphidium minutum*. Figura 14 a) *M. dybowski*. Figura 15 a-b) *Oocystis parva*. Figura 16 a) *O. submarina*. Figura 17 a) Chlorococcal indeterminada.....103

## RESUMEN

En relación con los descriptores limnológicos que más fuertemente se relacionan con la distribución del fitoplancton, el gradiente térmico en la columna de agua de Alchichica fue suficientemente intenso como para establecer una termoclina estable entre abril de 2003 y principios de diciembre, para romperse a finales de este mes; para enero de 2004 ya se observó una mezcla completa. Aunque este lago se considera oligo-mesotrófico, el oxígeno disuelto (OD) presentó una distribución clinograda vertical durante la estratificación, con anoxia hipolimnética desde mayo (de los 57 m al fondo) hasta noviembre (de los 34 m hasta el fondo), lo cual es característico de lagos tropicales con un cociente area/profundidad relativamente pequeño y periodos de estratificación prolongados, como es el caso de Alchichica.

La distribución de nutrimentos en la columna de agua varió siguiendo los cambios del OD y del fitoplancton: concentraciones epilimnéticas bajas y hipolimnéticas altas durante la estratificación, y en general bajas concentraciones y homogéneas durante la mezcla. El nitrógeno (N) fue el nutriente limitante principal durante el periodo de estudio.

Las concentraciones de clorofila *a* epi-metalimnética fue dominada por la fracción fitoplanctónica mayor de 2 $\mu$ m, excepto en abril en el metalimnion, donde la clorofila *a* <2  $\mu$ m fue de 2  $\mu$ g L<sup>-1</sup>.

El biovolumen fitoplanctónico ( $\mu$ m<sup>3</sup> mL<sup>-1</sup>) fue dominado por el nano- y el microfitoplancton, aunque la densidad (en cél mL<sup>-1</sup>) fue dominada por el picofitoplancton colonial (PCcy). Las especies importantes de nano- y microfitoplancton fueron *Nodularia* cf. *spumigena*, *Oocystis parva*, *Cyclotella* sp., *C. choctawhatcheeana* y *Chaetoceros elmorei*. Las especies importantes del PCcy fueron *Epigloeosphaera* cf. *glebulenta*, *Cyanodictyon* cf. *planctonicum*, *Lemmermanniella* cf. *flexa* y *Eucapsis* cf. *starmachii*. La densidad del picofitoplancton individual (Pcy *Synechococcus nidulans* y *Synechocystis* sp.), epilimético al principio (abril) y al final (diciembre) de la estratificación fue alta (promedio de 10<sup>5</sup> cél mL<sup>-1</sup>) en comparación con valores de otros lagos oligotróficos (10<sup>4</sup> cél mL<sup>-1</sup>). Durante el resto del periodo de estratificación, los máximos de Pcy se encontraron a nivel del metalimnion en la base de la zona fótica, lo cual se atribuye a su pequeño tamaño que limita la tasa de sedimentación y promueve que el Pcy se recicle *in situ*.

El Pcy fue importante durante la mezcla y al principio de la estratificación; *Eucapsis* cf. *starmachii* (con células dentro de un mucílago) dominó el CPcy durante las fases intermedias de estratificación, mientras que *L.* cf. *flexa* y *E.* cf. *glebulenta* (con células en el exterior del mucílago) lo dominaron al final de la estratificación. Se deduce que el CPcy está probablemente mejor adaptado a desarrollarse bajo limitación de luz, aprovechando los nutrimentos del metalimnion.

## 1. Introducción

El fitoplancton, conjunto de organismos que comparten niveles de organización y funciones autotróficas similares dentro de la zona fótica (Margalef 1983), se encuentra constituido por diferentes algas microscópicas unicelulares o coloniales, que generan oxígeno y materia orgánica (productores primarios) a partir de carbón inorgánico y nutrientes. El fitoplancton juega una parte importante en los ciclos del nitrógeno, fósforo, carbono y azufre en el ambiente acuático (Wetzel 2001). Para facilitar su estudio, ha sido clasificado en diversas formas; una de ellas se basa en el tamaño celular: micro-fitoplancton (200-20  $\mu\text{m}$ ), nano-fitoplancton (20-2  $\mu\text{m}$ ) y picofitoplancton (2-0.2  $\mu\text{m}$ ) (Sieburth *et al.* 1978, Lampert y Sommer 1997). En algunos trabajos, la clasificación por tamaños ha mostrado ser un método efectivo para el estudio de la dinámica poblacional del fitoplancton en respuesta a su ambiente, así como los flujos de energía y materia a través de las redes tróficas en ambientes acuáticos (Pick y Caron 1987, Rojo y Rodríguez 1994, Caroppo 2000, Han y Furuya 2000, Ansotegui *et al.* 2003).

A partir de los 70's se menciona cada vez más la importancia a la fracción menor a 2-3  $\mu\text{m}$ , gracias al desarrollo y uso de mejores técnicas de cuantificación (ej. microscopio de epifluorescencia, Schallenberg y Burns 2001, Uysal 2001, Callieri y Piscia 2002, Malinsky-Rushansky *et al.* 2002, Camacho *et al.* 2003, Crosbie *et al.* 2003, Drakare *et al.* 2003) y al modelo teórico ("circuito microbiano") propuesto por Azam *et al.* (1983) del funcionamiento de la comunidad planctónica marina, en el cual destacan la importancia de los microorganismos más pequeños dentro de la transmisión de materia y energía a través de la red trófica planctónica.

Como ya se ha mencionado, el término picoplancton fue propuesto por Sieburth *et al.* (1978) para nombrar organismos celulares planctónicos sencillos, con un intervalo de tamaño de 0.2 –2.0  $\mu\text{m}$ , estableciendo dos categorías funcionales: autótrofos (APP, por sus siglas en inglés "Autotrophic Picoplankton") y los heterótrofos (HPP, por sus siglas en inglés "Heterotrophic Picoplankton"), basadas en la presencia o ausencia de pigmentos fotosintéticos. En la mayoría de los lagos, el picoplancton autótrofo está compuesto principalmente por cianoprocariontes cocoides, la mayoría del género *Synechococcus* (Stockner y Antia 1986), aunque se han observado células eucariotas (la mayoría flageladas) que también contribuyen significativamente a la biomasa picoplanctónica (Fahnenstiel *et al.* 1986, Ansotegui *et al.* 2003).

Stockner y Antia (1986) realizaron una revisión de las observaciones directas y experimentos acerca del picofitoplancton, en la que se demuestra una contribución importante en la biomasa del fitoplancton y producción primaria en ambientes oligotróficos, mientras que en aguas con altas concentraciones de nutrientes la biomasa autotrófica y producción estará dada principalmente por el nano- y microfitoplancton (Kalff y Watson 1986, Munawar y Munawar 1986, Petrova 1986). En otras palabras, la distribución de tamaños de la comunidad fitoplanctónica estará influenciada por el estado trófico del lago.

El dominio del picofitoplancton sobre el resto del fitoplancton en condiciones de limitación de nutrientes se ha explicado por diversos motivos: una elevada eficiencia en tomar los nutrientes a bajas concentraciones, una pérdida reducida por sedimentación y su alta tasa de crecimiento (a 20° C, de aproximadamente 2.5 d<sup>-1</sup>), todo esto como consecuencia del diminuto tamaño de las células (Reynolds 1984, Raven 1986, Lampert y Sommer 1997). De acuerdo con Raven (1986), el hundimiento predecible será de sólo 2.6 mm día<sup>-1</sup> con un diámetro celular de 0.5 µm y puede, por lo tanto, tomar años a través de una zona eufótica estratificada. La temperatura juega un papel importante en la dinámica del picofitoplancton a escalas temporales, mientras que la luz regula principalmente su distribución vertical (Weisse 1993).

Los nutrientes y la disponibilidad de luz, acoplados a la composición y abundancia del zooplancton, se consideran generalmente los factores principales que influyen en la distribución de tamaños del fitoplancton en los ambientes de agua dulce, atribuyéndose mayor importancia a uno o a varios de estos factores (Reynolds 1984, Harris 1986, Wetzel 2001). En general, se señala que la disponibilidad de nutrientes es el factor principal que influye en la estructuración de la población fitoplanctónica en ambientes oligotróficos. Por tales motivos, se espera una mayor importancia del picofitoplancton en este tipo de aguas.

La disponibilidad de nutrientes y, por lo tanto, la estructuración del fitoplancton, se encuentran en estrecha relación con la estructura térmica del lago (Lewis 1973, 1983). La estructura térmica se determina directamente por el clima local en relación con las propiedades del agua, proporcionando la estratificación o modelos de circulación de las masas de agua (Margalef 1983, Wetzel 2001). Con base en la estructura térmica, los lagos se han clasificado en una serie de tipos. Esta ordenación se ha basado principalmente en los modelos de circulación y se refieren a lagos con profundidad suficiente para formar un hipolimnion (Margalef 1983,

Wetzel 2001). Lewis (1973) propone una clasificación generalizada para lagos tropicales (con profundidad suficiente) como monomícticos cálidos. Tal patrón de estratificación y circulación es común en lagos de áreas montañosas de latitudes subtropicales y tropicales. Este tipo de lagos se caracteriza porque se mezcla durante la fase más fría, se estratifica el resto del año y porque la temperatura del agua nunca es menor en superficie que en el fondo –dado que no se forma hielo-, e incluso no llega a descender por debajo del valor de máxima densidad ( $\approx 4^\circ \text{C}$ , Margalef 1983, Wetzel 2001).

En el caso del lago de Alchichica, se ha registrado que la temperatura mínima es de  $15^\circ \text{C}$  en la superficie (medida a 10 m) para los meses más fríos (enero y febrero); es decir, no se llega nunca a la formación de hielo (Alcocer *et al.* 2000) y el patrón de circulación-estratificación del lago coincide con la descrita por Lewis (1973). Por tales razones, Alcocer *et al.* (2000) y Lugo (2000) validan esta generalización en el Lago Alchichica, refiriéndolo como un lago monomíctico cálido, con un patrón recurrente inducido por las condiciones regulares meteorológicas de la región.

Las implicaciones directas de la estratificación térmica en Alchichica (Alcocer *et al.* 2000) son un florecimiento de cianoprocariotas Nostocales (*Nodularia cf. spumigena*) en los primeros estadios de la estratificación, un abatimiento inicial de las concentraciones de oxígeno disuelto en el hipolimnion, seguido por anoxia en el fondo, agotamiento de nutrimentos en el epilimnion y su acumulación en el hipolimnion.

El lago de Alchichica es salino ( $\approx 8 \text{‰}$ , Vilaclara *et al.* 1993) alimentado por una red subterránea de agua (Meneses 2002); este tipo de lagos son frecuentes en las regiones áridas y semiáridas de México (Lugo *et al.* 199). Se le ha dado poca importancia a estos lagos debido a que no pueden ser aprovechados para la obtención de agua potable ni para riego; sin embargo, su relevancia radica en ser hábitat importante de especies endémicas, sitios de anidación, alimentación y refugio para una gran variedad de aves acuáticas; además, presentan un amplio valor cultural, estético, recreativo e importancia económica (Lugo *et al.* 1994).

Dadas estas referencias, observamos que las relaciones generadas entre la estructura térmica, la dinámica y concentración de nutrimentos (nitrógeno, fósforo y silicio) y el estado trófico del lago, pueden llegar a determinar la distribución de tallas del fitoplancton. Aunque en

Alchichica se ha documentado bien la sucesión estacional del fitoplancton grande (nano- y microfitoplancton, Lugo 2000, Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001), existe menor información acerca de la contribución total de la biomasa del picofitoplancton (Sánchez 2001) y se carece de estudios sobre la composición taxonómica de las cianoprocariontas fitoplanctónicas pertenecientes a la clase de pequeño tamaño.

El presente estudio aporta conocimiento acerca de cuál es la contribución por porcentaje de cada grupo fitoplanctónico en biovolumen y clorofila *a* durante la época de estratificación y parte de la de mezcla; asimismo, se generan datos acerca de la composición picofitoplanctónica de las pequeñas algas verde-azules. Dichos aspectos se observan en el marco de referencia del desarrollo de la estratificación y cambios de oxígeno asociados, los cuales son de importancia capital para entender la sucesión de las diversas fracciones fitoplanctónicas (Lewis 1973, 1983). El estudio se ha realizado en los niveles de análisis taxonómico y ecológico de dichas fracciones.

### **1.1 Problemática taxonómica**

Para la determinación taxonómica de los taxa fitoplanctónicos observados en Alchichica se han seguido criterios de autores diversos según los grupos. En general, la taxonomía empleada en este texto se basa en una cuidadosa descripción morfológica, que –a la postre- es la más útil cuando se realizan trabajos ecológicos que implican la revisión y reconocimiento relativamente rápidos de muestras de fitoplancton. Cuando el análisis es estrictamente taxonómico, idealmente se deberían de complementar los criterios morfológicos -que permiten un rápido reconocimiento de los morfotipos-, con criterios moleculares, citomorfológicos, ecofisiológicos y bioquímicos -que implican generar cultivos axénicos de cada morfotipo- (Kooistra *et al.* 2004, Callieri y Stockner 2002, Komárek 1996). Cuando estos análisis se combinan adecuadamente y se logran cultivos de morfotipos diferentes que en la taxonomía tradicional se consideran variaciones de la misma especie, a menudo se generan nuevas especies con genotipos diferentes y fenotipos con algún rasgo consistentemente reconocible –por ejemplo- en microscopía electrónica. A estas especies “genéticas” escondidas dentro de especies morfológicas se las denomina “crípticas” en el grupo de las diatomeas (Kooistra *et al.* 2004) y “gemelas” en el zooplancton (Lampert y Sommer 1997). Los adeptos a estas dos líneas de enfoque de la taxonomía a menudo chocan entre sí: desde el punto de vista de definición biológica de especie cuando no hay reproducción sexual demostrada, es más correcto definir especies desde el punto de vista de caracterizar genotipos a través de

segmentos bien diferenciados (16S rRNA, comúnmente usado en algas, Crosbie *et al.* 2003); desde el punto de vista ecológico, también tendría sentido la detección de genotipos diferentes adaptados a condiciones ambientales variables (Kooistra *et al.* 2004, Crosbie *et al.* 2003), pero éste es un trabajo excesivamente laborioso para un análisis ecológico tradicional, el cual requiere de la posibilidad de reconocimiento morfológico fácil. Por ello, en el presente estudio se ha optado por seguir los criterios taxonómicos morfológicos en todos los grupos, con la limitante obvia de que la mayor parte de la bibliografía consultada es generada en zonas templadas, y no tropicales, donde las condiciones ambientales pueden llegar a ser muy diferentes, a este respecto Comas (1996) y Crosbie *et al.* (2003) mediante revisiones simplemente morfológicas o por análisis de secuencia de 16S rRNA, encuentran que especies algales registradas con una amplia distribución en realidad se encuentran restringidas a zonas delimitadas geográficamente, con algunas modificaciones morfológicas cuya posición taxonómica aun no se encuentra definida.

## 2. Antecedentes

Los diversos procesos geológicos, tales como derrames volcánicos, acumulación de rocas y movimientos tectónicos, han influido fuertemente en la fisiografía de la Cuenca Oriental (Atlas Nacional de México 1990), dando origen -por explosiones volcánicas y rupturas del manto freático- a la formación de lagos tipos maar. Los lagos cráter tipo maar se clasifican tomando en cuenta, además de su origen, sus características morfométricas, morfológicas y batimétricas (Ordóñez 1906, Gasca 1981, Arredondo *et al.* 1983). Estos lagos se alimentan de agua por una red subterránea, y en el caso particular del lago maar Alchichica, se ha observado una alta permeabilidad en los materiales que constituyen la cuenca que lo rodea (Reyes 1979, Gasca 1981, Meneses 2002).

Con base en su edafología, clima y vegetación (Fuentes 1972), los lagos cráter han sido agrupados en dos zonas: los Llanos de San Andrés y los de San Juan. Pese a las ligeras diferencias climáticas entre los dos llanos -con climas de semiáridos a templados-, los lagos de la Cuenca Oriental presentan marcadas diferencias en su composición iónica, incluso en aquellos separados entre sí pocos kilómetros (Arredondo *et al.* 1984, Ramírez-García y Novelo 1984, Ramírez-García y Vázquez-Gutiérrez 1989, Vilaclara *et al.* 1993).

Con respecto al patrón de circulación-estratificación, en el lago Alchichica, Arredondo *et al.* (1984) reportan una pequeña diferencia de temperaturas entre la superficie y el fondo, concluyendo erróneamente que Alchichica es un lago polimíctico cálido, sin estratificación verdadera y con una mezcla frecuente mucho más marcada en invierno. Trabajos posteriores, demostraron que el lago muestra un patrón de circulación-estratificación recurrente referido como monomíctico cálido (Alcocer *et al.* 2000, Lugo 2000).

Por otra parte, Alcocer y Lugo (2003) señalan que los efectos del Niño pueden implicar cambios en el patrón térmico del lago y, por lo tanto, en las características físicas, químicas y biológicas. Caballero *et al.* (2003) evalúan los sedimentos del lago intentando demostrar estas variaciones climáticas a largo plazo, sin logros importantes debido a las características particulares del lago, que no favorecen la preservación de los indicadores paleoambientales estudiados.



Las características ambientales tan peculiares de estos lagos les otorgan gran importancia biológica (Lugo *et al.* 1994); a este respecto, Alchichica ha recibido mayor atención, con estudios taxonómicos que destacan la presencia de especies nuevas y endémicas -principalmente en peces, con una nueva especie de aterínido nombrada como *Poblana alchichica alchichica* De Buen (De Buen 1945)-; también anfibios *Ambystoma subsalsum* Taylor (Taylor 1943), redescrito posteriormente con el nombre de *A. taylorii* (Taylor) Brandon (Brandon *et al.* 1981), y -dentro de los microcrustáceos- el copépodo calanioideo *Leptodiptomus novamexicanus* Harrick -nombre actual de *Diptomus (Leptodiptomus) novamexicanus* Light- (Osorio-Tafall 1942, Wilson y Yeatman 1959 en: Lugo 2000, Lugo *et al.* 1999).

El resto de la fauna acuática (macroinvertebrados bentónicos, rotíferos, ciliados planctónicos y protozoos litorales), así como la flora (fitoplancton y vegetación acuática vascular) y bacterias han recibido principal atención en el estudio de su composición y dinámica espacio temporal. Los estudios realizados sobre los organismos que habitan el lago señalan que la salinidad aparentemente tiene un efecto negativo en la riqueza específica, principalmente para rotíferos, copépodos y flora (Ramírez-García y Novelo 1984, Ramírez-García y Vázquez-Gutiérrez 1989, Garzón 1990, Lugo 1993, Úbeda y Estrada 1994, Alcocer 1995, Montoya y Peralta 1995, Tavera y Komárek 1996, Pérez 1999, Lugo 2000, Lugo *et al.* 2000, Hernández 2001, Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001, Tirado 2001, Macek y Martínez 2002, Martínez 2002, Macek *et al.* 2004, Martínez *et al.* 2004).

Otros estudios taxonómicos relevantes destacan la presencia de seis nuevas especies de cianoprocaritas encontradas en los estromatolitos de la región litoral del lago y especies epifitas de *Cladophora* (especie béntica), con una ecología muy particular: *Chamaesiphon halophilus* Tavera et Komarek, *Entophysalis atrata* Tavera et Komarek, *E. lithophila* Tavera et Komarek, *Heteroleibleinia profunda* Tavera et Komarek, *Mantellum rubrum* Tavera et Komarek y *Xenococcus candelariae* Tavera et Komarek (Tavera y Komárek 1996). Por otra parte, Komárek y Komárková-Legnerová (2002) realizaron una descripción taxonómica general de las cianoprocaritas planctónicas para lagos centrales de México, enfatizando la escasez de trabajos taxonómicos en regiones tropicales.

Desde el punto de vista saprobio y trófico, el lago Alchichica ha sido caracterizado como oligosaprobio y oligotrófico respectivamente, con cortos periodos de mesotrofia (Lugo *et al.*

1998, Garzón 1990, Lugo 2000, Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001, Sánchez 2001). Sin embargo, Pérez (1999) señala que las concentraciones bacterianas del lago corresponden a las encontradas en condiciones de ultraoligotrofia; posteriormente y con base en las concentraciones bacterianas, Macek y Martínez (2002), Martínez (2002) y Martínez *et al.* (2004) reportan densidades típicas para condiciones de mesotrofia-eutrofia. Asimismo, Martínez (2002) reporta el ciclo del picoplancton autotrófico con máximos al fin del periodo de mezcla del lago y durante la estratificación temprana.

Tomando como base la composición de organismos en el lago, así como la condición predominante de oligotrofia, se pensó que el circuito microbiano jugaba un papel importante en la dinámica del plancton; posteriormente, esta idea quedó descartada en el trabajo de Lugo (2000), reforzándose la vía directa de consumo fitoplancton-zooplancton como la de mayor importancia.

La relevancia del periodo de circulación-estratificación en la dinámica del plancton, oxígeno y nutrimentos ha sido resaltada en varios trabajos (Alcocer *et al.* 2000, Lugo 2000, Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001, Sánchez 2001, Martínez 2002). En el caso particular del fitoplancton y sus descriptores (clorofila *a*), se ha observado un patrón característico acorde con el periodo de estratificación y circulación (Lugo 2000, Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001, Sánchez 2001, Martínez 2002). La dinámica estacional del fitoplancton está influenciada por la aparición del breve florecimiento de *Nodularia cf. spumigena*, el cual se relaciona con el régimen térmico del lago; las especies dominantes durante el periodo de transición mezcla-estratificación fueron las cianoprocariontes fijadoras de nitrógeno, durante la estratificación establecida dominan las cianoprocariontes y clorofitas unicelulares y en la circulación dominan las diatomeas centrales, cianoprocariontes y clorofitas unicelulares. Destaca el dominio numérico, durante todo el periodo, de las clorofitas unicelulares-coloniales y cianoprocariontes unicelulares, sobre las diatomeas (Lugo 2000, Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001).

En estudios posteriores, Sánchez (2001) evalúa la contribución a la biomasa total de dos fracciones fitoplanctónicas (mayor y menor a 2  $\mu\text{m}$ ) con base en la clorofila *a*. Concluye que la fracción dominante (70%) fue la mayor a 2  $\mu\text{m}$ , que correspondería sobre todo a las diatomeas y cianoprocariontes filamentosas, datos que no concuerdan con lo reportado anteriormente (Lugo 2000, Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001) de un dominio numérico de clorofitas y cianoprocariontes unicelulares sobre las diatomeas. Registra, además, la presencia de altas concentraciones de

clorofila *a* durante el periodo de mezcla, al inicio de la estratificación y durante la fase de estratificación avanzada (en este último caso, DCM, “deep chlorophyll maximum”), especulando una asociación con florecimientos de diatomeas en mezcla, de cianoprocariotas filamentosas al inicio de la estratificación y al conjunto de especies fitoplanctónicas durante el DCM.

### 3. Preguntas y Hipótesis

1.- ¿Determina el régimen de estratificación/mezcla la distribución disímil en la columna de agua del pico-, nano- y microfitoplancton?

En el Lago Alchichica, la estructura del fitoplancton está determinada por la evolución de la estratificación/mezcla y sus implicaciones (Lugo 2000 y Oliva *et al.* 2001), y se espera encontrar una distribución diferente para el nano-, micro- y picofitoplancton.

2.- Si el picofitoplancton llega a dominar en Alchichica, ¿en qué época y profundidad(es) lo hace?

Estudios anteriores (Oliva *et al.* 2001, Sánchez 2001) demostraron que el picofitoplancton individual no dominó ni numéricamente ni por biomasa. Sin embargo, dadas las condiciones oligotróficas en parte de la estratificación y la naturaleza salina de Alchichica, por comparación con ecosistemas marinos, se esperaría un dominio de picofitoplancton individual al principio de la estratificación en el límite epilimnion/metalimnion, donde se observa una mayor concentración de nutrientes (Shortreed y Stockner 1990, Callieri y Piolini 1995), substituido posteriormente por picofitoplancton colonial, reportado en la literatura como más resistente a la herbívora.

3.- Con base en la observación de la variación numérica (densidad y biovolumen), ¿cuál puede ser la importancia ecológica de los diversos morfos del picofitoplancton en Alchichica?

Funcionalmente, el picofitoplancton colonial se comportaría más como nanofitoplancton y microplancton por el tamaño de sus colonias, aunque el de las células los coloque como picofitoplancton.

En relación con la importancia del picofitoplancton colonial, se consideran dos factores:

a).- El pequeño tamaño de las células, que implica una elevada relación superficie/volumen (ventajoso en la competición por nutrientes).

b).- Una baja afinidad de los herbívoros por colonias grandes mucilaginosas.

Se esperaría entonces que estas colonias dominen el fitoplancton durante la estratificación bien establecida en la zona fronteriza del epilimnion/metalimnion (base de la zona eufótica en Alchichica), asociado a una mayor acumulación de nutrimentos.

El picofitoplancton individual carecería de los mecanismos protectores contra la herbivoría que posee el picofitoplancton colonial, aunque mantendría una elevada tasa de reproducción como mecanismo alternativo de subsistencia ante la herbivoría; la tasa elevada es posible cuando los nutrimentos se encuentran en mayor concentración, es decir, durante el periodo de mezcla o en la frontera epilimnion/metalimnion durante la estratificación (aunque en esa región, la limitación más bien radica en la luz). Durante el periodo de mezcla, la circulación del agua puede actuar también como factor eliminador de células en la zona fótica, para lo cual también una mayor tasa de crecimiento reducirá la probabilidad de desaparecer por un tiempo de la zona fótica.

## 4. Objetivos

### Objetivo general

- Caracterizar las fracciones fitoplactónicas superiores e inferiores a 2  $\mu\text{m}$  de tamaño en la columna central del Lago Alchichica.

### Objetivos particulares

- Analizar la variación espacio-temporal de los parámetros físico-químicos que influyen en el comportamiento del fitoplancton ( $T^{\circ}\text{C}$ , descriptores relacionados con oxígeno, nutrimentos inorgánicos disueltos, 1% PAR, pH,  $K_{25}$ , SDT).
- Determinar la clasificación taxonómica de los taxa encontrados.
- Determinar la densidad numérica y el biovolumen de las fracciones de micro-, nano- y picofitoplancton.
- Evaluar la concentración de clorofila *a* por fracciones superior e inferior a 2  $\mu\text{m}$ .

Se esperaría entonces que estas colonias dominen el fitoplancton durante la estratificación bien establecida en la zona fronteriza del epilimnion/metalimnion (base de la zona eufótica en Alchichica), asociado a una mayor acumulación de nutrimentos.

El picofitoplancton individual carecería de los mecanismos protectores contra la herbivoría que posee el picofitoplancton colonial, aunque mantendría una elevada tasa de reproducción como mecanismo alternativo de subsistencia ante la herbivoría; la tasa elevada es posible cuando los nutrimentos se encuentran en mayor concentración, es decir, durante el periodo de mezcla o en la frontera epilimnion/metalimnion durante la estratificación (aunque en esa región, la limitación más bien radica en la luz). Durante el periodo de mezcla, la circulación del agua puede actuar también como factor eliminador de células en la zona fótica, para lo cual también una mayor tasa de crecimiento reducirá la probabilidad de desaparecer por un tiempo de la zona fótica.

## 4. Objetivos

### Objetivo general

- Caracterizar las fracciones fitoplactónicas superiores e inferiores a 2  $\mu\text{m}$  de tamaño en la columna central del Lago Alchichica.

### Objetivos particulares

- Analizar la variación espacio-temporal de los parámetros físico-químicos que influyen en el comportamiento del fitoplancton ( $T^{\circ}\text{C}$ , descriptores relacionados con oxígeno, nutrimentos inorgánicos disueltos, 1% PAR, pH,  $K_{25}$ , SDT).
- Determinar la clasificación taxonómica de los taxa encontrados.
- Determinar la densidad numérica y el biovolumen de las fracciones de micro-, nano- y picofitoplancton.
- Evaluar la concentración de clorofila *a* por fracciones superior e inferior a 2  $\mu\text{m}$ .

## 5. Área de estudio

### *Descripción general de la Cuenca Oriental*

La región de estudio se encuentra ubicada en la Cuenca de Oriental, en la parte este del estado de Puebla (Arredondo *et al.* 1983); es una cuenca endorreica que comprende los estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala (Fig. 1, INEGI 2000).

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 de Alchichica, las rocas del Mesozoico se encuentran junto con acumulaciones de material volcánico (tefras y lavas) (Atlas Nacional de México 1990).

Desde el punto de vista geomorfológico, en la cuenca dominan los procesos exógenos, influenciados 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 de 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 (INEGI 2000). Meneses (2002) generó un modelo hidrogeológico para la cuenca del lago de Alchichica, en el que describió cuatro capas: la primera, constituida por pómez, con un espesor entre 6 y 15 metros; la siguiente unidad está constituida por ignibritas, con un espesor entre 17 y 94 metros; la tercera unidad, constituida por conglomerados, con un espesor entre 62 y 186 metros, sugiere que esta capa puede ser capaz de transmitir cantidades importantes de agua; la cuarta unidad geoelectrónica se corresponde con calizas compactas con espesores indeterminados, que sugieren ser el basamento de la región (Fig. 2).

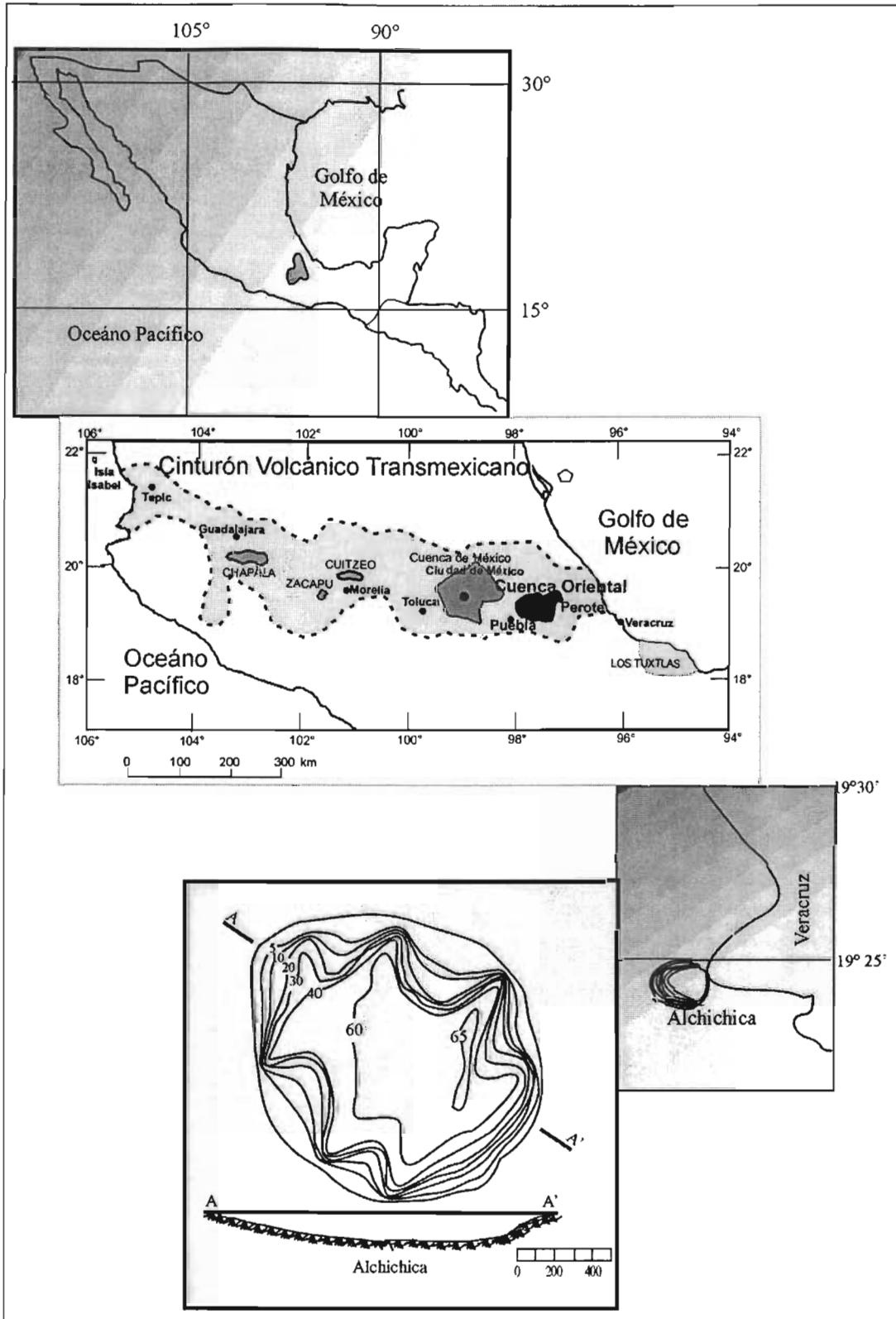


Figura 1. Ubicación geográfica de la Cuenca de Oriental y morfometría del Lago Alchichica, Puebla.



La actividad volcánica ha dado origen a un gran número de cuencas endorreicas, con el consecuente desarrollo de lagos y planicies rodeadas de sierras.

### ***Lago Alchichica***

En México, muchos lagos son de origen volcánico o tectónico-volcánico, la mayoría asociados con la Faja Volcánica Transmexicana, como la zona de los axalapascos (“ollas de arena”) de la Cuenca Oriental de Puebla (Lanza y García 1995). En esta zona se encuentran seis lagos-cráter; el más grande de ellos es el lago de Alchichica, ubicado al noreste del estado de Puebla ( $19^{\circ} 24' 37.3''$  N y  $97^{\circ} 24' 16.68''$  O), a una altura de 2,320 m s.n.m. (Figura 1) (INEGI 2000). 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 (Arredondo *et al.* 1984, Meneses 2002); sin embargo, se desconoce el origen y el recorrido del agua que mantiene al lago.

El lago de Alchichica pertenece a un grupo de lagos denominados “maar”. Hutchinson (1957) indica que este tipo de lagos presentan forma circular, con un desarrollo de línea de costa que va desde 1.04-1.15 % y profundidad máxima de 21-108 m. 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 tipo maar de 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 tiempo, llenaron los cráteres de agua (Gasca 1981, Arredondo *et al.* 1983).

El lago de Alchichica presenta un área superficial de  $1,810 \text{ m}^2$ , un volumen de  $69.92 \times 10^6 \text{ m}^3$  y línea de costa con valor de 5,060 m. Su forma general es circular, con una longitud máxima de 1,733 metros, con orientación SE-NO. Las paredes son muy inclinadas, incrementándose bruscamente la profundidad conforme se aleja de la orilla. Esta inclinación acentuada finaliza en una plataforma a los 60 m, desplazada ligeramente hacia el NE y cortada por la parte más profunda, que alcanza aproximadamente los 64 metros

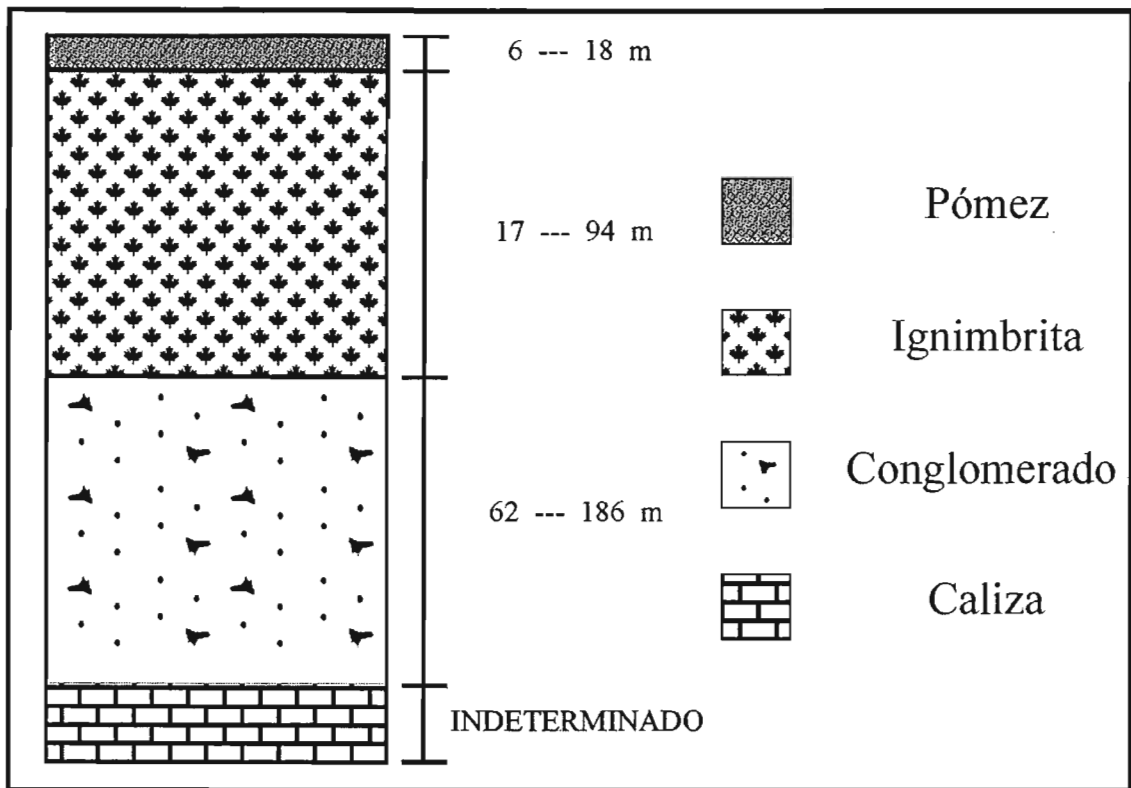


Figura 2. Modelo hidrogeológico (Meneses 2002).

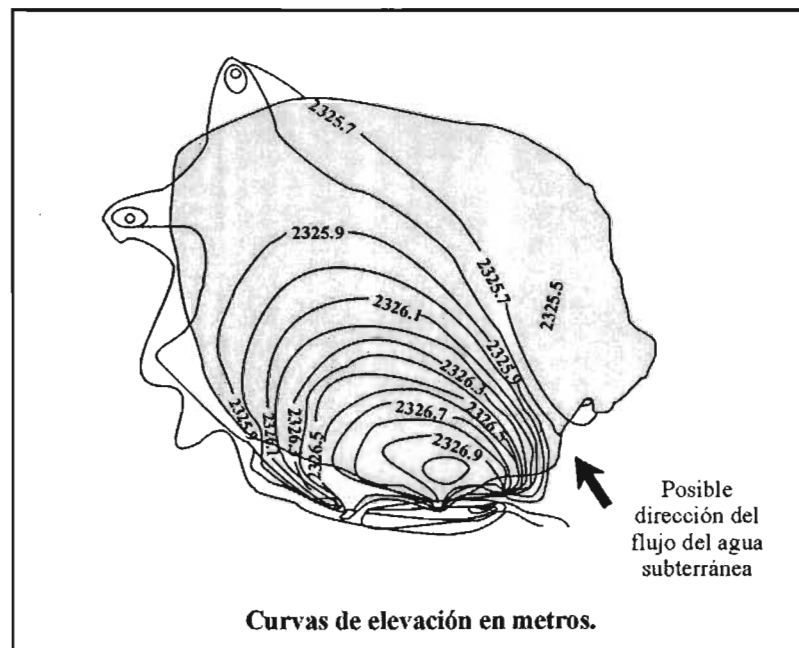


Figura 3. Mapa de elevaciones indicando el posible flujo del agua subterránea (Meneses 2002).

(profundidad media 38.6 m, Arredondo *et al.* 1983). Meneses (2002) encontró un posible patrón de flujo de agua subterránea en la dirección SE-NW para el lago de Alchichica (Fig. 3).

El clima que presenta la cuenca se caracteriza por ser semi-seco templado con lluvias en verano (BS<sub>1</sub>k'w) (García 1980). La temperatura media anual es de 12.9 °C. La precipitación media anual es de 420 mm, el territorio se ve afectado por la sombra orográfica, dada por la altitud del relieve, el cual produce una menor cantidad de lluvia para la región, mientras que la evaporación presenta intervalos anuales de 500-600 mm (Alcocer *et al.* 2000, INEGI 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).

Alchichica es un lago tropical monomítico cálido, con un periodo de mezcla a fines de diciembre hasta principios de marzo (durante la 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. El patrón de estratificación ocurre de abril a diciembre durante la estación caliente-lluviosa; al calentarse las capas superiores del lago por radiación y conducción, se otorga al lago una estratificación térmica, debido a la elevación de la temperatura mínima (marzo) y a la disminución de la fuerza del viento. Desde ese momento hasta fines 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 epi- y hipolimnion) y el hipolimnion. En los meses de julio a principios de diciembre se presentan condiciones de microaerobias a anaerobias en las capas del fondo (Alcocer *et al.* 2000).

Alchichica ha sido considerado oligo-mesotrófico (Garzón 1990, Oliva 2001, Sánchez 2001), condiciones acordes con la profundidad relativamente elevada del lago y la falta de fuentes importantes de contaminación, lo que da lugar a concentración de clorofila *a* intermedias (OECD 1982 en: Ryding y Rast 1989, Margalef 1983).

El ambiente químico fue caracterizado por Vilaclara *et al.* (1993); describen Alchichica como un lago salino (8.5 g L<sup>-1</sup>), con una conductividad (corregida a 25 °C, K<sub>25</sub>) de 13000 μS cm<sup>-1</sup>

con una ligera desviación estándar; el pH presenta valores de 9.0 con una ligera desviación, los autores indican que el lago presenta una elevada dureza y reserva alcalina, por lo que el pH no sufre fuertes variaciones. Reportan cantidades importantes de boratos (3.79 mM) y concentraciones muy bajas de Si (0.01 mM). La dominancia iónica en concentraciones mM es:  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{++}$  y  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-}$ . La composición iónica reportada, incluyendo la desviación estándar, se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición iónica del Lago Alchichica (Tomado de Vilaclara *et al.* 1993).

| $K_{25}$                | Salinidad           | pH        | Alcal. Tot.           | Alcal. Fen.           | $\text{CO}_3^{2-}$ | $\text{HCO}_3^-$ | Dur. Tot.            |
|-------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------|----------------------|
| $(\mu\text{S cm}^{-1})$ | $(\text{g L}^{-1})$ |           | $(\text{meq L}^{-1})$ | $(\text{meq L}^{-1})$ | $(\text{mM})$      | $(\text{mM})$    | $(\text{mM CaCO}_3)$ |
| 13000                   | 8.5                 | 9.0       | 41.7                  | 7.7                   | 7.70               | 13.14            | 18.72                |
| $\pm 500$               | $\pm 0.2$           | $\pm 0.1$ | $\pm 2.04$            | $\pm 0.52$            | $\pm 0.53$         | $\pm 0.80$       | $\pm 1.86$           |

| $\text{SO}_4^{2-}$ | Cl            | Si            | Boratos       | $\text{Ca}^{++}$ | $\text{Mg}^{++}$ | $\text{Na}^+$ | $\text{K}^+$  |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|------------------|------------------|---------------|---------------|
| $(\text{mM})$      | $(\text{mM})$ | $(\text{mM})$ | $(\text{mM})$ | $(\text{mM})$    | $(\text{mM})$    | $(\text{mM})$ | $(\text{mM})$ |
| 10.68              | 85.24         | 0.01          | 3.79          | 0.30             | 13.61            | 87.21         | 5.55          |
| $\pm 0.78$         | $\pm 1.30$    | $\pm 0.01$    | $\pm 0.83$    | $\pm 0.05$       | $\pm 1.28$       | $\pm 2.74$    | $\pm 1.18$    |

## 6. Metodología

### a) Trabajo de campo

Se realizaron 10 muestreos mensuales en el lago de Alchichica que comprendieron nueve meses de estratificación del lago y uno de circulación; es decir, de abril del 2003 a enero del 2004. El sitio de muestreo se ubicó en una columna en la parte central profunda del lago (62 m); para la elección de un solo punto de muestreo se consideró la morfometría y batimetría de Alchichica (área reducida, cuenca circular y paredes muy inclinadas), así como la presencia de un fuerte viento que ayuda a mantener un buen nivel de homogeneidad en la capa superficial, evitando la formación de parches fitoplanctónicos; estos parámetros fueron considerados y utilizados en trabajos anteriores (Lugo 2000).

Se midieron *in situ* los siguientes parámetros físicos y químicos (cada metro desde la superficie hasta el fondo): temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, pH, conductividad (corregida a 25° C,  $K_{25}$ ) y sólidos disueltos totales por medio de una sonda multisensor marca Hydrolab, modelo Datasonde 3, conectada a un almacenador electrónico de datos Surveyor 3. Se determinó la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés photosynthetically active radiation) –400 a 700 nm- a lo largo del perfil vertical (con una discretización temporal de 1 segundo), utilizando un irradiómetro escalar instalado en un perfilador de fluorescencia natural Biospherical PNF-300.

Se tomaron muestras integradas en las siguientes profundidades: 0-1.5-3 m, pico de fitoplancton (profundidad variable), termoclina  $\pm 1.5$  m, oxiclina  $\pm 1.5$  m, fondo (0.5 por arriba del fondo, aproximadamente 61 m), teniendo un total de 50 muestras colectadas para la cuantificación de fitoplancton por el método de Utermöhl y extracción de clorofila *a*. Las muestras para el análisis de nutrientes y cuantificación de picofitoplancton por epifluorescencia fueron puntuales y más específicas, ampliadas a 10 colectas por muestreo, con énfasis en las capas arriba descritas. Para su colecta, se utilizó una botella muestreadora tipo IHE de 2 L de capacidad. Se tomaron alícuotas de las muestras integradas para la cuantificación del fitoplancton por el método de Utermöhl y extracción de clorofila *a*. Como apoyo a la identificación

taxonómica de las especies macro- y algunas nano-fitoplanctónicas, se realizaron arrastres horizontales con una red de fitoplancton con abertura de malla de 20  $\mu\text{m}$ .

Las muestras para el análisis de nutrientes se filtraron *in situ* con filtro de membrana de nitrocelulosa de 0.2  $\mu\text{m}$  (Millipore, USA), y fueron fijadas con cloroformo. Fueron transportadas al laboratorio, conservándolas congeladas para su posterior análisis dentro de los siguientes 30 días.

Las muestras de fitoplancton fueron fijadas con Lugol añadido con ácido acético, para la cuantificación por el método de Utermöhl (Vollenweider *et al.* 1974). Las muestras para la identificación taxonómica fueron la mitad mantenidas *in vivo*, para su pronta observación, la otra mitad fijadas con formol al 2 %. Las muestras para el conteo del picofitoplancton por epifluorescencia fueron fijadas con formol al 2 %.

El agua para la cuantificación de clorofila *a* se llevó al laboratorio, conservándola en frío y en la oscuridad para filtrarla dentro de las 24 horas posteriores al muestreo.

### ***b) Trabajo de laboratorio***

La determinación de nutrientes se realizó con el analizador de flujo segmentado (marca Skalar Sanplus System), en el laboratorio de Biogeoquímica Acuática del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Los nutrientes que se evaluaron fueron: Fósforo reactivo soluble (teóricamente, en su mayoría ortofosfatos,  $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) a través del método de reducción del ácido molibdofosfórico a fosfomolibdeno azul (0.05-4  $\mu\text{M}$  de intervalo de concentración). Nitrógeno como nitritos ( $\text{N-NO}_2^-$ ) por medio del método de diazotización con sulfamilamida (0.1-20  $\mu\text{M L}^{-1}$  de intervalo de concentración). Nitrógeno como nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) con el método de reducción por cadmio y analizando nitritos (0.1-20  $\mu\text{M}$  de intervalo de concentración). Nitrógeno como amonio ( $\text{N-NH}_3$ ) por la reacción de Berthelot (azul de endofenol, 0.2-20  $\mu\text{M L}^{-1}$  de intervalo de concentración) y sílice (como  $\text{SiO}_2$ ) por la conversión del ácido silícico a ácido  $\beta$ -silicomolibdico y su reducción a molibdeno azul (0.02-140  $\mu\text{M L}^{-1}$  de intervalo de concentración) (APHA-AWWA-WPCF 1980).

La determinación del fitoplancton se realizó con la ayuda del microscopio Olympus BX 50 de contraste de fases y contraste diferencial de interferencia (DIC; Nomarski), se tomaron

fotografías de las especies con una cámara digital para facilitar su determinación. Para las especies de la clase Bacillariophyceae se efectuó una limpieza con la técnica de oxidación ácida (Rushforth *et al.* 1984, modificada por Stoermer *et al.* 1995) y se cubrieron con oro para hacer observaciones al Microscopio Electrónico de Barrido (MEB, Cambridge 360). Para las especies picofitoplanctónicas se realizó deshidratación por punto crítico y se ionizó con oro-paladio por 3 min. para su observación al MEB (JEOL JSM-5000). Se empleó la técnica de tinción con azul alciano 0.3 % en 3 % de ácido acético a pH 2.5 para evidenciar el mucílago principalmente en las cianoprocariontas (Sheath y Cole 1990).

El esquema general de clasificación que se siguió es el propuesto por van den Hoek *et al.* (1995). Para las cianoprocariontas se siguió el esquema de clasificación de Anagnostidis y Komárek (1985, 1988) y Komárek y Anagnostidis (1986, 1989, 1999). Para la determinación de las especies se emplearon los siguientes trabajos: Desikachary (1959), Hindák (1985), Komárková-Legnerová (1991), Komárek y Anagnostidis (1999), Komárek (1996, 1999, 2003), Azevedo *et al.* (1999) y Komárek y Cronberg (2001).

Para la clase Bacillariophyceae se siguió el esquema de clasificación de Round *et al.* (1990); para la identificación específica se utilizaron los siguientes trabajos: Battarbee *et al.* (1984), Rushforth y Johansen (1986), Krammer y Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, 1991b), Håkansson y Kling (1994) y Håkansson (2002). Para el resto de los grupos se empleó el esquema genérico de Huber-Pestalozzi (1961, 1962, 1983) y para la identificación específica se utilizaron los siguientes trabajos: Huber-Pestalozzi (1962), Komárek y Fott (1983), Comas (1996) y Wehr y Sheath (2003). Se contaron un mínimo de 20 individuos para elaborar las descripciones taxonómicas.

La densidad del fitoplancton se estimó con ayuda de cámaras Utermöhl, (Vollenweider *et al.* 1974). Se sedimentaron 50 ml y se cuantificaron mediante un microscopio invertido Olympus IX 70 a aumentos entre 100× a 600×. El conteo se realizó por célula con contenido celular, en función del tamaño de las células (media cámara a bajo aumento, o a mayor aumento en células pequeñas se contaron campos con un mínimo de 400 células del organismo más abundante). Bajo este criterio, el intervalo de confianza (APHA-AWWA-WPCF 1980) para la media será de  $\pm 10$  %. Para determinar el número de células por mililitro, se siguió la siguiente fórmula:

$$\text{Cél/mL} = \frac{\text{No. de organismos} \times \text{Vol. Sedimentado}}{\text{No. de campos} \times \text{Vol. Campo}}$$

Los biovolúmenes fueron calculados a partir de los registros de densidad y biovolúmenes específicos, aproximados de formas geométricas (Hillebrand *et al.* 1999, Sun y Liu 2003), con mediciones de un mínimo de 20 células.

Para los conteos del picofitoplancton, se utilizó la técnica de autofluorescencia dada por los pigmentos fotosintéticos. Dentro de las 36 horas después de la colecta, la muestra se concentró sobre un filtró a través de un filtro de membrana de policarbonato (Porectics, Alemania), con una apertura de poro de 0.2  $\mu\text{m}$ . Los filtros fueron montados en un portaobjetos, con una gota de glicerol entre el filtro y el cubreobjetos (cuando se requirió, por degradación de la clorofila) o con una gota de aceite de inmersión (FLUKA). Cada filtro fue examinado por autofluorescencia del pigmento a 100 $\times$  aumentos en el microscopio Leika, Alemania, con el juego de filtros CY3 (excitación verde, observación roja), comparándolo con el juego de rodamina (excitación verde, observación roja; observación de eucariontes) y el de FITC (excitación azul, observación verde-amarilla; fluorescencia de procariontes). Fueron contadas como mínimo 400 células.

Para la evaluación de clorofila *a* por fracciones de tamaño, se filtraron diferentes volúmenes de agua (el mayor volumen que permitió la concentración de fitoplancton) a través de un filtro de membrana de policarbonato con 2  $\mu\text{m}$  de apertura de poro (Millipore, USA), para separar la fracción nano- y microfitoplancton (20-2 y 200-20  $\mu\text{m}$ , respectivamente) de la picofitoplanctónica (2-0.2 $\mu\text{m}$ ). La muestra previamente filtrada se volvió a filtrar con un filtro de membrana de nitrocelulosa 0.22  $\mu\text{m}$  (Millipore, USA), para concentrar la fracción correspondiente al picofitoplancton (2-0.2  $\mu\text{m}$ ). La extracción se realizó con acetona al 90% (con réplicas con metanol, para verificar eficiencias de extracción de la clorofila *a*), por un periodo de 24-48 horas en la oscuridad y a 4° C. La concentración del extracto fue leída en el espectrofotómetro ELÍPTICA (abril-mayo) y THERMO (junio-enero), la concentración de clorofila *a* se obtuvo utilizando las fórmulas de Vollenweider *et al.* (1974) para el metanol y de Jeffrey y Humphrey (1975) para la acetona.



### *c) Trabajo de gabinete*

Los valores de temperatura, oxígeno disuelto y nutrimentos fueron graficados mediante isolíneas en función de la profundidad y el tiempo mediante el programa Surfer versión 7.0 (Golden Software, Inc. USA). Los resultados de temperatura y oxígeno disuelto fueron graficados también en Excel para ver el comportamiento en las profundidades muestreadas y los meses de muestreo.

Con los registros del PAR, se calculó la profundidad de la zona fótica, definida como la profundidad a la cual se obtiene el 1% de la PAR superficial (la cual se calculó eliminando los valores más altas de los primeros 0.5 m de la columna –debido al efecto de sobresaturación del sensor por exceso de luz- y obteniendo el promedio de los valores restantes).

Los resultados del picofitoplancton se graficaron mediante isolíneas en función de la profundidad y el tiempo mediante el programa Surfer versión 7.0 (Golden Software, Inc. USA). Los resultados de densidad, clorofila *a* y biovolumen fueron graficados con Microsoft Excel para facilitar su visualización e interpretación. Con los resultados cualitativos del fitoplancton, se realizó un listado de especies en el cual se incluye su presencia en la superficie, metalimnion y hipolimnion.

Con el fin de establecer la relación entre la concentración de clorofila *a* y el biovolumen se realizó una correlación de Spearman mediante el paquete estadístico Statgraphics versión 5.0; previamente los datos fueron estandarizados mediante una transformación a logaritmo natural. El nivel de significancia utilizado fue  $p < 0.05$ .

## 7. Resultados

### 7.1 Comportamiento de los descriptores físicos y químicos en columna

#### i) Temperatura

El gradiente vertical de temperatura del Lago Alchichica durante el tiempo de estudio (abril 2003 a enero 2004) mostró dos periodos (Fig. 4), uno de estratificación que abarcó de abril a principios de diciembre y uno de mezcla durante parte de diciembre y enero. Las capas superiores comenzaron a calentarse en abril, hasta alcanzar su máximo en mayo (21.9° C) y junio (21.5° C) en la superficie. La diferencia máxima de temperatura en la vertical durante la estratificación fue de 7.5° C en mayo (entre 22.0° C en la superficie y 14.4° C en el fondo, con la máxima variación de temperatura, 3.4° C, en el metalimnion, entre los 8 y 16 m). Los valores mínimos de temperatura del agua fueron registrados en enero (16.2° C en superficie y 14.1° C en el fondo, 2.1° C de diferencia) y, durante este mes los valores más altos se presentaron en los primeros 3 metros de la columna, mientras que el resto de la columna mantuvo homogeneidad térmica (Fig. 4).

La temperatura del epilimnion fluctuó entre 22.0° C en mayo hasta 15.8° C en diciembre, la diferencia térmica máxima en la capa de mezcla se registró en junio (2.2° C) y la mínima en diciembre (0.4° C). El epilimnion aumentó su profundidad a la vez que la temperatura comenzó ligeramente a disminuir en el mes de julio (cuando presentó un grosor de 13 m), hasta alcanzar su máximo grosor a 34 m en diciembre para dar paso posteriormente al periodo de mezcla. Los cambios en el epilimnion afectaron también al metalimnion e hipolimnion; la termoclina quedó bien establecida a partir del mes de julio, entre 14 y 24 m de profundidad, presentando posteriormente un hundimiento progresivo (en relación con el enfriamiento de la columna) que alcanzó su máximo en el mes de diciembre entre los 35 y 41 m de profundidad. En el resto de los meses, la termoclina se encontró entre 4 y 19 m en abril, 7-19 en mayo, 8-22 m en junio, 13-26 m en agosto, 19-29 m en septiembre, 23-29 m en octubre y 31-34 m en noviembre (Fig. 4).

La temperatura del hipolimnion fluctuó entre 19.4° C en capas adyacentes al metalimnion, hasta 14.4° C en las capas más profundas; es decir la diferencia máxima de temperatura fue 5° C

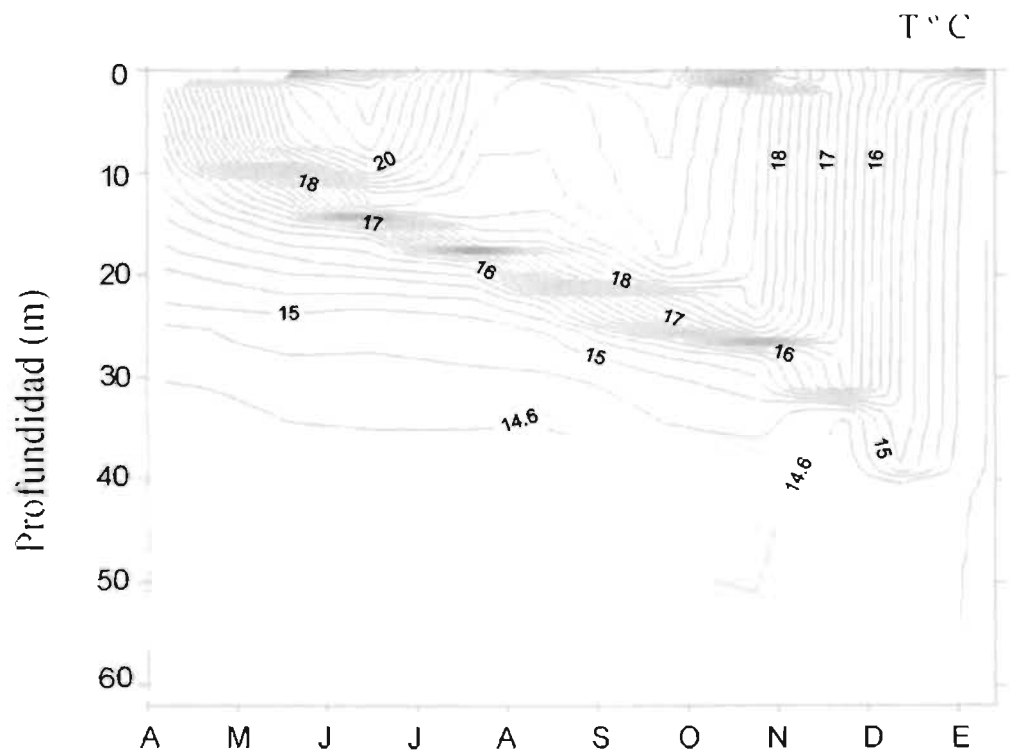
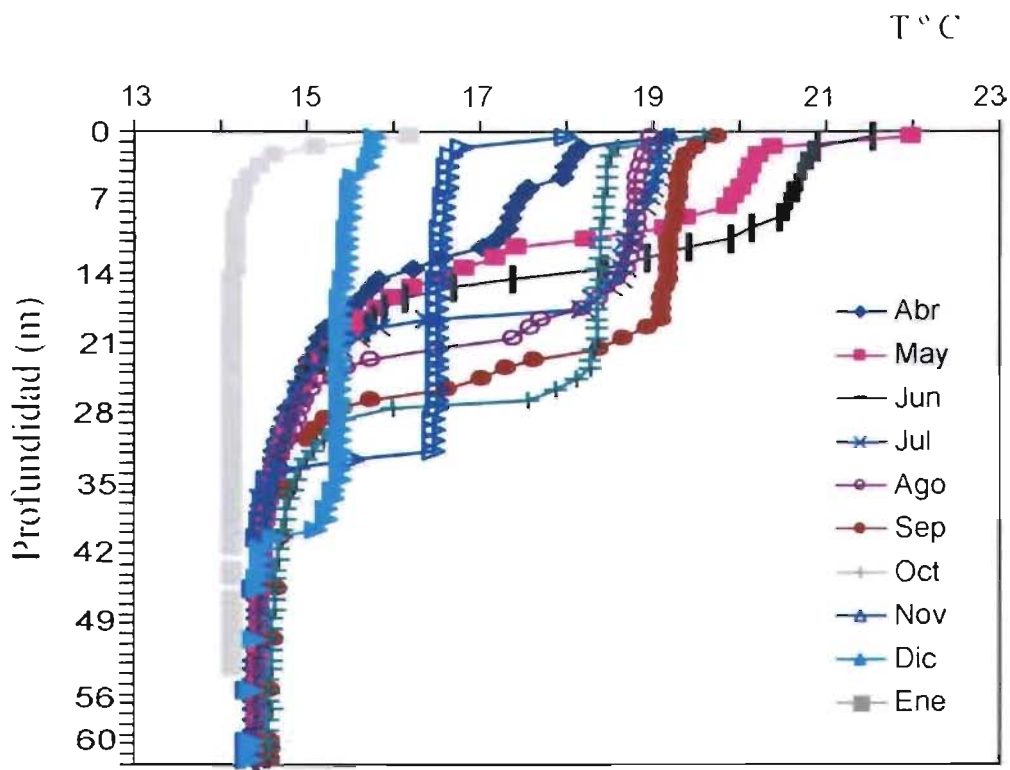


Figura 4. Perfiles verticales de la temperatura (°C, arriba) y diagrama profundidad-tiempo de isotermas (°C, abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.

en el mes de mayo, mientras que la diferencia mínima se registró en el mes de diciembre ( $0.15^{\circ}$  C). El espesor del hipolimnion disminuyó con el avance del periodo de estratificación, registrando su máximo grosor en el mes de abril (entre 20-62 m) y el menor durante diciembre (entre 42-62 m, Fig. 4).

## ii) Oxígeno disuelto y Porcentaje de Saturación de Oxígeno

El comportamiento vertical del oxígeno disuelto ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y el porcentaje de saturación de oxígeno (Fig. 5) siguieron de cerca al régimen térmico, mostrando siempre una mayor concentración de gas disuelto en la superficie, la cual disminuía conforme aumentaba la profundidad, lo que indica una curva de tipo clinógrada, incluso en el mes de mezcla (aunque entonces la inclinación fue mínima). Los valores de oxígeno disuelto en la columna fluctuaron desde un máximo de  $7.0 \text{ mg L}^{-1}$  (107% de saturación) en mayo a 1.5 metros, hasta  $0 \text{ mg L}^{-1}$  (0% de saturación) de mayo (57-61 m) a noviembre (34-62 m), con un máximo grosor en la capa de anoxia en agosto (28-62 m). La diferencia máxima de concentración se observó en mayo ( $7.0 \text{ mg L}^{-1}$ ) y la mínima en el mes de enero ( $0.8 \text{ mg L}^{-1}$ , Fig. 5).

Los valores registrados por encima de la oxiclina fluctuaron poco, desde  $7.0 \text{ mg L}^{-1}$  (107% de saturación en mayo) a  $5.3 \text{ mg L}^{-1}$  (48% de saturación en diciembre), con una diferencia máxima en la concentración del oxígeno disuelto de  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$  durante los meses de abril, noviembre y diciembre, mientras que la diferencia mínima se registró en el mes de julio y octubre ( $0.4 \text{ mg L}^{-1}$ ). En la oxiclina las concentraciones fluctuaron desde  $6.8 \text{ mg L}^{-1}$  (98% de saturación en septiembre) a  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  (2% de saturación en agosto), registrando la máxima diferencia en concentración en el mes de septiembre,  $6.3 \text{ mg L}^{-1}$  y la mínima en abril,  $2.1 \text{ mg L}^{-1}$ . La profundidad de la oxiclina aumentó conforme avanzó el periodo de estratificación de 10 a 40 m, mientras que el espesor se fue comprimiendo de 14 a 4 m. En la capa inferior a la oxiclina se registró una concentración máxima de oxígeno disuelto de  $3.1 \text{ mg L}^{-1}$  (43% de saturación en abril) y una mínima de  $0 \text{ mg L}^{-1}$  (0% de saturación de agosto a diciembre), mostrando la máxima diferencia de concentración en el mes de mayo, con  $2.9 \text{ mg L}^{-1}$  y una mínima desde agosto hasta diciembre, con  $0 \text{ mg L}^{-1}$ . Esta capa también mostró cambios en su profundidad, fluctuando desde 10-62 m en mayo hasta 41-62 m en diciembre (Fig. 5).

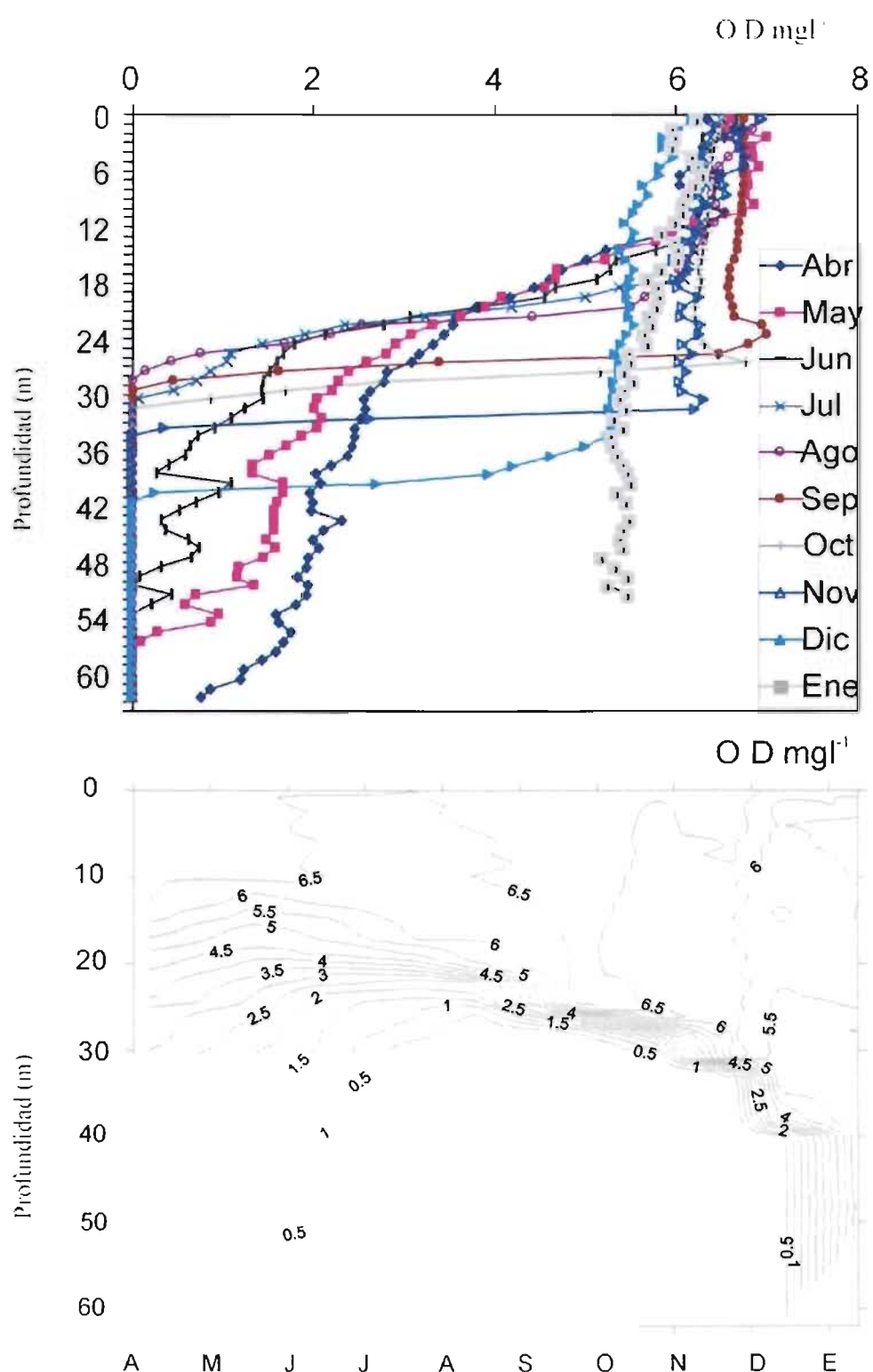


Figura 5. Perfiles verticales de la concentración de oxígeno disuelto ( $\text{mg L}^{-1}$ , arriba) y diagrama profundidad-tiempo de oxígeno disuelto ( $\text{mg L}^{-1}$ , abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.

### iii) Nutrientes

En general, durante el periodo de estratificación las concentraciones de fósforo reactivo soluble (PRS), SiO<sub>2</sub>, N-NH<sub>3</sub> y de nitrógeno inorgánico disuelto (DIN, pos sus siglas en inglés= tres formas de nitrógeno) mostraron un comportamiento semejante, con una gradual disminución en el epilimnion y metalimnion al paso de este periodo, excepto en los estratos profundos del hipolimnion en los que ocurrió una acumulación, mientras que durante el periodo de mezcla las concentraciones se mantuvieron homogéneas en la columna de agua (Fig. 6, 7 y 8). El N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mostró un comportamiento diferente en el hipolimnion, con altas concentraciones en el límite metalimnion-hipolimnion, de abril a agosto (coincidiendo con el mayor gradiente de oxígeno) y de septiembre a diciembre, en el hipolimnion las concentraciones fueron bajas (Fig. 7). Por otra parte, el N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> mostró bajas concentraciones en toda la columna de agua, excepto en los meses de abril y mayo en los que se registraron los valores más altos dentro del hipolimnion. Durante el periodo de mezcla, las concentraciones de todos los nutrientes se mantuvieron homogéneas y bajas en la columna de agua. En la tabla 2 se muestran los intervalos registrados durante todo el periodo de estudio, así como los intervalos para cada estrato. En la tabla 3 se muestra la relación DIN/PRS durante el periodo de estudio, la cual registró una alternancia del fósforo y el nitrógeno como nutrientes limitantes (Fig. 9), con dominio del nitrógeno como nutriente limitante en el epilimnion y metalimnion en abril, julio, agosto y septiembre, de octubre a enero en toda la columna, mientras que, el fósforo fue limitante en el principalmente en el hipolimnion de abril a septiembre y en toda la columna en mayo y junio.

Tabla 2. Nutrientes

| Nutrientes<br>( $\mu M$ )      | Intervalo  | Promedio<br>$\pm D. S.$ | Intervalo<br>epilimnion | Intervalo<br>metalimnion | Intervalo<br>hipolimnion | Intervalo<br>mezcla |
|--------------------------------|------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| PRS                            | 0.1 – 7.5  | 0.7 $\pm$ 1.2           | 0.1 – 0.7               | 0.1 – 0.3                | 0.2 – 7.5                | 0.6 – 0.8           |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.6 – 49   | 5.6 $\pm$ 7.4           | 1.3 – 13                | 0.6 – 14                 | 0.6 – 49                 | 2.3 – 5.8           |
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 0.06 – 13  | 1.7 $\pm$ 3.0           | 0.06 – 1.1              | 0.09 – 4.4               | 0.1 – 13                 | 0.4 – 0.9           |
| N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | 0.04 – 8.2 | 0.5 $\pm$ 1.0           | 0.04 – 0.8              | 0.06 – 1.3               | 0.06 – 8.2               | 0.05 – 0.2          |
| N-NH <sub>3</sub>              | 0.2 – 44   | 4.3 $\pm$ 7.7           | 0.2 – 9.1               | 0.5 – 3.2                | 0.3 – 44                 | 1.3 – 1.9           |
| DIN                            | 0.4 – 44.0 | 6.5 $\pm$ 8.2           | 0.4 – 9.3               | 1.0 – 6.6                | 1.5 – 44.0               | 1.9 – 2.9           |

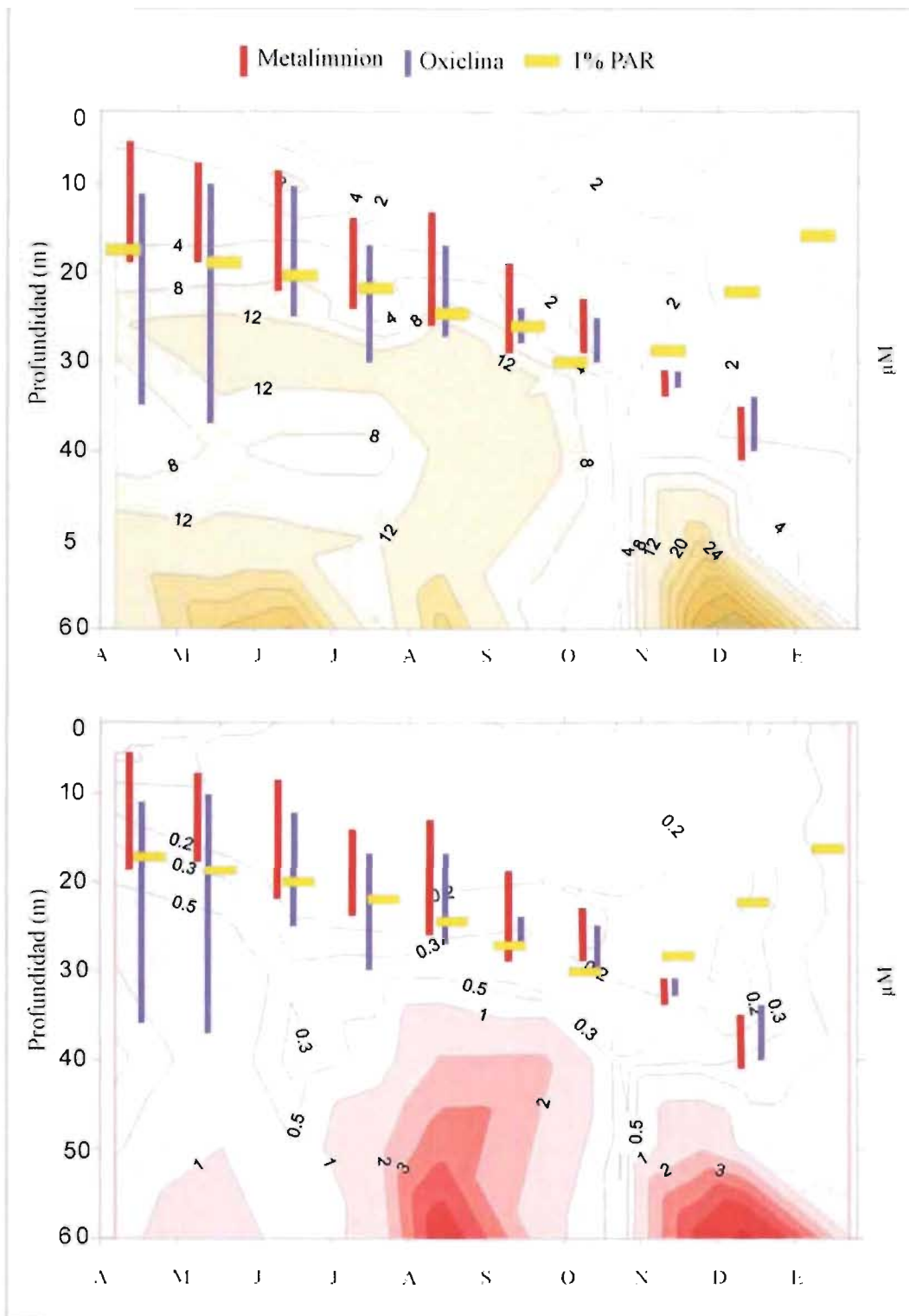


Figura 6. Diagrama profundidad-tiempo de isopletas PRS ( $\mu\text{M}$ , arriba) y DIN ( $\mu\text{M}$ , abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.

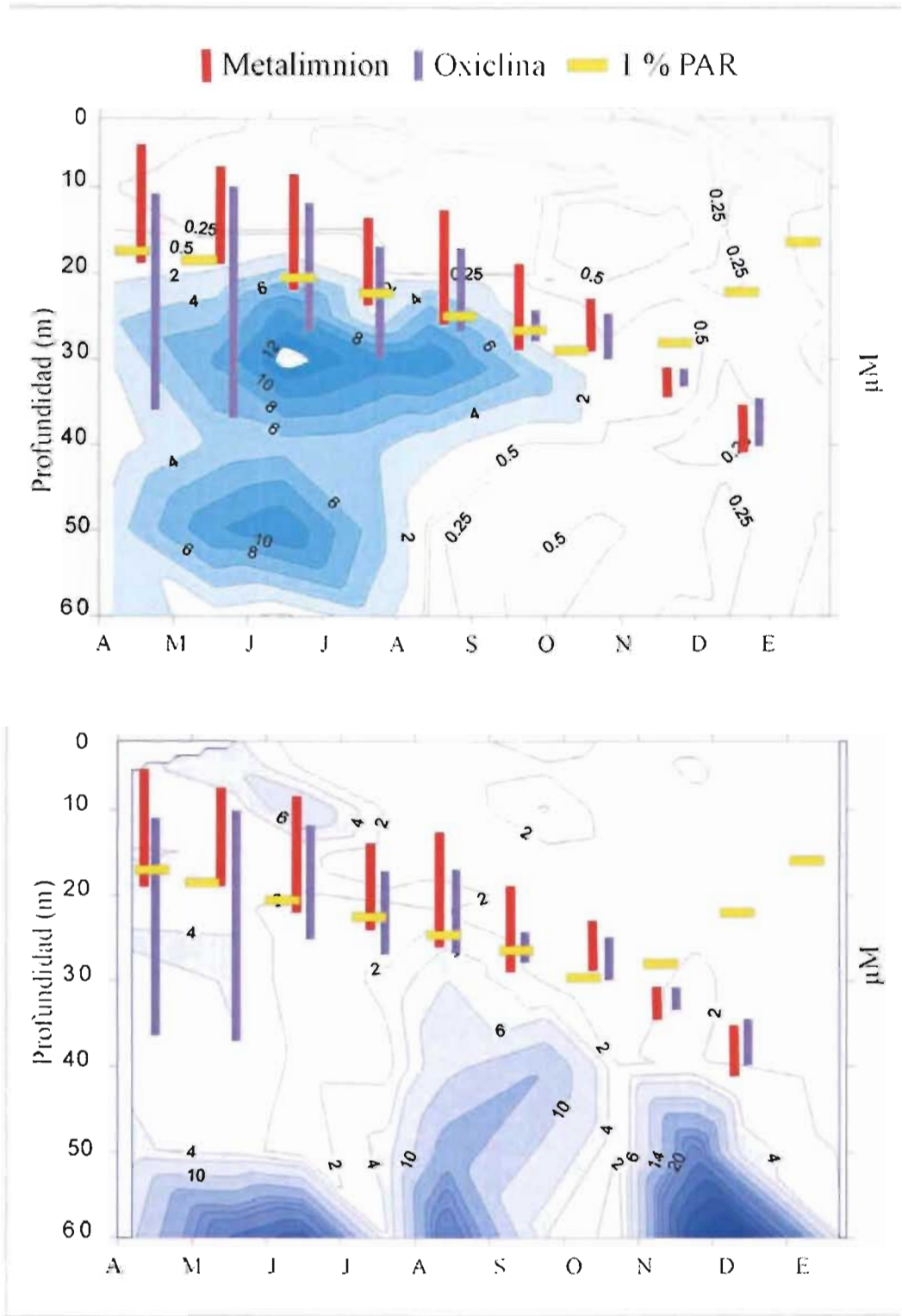


Figura 7. Diagrama profundidad-tiempo de isopletas  $N-NO_3^-$  ( $\mu M$ , arriba) y  $N-NH_3$  ( $\mu M$ , abajo) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.



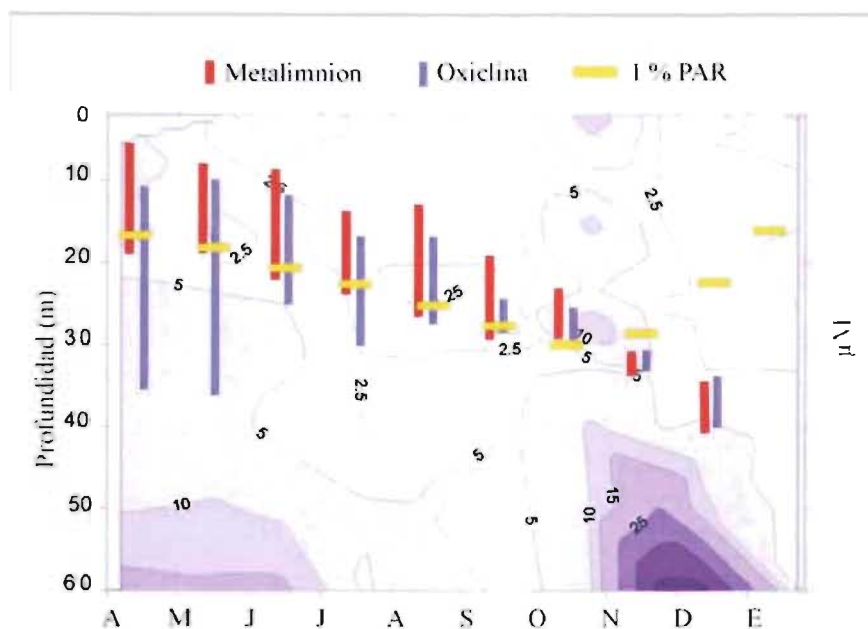


Figura 8. Diagrama profundidad-tiempo de isoplethas  $\text{SiO}_2$  ( $\mu\text{M}$ ) en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004.

Tabla 3. Relación DIN/PRS:  $>16$ , limitación por fósforo (P);  $<16$  limitación por nitrógeno (N); la limitación de ambos nutrientes en el mismo estrato se muestra como N/P. (Unidades en  $\mu\text{M}$ ).

| Columna      | Zona superficial <sup>1</sup> | Zona intermedia <sup>2</sup> | Zona inferior <sup>3</sup> |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <i>Meses</i> |                               |                              |                            |
| <i>Abril</i> | N<br>(11-12)                  | N/P<br>(9-22)                | N/P<br>(15-35)             |
| <i>Mayo</i>  | P<br>(20-40)                  | P<br>(17-18)                 | N/P<br>(12-22)             |
| <i>Junio</i> | N<br>(5-12)                   | P<br>(23-74)                 | P<br>(25-60)               |
| <i>Julio</i> | N<br>(5-12)                   | N/P<br>(8-20)                | N/P<br>(6-42)              |
| <i>Ago</i>   | N<br>(3-5)                    | N/P<br>(15-31)               | N/P<br>(4-52)              |
| <i>Sep</i>   | N<br>(6-15)                   | N<br>(7-8)                   | N/P<br>(4-52)              |
| <i>Oct</i>   | N<br>(3-8)                    | N<br>(6.7-7)                 | N<br>(5-11)                |
| <i>Nov</i>   | N<br>(8-17)                   | P<br>(21)                    | N<br>(7-13)                |
| <i>Dic</i>   | N<br>(3-6)                    | N<br>(7)                     | N<br>(6-8)                 |
| <i>Ene</i>   | N<br>(3-4)                    | N<br>(3-4)                   | N<br>(3-4)                 |

<sup>1</sup>, <sup>2</sup> y <sup>3</sup>. Equivalen, respectivamente, al epilimnion, metalimnion y hipolimnion cuando el lago estuvo estratificado. Para las profundidades correspondientes, ver fig. 9; en enero de 2004, se consideró zona superficial de 0-15 m (donde se encontró el 1% de PAR), de 20-30 m intermedia y de 40-60 m inferior.

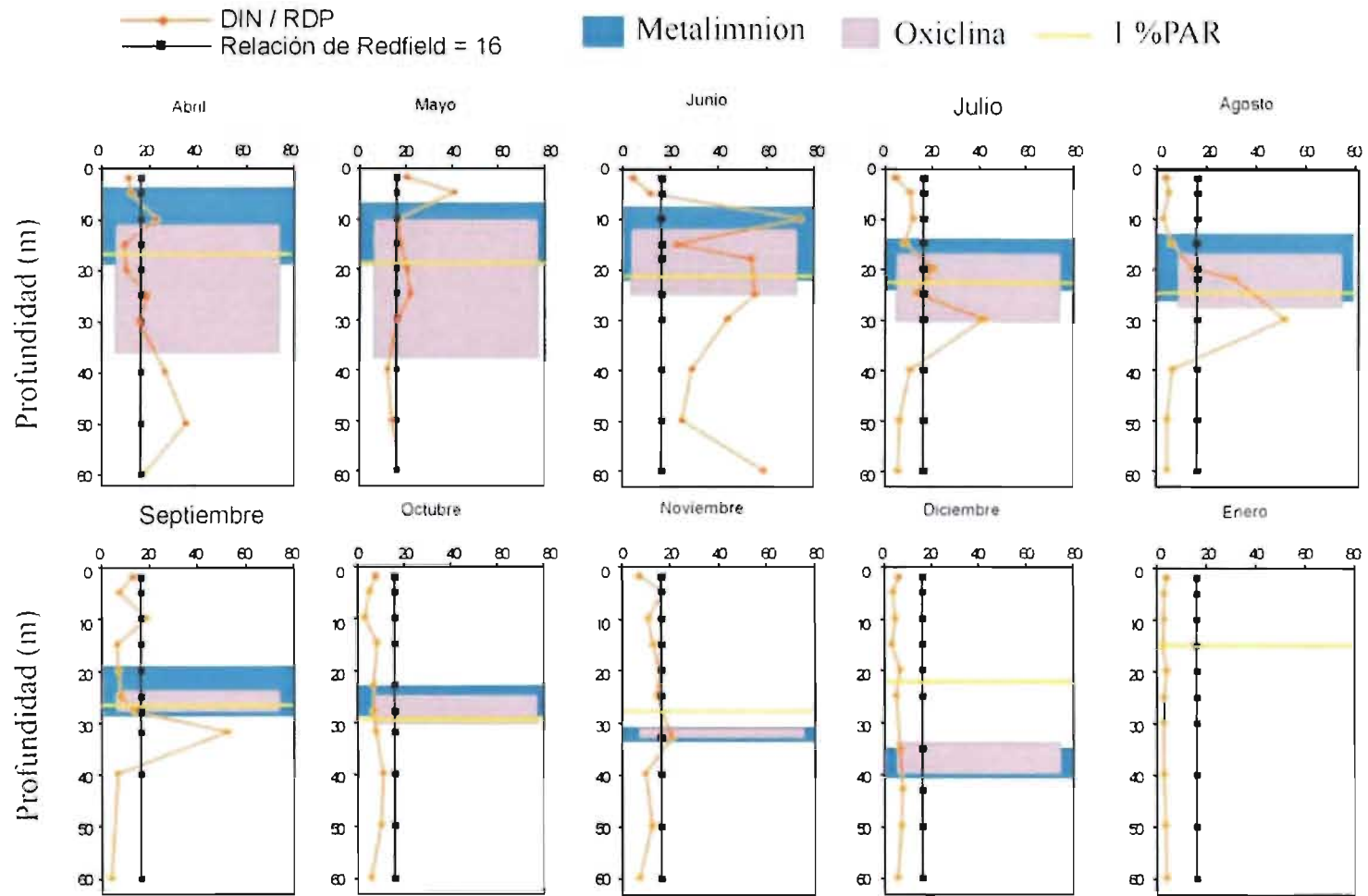


Figura 9. Variación vertical de la relación DIN/PRR = 16, metalimnion, oxiclina y 1% PAR en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004

#### iv) Radiación fotosintéticamente activa (PAR) y zona fótica

La zona fótica, delimitada como la profundidad a la que se encuentra aproximadamente el 1% de PAR superficial, se mantuvo entre 16 y 30 m en Alchichica. Durante el periodo de mezcla y al inicio del periodo de estratificación (abril) se registraron las menores profundidades de la zona fótica en el periodo de estudio (16-17 y 17 m, respectivamente). De mayo a octubre se observó un aumento gradual en la profundidad de la zona fótica, alcanzando su máximo en octubre (29-30 m), comenzando a disminuir la profundidad de noviembre a enero (Fig. 9).

#### v) pH, conductividad y sólidos disueltos totales

Los valores de pH, conductividad y sólidos disueltos totales no mostraron gran variación en la vertical ni en el transcurso de los meses. En la tabla 4 se muestran los valores promedio de todos los datos registrados, incluyendo su desviación estándar; los parámetros expresaron un estrecho intervalo de variación.

Tabla 4. Parámetros conservativos

|  | <i>pH</i> | $K_{25}$<br>( $\mu S\ cm^{-1}$ ) | <i>SDT</i><br>$g\ L^{-1}$ |
|--|-----------|----------------------------------|---------------------------|
| Promedio, X  | 9.0       | 13800                            | 8.8                       |
| Desviación estándar, d.s.                                  | $\pm 0.1$ | $\pm 400$                        | $\pm 0.3$                 |
| <sup>1</sup> Coefficiente de variación (%)<br>(d.s./X)*100 | 1         | 3                                | 3                         |

<sup>1</sup>En Wetzel y Likens (1991).

## 7.2 Comportamiento de los descriptores fitoplanctónicos

### i) Composición de la comunidad fitoplanctónica

Se determinaron 22 especies, 9 (40 %) pertenecientes a la división Heterokontophyta, 7 (32 %) a la Cyanoprokaryota, 5 (23 %) a la Chlorophyta y 1 (5 %) a la Cryptophyta (Figura 10 y tabla 5).

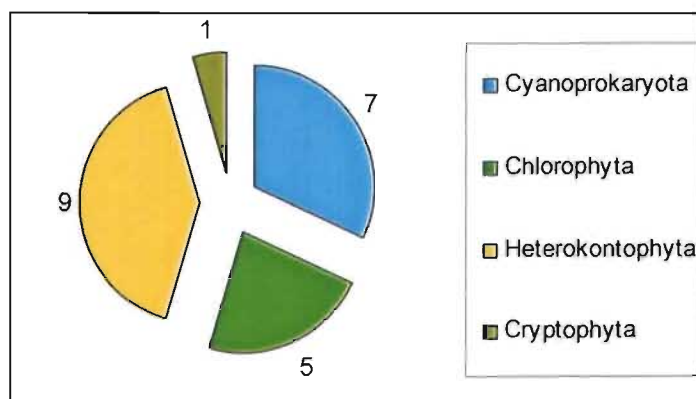


Figura 10. Número de especies por división.

Dentro de la división Cyanoprokaryota se distinguieron dos grupos de organismos por sus diferencias morfológicas: 1) el picofitoplancton individual, células unicelulares de tamaño entre 0.2-2.0  $\mu\text{m}$  (*Synechococcus nidulans* y *Synechocystis* sp.) y 2) el picofitoplancton colonial, células con las mismas dimensiones, pero de organización colonial (*Eucapsis* cf. *starmachii*, *Epigloeosphaera* cf. *glebulenta*, *Lemmermanniella* cf. *flexa* y *Cyanodictyon* cf. *planctonicum*). Para el resto de las especies en la tabla 5 se especifica la fracción a la que pertenece y en la tabla 6 se comparan las características del picofitoplancton individual y colonial.

Del total de especies determinadas, sólo seis cianoprocarioras fueron dominantes por densidad, con una aparente periodicidad: *Synechococcus nidulans*, especie picofitoplanctónica individual dominó en abril. En mayo codominan *Oocystis parva* y *E.* cf. *starmachii*, en el resto de los meses dominaron las especies picofitoplanctónicas coloniales; *E.* cf. *starmachii* alcanzó su máximo en julio, sustituida en agosto -con un valor menor de densidad total- por un co-dominio de *E.* cf. *glebulenta* y *L.* cf. *flexa*; de septiembre a octubre *E.* cf. *glebulenta* fue la dominante total, reemplazada por *L.* cf. *flexa* en el mes de noviembre y diciembre. *Cyanodictyon* cf.

Tabla 5. Distribución del fitoplancton en el Lago Alchichica durante el lapso 2003/2004 (S = superficie, M = metalimnion, H = hipolimnion, <sup>1</sup>= picofitoplanctónica colonial, <sup>2</sup> = picofitoplancton individual, <sup>3</sup> = nanofitoplancton, <sup>4</sup> = microfitoplancton y <sup>5</sup> = ticoplancton).

| Especies                                | Abr |   |   | May |   |   | Jun |   |   | Jul |   |   | Ago |   |   | Sep |   |   | Oct |   |   | Nov |   |   | Dic |   |   | Ene | Columna |
|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---------|
|   | S   | M | H | S   | M | H | S   | M | H | S   | M | H | S   | M | H | S   | M | H | S   | M | H | S   | M | H | S   | M | H |     |         |
| <b>Cyanoprokaryota</b>                  |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |         |
| <sup>1</sup> <i>C. cf. planctonicum</i> | ♠   |   | ♠ |     | ♠ | ♠ |     |   | ♠ |     | ♠ | ♠ |     | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ |   |     | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <sup>1</sup> <i>E. cf. glebulenta</i>   | ♠   |   | ♠ | ♠   | ♠ |   | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <sup>1</sup> <i>E. cf. starmachii</i>   |     |   |   | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ |   |     |   | ♠ |     |   |   |     |   |   | ♠   |         |
| <sup>1</sup> <i>L. cf. flexa</i>        |     |   |   |     |   | ♠ | ♠   |   |   | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |   |   |     | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <sup>3</sup> <i>N. cf. spumigena</i>    |     | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |   |   | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |         |
| <sup>2</sup> <i>S. nidulans</i>         | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ |     | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <sup>2</sup> <i>Synechocystis</i> sp.   | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <b>Chlorophyta</b>                      |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |   |   |     |         |
| <sup>2</sup> <i>M. minutum</i>          | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <sup>2</sup> <i>M. dybowskii</i>        | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <sup>3</sup> <i>O. parva</i>            | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |
| <sup>3</sup> <i>O. submarina</i>        | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   | ♠ | ♠ | ♠   |         |

| <i>Especies</i>                          | <i>Abr</i> |   |   | <i>May</i> |   |   | <i>Jun</i> |   |   | <i>Jul</i> |   |   | <i>Ago</i> |   |   | <i>Sep</i> |   |   | <i>Oct</i> |   |   | <i>Nov</i> |   |   | <i>Dic</i> |   |   | <i>Ene</i> |   |   |         |
|--|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|---------|
|  | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | S          | M | H | Columna |
| <b>Cyanoprokaryota</b>                   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |         |
| <sup>3</sup> <i>Chl. indeterminada</i>   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   | ♣          |   | ♣ | ♣          |   |   | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          |   |   |         |
| <b>Heterokontophyta</b>                  |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |         |
| <sup>4</sup> <i>Cyclotella</i> sp.       | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ |            | ♣ | ♣ |            | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          |   |   |         |
| <sup>3</sup> <i>C. choctawhatcheeana</i> | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          |   |   |         |
| <sup>3</sup> <i>Ch. elmorei</i>          |            | ♣ |   | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          |   |   |         |
| <sup>3,5</sup> <i>Amphora</i> sp.        |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          |   |   |         |
| <sup>3,5</sup> <i>Cymbella</i> sp.       |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   | ♣          |   |   |            |   |   |            |   |   |         |
| <sup>3,5</sup> <i>Navicula</i> sp.       |            |   | ♣ |            |   | ♣ |            |   |   |            | ♣ |   |            |   |   |            |   |   |            |   | ♣ | ♣          |   |   |            |   |   | ♣          |   |   |         |
| <sup>3,5</sup> <i>Ephitemia</i> sp.      |            |   | ♣ |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |         |
| <sup>3,5</sup> <i>Nitzschia</i> sp.      |            |   | ♣ |            |   |   |            | ♣ |   | ♣          |   | ♣ | ♣          |   | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ |            | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          |   |   | ♣          |   |   |         |
| <sup>3</sup> <i>Ochromonas</i> sp.       | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ |   | ♣          |   | ♣ |            |   | ♣ |            |   |   |            |   |   |            | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ | ♣          |   |   |         |
| <b>Cryptophyta</b>                       |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |            |   |   |         |
| <sup>3</sup> <i>Cryptomonas</i> sp.      |            | ♣ | ♣ |            |   | ♣ |            | ♣ | ♣ | ♣          | ♣ | ♣ |            | ♣ | ♣ | ♣          |   | ♣ |            |   | ♣ |            | ♣ | ♣ | ♣          |   |   | ♣          |   |   |         |

*planctonicum* dominó únicamente a 20m en enero, en el resto de la columna fue *S. nidulans* (Fig. 11).

Considerando el biovolumen, las especies dominantes durante todos los meses fueron sólo dos, *Cyclotella* sp. (diatomea) y *Oocystis parva* (chlorococcal), excepto en el mes de septiembre, en el que domina en la parte superficial *Ch. elmorei* y en mayo (superficie) en el que compartieron el dominio *Nodularia* cf. *spumigena*, *Oocystis submarina*, *Chaetoceros elmorei* y *Cyclotella choctawhatcheeana*, esta última diatomea dominó también en diciembre en toda la columna (Fig. 13).

Las diatomeas: *Cymbella* sp., *Navicula* sp., *Ephitemia* sp. y *Nitzschia* sp., fueron registradas con bajas densidades y biovolúmenes en todos los meses y en la vertical, mostrando una presencia esporádica, mientras que *Amphora* sp. incrementó su densidad y biovolumen a partir de agosto a noviembre, principalmente en la superficie y metalimnion, sin embargo, nunca fue dominante. La Chrysophyceae (*Ochromonas* sp.) y la Cryptophyta (*Cryptomonas* sp.) mostraron una presencia relativamente constante pero con muy bajas densidades y biovolúmenes, en general fueron registradas principalmente en el metalimnion.

Tabla 6. Características del picofitoplancton individual y picofitoplancton colonial

| Características   | <i>Picofitoplancton</i> | <i>Picofitoplancton</i>  |
|---|-------------------------|--|
|   | <i>Individual</i>       | <i>Colonial</i>  |
| Tamaño  | 0.2 a 2.0 µm            | 5.0 a 140 µm   |
| Relación superficie/volumen   | Baja                    | Alta   |
| Presencia de mucílago   | No                      | Sí   |
| Herbivoría  | Alta                    | Baja   |
| Tasa de reproducción  | Alta                    | Baja   |
| Comunes en lagos  | Sí                      | No   |
| Presencia en lagos con escasez de nutrientes                                      | Sí                      | Sí   |
| Sedimentación   | Baja                    | Dudoso: quizá alta por su gran tamaño; quizá menor por la presencia de un mucílago delgado |
| Asimilación de nutrientes   | Rápida                  | Limitada, principalmente en especies con células dentro de un mucílago                     |
| Formación de colonias como estrategia para mejorar el reciclamiento de nutrientes | -----                   | Dudoso, por la limitación del mucílago   |
| Presencia de mucílago como un mecanismo fotoprotector                             | No                      | Posible  |

## ii) Descripción de especies

En la descripción de las especies se mencionan los intervalos de los descriptores que varían a lo largo del periodo de estudio, considerando que los demás parámetros conservativos (*sensu* Margalef 1983, es decir, aquellos que no varían en espacio ni en tiempo porque sus concentraciones no se ven afectadas por la actividad biológica) se encuentran publicados en Vilaclara *et al.* (1993), y prácticamente no han cambiado para años recientes (Vilaclara *et al.* 2002).

### Cyanoprokaryota

Cyanophyceae  
Chroococcales  
Synechocaceae  
Synechococcoideae

***Synechococcus nidulans*** (Pringsheim) Komárek in Bourrelly (1970) Lámina 1. Fig. 1 a-b

Sinónimos: < *Anacystis nidulans* Drouet > *sensu* Kratz & Myers 1955 et auct. Post (non *Anacystis nidulans* (Richter) Drouet et Daily 1952 = *Aphanothece nidulans* Richter in Wittrock et Nordstedt 1884); = *Lauterbornia nidulans* Pringsheim 1968; = *Synechococcus leopoliensis* (Raciborski) Komárek 1970 sine typo.

Células solitarias que no forman colonias distintivas (fig. 1a); carecen de capas mucilaginosas que envuelvan a la célula; las células son cilíndricas, alargadas, a veces ligeramente arqueadas después de la división (fig. 1b). El contenido celular es homogéneo (fig. 1a), de color verde-azul pálido, sin vesículas de gas. La división celular es perpendicular al eje longitudinal (fig. 1a). Dimensiones celulares 1.5-4.9 x 0.9-2  $\mu\text{m}$  (n= 40).

Comentarios: con respecto a este género se han realizado trabajos moleculares que prueban la existencia de diversos “morfotipos” originados por especiación en una localidad o ambiente particular, restringiendo así su distribución geográfica (Crosbie *et al.* 2003). Por tal razón, algunos autores prefieren nombrar tipo o morfo a las especies de *Synechococcus*; sin embargo, en el presente estudio y siguiendo el esquema de clasificación de Komárek y Anagnostidis (1999), dadas las coincidencias morfológicas se toma la decisión de nombrar a la especie de *Synechococcus* observada en Alchichica como *S. nidulans*. Es la primera mención de esta especie para Alchichica (dado que no aparece en Oliva *et al.* 2001). Sin embargo, es



importante considerar que esta especie se ha reportado sólo para zonas templadas, implicando que es la primera mención en zonas tropicales, por lo cual ha de confirmarse adecuadamente su asignación taxonómica. De hecho, convendría usar los cuatro criterios –morfológico, molecular, fisiológico y ecológico (Komárek 1996) para determinar adecuadamente tanto ésta como las demás especies del fitoplancton. No obstante, se ha de tomar en cuenta que un trabajo limnológico como el presente implica la revisión de muestras con base en su morfología, y que apenas ahora empiezan a hacerse trabajos elaborados que incluyen algunos de estos cuatro aspectos para algunas especies fitoplanctónicas (Kooistra *et al.* 2004). Por motivos prácticos y como ya se ha mencionado, se siguen aquí los criterios morfológicos, matizados con algunos aspectos ecológicos que se conocen para las especies de Alchichica en relación con los descritos para especies semejantes en otras partes del mundo.

Ecología en Alchichica: planctónica, con presencia importante en abril (en metalimnion y epilimnion), y en enero distribuida en toda la columna; en el resto de los meses se mantuvo presente principalmente en el metalimnion.

|             | Biovol.<br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Den.<br>( $\text{cél mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Chl a<br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Chl a<br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Temp.<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | O. D.<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>( $\mu\text{M}$ ) | N- $\text{NO}_3^-$<br>( $\mu\text{M}$ ) | N- $\text{NH}_3$<br>( $\mu\text{M}$ ) | DIN<br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------------|---|--|--|--|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|
| Abril       | 17–20   | 4.5–5.5                                    | 0.3–1.8  | 0.3–2.5  | 19–15.8                         | 5.2–6.6                         | 3.8                    | 0.2–0.7                  | 0.3–0.9                                 | 1.9–6.2                               | 2.6–7.9                  |
| Enero       | 35–54   | 9.6–15                                     | 2.3–3.1  | 0.3–0.5  | 14–16                           | 5.5–6.2                         | 7.7                    | 0.6–0.8                  | 0.4–0.9                                 | 1.3–1.9                               | 2.0–3.0                  |
| Metalimnion | 0.3–20  | 0.06–5.6                                   | 0.1–5.7  | 0.1–2.5  | 14.5–19                         | 0.3–6.9                         |                        | 0.1–0.3                  | 0.1–4.4                                 | 0.5–3.2                               | 1.0–6.6                  |

#### Aphanothecoideae

#### ***Cyanodictyon cf. planctonicum*** Meyer (1994) Lámina 1. Fig 3 a-b

Sinónimos: *Cyanodictyon reticulatum* sensu Hickel 1981; *Aphanothece clathratiformis* var. *maior* Liebetanz 1925.

Colonia inicialmente pequeña y más o menos esférica, 21–55- x 7–43-  $\mu\text{m}$  (n= 20), tridimensional, después alargada a irregular, reticulada (fig. 3a-b); mucílago liso, fino, incoloro, únicamente visible al teñirse con azul alciano (fig. 3a-b); células dentro de la colonia formando líneas de pseudofilamentos (fig. 3a-b), células ovales hasta en forma de bastón recto (fig. 3b), o algunas veces ligeramente curvada, distribuidas en la parte interna del mucílago, en hileras uniseriadas a multiseriadas (fig. 3a-b); la división celular ocurre perpendicular al eje longitudinal. Dimensiones celulares 1–3 x 1  $\mu\text{m}$  (n= 40).

Comentarios: en la bibliografía ha sido reportada como planctónica para lagos eutróficos, en Dinamarca, Alemania y Canadá (Komárek y Anagnostidis 1999, Komárek 2003). Basados en estas diferencias ecológicas –dada la naturaleza oligotrófica con cortos periodos de mesotrofia, en Alchichica- se decidió utilizar confer para *Cyanodictyon* cf. *planctonicum* pese a que las características morfológicas coinciden plenamente con las reportadas para la especie tipo. Con base en Komárek y Anagnostidis (1999) y Komárek 2003 parece ser que los datos ecológicos mencionados en este trabajo para *C.* cf. *planctonicum* son los primeros para regiones tropicales.

Ecología en Alchichica: planctónica, con presencia importante en diciembre (20-23 m) y enero (20 m) bajo condiciones de menor temperatura en el agua.

|                        | Biovol.<br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Dens.<br>(cél $\text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Chl a<br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Chl a<br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Temp.<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | O. D.<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NO <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | N-H <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | DIN<br>( $\mu\text{M}$ ) |
|------------------------|---|--|--|--|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|
| Diciembre<br>(20-23 m) | 59  | 59   | 3.7  | 1.1  | 15.4                            | 5.5                             | 4.75                   | 0.2                      | 0.3                                    | 0.6                                   | 1.1                      |
| Enero<br>(20 m)        | 16  | 16   | 2.6  | 0.3  | 14.1                            | 5.8                             | 7.7                    | 0.7                      | 0.6                                    | 1.9                                   | 2.6                      |

***Epigloesphaera* cf. *glebulenta*** (Zalessky) Komárková-Legnerová (1991) Lámina 2 Fig. 4 a-f  
Sinónimos: *Aphanothece glebulenta* Zalessky 1926

Colonias mucilaginosas, más o menos esféricas (fig. 4a y d), solitarias (fig. 4e) o con subcolonias (fig. 4a y d); forma grupos irregulares, estrechamente agrupados, 8-134 x 7-33  $\mu\text{m}$  (n= 20). Células situadas en la superficie externa de la colonia (fig. 4c), distribuidas irregularmente, distantes unas de otras. Mucílago visible sólo al tefirse, incoloro, homogéneo, delimitado y liso en la superficie; las células son ovales a forma de bastón con puntas redondeadas, cuando están en división (fig. 4b, c y f), aunque predominan las células ovales; la división es perpendicular al eje longitudinal de la célula (fig. 4f). Dimensiones celulares, 1.2-2 x 0.8-1.2  $\mu\text{m}$  (n= 40).

Comentarios: en la bibliografía, las poblaciones se han reportado como típicas de hábitat bentónico, epipélico en estanques y lagos oligotróficos a ligeramente eutróficos; facultativamente en el plancton (solitarias o formando pequeñas colonias compuestas); observada principalmente en lagos y estanques europeos fríos, en áreas templadas y en Norte América en pequeños lagos en el centro de Canadá (Komárková-Legnerová 1991, Komárek y Anagnostidis 1999, Komárek 2003). Probablemente, los escasos reportes limitan el conocimiento sobre su forma de vida y

datos ecológicos; por tal motivo, pese a que en la literatura se menciona como una especie principalmente bentónica, en el Lago Alchichica sin duda se comporta como una especie planctónica con dominancia o altas densidades durante prácticamente todo el periodo de estratificación. Es por esta razón que se ha decidido dejar *confer* a la especie de Alchichica, aunque las demás características coinciden plenamente con la definida por Komárková-Legnerová. Con base en la bibliografía (Komárková-Legnerová 1991, Komárek y Anagnostidis 1999, Komárek 2003) los datos ecológicos reportados en este trabajo para *E. cf. glebulenta* son los primeros para regiones tropicales.

Ecología en Alchichica: planctónica, presente durante todo el periodo de estratificación, con máximos en junio (0 a 18m), julio (0 a 33 m), agosto (0 a 24 m), septiembre (0 a 32 m), octubre (0 a 29m), noviembre (0 a 34 m) y diciembre (0 a 40 m), bajo condiciones de relativamente altas concentraciones de nutrimentos. Durante el periodo de mezcla las densidades sufrieron un drástico decremento.

|            | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( <i>cél mL</i> <sup>-1</sup> )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>(°C) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>(m) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|------------|--|--|---|---|----------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Junio      | 14-21  | 23-33  | 1.0-1.1   | 0.9-1.7   | 15.8-22              | 4.7-6.7                                | 3.6                                  | 0.1-0.2                         | 0.1-2.2                                      | 0.7-9.1                                      | 0.9-9.3                         |
| Julio      | 12-44  | 19-70  | 0.5-1.6   | 0.4-0.5   | 14.6-19              | 0-6.5                                  | 4.2                                  | 0.2-0.4                         | 0.2-11                                       | 0.5-2.6                                      | 0.8-15                          |
| Agosto     | 8.5-30   | 14-48  | 0.4-1.3   | 0.4-0.5   | 15.3-19              | 1.7-6.9                                | 3.0                                  | 0.1-0.3                         | 0.1-4.4                                      | 0.3-2.8                                      | 0.4-6.6                         |
| Septiembre | 5.7-10   | 9.2-17   | 0.1-4.3   | 0.4-0.9   | 15-19.7              | 0-6.7                                  | 7                                    | 0.2-0.4                         | 0.06-5.4                                     | 0.7-4.4                                      | 1.4-11.5                        |
| Octubre    | 10-12  | 17-19  | 0.1-2.2   | 0.4-0.6   | 15-19.6              | 1.7-6.8                                | 5.5                                  | 0.2-0.3                         | 0.2-1.1                                      | 0.3-1.0                                      | 0.7-2.8                         |
| Noviembre  | 11-14  | 18-23  | 0.3-5.7   | 0.04-0.1  | 14.6-18              | 0-7.0                                  | 6.5                                  | 0.1-0.2                         | 0.2-0.8                                      | 1.1-3.2                                      | 1.4-4.1                         |
| Diciembre  | 10-16  | 16-25  | 2.7-3.7   | 0.8-1.1   | 14.7-16              | 0.3-6.2                                | 4.8                                  | 0.17-0.2                        | 0.2-0.4                                      | 0.2-0.8                                      | 0.7-1.1                         |

***Lemmermanniella cf. flexa* Hindák (1985) Lámina 3. Fig. 5 a-f**

Colonias más o menos esféricas (fig. 5d-e) o irregularmente ovoides a elípticas (fig. 5f), mucilaginosas, 35-110 x 10-60  $\mu\text{m}$  (n= 20), predominan las colonias simples e irregulares disgregadas; mucílago fino, homogéneo, visible solo al teñirse (fig. 5e), incoloro, liso. Células solitarias o en dos después de la división (fig. 5c), no se observaron cortas (4 células) hileras de pseudofilamentos a diferencia de la especie tipo; células estrechas en forma de bastón cilíndrico largo (fig. 5c) a forma de salchicha cuando están en división, ligeramente curvadas con puntas redondeadas (fig. 5b y c), predominan las células en forma de bastón cilíndricos; células

irregularmente arregladas en una capa justo debajo de la periferia del mucílago colonial, generalmente distantes unas de otras (fig. 5a y f), aunque en algunas colonias se observan estrechamente agrupadas (fig. 5d-e); la división celular ocurre perpendicular al eje longitudinal de la célula (fig. 5b). Dimensiones celulares, 1.8-4 x 0.8-1  $\mu\text{m}$  (n= 40).

Comentarios: en la bibliografía se ha reportado como planctónica durante el verano y otoño, conocida sólo para un lago somero con fondo de grava y flujo irregular de aguas termales, en Eslovakia (Komárek y Anagnostidis 1999). Las diferencias ecológicas entre la especie tipo y la especie descrita en Alchichica dieron la pauta para utilizar el criterio confer. Con base en esta bibliografía, los datos ecológicos reportados en este trabajo para *L. cf. flexa* son los primeros para regiones tropicales.

Ecología en Alchichica: planctónica, con presencia importante en julio (16 a 22 m), agosto (17 a 24 m), noviembre (0 a 36 m) y diciembre (0 a 61 m).

|           | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( $\text{cél mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>(m) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-----------|--|---|---|---|--|--|--------------------------------------|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Julio     | 83-173   | 71-150  | 1.1-1.6   | 0.4   | 15-19                                  | 2.3-6.1                                | 4.2                                  | 0.2                             | 0.3-0.7                                      | 0.8-2.3                                      | 1.2-3.4                         |
| Agosto    | 43-143   | 37-123  | 0.4-1.3   | 0.4   | 15-18                                  | 1.7-6.1                                | 3.0                                  | 0.2                             | 0.09-4.4                                     | 1.9-2.8                                      | 2.9-6.6                         |
| Noviembre | 10-150   | 8.9-130   | 0.3-5.7   | 0.04-0.1  | 15-18                                  | 0-7.0                                  | 6.5                                  | 0.1-0.2                         | 0.2-0.8                                      | 1.1-3.2                                      | 1.7-4.1                         |
| Diciembre | 70-100   | 59-86   | 0.5-3.7   | 0.3-1.1   | 15-16                                  | 0-6.2                                  | 4.75                                 | 0.1-0.2                         | 0.2-0.4                                      | 0.4-0.8                                      | 0.5-1.1                         |

Merismopediaceae  
Merismopedioideae

### ***Synechocystis* sp.** Lámina 1. Fig. 2 a-b

Células solitarias o en pares por corto tiempo después de la división (fig. 2b); células esféricas, raramente ovals y sólo después de la división (fig. 2a-b); color usualmente verde-azul pálido. Contenido celular homogéneo (fig. 2a); la división celular ocurre regularmente en dos planos perpendiculares en sucesivas generaciones (fig. 2b). Dimensiones celulares 1-2 $\mu\text{m}$  de diámetro (n= 20).

Comentarios: en el lago de Alchichica, Oliva (2001) y Oliva *et al.* (2001) reportan la especie *Synechocystis aquatilis*; sin embargo, las medidas registradas son mucho menores a las reportadas para esta especie en el presente estudio.

Ecología en Alchichica: planctónica, con importante presencia durante abril, principalmente en el epilimnion, y en enero distribuida en toda la columna; en el resto de los meses mantuvo aportes constantes y mayores a los de *S. nidulans*, principalmente en el metalimnion.

|             | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( $\text{cél mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>( <i>m</i> ) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------------|--|---|---|---|--|--|---|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Abril       | 4.9  | 1.5   | 0.3   | 1.2   | 17.4-19                                | 6.0-6.6                                | 3.8   | 0.4-0.7                         | 0.4-0.9                                      | 3.4-6.2                                      | 4.2-8.0                         |
| Enero       | 4.0-16   | 1.2-5.1   | 2.3-3.1   | 0.3-0.5   | 14-16                                  | 5.5-6.2                                | 7.7   | 0.6-0.8                         | 0.4-0.9                                      | 1.3-1.9                                      | 2.0-3.0                         |
| Metalimnion | 0.9-10   | 0.2-3.2   | 0.1-5.7   | 0.1-2.5   | 14.5-19                                | 0.3-6.9                                |   | 0.1-0.3                         | 0.1-4.4                                      | 0.5-3.2                                      | 1.0-6.6                         |

### Microcystaceae

*Eucapsis cf. starmachii* Komárek et Hindák (1989) Lámina 4. Fig. 6 a-b

Sinónimos: *Chroococcus parallelepipedon* sensu Hansgirg 1892.

Colonias pequeñas (fig. 6a-b), con células arregladas en tres dimensiones en forma irregularmente cúbica (fig. 6b), 20-10 x 8-5  $\mu\text{m}$  (n= 20), usualmente con un pequeño número de células, (1-3) 4-16 (32), las cuales se encuentran distantes unas de otras por una longitud de más o menos el diámetro celular; en filas cortas, perpendiculares, algunas veces con pequeñas irregularidades; otras veces compuestas por subcolonias; mucílago incoloro, difluente, liso, visiblemente grueso al teñirse con azul de alciano (fig. 6a); las células son esféricas o ligeramente ovales después de la división (fig. 6b); color verde-azul pálido; sin vesículas de gas; la división celular ocurre regularmente en tres planos perpendiculares en sucesivas generaciones. Dimensiones celulares, 1-2 $\mu\text{m}$  (n= 40).

Comentarios: las características observadas en los ejemplares coinciden con las descritas para *Eucapsis starmachii*; sin embargo, los ambientes en los que ha sido observada son de tipo pantano o turberas en las tierras bajas o montañosas en Europa Central con presencia esporádica (Komárek y Anagnostidis 1999); condiciones contrarias a las del presente estudio. En general, una ecología muy disímil a la original de la especie descrita, cuando ésta no es cosmopolita, tiende a sugerir que podrían tratarse de especies diferentes (Stoermer, com. pers.); sin embargo, las características morfológicas coinciden plenamente con la especie mencionada. Con base la bibliografía (Komárek y Anagnostidis 1999, Komárek 2003) los datos ecológicos reportados en

este trabajo para *E. cf. starmachii* son los primeros para regiones tropicales. En trabajos anteriores Oliva (2001), Oliva *et al.* (2001) no fue reportada esta especie.

Ecología en Alchichica: planctónica, con importante presencia en mayo y junio en el metalimnion y en julio en el epilimnion, metalimnion y oxiclina; durante abril y de octubre a enero no fue registrada. En los meses que esta especie mostró altas densidades, coinciden con un incrementó en la temperatura y estabilidad de la columna de agua.

|       | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( $\text{cél mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>(m) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------|--|---|---|---|--|--|--------------------------------------|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Mayo  | 20   | 20  | 1.2   | 0.9   | 16-19.4                                | 4.7-6.9                                | 3.5                                  | 0.1-0.2                         | 0.09-0.2                                     | 2.0-2.8                                      | 2.4-2.9                         |
| Junio | 95   | 100   | 1.1   | 1.7   | 16-19                                  | 4.7-6.3                                | 3.6                                  | 0.1                             | 0.2-2.2                                      | 2.3-2.4                                      | 2.5-5.9                         |
| Julio | 83-141   | 90-150  | 0.5-1.1   | 0.4-0.5   | 16-19                                  | 1.0-6.5                                | 4.2                                  | 0.16-0.2                        | 0.2-1.7                                      | 0.5-2.3                                      | 0.8-3.4                         |

Nostocales  
Nostocaceae

***Nodularia cf. spumigena*** Mertens ex Bornet et Flahault (1886) Lámina 4. Fig. 7 a-b

Filamentos rectos, uniseriados (fig. 7a-b), únicos, o formando densas natas de color verdoso; vaina delgada, fina pero distinguible, incolora y transparente. Tricomas cilíndricos (fig. 7a-b), con constricciones en los septos, no atenuados hacia la parte terminal. Células en forma de barril, discoidales, siempre distintivamente más cortas que anchas (fig. 7a-b), con vesículas de gas. Heterocitos cortos (7-5 x 11-9  $\mu\text{m}$ , n= 20), intercalares (fig. 7a), localizados a distancia más o menos regular unos de otros, subsféricos o discoidales. No se observaron acinetos. Dimensiones celulares 6-3 x 10-7  $\mu\text{m}$  (n= 20). Difiere de la especie tipo –descrita para el mar Báltico- en que el morfotipo de Alchichica (cuya salinidad es considerablemente diferente en composición iónica a la del Mar Báltico) siempre presenta filamentos rectos, nunca espiralados o enrollados; otras diferencias son las finas vainas y fuertes constricciones en las paredes que separan las células.

Comentarios: en la bibliografía se ha sido reportado como una especie de aguas salinas o salobres (Hamel y Huber 1985, Galat *et al.* 1990, Kononen 1992, 2001, Pérez *et al.* 1999)

Ecología en Alchichica: planctónica, con presencia importante en mayo y junio, en la superficie, con un aumento relativo en la temperatura y estabilidad, así como una limitación por nitrógeno en el mes de mayo. Sin embargo, durante el lapso de estudio y las fechas de muestreos,

el florecimiento de *Nodularia* fue bastante inferior a los reportados para otros años (Oliva *et al.* 2001), lo cual probablemente explique el bajo número observado de heterocitos.

|       | Biovol.<br>( $\mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Den.<br>(cél $\text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Heterocito<br>( $\text{mL}^{-1}$ de<br>agua) | Heterocito<br>( $\text{mm}^{-1}$ fi-<br>lamento) | Chl a<br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Chl a<br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Temp.<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | O. D.<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NH <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | DIN<br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------|--|---|--|--|--|--|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|---|--|--------------------------|
| Mayo  | 300  | 1.3                                       | 9-80   | 16   | 2.9  | 0.5  | 20-22                           | 7.0-6.6                         | 3.5                    | 0.2-0.3                  | 0.2-0.4   | 4.4-5.9                                | 4.9-6.1                  |
| Junio | 300  | 1.3                                       | 9-120  | 18   | 1.0  | 0.9  | 21-22                           | 6.7-6.2                         | 3.6                    | 0.15-<br>0.2             | 0.1-0.2   | 0.7-1.6                                | 0.9-1.8                  |

## Cryptophyta

### Cryptophyceae

#### Cryptomonadaceae

#### *Cryptomonas* sp. Lámina 4. Fig. 9 a

Células de contorno reniforme o elíptico, más ancha en la parte anterior que posterior que es puntiaguda y ligeramente curvada hacia la parte dorsal (fig. 9a); la depresión apical es ancha y profunda; células con dos flagelos ligeramente desiguales en la parte terminal anterior, que pueden alcanzar la longitud celular (fig. 9a), 2 cloroplastos de color café y de posición parietal ubicados en la zona dorsal (fig. 9a). Dimensiones celulares 10-7 x 5-4  $\mu\text{m}$  (n= 10).

Comentarios: debido a su escasa presencia y la degradación que sufre la célula se dificultó su identificación; sin embargo Oliva (2001) reporta la especie de *Cryptomonas ovata* en este lago y destaca su presencia en otros lagos cráter: Quechulac, Atexcac y Aljojuca.

Ecología en Alchichica: planctónica, especie que apareció muy poco y con bajas densidades en el lago, sin definir su presencia en alguna capa en particular.

## Heterokontophyta

### Chrysophyceae

#### Chrysomonadae

##### Ochromonadales

##### Ochromonadaceae

##### Ochromonadoideae

### *Ochromonas* sp. Lámina 4. Fig. 8 a

Células vegetativas solitarias, esféricas a ovoides (fig. 8a), con una plasticidad pronunciada; con dos flagelos que pueden alcanzar la longitud celular. Presentan 1 ó 2 cloroplastos de color café-dorado y una o más vacuolas contráctiles. Dimensiones celulares 4.0-7.5  $\mu\text{m}$  (n= 20).

Comentarios: es difícil determinar la especie debido a la rápida degradación que sufren las células y a su constante movimiento cuando se observa en vivo; en trabajos anteriores (Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001) no ha sido reportada.

Ecología en Alchichica: planctónica, especie que apareció esporádicamente con bajas densidades durante todo el periodo de estudio; en los meses que registró un ligero aumento en su densidad fue en agosto (metalimnion y oxiclina), septiembre (metalimnion) y octubre (oxiclina).

|            | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( $\text{cél mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>( <i>m</i> ) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|------------|--|---|---|---|--|--|---|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Agosto     | 32-41  | 0.5-6.2   | 0.4-1.4   | 0.3-0.4   | 15-18.4                                | 0.1-6.0                                | 3   | 0.19-0.2                        | 0.09-4.4                                     | 1.9-2.8                                      | 2.9-6.6                         |
| Septiembre | 20   | 0.3   | 0.5   | 0.9   | 16-19                                  | 3.4-7.0                                | 7   | 0.2-0.3                         | 0.2-1.1                                      | 1.0-1.2                                      | 1.4-2.4                         |
| Octubre    | 16   | 0.2   | 2.2   | 0.6   | 15-18                                  | 0.9-6.8                                | -   | 0.2                             | 0.5  | 0.5  | 1.2                             |

## Bacillariophyceae

### Coscinodiscophyceae

#### Thalassiosirales

#### Thalassiosiraceae

### *Cyclotella* sp. L.W. Bailey (1922) Lámina 5. Fig. 10 a-f

Valvas usualmente planas (fig. 10a)—a diferencia de la especie tipo, que las tiene onduladas tangencialmente (Hakansson 2002)—, con diámetro (n=25) de 35-55  $\mu\text{m}$  (11-70  $\mu\text{m}$  según Hakansson op. cit.). Valvas con un área central poco ornamentada en el exterior y lisa en el interior (fig. 10a-c), con un anillo irregular de 4 a 11 fultopórtulas centrales (FPc fig. 10b, un



número bajo si consideramos que se reporta hasta 60), con 3 ó 4 poros satélites (fig. 10d; contra sólo 3 que menciona la literatura). Típicamente presenta gránulos en la superficie valvar y, especialmente, alrededor de los poros de salida exteriores de las FP centrales, que están asimismo ligeramente engrosados (Fig. 10c). Área marginal con estrías e interestrías; las estrías presentan 3 a 4 hileras de areolas, ubicadas en una ligera depresión, y se continúan inconspicuamente hacia el centro valvar, pues en el centro, donde se termina el margen valvar, ya no se observan claramente las areolas, sino surcos poco profundos, sinuosos y anastomosados (fig. 10a, c y e). Las interestrías están ligeramente abombadas, presentan dos hileras de areolas separadas por una zona central hialina (*C. quillensis* no presenta areolas), y una espina en el extremo (a diferencia de *C. quillensis*, en la que las espinas están al final de cada estría), las cuales pueden observarse contiguas, o bien dejar espacios de una a dos interestrías. Las espinas están bien desarrolladas, a veces se observan rectas y torcidas, otras veces son curvadas y lisas; pueden ser únicas o dobles; algunos ejemplares presentan numerosas espinas pequeñas en la base del manto (fig. 10e). Las FP marginales son pequeñas, tubulares, sin poros satélites claramente delimitados, sólo se observa una marca anular por debajo del poro y, al igual que las espinas, se encuentran adyacentes entre sí, o bien separados cada una a dos costillas (fig. 10f; lo cual, como con las espinas, es otra de las diferencias importantes con la especie que más se le asemeja); no se observa claramente el poro exterior de las FP marginales. En la valva interior tiene una única rimopórtula (o proceso labiado, RP), en forma de abanico, con un labio delgado y extendido, y una salida exterior muy poco visible, apenas una hendidura a veces indistinguible (fig. 10f y e) lo cual también es una diferencia con *C. quillensis*, que la tiene algo protruida, Hakansson 2002).

Comentarios: vistas todas las diferencias con la especie más cercana, *C. quillensis*, parece obvio que se trata de una nueva especie. Así lo han considerado Oliva y colaboradores (comunicación personal), quienes actualmente están trabajando para generar una nueva especie.

Ecología en Alchichica: planctónica, con presencia importante en septiembre (26 a 32 m), octubre (26 a 34 m) y noviembre (31 a 34 m).

|            | Biovol.<br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Den.<br>(cél $\text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Chl a<br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Chl a<br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Temp.<br>(° C) | O. D.<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NO <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NH <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | DIN<br>( $\mu\text{M}$ ) |
|------------|---|---|--|--|----------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--|--|--------------------------|
| Septiembre | 5800-<br>8600   | 0.2-0.4                                   | 3.4-4.3  | 0.4-0.7  | 15-16          | 0-3.4                           | 7.0                    | 0.2                      | 2.4-5.4                                | 0.7-2.9                                | 3.0-11.5                 |
| Octubre    | 3600-<br>10200  | 0.2-0.4                                   | 2.2-5.3  | 0.1-0.6  | 15-18          | 0-6.8                           | 5.5                    | 0.17-0.2                 | 0.5-0.9                                | 0.5                                    | 1.2-1.6                  |
| Noviembre  | 8800-<br>9000   | 0.3-0.4                                   | 5.7  | 0.1  | 15-17          | 0-6.2                           | 6.5                    | 0.2                      | 0.8                                    | 3.2                                    | 4.1                      |

***Cyclotella choctawhatcheeana*** Prasad (1990) Lámina 6. Fig. 11 a-f

Valvas onduladas tangencialmente, con diámetro (n=20) de 7-10  $\mu\text{m}$ . El área central de la valva externa está ligeramente convexo (fig. 11a) a ondulado (fig. 11c). Presenta gránulos en la superficie valvar cercanos al área marginal y colocados en las estrías (fig. 11a y c). Área marginal con estrías e interestrías que no se continúan hacia la parte central (11a); las estrías presentan 2 a 4 hileras de areolas, ubicadas en una ligera depresión; las interestrías son delgadas, ligeramente abombadas y no presentan areolas. Se observan 1 a 3 FP valvares ubicadas en la zona abultada externamente (fig. 11b, d y f). El túbulo de cada FP central es corto y está rodeada de 3 poros satélites (Fig. 11d y f). Las FP marginales son pequeñas, tubulares, con dos poros satélites (fig. 11d y f), y se encuentran cada una a tres costillas; el poro exterior de la FP marginal está claramente definido, es poco conspicuo y se encuentra colocado en la interestría (fig. 11e). Tiene una RP, observada internamente como en forma de abanico, con un labio delgado y extendido; su salida exterior es sencilla, apenas una hendidura (fig. 11f). Coincide bien con la especie tipo (Oliva com. per.).

Comentarios: en la bibliografía esta especie ha sido reportada como típica habitante de lagos salinos y alcalinos (Galat *et al.* 1981, 1990).

Ecología en Alchichica: planctónica, con presencia importante durante noviembre (0 a 34 m) y diciembre en toda la columna.

|           | Biovol.<br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Den.<br>(cél $\text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Chl a<br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Chl a<br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Temp.<br>(° C) | O. D.<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NO <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NH <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | DIN<br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-----------|---|---|--|--|----------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--|--|--------------------------|
| Noviembre | 170-300   | 0.8-1.4                                   | 0.3-5.7  | 0.04-0.1   | 15-18          | 0-7.0                           | 6.5                    | 0.1-0.2                  | 0.2-0.8                                | 1.1-3.2                                | 1.4-4.1                  |
| Diciembre | 80-510  | 0.4-2.4                                   | 0.5-3.7  | 0.3-1.1  | 14-16          | 0-6.2                           | 4.8                    | 0.2-7.6                  | 0.1-0.4                                | 0.2-44                                 | 0.5-44                   |

Chaetocerotales

Chaetocerotaceae

***Chaetoceros elmorei*** Boyer (1914) Lámina 7. Fig. 12 a-d

Células rectangulares en vista conectiva, células más largas que anchas (fig. 12 a-c), convexas a planas, unidas en cadenas de 7 células como máximo (fig. 12 a-b). Las valvas son elípticas y consistentemente muestran procesos bien definidos en la mayor parte de las células, las valvas terminales de la cadena no muestran procesos. Las sedas son robustas (fig. 12d) y algunas veces ligeramente onduladas, y divergen en un ángulo de 45 ° del plano valvar (fig. 12a-b); las sedas en las valvas terminales están generalmente orientadas más paralelamente a las cadenas que a las sedas intercalares. No se observaron esporas de resistencia. Dimensiones celulares 7.5-11.0 x 5.0-7.0 µm (n= 25). Los organismos observados durante el periodo de estudio mostraron cadenas con menor número de células a las reportadas por Oliva 2001.

Comentarios: en la bibliografía esta especie se ha reportado en ambientes salinos y alcalinos (Galat *et al.* 1981, Hammer *et al.* 1983, Fritz *et al.* 1993).

Ecología en Alchichica: planctónica, con un máximo durante septiembre (superficie) y una presencia importante de mayo a diciembre, principalmente en el epilimnion.

|            | Biovol.<br>(µm <sup>3</sup> mL <sup>-1</sup> )<br>10 <sup>3</sup> | Den.<br>(cél mL <sup>-1</sup> )<br>10 <sup>3</sup> | Chl a<br>> 2 µm<br>(µg L <sup>-1</sup> ) | Chl a<br>< 2 µm<br>(µg L <sup>-1</sup> ) | Temp.<br>(°C) | O. D.<br>(mg L <sup>-1</sup> ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>(µM) | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(µM) | N-NH <sub>3</sub><br>(µM) | DIN<br>(µM) |
|------------|---|--|--|--|---------------|--------------------------------|------------------------|-------------|--|---------------------------|-------------|
| Septiembre | 180   | 0.9  | 0.1                                      | 0.7                                      | 19-19.7       | 6.7                            | 7.0                    | 0.3-0.4     | 0.3-0.4                                | 1.6-3.8                   | 2.0-4.5     |
| Epilimnion | 28-150  | 0.1-0.7  | 0.1-2.9                                  | 0.04-0.9                                 | 16-22         | 7.0-6.0                        |                        | 0.15-0.3    | 0.1-0.4                                | 0.5-6.0                   | 0.7-6.1     |

## Chlorophyta

Chlorophyceae

Chlorococcales

Chlorellaceae

Ankistrodesmoideae

***Monoraphidium minutum*** (Nägeli) Komárková-Legnerová (1969) Lámina 8. Fig. 13 a

Sinónimos: *Raphidium minutum* Näg 1849; *Selenastrum minutum* (Näg.) Collins 1909; *Ankistrodesmus minutissimus* Korsch. 1953; *Choricystis minuta* (Näg.) Hind. 1988.

Células cilíndricas hasta ligeramente fusiformes, arqueadas o levemente sigmoides; extremos cilíndricos o levemente atenuados; polos redondeados; cloroplasto parietal que ocupa casi todo el contenido celular, sin pirenoide (fig. 13a). Dimensiones celulares 4-7 x 1-2  $\mu\text{m}$  (n= 20); las células del lago Alchichica son menos largas a las reportadas por Comas (1996). En esta bibliografía se menciona como más frecuente en los trópicos, en cuerpos de agua más o menos alcalinos.

Ecología en Alchichica: planctónica, con máximos en enero en toda la columna; durante todo el periodo de estratificación, mostró una constante e importante presencia principalmente en el epilimnion y metalimnion.

|             | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( <i>cél</i> $\text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>( <i>m</i> ) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>4</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------------|--|--|---|---|--|--|---|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Enero       | 11-15  | 3.8-5.2  | 2.3-3.1   | 0.3-0.5   | 14-16.2                                | 6.3-5.2                                | 7.7   | 0.6-0.8                         | 0.4-0.9                                      | 1.3-1.9                                      | 1.9-3.0                         |
| Epilimnion  | 1.2-11   | 0.4-4.0  | 0.1-2.9   | 0.04-1.2  | 15.4-22                                | 5.3-7.0                                |   | 0.1-0.7                         | 0.06-1.1                                     | 0.3-9.1                                      | 0.4-9.3                         |
| Metalimnion | 0.8-9.0  | 0.3-3.1  | 0.1-5.7   | 0.1-2.5   | 14.5-19                                | 0.3-6.9                                |   | 0.1-0.3                         | 0.1-4.4                                      | 0.5-3.2                                      | 1.0-7.0                         |

***Monoraphidium dybowskii*** (Wolosz.) Hindák et Kom-Leg in Kom-Leg (1969) Lámina 8. Fig. 14 a

Sinónimos: *Keratococcus dybowskii* Wolosz. 1917; *Choricystis dybowskii* (Wolosz.)Hind. 1988.

Células cilíndricas, rectas o ligeramente curvadas, algo asimétricas; extremos ligeramente atenuados, pero con polos redondeados; cloroplasto parietal sin pirenoide (fig. 14 a). Dimensiones celulares 4.0-7.3 x 1.2-2.0  $\mu\text{m}$  (n= 20).

Comentarios: en trabajos anteriores (Oliva 2001, Oliva *et al.* 2001), esta especie no ha sido reportada. En la bibliografía se conoce principalmente para Europa Central, en Cuba se menciona en cuerpos de agua desde oligo- hasta mesotróficos (Fott 1969, Comas 1996).

Ecología en Alchichica: planctónica, con máximas densidades en enero y presencia constante en el epilimnion y metalimnion.

|             | Biovol.<br>( $\mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Den.<br>(cél $\text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Chl a<br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Chl a<br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Temp.<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | O. D.<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NO <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NH <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | DIN<br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------------|--|---|--|--|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--|--|--------------------------|
| Enero       | 3.2-8.8  | 1.1-3.1                                   | 2.3-3.1  | 0.3-0.5  | 14-16.2                         | 6.3-5.2                         | 7.7                    | 0.6-0.8                  | 0.4-0.9                                | 1.3-1.9                                | 1.9-3.0                  |
| Epilimnion  | 0.02-3.1   | 0.006-1.1                                 | 0.1-2.9  | 0.04-1.2   | 15.4-22                         | 5.3-7.0                         |                        | 0.1-0.7                  | 0.06-1.1                               | 0.3-9.1                                | 0.4-9.3                  |
| Metalimnion | 0.1-2.7  | 0.04-1.0                                  | 0.1-5.7  | 0.1-2.5  | 14.5-19                         | 0.3-6.9                         |                        | 0.1-0.3                  | 0.1-4.4                                | 0.5-3.2                                | 1.0-7.0                  |

Oocystaceae  
Oocystoideae

***Oocystis parva*** West W et G. S. (1898) Lámina 8. Fig. 15 a-b

Sinónimos: *Oocystella parva* (W. Et G. S. Est) Hind. 1988.

Mayormente en colonias de 4-16 células (fig. 15b) dentro de una pared materna visiblemente ensanchada, raramente solitarias; células ovales a elipsoidales (fig. 15a) sin engrosamientos polares, con un solo cloroplasto parietal y un pirenoide (fig. 15a). Pared celular lisa sencilla. Dimensiones celulares 7-13 x 4-8  $\mu\text{m}$  (n= 30).

Comentarios: en la bibliografía ha sido reportada con dominancia en cuerpos oligotróficos hasta eutróficos (Komárek y Fott 1983, Comas 1996).

Ecología en Alchichica: planctónica, con máximos epilimnéticos de mayo a julio bajo condiciones de alta temperatura y de relativa estabilidad, así como relativamente altas concentraciones de nutrientes. En el resto de los meses de estudio mostró una presencia constante, preferentemente en el epilimnion y metalimnion.

|             | Biovol.<br>( $\mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Den.<br>(cél $\text{mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | Chl a<br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Chl a<br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | Temp.<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | O. D.<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | Disco<br>Secchi<br>(m) | PRS<br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NO <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | N-NH <sub>3</sub><br>( $\mu\text{M}$ ) | DIN<br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------------|--|---|--|--|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--|--|--------------------------|
| Mayo        | 3100   | 12  | 2.9  | 0.5  | 20-22                           | 6.6-7.0                         | 3.5                    | 0.1-0.3                  | 0.2-0.4                                | 4.4-5.9                                | 4.9-6.1                  |
| Junio       | 2900   | 12  | 1.0  | 0.9  | 21-22                           | 6.2-6.7                         | 3.6                    | 0.1-0.2                  | 0.1-0.2                                | 0.7-9.0                                | 0.9-9.3                  |
| Julio       | 900  | 3.6                                       | 0.5  | 0.5  | 19-19.1                         | 6.2-6.5                         | 4.2                    | 0.1-0.2                  | 0.2-0.5                                | 0.5-1.7                                | 0.8-2.2                  |
| Epilimnion  | 27-480   | 0.1-1.9                                   | 0.1-2.9  | 0.04-1.2   | 15.4-22                         | 5.3-7.0                         |                        | 0.1-0.7                  | 0.06-1.1                               | 0.3-9.1                                | 0.4-9.3                  |
| Metalimnion | 27-320   | 0.1-1.3                                   | 0.1-5.7  | 0.1-2.5  | 14.5-19                         | 0.3-6.9                         |                        | 0.1-0.3                  | 0.1-4.4                                | 0.5-3.2                                | 1.0-7.0                  |

***Oocystis submarina*** Lagerheim (1886) Lámina 8. Fig. 16 a

Mayormente en colonias de 2-4 células dentro de la pared materna lisa, con engrosamientos polares que le dan el aspecto citriforme (fig. 16a); tamaño 9-22 x 15-25  $\mu\text{m}$  (n= 20), raramente se

observan células solitarias; células ovales a elipsoidales, con un solo cloroplasto parietal y un pirenoide (fig. 16a); dimensiones celulares, 7.0-13.0 x 4.5-6.0  $\mu\text{m}$  (n= 30).

Comentarios: en la bibliografía ha sido reportada en aguas dulces y salobres (Komárek y Fott 1983).

Ecología en Alchichica: planctónica, con máximos en mayo (0 a 21 m), junio (0 a 18 m) y julio (0 a 23 m), bajo condiciones de alta temperatura y de relativa estabilidad, así como relativamente altas concentraciones de nutrimentos.

|       | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( <i>cél mL</i> <sup>-1</sup> )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>( <i>m</i> ) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-------|---|--|---|---|--|--|---|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Mayo  | 62-320  | 0.4-2.3  | 1.2-2.9   | 0.5-0.9   | 15.4-22                                | 1.8-6.7                                | 3.5   | 0.1-0.3                         | 0.09-0.4                                     | 2.0-5.9                                      | 2.9-6.5                         |
| Junio | 41-60   | 0.3-0.4  | 1.0-1.1   | 0.9-1.7   | 16-22                                  | 5.1-6.7                                | 3.6   | 0.1-0.2                         | 0.1-0.2                                      | 0.7-9.1                                      | 0.9-9.3                         |
| Julio | 60-110  | 0.3-0.8  | 0.5-1.3   | 0.4-0.5   | 15-19.1                                | 2.3-6.5                                | 4.2   | 0.1-0.2                         | 0.2-0.7                                      | 0.5-2.3                                      | 0.8-3.4                         |

### **Chlorococcal indeterminada** Lámina 8. Fig. 17 a

En colonias de 2 células dentro de la pared materna lisa, sin ensanchamientos visibles, con hundimientos marcados de la pared materna en las partes de unión de las células, las cuales usualmente se observan en división, muy raramente separadas (Fig. 17a). En una única ocasión se observó una colonia de 4 células. Células elipsoidales, aparentemente con un solo cloroplasto parietal (fig. 17a). Dimensiones celulares, 7-9 x 4-5  $\mu\text{m}$  (n= 20).

Comentarios: en trabajos anteriores (Oliva 2001 y, Oliva *et al.* 2001) no se había reportado esta población.

Ecología en Alchichica: planctónica, se encuentra con máximos en octubre (0 a 29 m), noviembre (0 a 34 m) y diciembre (0 a 40 m).

|           | <i>Biovol.</i><br>( $\mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ )<br>$10^3$ | <i>Den.</i><br>( <i>cél mL</i> <sup>-1</sup> )<br>$10^3$ | <i>Chl a</i><br>> 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Chl a</i><br>< 2 $\mu\text{m}$<br>( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) | <i>Temp.</i><br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | <i>O. D.</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) | <i>Disco</i><br><i>Secchi</i><br>( <i>m</i> ) | <i>PRS</i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NO<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>N-NH<sub>3</sub></i><br>( $\mu\text{M}$ ) | <i>DIN</i><br>( $\mu\text{M}$ ) |
|-----------|---|--|---|---|--|--|---|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Octubre   | 4.6-7.5   | 0.05-0.08  | 0.1-2.2   | 0.4-0.6   | 20-15.3                                | 1.7-6.8                                | 5.5   | 0.2-0.3                         | 0.2-1.1                                      | 0.3-1.0                                      | 0.7-2.8                         |
| Noviembre | 3.5-23  | 0.04-0.2   | 0.3-5.7   | 0.04-0.1  | 18-15                                  | 0-7.0                                  | 6.5   | 0.1-0.2                         | 0.15-0.7                                     | 1.1-2.6                                      | 1.4-3.1                         |
| Diciembre | 28-41   | 0.3-0.4  | 2.7-3.8   | 0.8-1.1   | 16-15                                  | 0.3-6.2                                | 4.8   | 0.15-0.2                        | 0.2-0.4                                      | 0.2-0.8                                      | 0.5-1.0                         |

### iii) Variación temporal y vertical de la densidad fitoplanctónica (Utermöhl)

La densidad mínima se presentó en abril ( $8 \times 10^2$  cél mL<sup>-1</sup>, a 61 m, Fig. 12) y la máxima en julio ( $2.6 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup>, a 22 m, Fig. 12), con dominio de la fracción picofitoplanctónica colonial con *Lemmermanniella cf. flexa* (60%) y *Eucapsis cf. starmachii* (32%, Fig. 11). Las densidades en el tiempo variaron de la siguiente manera: en el mes de abril (inicio de la estratificación), el valor máximo de densidad fue bajo ( $1 \times 10^4$  cél mL<sup>-1</sup>, a 2 m, Fig. 12), con dominó de la fracción picofitoplanctónica individual (*Synechococcus nidulans* 44%, Fig. 11). El incremento en los valores de densidad comenzó a partir de junio a agosto, alcanzando su máximo en julio ( $2.6 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup>, a 32 m, Fig. 12). Durante septiembre y octubre, la densidad sufre un decremento en la toda la columna, con máximos de  $0.3 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup>. A partir de noviembre y diciembre, la densidad incrementó nuevamente en el epilimnion, alcanzando un máximo de  $1.6 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup> (Fig. 12). Durante el periodo de mezcla (enero) la densidad registró un intervalo entre  $1.8$  a  $3.4 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup> (Fig. 12). A partir de mayo hasta diciembre, las especies que dominaron pertenecen a la fracción picofitoplanctónica colonial, *E. cf. starmachii*, *L. cf. flexa* y *Epigloeosphaera cf. glebulenta*, con cambios en sus densidades y una alternancia en dominio durante este periodo. Durante el periodo de mezcla, la especie que dominó fue *S. nidulans* (54%, Fig. 11).

Los valores en la vertical mostraron el siguiente comportamiento: en la superficie las densidades fitoplanctónicas registraron los máximos en julio ( $1.8 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup> a 1.5 m), noviembre ( $1.5 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup> a 1.5 m) y diciembre ( $1.2 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup> a 1.5 m, Fig. 12). La especie que dominó en julio fue *E. cf. starmachii* (83%) y en noviembre y diciembre fue *L. cf. flexa* (81 y 71%, respectivamente, Fig. 11). Dentro del metalimnion, las densidades fluctuaron entre  $2.4 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup> (julio, 18 m) y  $0.08 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup> (abril, 12 m); los máximos valores se registraron en esta capa (Fig. 12) excepto en el mes de julio, noviembre y diciembre; (Fig. 12). Las especies responsables del máximo valor fueron nuevamente las cianoprocaritas coloniales, *E. cf. starmachii* (37%), *L. cf. flexa* (29%) y *E. cf. glebulenta* (29%) (Fig. 11). En el hipolimnion, el máximo valor de densidad se reistró en el mes de julio ( $2.6 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup>, 32 m, Fig. 12), con dominio de *L. cf. flexa* (60%) y *E. cf. starmachii* (32%, Fig. 11) y el mínimo en abril ( $8 \times 10^2$  cél mL<sup>-1</sup>, 61 m, Fig. 12).

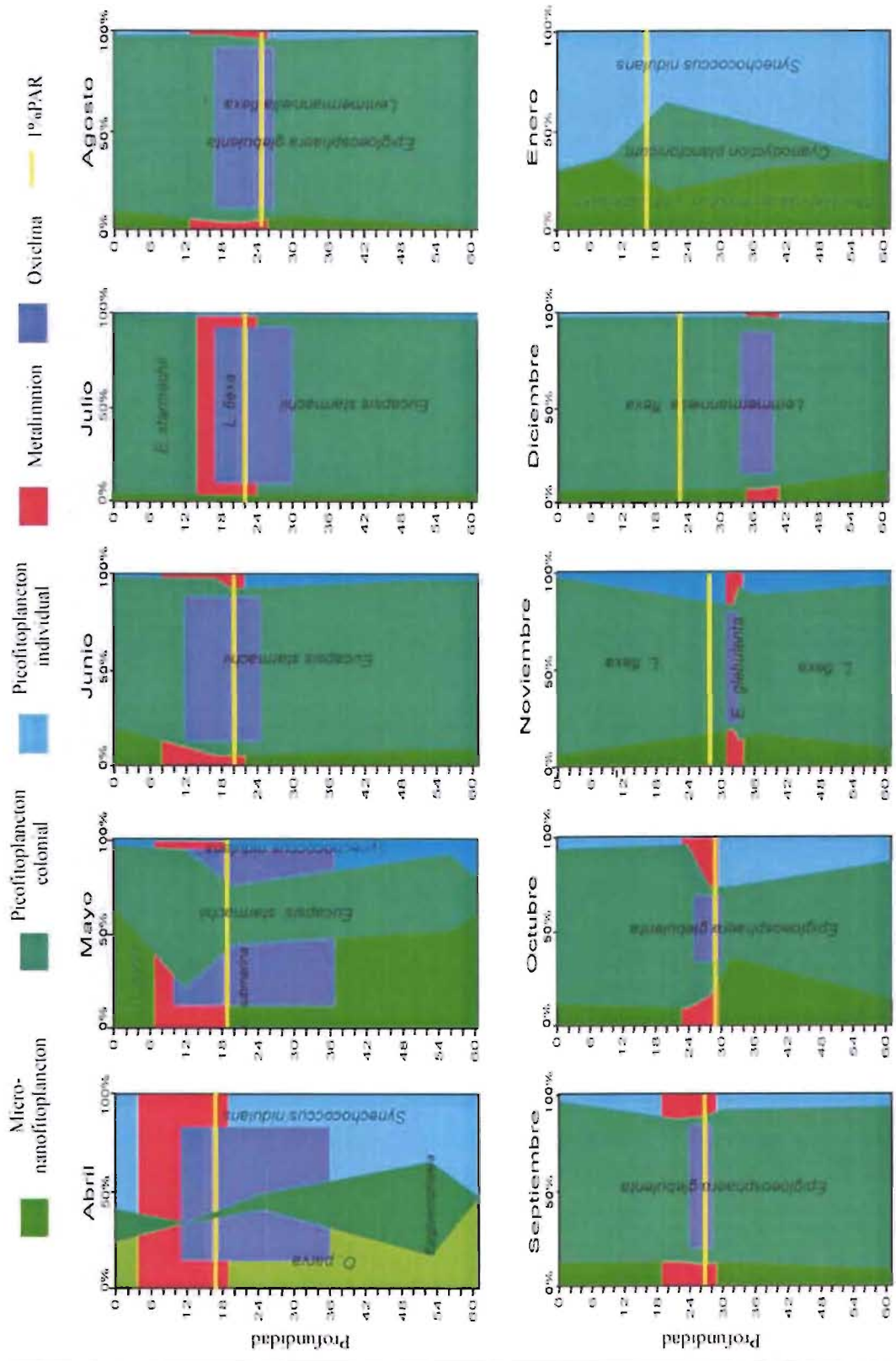


Figura 11. Variación vertical de la densidad del fitoplancton por fracción (%), metalimnion, oxielimna y 1º aPAR en el lago Alchichén, durante el lapso 2003-2004



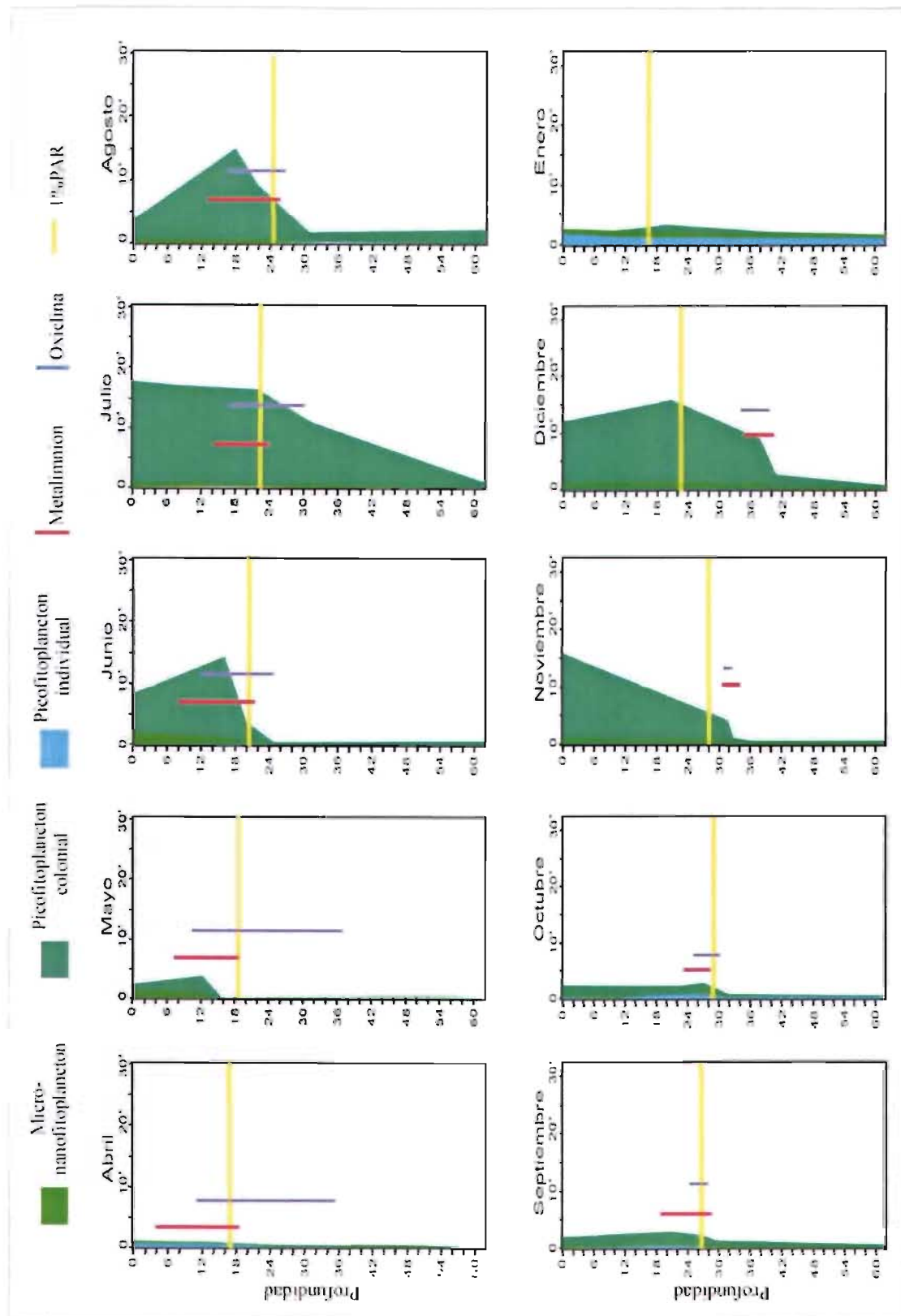


Figura 12. Variación vertical de la densidad (cell mL<sup>-1</sup>) fitoplanctónica por fracción (valor absoluto): metaluminon, oxielina y I% PAR en el lago Alchichica durante el lapso 2003-2004

#### iv) Variación temporal y vertical del biovolumen fitoplanctónico

Los valores de biovolumen se mantuvieron bajos de abril a agosto, con un mínimo en mayo de  $6 \times 10^4 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$  a 61 m (Fig. 14); los valores comenzaron a aumentar a partir de septiembre a noviembre, alcanzando su máximo en el mes de octubre ( $1 \times 10^7 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ , en 33 m Fig. 14); en mayo y octubre dominó *Cyclotella* sp. con un 99 y 77%, respectivamente (Fig. 13). Los máximos biovolúmenes registrados en mayo y de septiembre a noviembre se encuentran estrechamente relacionados con relativamente altas concentraciones de  $\text{N-NO}_3^-$  (Fig. 15).

En los meses anteriores, los valores altos se encuentran en los primeros 30 m de profundidad, dominando *O. parva* en abril (78%, a 2 m), junio (81%, a 2 m) y julio (40%, a 22 m); en el mes de mayo, varias especies compartieron la dominancia a 2 metros, como *N. cf. spumigena* (46%), *C. choctawhatcheeana* (19%), *O. submarina* (13%), *Ch. elmorei* (8%) y *O. parva* (5%). En el mes de septiembre dominó *Ch. elmorei* (59%) en la superficie. Desde agosto hasta enero, con excepción del mes de diciembre, la especie dominante en el metalimnion y hipolimnion fue *Cyclotella* sp. (con más del 90%), mientras que en diciembre las especies favorecidas en toda la columna fueron *C. choctawhatcheeana* (35 a 49%), *Cyclotella* sp. (14 a 38%) y *Ch. elmorei* (13%, Fig. 13).

El biovolumen en la vertical fue el siguiente: en la superficie el mayor valor se observó en el mes de junio ( $3.4 \times 10^6 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$  a 1.5m, Fig. 14), dominado básicamente *O. parva* (86 %, Fig. 13), mientras que el mínimo se encontró en septiembre ( $3.1 \times 10^5 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$  a 1.5 m, Fig 14) con dominio de *Ch. elmorei* (Fig. 13). En el metalimnion, el mayor valor se detectó en noviembre ( $9.3 \times 10^6 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$  a 32 m, Fig. 14), la especie responsable fue *Cyclotella* sp. (96%, Fig. 13), y el valor mínimo se registro en mayo ( $4.1 \times 10^5 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$  a 12 m, Fig. 14). En el hipolimnion, el máximo valor registrado fue  $1 \times 10^7 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ , 33 m en octubre y el mínimo en mayo ( $0.6 \times 10^4 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ , 61 m, Fig. 14); la especie responsable de estos valores fue *Cyclotella* sp. (99 y 77%, respectivamente, Fig. 13).

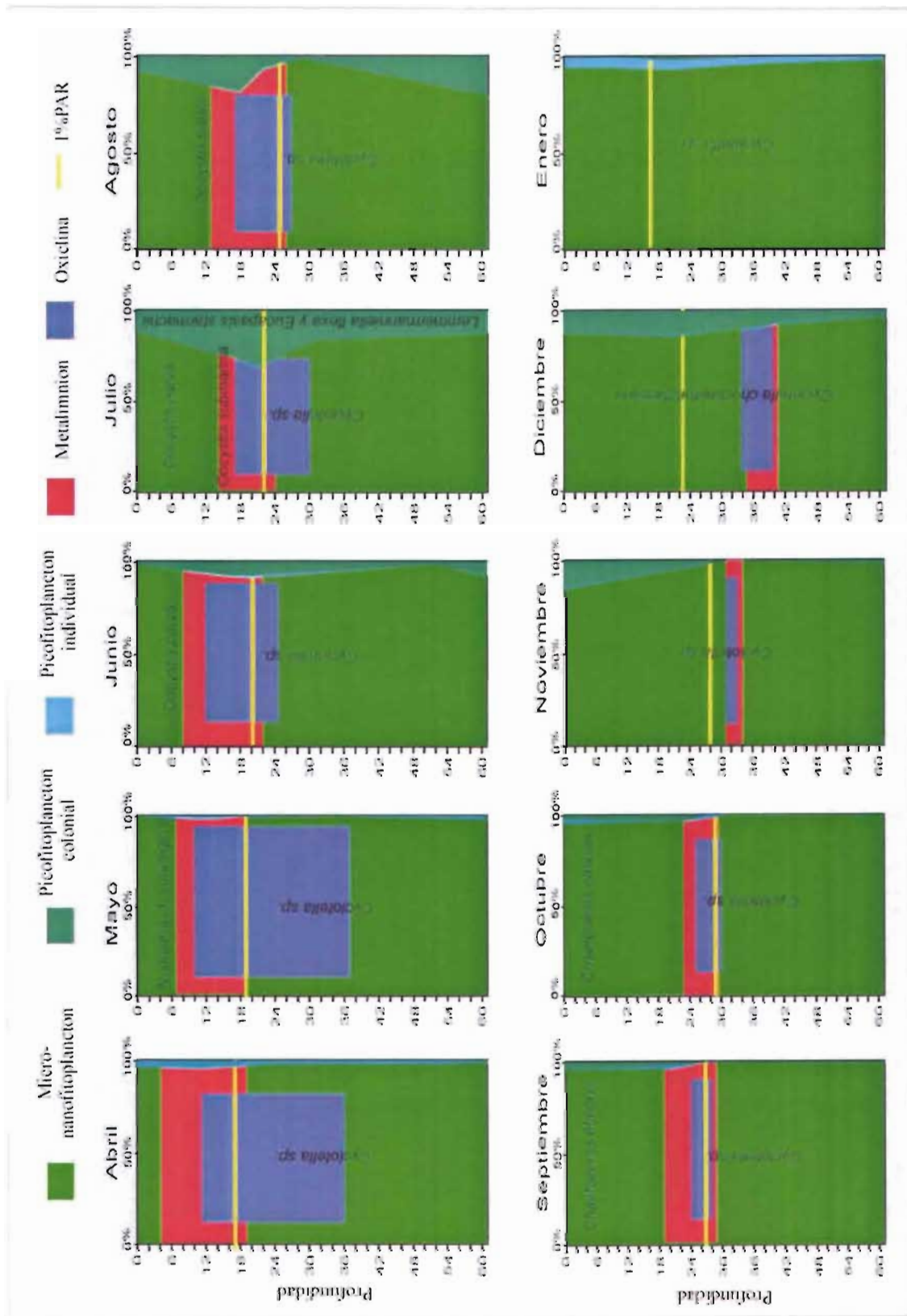


Figura 13. Aplicación vertical del biovolumen por fracción (%): microfitoplancton, oxidolina, %PAR en el lago Alchichica durante el lapso 2003-2004

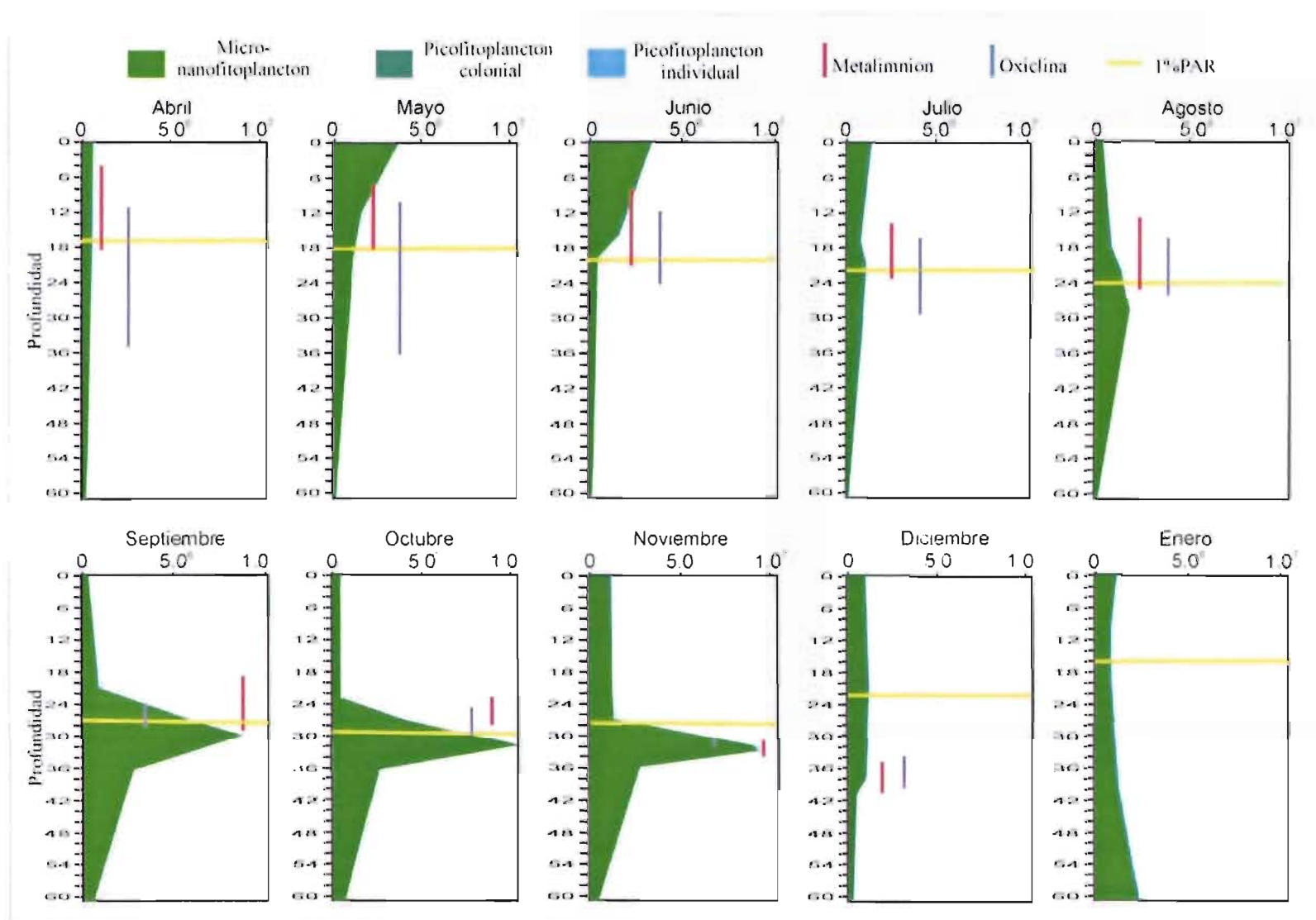


Figura 14. Variación vertical del biovolumen ( $\mu\text{m}^3 \text{ml}^{-1}$ ) por fracción (valor absoluto), metalimnion, oxiclina y 1% PAR en el lago Alchichica durante el lapso 2003-2004

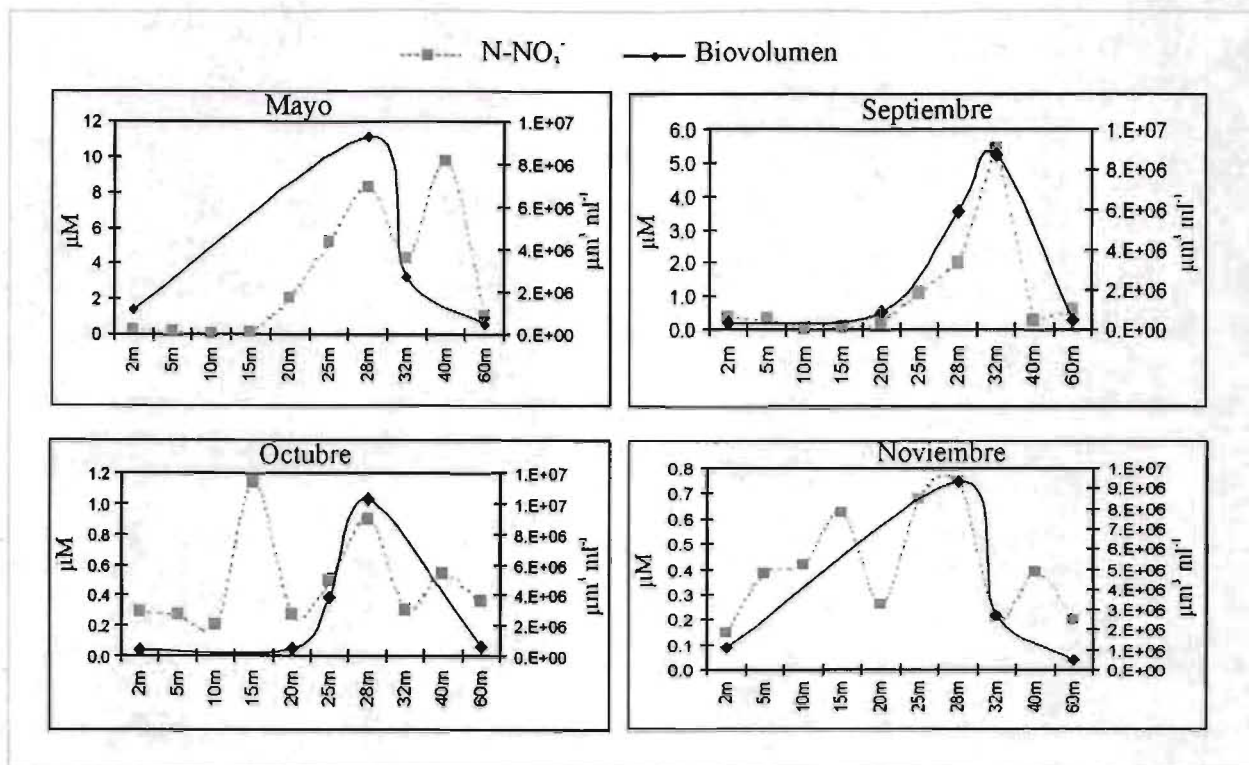


Figura 15. Máximas concentraciones de biovolumen (mayo, septiembre, octubre y noviembre) y su relación con la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$ .

#### v) Variación temporal y vertical de la densidad picofitoplanctónica, obtenida por epifluorescencia

Los valores registrados en la cuantificación del picofitoplancton individual por epifluorescencia fluctuaron a través de los meses y en la vertical, mostrando máximos en abril a 2 m ( $1.2 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ ) y a 12 m ( $1.0 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ ) y en diciembre a 2 m ( $1.1 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ ) y a 5 m ( $1.0 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ ). El valor mínimo se registró en el mes de septiembre a 1.5 m ( $2 \times 10^3$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , Fig 16). Las especies que probablemente proporcionaron estas concentraciones fueron *Synechococcus nidulans* y *Synechocystis* sp., durante todos los meses.

La distribución del picofitoplancton en la vertical mostró en la superficie, máximas concentraciones en abril a 2 m ( $1.2 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ ) y en diciembre a 2 y 5 m ( $1.1 \times 10^6$  y  $1.0 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , respectivamente), mientras que la mínima fue en septiembre a 1.5 m ( $2 \times 10^3$  cél  $\text{mL}^{-1}$ ). Con excepción del mes de abril y diciembre, en el metalimnion se registraron las mayores

concentraciones de células menores a  $2\ \mu\text{m}$ , con un máximo en abril a 12 m ( $1.0 \times 10^6\ \text{cél mL}^{-1}$ ) y un mínimo durante noviembre a 33 m ( $5 \times 10^3\ \text{cél mL}^{-1}$ ).

Finalmente, las densidades registradas en el hipolimnion mostraron dos comportamientos: 1) densidades semejantes a las registradas en el metalimnion en el límite metalimnion-hipolimnion, y 2) los valores más bajos en toda la columna en el hipolimnion profundo. Los valores fluctuaron ampliamente, con un máximo en mayo a 20 m ( $2.8 \times 10^5\ \text{cél mL}^{-1}$ ) y mínimo en diciembre a 60 m ( $4 \times 10^3\ \text{cél mL}^{-1}$ , Fig. 16).

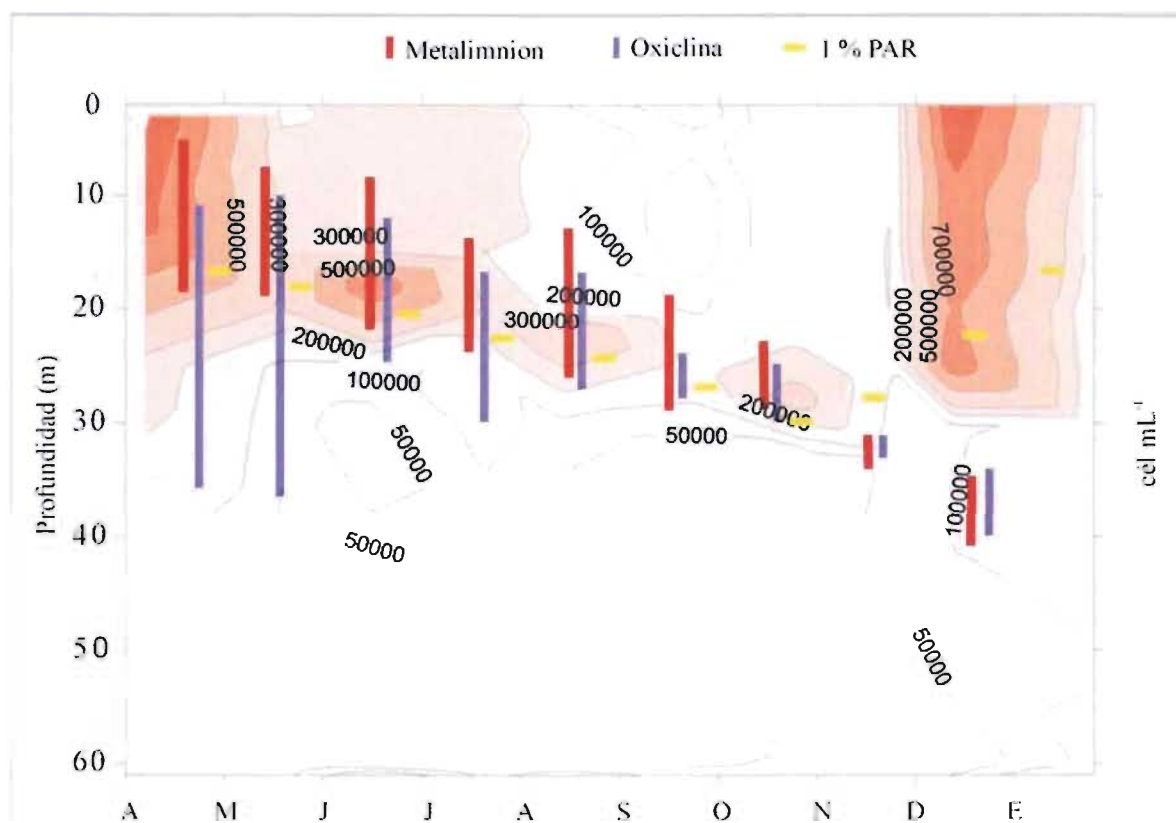


Figura 16. Diagrama profundidad-tiempo de la densidad ( $\text{cél mL}^{-1}$ ) de células  $< 2\ \mu\text{m}$ , obtenidas por epifluorescencia.

#### vi) Variación temporal y vertical de la clorofila *a* (acetona)

La concentración total de clorofila *a* presentó un amplio intervalo de variación con máximos de 5.8  $\mu\text{g L}^{-1}$  (noviembre a 33 m), 5.7  $\mu\text{g L}^{-1}$  (mayo a 21 m), 5.4  $\mu\text{g L}^{-1}$  (octubre a 28 m), 5.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  (septiembre a 28 m) y 4.8  $\mu\text{g L}^{-1}$  (diciembre a 22 m, Fig. 17). El valor mínimo fue de 0.3  $\mu\text{g L}^{-1}$  en el mes de noviembre en superficie (2 m); el valor promedio durante los meses y en la vertical fue de 2.2  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Las máximas concentraciones de clorofila de septiembre a noviembre coinciden con valores altos de biovolumen de *Cyclotella* sp.; en el mes de mayo dominó por biovolumen *Cyclotella* sp.; sin embargo, los valores no se relacionan con la clorofila *a*, al igual que en el mes de diciembre en donde dominó principalmente *C. choctawhatcheeana* y, en concentraciones menores, *Cyclotella* sp. y *Ch. elmorei* (Fig. 13). Enero fue el único mes en el que se registraron valores homogéneos y relativamente elevados de clorofila *a* dentro de toda la columna (3.4 a 2.7  $\mu\text{g L}^{-1}$ , Fig. 17).

En la superficie, la concentración de clorofila fluctuó entre 4.8  $\mu\text{g L}^{-1}$  (diciembre, 22 m) y 0.3  $\mu\text{g L}^{-1}$  (noviembre, superficie), los valores registrados mostraron una disminución conforme avanzó la estratificación, mientras que en el metalimnion aumentaron, alcanzando su máximo en noviembre 5.8  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Los valores registrados en el hipolimnion mostraron un intervalo de fluctuación entre 0.1 y 5.7  $\mu\text{g L}^{-1}$  (julio, 61 m y mayo 21 m, respectivamente, Fig. 17).

El comportamiento del contenido de clorofila en la fracción  $>$  a 2  $\mu\text{m}$  (nanomicroplancton) fue muy similar al del contenido clorofila *a* total, debido a que esta fracción fue la que contribuyó predominantemente en la vertical y en el transcurso de los meses (excepto en abril). Los valores registrados fluctuaron ampliamente entre 5.7  $\mu\text{g L}^{-1}$  (noviembre, 33 m) y 0.1  $\mu\text{g L}^{-1}$  durante julio (61 m), septiembre (2 m) y octubre (2 y 27m), con una concentración promedio de 1.7  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Los valores más bajos se registraron predominantemente en los meses de marcada estratificación, en la superficie o bien en las partes más profundas del hipolimnion, mientras que las altas concentraciones de clorofila *a* registradas durante todos los meses se encontraron asociadas con el metalimnion (Fig 17).

Con respecto a la fracción  $<$  a 2  $\mu\text{m}$ , las concentraciones fluctuaron entre 0.04  $\mu\text{g L}^{-1}$  (noviembre, 2 m) a 2.5  $\mu\text{g L}^{-1}$  (abril, 12 m), con una concentración promedio de 0.6  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Las especies que probablemente aportaron estas concentraciones de clorofila *a* fueron *Synechococcus*

*nidulans* y *Synechocystis* sp. En comparación con la fracción > a 2  $\mu\text{m}$ , las concentraciones registradas se mantuvieron bajas y homogéneas, contribuyendo pobremente a la clorofila total durante casi todos los meses, excepto en abril (1.5 y 12 m), en donde la fracción < a 2  $\mu\text{m}$  fue la dominante. Dentro del metalimnion se registraron las concentraciones ligeramente más altas (Fig. 17).



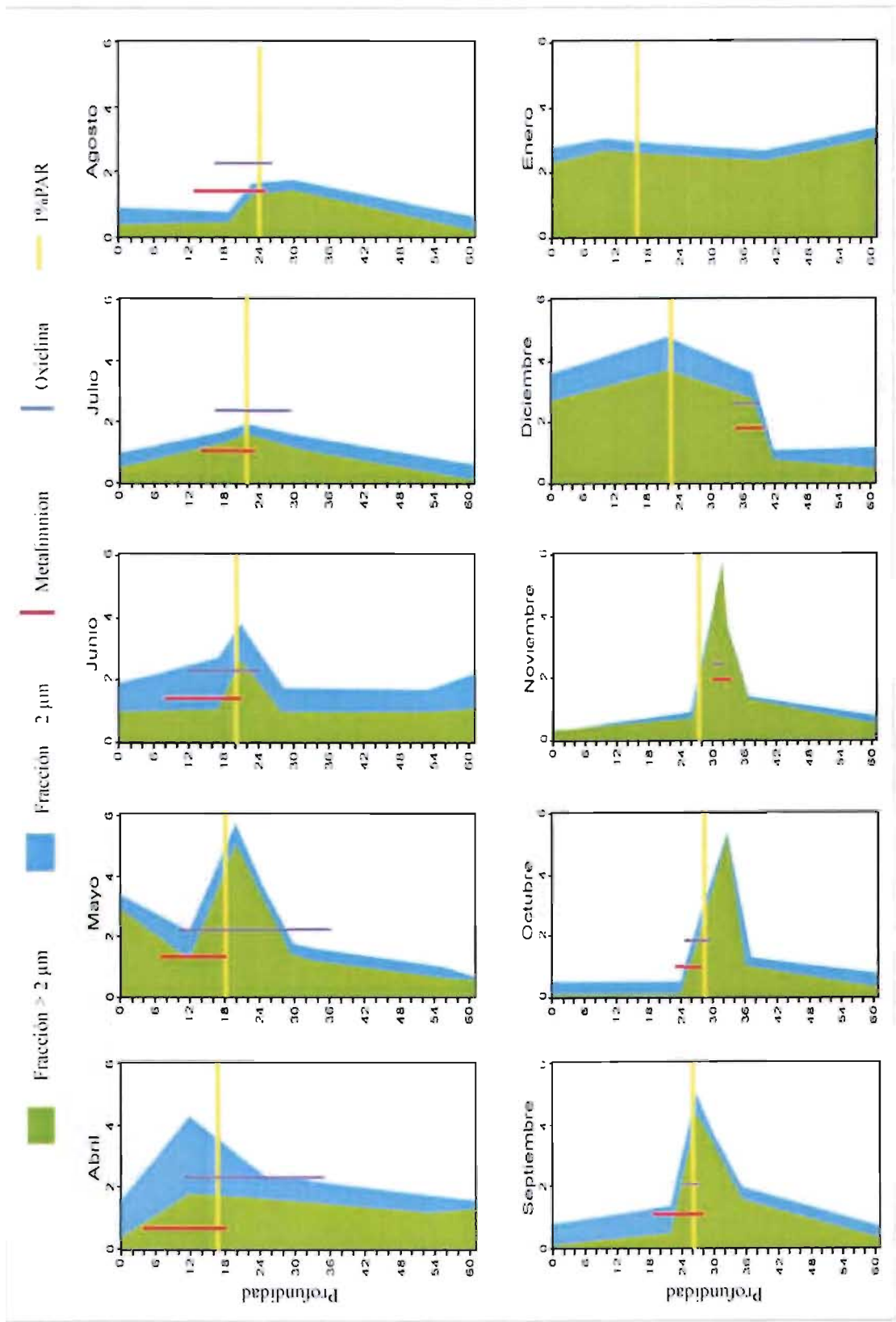


Figura 17. Variación vertical de la concentración de clorofila *a* ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) por fracción, metalimnion, oxidada y 1<sup>st</sup> PAR en el lago Alchichica, durante el lapso 2003/2004

## 8. Discusión

### 8.1 Comportamiento de los descriptores fisicoquímicos en columna

El lago Alchichica ha sido clasificado como monomíctico cálido por Alcocer *et al.* (2000) y Lugo (2000). Según el esquema de Lewis (1973), los lagos monomícticos cálidos se caracterizan por su temperatura superficial -superior al valor máximo de densidad (4° C) y sin formación de hielo- y por presentar un periodo de circulación y otro de estratificación, características todas observadas en el lago Alchichica durante el presente estudio (Fig. 4). No obstante, en el periodo de 2003 se observa que la diferencia máxima de temperaturas a lo largo del periodo de estratificación es de 7.5° C entre el agua superficial y la de fondo (22° C y 14.4° C respectivamente, Fig. 4 y 5), es decir, un poco mayor a lo reportado anteriormente para el mismo lago (3.5-4° C en Alcocer *et al.* 2000 y 5° C, en Oliva 2001, Lugo 2000, Lugo *et al.* 2000); sin embargo, dado que la mayor diferencia se debe al primer metro de agua, donde los procesos de calentamiento son más intensos y variables, y no en todo el epilimnion, no se considera importante, aunque se menciona como referencia para trabajos posteriores.

En el presente estudio, al inicio de la época cálida-lluviosa (abril a junio), el incremento de temperatura eleva la resistencia térmica de la capa superficial de agua (menor densidad), lo que ocasiona el establecimiento de una estratificación temprana y ligera (Figs. 4 y 5). Alcocer *et al.* (2000) señalan que la estratificación también se ve favorecida por la disminución en la fuerza del viento. Bajo estas condiciones, se impide el flujo de oxígeno hacia la capa profunda, con el subsiguiente establecimiento de una oxiclina. La anoxia se hace menos profunda conforme avanza el tiempo, se intensifica la estratificación y se va agotando el oxígeno (Figs. 4 y 5). Después y con la disminución gradual de la temperatura en la columna de agua (de julio a septiembre), el epilimnion aumenta de espesor y se establece una termoclina definida y estable. Durante octubre se incrementa el descenso de temperatura y, con ello, se registra una menor diferencia térmica en la columna de agua, la cual favorece el debilitamiento de la termoclina con un marcado desplazamiento hacia aguas más profundas. Este hundimiento progresivo de la termoclina permite un suministro de oxígeno disuelto a la columna de agua progresivamente mayor, haciéndose más delgada la capa de anoxia del fondo. Aunado a la menor diferencia térmica, el incremento en la intensidad del viento durante el mes de enero provoca finalmente la

homogeneización de la temperatura y de la concentración de oxígeno disuelto (Figs. 4 y 5), lo cual corresponde a la época seca-fría (Arredondo *et al.* 1984, Alcocer *et al.* 2000).

Como se puede apreciar, la estructura térmica del lago Alchichica se ve influenciada por el clima dominante de la región, lo que propicia el desarrollo de un periodo de estratificación prolongado durante la época cálida lluviosa, y otro de circulación en la época seca fría, patrón también característico de lagos tropicales profundos (Lewis 1996). En general, el comportamiento de la estructura térmica y de oxígeno disuelto registrado para el lago Alchichica es similar al reportado en trabajos anteriores (Alcocer *et al.* 2000, Lugo 2000, Oliva *et al.* 2001, Sánchez 2001). Otros lagos registrados como monomícticos cálidos: Atexcac,  $Z_m=35$  m (Macek *et al.* 1994, 2000), Zacatal,  $Z_m=13$  m, La Escondida,  $Z_m=33$  m (Torres-Orozco *et al.* 1996), Majahual,  $Z_m=53$  m, Chalchoapan  $Z_m=43$  m, Manantiales  $Z_m=36$  m (Vázquez *et al.* 2004), Zirahuén,  $Z_m=40$  m (Tavera y Martínez-Almeida 2005) presentan condiciones similares a lo reportado en el presente trabajo, por ejemplo, un periodo largo de estratificación durante los meses cálidos y un periodo de mezcla corto durante la época fría, así como una dinámica de oxígeno disuelto estrechamente relacionada a las variaciones en la temperatura, y hasta cierto punto independiente del trofismo (Lewis 1996).

En relación con los nutrientes, sus concentraciones están sujetas a fluctuaciones estacionales afectadas por la estructura térmica, el oxígeno disuelto y la densidad fitoplanctónica. Las máximas concentraciones de PRS, N-NH<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y DIN en el hipolimnion y el decremento en la superficie (Figs. 6, 7 y 8) es un comportamiento característico de lagos con curvas de tipo clinogrado (Wetzel 2001). Al intensificarse la estratificación, las concentraciones de estos nutrientes disminuyen en el epilimnion y metalimnion (Figs. 6, 7 y 8), debido a la asimilación por parte de los organismos (fitoplancton y bacterioplancton) y al proceso de nitrificación bacteriana en el caso de N-NH<sub>3</sub> y DIN (oxidación del N-NH<sub>3</sub> hacia compuestos intermedios NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Harris 1986, Darley 1987, Wetzel 2001). Como paso previo a su mineralización, los organismos planctónicos, al morir y hundirse, exportan estos nutrientes al hipolimnion; por tal razón, las concentraciones de los nutrientes se intensifican en el hipolimnion durante la fase final de la estratificación. Aunado a lo anterior, las condiciones de anoxia pueden favorecer la liberación de PRS y N-NH<sub>3</sub> de los sedimentos (Anda *et al.* 2001, Wetzel 2001).

Por otra parte, el comportamiento del  $\text{N-NO}_3^-$  difiere en el hipolimnion, con altas concentraciones en el límite del metalimnion-hipolimnion (coinciden con el mayor gradiente de oxígeno) de abril a agosto y bajas para el resto de los meses (Fig. 7). Probablemente, la acumulación se debe a la mineralización de formas de nitrógeno más reducidas (procesos de nitrificación bacteriana -oxidación del  $\text{N-NH}_3$  procedente del hipolimnion hacia compuestos intermedios,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) y a la menor actividad fotosintética del fitoplancton en el metalimnion, mientras que las bajas concentraciones de mediados y finales de la estratificación responden a la rápida desnitrificación del  $\text{N-NO}_3^-$  hacia  $\text{N}_2$ , promovida bajo condiciones de anoxia (Wetzel 2001). Las concentraciones de  $\text{N-NO}_2^-$  son bajas, tanto en la estratificación como en la mezcla, debido a que el  $\text{N-NO}_2^-$  -por ser una fase de transición entre el  $\text{N-NO}_3^-$  y el  $\text{N-NH}_3$ - se oxida rápidamente y prácticamente no se acumula (Wetzel 2001). Durante el periodo de circulación, se produce una distribución homogénea de todos los nutrientes, con concentraciones relativamente bajas, probablemente debido a la presencia de un importante florecimiento de diatomeas.

El patrón que exhiben los nutrientes -acumulación en el hipolimnion y un decremento en el epilimnion y metalimnion- en relación con la dinámica del oxígeno disuelto y el comportamiento del fitoplancton, en Alchichica es muy similar al de otros lagos tropicales monomícticos cálidos con largos periodos de estratificación, como el lago Pirámide (Galat *et al.* 1981) y el lago Amvrakia (Danielidis *et al.* 1996). En los lagos Amvrakia y Pirámide, la acumulación de nutrientes en el hipolimnion -favorecida por las condiciones de anoxia- termina al ser liberados durante el corto periodo de circulación, esto provoca un florecimiento invernal de diatomeas y un rápido decremento en la concentración de nutrientes en las capas superiores, lo cual se ve reflejado en el dominio de especies adaptadas a condiciones de escasez, comportamiento bastante similar al reportado en el presente estudio.

Con respecto a la relación DIN/PRS, los bajos valores (<16) en la zona fótica sugieren una limitación por nitrógeno en el lago para la mayor parte del ciclo (Fig. 9 y tabla 3), comportamiento típico para lagos tropicales (Lewis 1996) y alcalino-sódicos en los que el principal proceso de pérdida de fósforo disuelto por precipitación con calcio está ausente (Alcocer y Escobar 1992), provocando relativamente altas concentraciones de fósforo en Alchichica en comparación con otros lagos oligotróficos (como, por ejemplo, el lago Sproat, Shortreed y Stockner 1990 y el lago Maggiore, Callieri y Piscia 2002). Las altas relaciones

DIN/PRS (17-74), en prácticamente toda la columna durante mayo y junio (son las únicas indicadoras de limitación por fósforo (Fig. 9 y tabla 4), cuyo comportamiento está estrechamente relacionado con el fitoplancton, como se discutirá más adelante. Por otra parte, se ha observado que la limitación por nitrógeno en lagos tropicales está influida por la larga estratificación térmica, en adición a la baja precipitación y la escasa vegetación terrestre en la cuenca, lo que reduce las entradas terrestres de nitrógeno (Galat *et al.* 1981), este mismo criterio podría aplicarse en Alchichica cuya cuenca presenta características muy similares a las descritas anteriormente.

Una baja relación DIN/PRS, es decir, deficiencia de nitrógeno en el epilimnion favorece el desarrollo en mayo de la cianoprocarionta *Nodularia cf. spumigena*, especie fijadora de nitrógeno, aunque cabe remarcar que, en el 2003 al menos en la fecha de muestreo, este florecimiento fue menos intenso que en otros años (Oliva *et al.* 2001). Como consecuencia del florecimiento de *Nodularia*, las concentraciones de nitrógeno incrementan en el lago, provocando una limitación por fósforo durante un periodo muy corto (mayo y junio), para posteriormente regresar a una limitación por nitrógeno en la zona fótica por el resto del periodo. Este comportamiento implica importantes cambios estacionales en la composición y variación en las densidades de las especies fitoplanctónicas.

En estudios anteriores en el lago Alchichica, la relación DIN/PRS encontrada muestra un patrón diferente al reportado en el presente estudio; Oliva *et al.* (2001) y Sánchez (2001) reportan el predominio del fósforo como nutrimento limitante, cabe señalar que, en estos trabajos, la determinación se realizó con un espectrofotómetro portátil de calidad de agua (HACH DREL/2000), el cual posee una menor sensibilidad para la evaluación de nutrimentos. El criterio de limitación por fósforo durante prácticamente todo el ciclo contradice en principio la condición básica los lagos alcalino-sódicos, en donde el fósforo mantiene mayores concentraciones en relación con el nitrógeno, debido a la falta de procesos importantes de pérdidas de fósforo en el sistema (Margalef 1983). Por otra parte, estas altas concentraciones de nitrógeno pueden estar asociadas a la presencia de grandes florecimientos de *N. cf. spumigena* en estos años, provocando entradas grandes de nitrógeno al sistema y que el fósforo se comporte aparentemente como el nutrimento “limitante”, por lo que se especula que posiblemente algunos de los ciclos de estudio pueden no ser representativos de un patrón más general en el lago Alchichica.

En relación con la profundidad de la zona fótica, se observa un marcado acoplamiento -de abril a octubre- de la evolución del 1% de PAR con el límite inferior de la termoclina; a su vez, el fitoplancton mantuvo los máximos valores dentro de esta zona durante estos meses, mientras que durante la fase final de la estratificación (noviembre y diciembre), la zona fótica se encontró por arriba de la termoclina (Fig. 9); es decir, su profundidad disminuyó, al igual que la acumulación del fitoplancton que registra sus máximas densidades en esta zona.

En relación con los parámetros conservativos, los valores de pH y  $K_{25}$  se mantienen estables espacial y temporalmente, debido a que no se ven afectados por fenómenos de dilución/concentración a corto plazo en este lago (Tabla 4). Particularmente, el pH muestra un comportamiento similar al observado por Vilaclara *et al.* (1993) relacionado a la alta reserva alcalina del lago Alchichica. Los altos valores de  $K_{25}$  y SDT no han sufrido variaciones desde finales de los años 80 (Vilaclara *et al.* 2002); indican una elevada mineralización de las aguas del lago Alchichica respecto al agua dulce (Kalff 2002) y que es hiposalino (Hammer *et al.* 1990).

## 8.2 Comportamiento de los descriptores fitoplanctónicos

En relación con la determinación de especies, se observa que la División con mayor número de especies fitoplanctónicas es la Heterokonthophyta (Bacillariophyceae), seguida por Cyanoprokaryota (Fig. 10), lo cual coincide con los anteriores reportes para el lago Alchichica (Lugo 2000, Oliva *et al.* 2001). Por otra parte, Leland y Berkas (1998) señalan que las diatomeas y las cianoprocaritas generalmente dominan en lagos hiposalinos, como es el caso de Alchichica.

Durante el periodo de estudio, destacan *Cyclotella* sp., *C. choctawhatcheeana* y *Chaetoceros elmorei* entre las especies más representativas de la clase Bacillariophyceae, las cuales han sido reportadas para ambientes salinos (Galat *et al.* 1981, Hammer *et al.* 1983, Leland y Berkas 1998). Por otra parte, las especies más destacadas de las cianoprocaritas son *Cyanodictyon* cf. *planctonicum*, *Epigloeosphaera* cf. *glebulenta*, *Lemmermanniella* cf. *flexa*, *Eucapsis* cf. *starmachii*, *Synechococcus nidulans* y *Synechocystis* sp., todas ellas del orden Chroococcales, además de *Nodularia* cf. *spumigena*, del orden Nostocales (Fig. 11). Las seis primeras se han reportado por primera vez en Alchichica, aumentando el número de especies estrictamente fitoplanctónicas, citadas para este lago, de 13 a 17 (las demás especies mencionadas

tanto por Oliva 2000 como en el presente estudio, son bentónico-perifíticas encontradas como ticoplanctónicas).

En Alchichica, muchos de los morfotipos coinciden plenamente, pero otros muestran diferencias que se señalan en el texto, es criterio de la autora -con base en los rasgos usados en la literatura para definir los diversos taxa- el decidir si las diferencias observadas son poco importantes, y por lo tanto se puede asignar el taxon más parecido, o si éstas son tan grandes, que se vuelve obligado el uso de *confer* o *sp.* La asignación de cada taxon a una especie previamente descrita (usualmente para zonas templadas) se realizó considerando también los descriptores limnológicos observados; por tal razón, cuando la morfología coincide plenamente, pero no lo hace la ecología, se ha optado por usar *confer* (cf.); cuando la morfología y la ecología coinciden, pero alguna característica importante a nivel específico no coincide plenamente con todo el intervalo de variación descrito para una especie, también se ha optado por el *confer*. Si no se parece a alguna especie descrita, se usa el *sp.*

*C. cf. planctonicum*, *E. cf. glebulenta*, *E. cf. starmachii* y *L. cf. flexa* han sido reportadas para lagos y estanques europeos, en trabajos que cuentan con escasos datos ecológicos (Komárek y Anagnostidis 1999, Komárek 2003); con base en la literatura mencionada, los intervalos ecológicos reportados en este trabajo para dichas especies parecen ser los primeros para regiones tropicales; sin embargo, Komárek y Cronberg (2001) y Crosbie *et al.* (2003) -este último con base en secuencias de 16S rRNA- señalan que las especies algales realmente cosmopolitas son raras y que en realidad se trata de especies muy específicas restringidas geográficamente, por lo que cabría también la posibilidad de que la mayoría de las especies picoplanctónicas sean nuevas especies.

Con base en el nivel de organización colonial y tamaño celular, Stockner *et al.* (2000) distinguen Pcy (picocianobacterias unicelulares, con tamaño celular de 0.2-2.0  $\mu\text{m}$ ) de CPcy (picocianobacterias coloniales, con tamaño celular de 0.5-3.0  $\mu\text{m}$ ). *C. cf. planctonicum*, *L. cf. flexa*, *E. cf. starmachii* y *E. cf. glebulenta* caen dentro de la categoría CPcy; los mismos autores señalan que la mayoría del CPcy ha sido reportado para lagos mesotróficos a eutróficos y estanques eutróficos. Sin embargo, Schallenberg y Burns (2001), Wetzel (2001), Callieri y Piscia (2002) y Szelag-Wasielewska (2003) indican que el CPcy es característico de lagos oligotróficos, lo cual amplía el intervalo de distribución para este grupo y justifica su localización en

Alchichica, considerado como oligo-mesotrófico (Garzón 1990, Lugo 2000, Oliva *et al.* 2001, Sánchez 2001).

Cabe resaltar que la presencia del CPcy en los lagos se reporta raramente en la literatura; estas formas frecuentemente se cuentan como organismos y no como células individuales, o bien se determinan erróneamente (Crosbie *et al.* 2003). Los estudios se han centrado en el conocimiento de la importancia ecológica de las poblaciones naturales del Pcy, así como su distribución vertical y estacional y la comparación de diferentes lagos a través de un gradiente trófico. Además, que el cambio en el tamaño celular puede ser una estrategia para explotar la variabilidad ambiental, en tanto que el conjunto de “tamaño y función” constituye la importancia ecológica del Pcy y CPcy (Callieri y Stockner 2002).

En relación con la densidad (cél mL<sup>-1</sup>) fitoplanctónica, se observa que la variación espacio-temporal tiene una clara estructuración por tamaño celular (Fig. 11 y 12). Dicho comportamiento responde a la disponibilidad de nutrientes y al grado de turbulencia/estratificación en el lago, lo que promueve la selección diferencial de mecanismos de suspensión del fitoplancton, crecimiento y supervivencia (Reynolds 1984, 1994, Harris 1986). Siguiendo a Margalef (1983) y Reynolds (1984), en Alchichica se pueden distinguir especies estrategias ‘r y k’ (tomando esta nomenclatura, al igual que los autores mencionados, de los conceptos que aplican en poblaciones de peces); la especies ‘r’ pertenecerían a la fracción menor a 2µm debido a su aparente alta tasa de crecimiento y rápida respuesta en disponibilidad de nutrientes y sus cortos periodos de máximas densidades durante abril y enero, mientras que las especies ‘k’ corresponderían a la fracción superior a 2µm –básicamente al CPcy- debido a su habilidad para tolerar o adaptarse a periodos de escasez de nutrientes, pero con una aparente menor tasa de crecimiento durante todo el periodo de estratificación.

Al inicio de la estratificación (abril), el dominio del picofitoplancton individual (especies tipo ‘r’: *S. nidulans* y *Synechocystis* sp., Fig. 11 y 12) se debe probablemente a una alta tasa de crecimiento favorecida por una entrada alóctona de nutrientes (materiales finos procedentes del suelo o de ceniza volcánica, Macek y Martínez 2002) arrastrados por los fuertes vientos durante este periodo; esta fuente alóctona se ve reflejada en el aumento en los valores superficiales de turbidez en el agua durante el mes de abril. En relación con esto se suman posiblemente: 1) Una alta relación superficie/volumen, comparada con la del nanofitoplancton y microfitoplancton, que



incrementa la eficiencia en el aprovechamiento de la luz, del bióxido de carbono y de los nutrientes. 2) Por el mismo motivo, una baja tasa de sedimentación, que les favorece durante el periodo de estratificación (Reynolds 1984, Raven 1986, Stockner y Shorted 1994, Agawin *et al.* 2000).

La máxima densidad fitoplanctónica de abril fue exclusivamente de células sencillas de Pcy (*S. nidulans* y *Synechocystis* sp.), mientras que durante el resto de la estratificación –asociado a un decremento relativo de nutrientes- la variedad de especies coloniales (especies tipo ‘k’: *E. cf. starmachii*, *L. cf. flexa* y *E. cf. glebulenta*) incrementa, jugando un significativo papel en la estructura poblacional, con dominio en la zona metalimnética y cambios (¿sucesión?) en las especies representativas relacionados con las condiciones físicoquímicas dominantes, como son cambios en la estructura térmica y su asociación con la disponibilidad de oxígeno disuelto, nutrientes y luz (Fig. 12). En el lago Maggiore, por ejemplo, Callieri y Stockner (2002) registran un cambio de Pcy a CPcy similar al de Alchichica; ellos postulan que esta variación estacional puede ser resultado de una sucesión con cambios de morfotipos, sugiriendo una posible respuesta adaptativa de la población Pcy a la variación estacional de los factores físicoquímicos del lago.

La limitación por nitrógeno observada en el epilimnion durante la mayoría de los meses de estudio (Fig. 9), juega un papel muy importante en Alchichica, favoreciendo la presencia de especies fijadoras de nitrógeno (*N. cf. spumigena*) y quizás algunas del CPcy. En el caso de Alchichica, sería interesante explorar la capacidad fijadora de nitrógeno de *E. cf. starmarchii*, debido a la presencia de un mucílago denso que podría permitir crear, en su interior, las condiciones de anoxia necesarias para el funcionamiento de la nitrogenasa (Schallenberg y Burns 2001). Las bajas relaciones DIN/PRS (<16) juegan un papel importante en el fitoplancton, comportamiento reflejado en el florecimiento de *N. cf. spumigena*, el cual genera un corto periodo de aparente limitación por fósforo; es decir, incrementan las concentraciones de nitrógeno, rápidamente asimilado por el fitoplancton presente, provocando el pico máximo de densidad fitoplanctónica en el mes de julio (Fig. 9 y 13), comportamiento relacionado con un incremento en los valores superficiales de turbidez que probablemente indican una entrada de nutrientes por una fuente alóctona.

En el mes de enero, con el decremento en los valores de temperatura y la circulación del lago, se registra nuevamente el dominio del Pcy (especies tipo 'r'); *S. nidulans* es la especie dominante, acompañada por *Synechocystis* sp., *Cyanodiction* cf. *planctonicum* y las algas verdes *Monoraphidium minutum* y *M. dybowskii* (Fig. 11). El paso de picofitoplancton colonial a picofitoplancton individual en la composición fitoplanctónica responde probablemente a la liberación de nutrientes en la columna de agua provocado por el inicio de la circulación. El picofitoplancton individual y las pequeñas algas verdes nanofitoplanctónicas son favorecidas por su mayor potencial de tasa de crecimiento bajo concentraciones relativamente altas de nutrientes, en comparación con el microfitoplancton (Weisse 1988, Lampert y Sommer 1997). Además, las células individuales pequeñas son favorecidas durante la circulación, debido al rápido incremento en su tasa de crecimiento que aumenta su probabilidad de encontrarse dentro de la zona iluminada (Margalef 1983).

Por otra parte, siguiendo la idea de que las colonias pudieran derivarse de las células individuales -al menos en los meses de verano-, la fragmentación del picofitoplancton colonial se postula como una de las posibles causas del incremento en la abundancia del Pcy durante el periodo de mezcla (Callieri y Stockner 2000), con base en estudios en los que sonifican pequeñas colonias y durante su fragmentación se observa la liberación de células individuales (Crosbie *et al.* 2003).

Las altas densidades fitoplanctónicas en la vertical generalmente se encuentran en el metalimnion (excepto en noviembre y diciembre, Fig. 12) asociadas con el 1% PAR, comportamiento atribuido a las relativamente altas concentraciones de nutrientes registradas en esta capa (Fig. 6, 7 y 8). Datos similares han sido reportados por Shortreed y Stockner (1990), Tremblay *et al.* (1997), Morabito *et al.* (2003). Estos autores consideran que el incremento en la densidad fitoplanctónica se debe a la acumulación de nutrientes y su reciclamiento *in situ*. La acumulación de células en el metalimnion puede también estar asociada con bajos valores de PAR, debido a que las células encuentran -bajo esta condición- un refugio a la posible inhibición -en producción de biomasa, fotosíntesis y tasas de fijación de nitrógeno- por exposición a radiaciones ultravioleta (Darley 1987, Bertoni y Callieri 1999). En Alchichica se ha reportado una disminución en la tasa de fijación de nitrógeno en *N. cf. spumigena* causado por la presencia de radiación ultravioleta (Falcón *et al.* 2002).

Los únicos meses en los que se registran altas densidades en la superficie (0-5 m), noviembre y diciembre, coinciden con una descenso en la profundidad de la zona fótica y en un aumento en los valores de turbidez, lo cual puede explicarse como una entrada alóctona (Macek y Martínez 2002) que aporta nutrientes aparentemente asimilables por *Lemmermanniella cf. flexa* (Fig. 11 y 12).

Las concentraciones de clorofila *a* obtuvieron una correlación positiva significativa ( $p < 0.05$ ) con el biovolumen ( $r = 0.5$ ), por lo que a continuación se discutirán juntos. Los valores de clorofila *a* y biovolumen varían poco espacio-temporalmente, a excepción de mayores concentraciones de clorofila en mayo y de septiembre a noviembre, cuando se forma un máximo de clorofila profundo (DCM, por sus siglas en inglés “deep chlorophyll maximum” Fig. 14 y 17). Al respecto, Harris (1986) señala que los lagos tropicales varían poco en biovolumen, biomasa (como clorofila *a*) y productividad, lo cual podría aplicarse a Alchichica en el ciclo y muestreos estudiados; sin embargo, esta baja variabilidad podría deberse también a que el lago es relativamente poco productivo y, por ello, fluctúa menos que los lagos eutróficos; por último, en el ciclo estudiado, el muestreo de mayo parece ser que fue a inicios del florecimiento de *Nodularia* (considerando que apenas hubo un aumento superficial en la relación DIN/PRS, mientras que este aumento se observa generalizado en junio), lo cual implica que no se detectó el máximo superficial de contenido de clorofila *a* correspondiente al mismo (Oliva *et al.* 2001, quien lo reporta para abril en su periodo de estudio). Por otra parte, el ciclo de estudio puede no ser representativo de un patrón, dado que en estudios continuos en Alchichica, para el contenido de clorofila *a* se ha detectado la presencia de ciclos interanuales (Alcocer com. pers.).

En el presente estudio, el intervalo de variación del contenido de clorofila *a* total (0.3 a 5.8  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) indica condiciones oligotróficas, según los límites establecidos por Margalef (1983). Cabe resaltar que los valores obtenidos por extracción con metanol son generalmente más altos (0.4 a 17.2  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) que los de acetona y, con base en estas concentraciones, las condiciones que presenta Alchichica difieren típicamente de oligotróficas a oligotróficas con cortos periodos de mesotrofia.

Durante el periodo de estudio, los valores de clorofila *a* indican que la fracción  $< 2 \mu\text{m}$  domina únicamente en el mes de abril a 12 m (2.5  $\mu\text{g L}^{-1}$ , Fig. 17), con *S. nidulans* y *Synechococcus* sp. como las especies representantes; sin embargo, no se observa relación con los

valores de biovolumen ( $p > 0.05$ ). Este comportamiento se debe probablemente a que los valores de biovolumen se calcularon en función de las densidades obtenidas por conteos con el microscopio invertido a  $600\times$  y debido a su pequeño tamaño celular ( $< 2\mu\text{m}$ ) se contabilizó un menor número de células por este método, resultando en bajos biovolúmenes para la fracción mencionada.

Cabe resaltar que, en el hipolimnion del lago, la fracción  $< 2\mu\text{m}$  muestra concentraciones de clorofila *a* que, aunque bajas comparadas con las de superficie, son relativamente constantes y superiores a las de la fracción  $> 2\mu\text{m}$  (Fig. 17); esto probablemente se debe a que las células se encuentran limitadas por luz y producen un sistema más eficiente para capturarla, lo cual implica un incremento en el contenido de clorofila por célula, respuesta relativamente rápida que se da entre uno a tres días (Darley 1987, Lampert y Sommer 1997, Wetzel 2001); esta adaptación se ha registrado en cultivos de *Synechococcus* con un incremento de tres veces el contenido de clorofila por célula (Malinsky-Rushansky *et al.* 2002).

En el resto de los meses, los valores de clorofila *a* son atribuibles principalmente a la fracción  $> 2\mu\text{m}$  (microfitoplanctónica y nanofitoplanctónica), con una distribución disímil en la vertical (Fig. 17). La clorofila *a* total en la superficie y metalimnion es baja de abril a octubre, se infiere que es aportada principalmente por el biovolumen de la fracción nanofitoplanctónica, representada sobre todo por *Oocystis parva*, *Ch. elmorei* y *N. cf. spumigena*. El dominio de estas especies en las capas superficiales del lago -y, por lo tanto, su importante contribución a los valores de clorofila *a*-, se debe a la presencia de adaptaciones que evitan pérdidas por hundimiento: en el caso de *Ch. elmorei*, la formación de largas sedas y cadenas de células disminuyen su hundimiento por incremento en la fricción (Harris 1986), mientras que *O. parva* probablemente se ve favorecida por la presencia de una delgada capa mucilaginosa que disminuye su velocidad de hundimiento por decremento global de la densidad, y *N. cf. spumigena* se ve favorecida a causa de que sus células presentan vesículas de gas que, al expandirse, le confieren flotabilidad (Wetzel 2001).

Durante el mes de diciembre ocurren incrementos en los valores de clorofila *a* registrados en la superficie y metalimnion ( $3.6$  y  $4.8\mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente, Fig. 17); aparentemente, la especie que contribuye predominantemente es *C. choctawhatcheeana*, cuya presencia en estas capas superficiales parece responder al aumento en la turbulencia y a la entrada de material alóctono

como fuente de nutrientes en el mes de diciembre. Bajo condiciones similares, se ha observado el dominio de diatomeas pequeñas que presentan un rápido crecimiento y mayor competencia por asimilación de nutrientes, en contraste con el microfitoplancton (Reynolds 1984, Harris 1986).

Los máximos valores de clorofila *a* (DCM) registrados en el metalimnion, o bien en el límite metalimnion-hipolimnion, se encuentran estrechamente relacionados con el biovolumen (excepto en mayo) de la fracción > a 2  $\mu\text{m}$ , particularmente con *Cyclotella* sp. (especie microfitoplanctónica) como su principal representante (Fig. 17 y 13). Este comportamiento responde, en principio, a las condiciones de estabilidad en la columna de agua durante el periodo de estratificación en el Lago Alchichica, las cuales convierten el epilimnion en un ambiente con relativamente bajas concentraciones de nutrientes (Fig. 6, 7 y 8). Las células fitoplanctónicas grandes presentan una capacidad limitada para competir bajo estas condiciones, por lo tanto comienzan a hundirse fuera del epilimnion –por su elevada tasa de sedimentación– (Reynolds 1994), hasta encontrar un ambiente en el que la concentración de nutrientes es mayor. Esto es visible por el continuo incremento de células de *Cyclotella* sp. en metalimnion y hipolimnion del lago y su virtual ausencia en la superficie, así como la estrecha relación con la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  en mayo y de septiembre a noviembre (Fig. 14 y 15). Este mecanismo es aparentemente el que regula la formación del máximo de clorofila profundo en el lago Alchichica, observado durante los meses de mayo y de septiembre a noviembre (27 y 34 m). Kiefer y Kremer (1981) sugieren que, en los océanos oligotróficos, el fitoplancton se acumula formando un DCM a causa de la desaceleración en la velocidad de hundimiento de las células microfitoplanctónicas en aguas con gradientes de densidad, con menor luz y ricas en nutrientes. Durante el periodo de estudio, los DCM fueron atribuibles fundamentalmente al biovolumen de *Cyclotella* sp., lo cual resulta en flagrante contradicción con los datos aportados con Sánchez (2001), quién los asocia a las demás especies dominantes numéricamente.

La incongruencia observada entre las concentraciones de clorofila *a* y el biovolumen en el mes de mayo se debe probablemente a que, durante la sedimentación de *Cyclotella* sp., el contenido celular sufre una aparente disminución y degradación, razón por la cual se dificulta determinar –en microscopio invertido– la viabilidad de las células, contabilizadas como células vacías o degradadas, por lo que no se tomaron en cuenta en los cálculos de biovolumen.

Durante el periodo de mezcla (enero), los valores de clorofila *a* fueron uniformes (2.7 a 3.4  $\mu\text{g L}^{-1}$ , Fig. 17) en la columna de agua; estas relativamente altas concentraciones de clorofila *a* son atribuibles a la fracción microfitoplánctonica, de nuevo dominada por *Cyclotella* sp., la cual se ve favorecida por el incremento en las condiciones de turbulencia del lago y la liberación de los nutrientes atrapados en el hipolimnion durante el periodo de estratificación. Reynolds (1994) señala que las diatomeas que crecen durante la mezcla usan accesorios fotosintéticos como adaptación múltiple a condiciones cambiantes de intensidad luminosa. Son precisamente estas adaptaciones las que justifican la presencia de *Cyclotella* sp. a mayor profundidad con menor intensidad luminosa, favoreciendo la formación de un DCM.

En relación con la densidad de células picofitoplanctónicas obtenidas por autofluorescencia del pigmento fotosintético, los valores observados son altos (promedio de  $1.9 \times 10^5$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , Fig. 16) en comparación con otros lagos oligotróficos (Stockner y Shortreed 1994, Callieri y Pinolini 1995, Schallenberg y Burns 2001). Valores asimismo altos de Pcy se han reportado en otros lagos: los lagos oligotróficos Hurón y Michigan ( $10^5$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , Fahnenstiel y Carrick 1992), el oligo-mesotrófico Skrzyńska ( $5 \times 10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , Szeląg-Wasielewska 1999), el lago meso-eutrófico Constanza ( $10^5$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , Gaedke y Weisse 1998) y el meso-eutrófico Lago Biwa ( $10^6$  cél  $\text{mL}^{-1}$ , Eguchi *et al.* 1996). Como se ve, las altas densidades reportadas no se encuentran directamente relacionadas con el estado trófico, contrario a lo que afirma Stockner (1991), quién encuentra un patrón relacionado con el trofismo que se resume de la siguiente manera: lagos oligotróficos densidades de  $2 \times 10^4$  cél  $\text{mL}^{-1}$  y eutróficos de  $6 \times 10^5$  cél  $\text{mL}^{-1}$ . Este modelo que -postula un incremento en la abundancia y biomasa del picofitoplancton individual cuando las concentraciones de fósforo aumentan, mientras que su contribución a la biomasa fitoplanctónica total declina, observada en ecosistemas marinos y agua dulce (Stockner 1991, Bell y Kalff 2001)- no ha sido aceptado por todos los autores. Por ejemplo, Vörös *et al.* (1998) y Callieri y Stockner (2000) no encuentran una relación simple entre el estado trófico y la abundancia del picofitoplancton en su investigación. Cabe resaltar que en los cuerpos de agua continentales, la mayoría de estos trabajos son de ambientes templados y se basan en conteos de picofitoplancton individual, lo cual probablemente restrinja el modelo propuesto, ya que -como se sabe- en los ambientes tropicales es frecuente que el nitrógeno sea el principal nutriente limitante, además de la falta real de estudios en ambientes tropicales acerca del comportamiento del picofitoplancton. Así pues, el modelo de Stockner en el lago Alchichica no aplica, debido a

que las concentraciones de fósforo son relativamente altas a pesar de su condición oligotrófica (lo cual es esperable en lagos alcalino-sódicos, en comparación con las del nutriente limitante, el nitrógeno); es decir, se tendrían las condiciones adecuadas para una alta biomasa y densidad picofitoplanctónica y, sin embargo, en el ciclo únicamente se tienen dos picos importantes, uno al inicio de la estratificación y el otro a finales de ésta. Además, la contribución a la biomasa total fitoplanctónica es importante cuando su densidad y biomasa son altas, durante abril. Por densidad, la fracción que aparentemente se ve favorecida bajo una limitación por nitrógeno es el picofitoplancton colonial, aunque -por tamaño- esta fracción se ubicaría entre el nano- o microfitoplancton<sup>1</sup>; mientras que, por biomasa -con base en su biovolumen- su contribución a la biomasa fitoplanctónica total es baja. Es decir, el modelo de Stockner aparentemente sí se cumple en la fracción colonial, aunque el modelo sólo se refiere a la fracción individual. Ello se debe, seguramente, a la falta de estudios que confirmen o desmientan la posible formación de CPcy a partir de células del Pcy (por ejemplo, constituirían fases diferentes dentro del ciclo de vida de una especie) y su importancia con respecto a su “tamaño-función” (Callieri y Stockner 2000, Crosbie *et al.* 2003).

El patrón de densidad estacional de Pcy en Alchichica parecería diferir de los patrones más comunes observados en otros lagos, como los dimícticos, los cuales presentan un pico en primavera o a principios de verano y un segundo pico durante otoño (Callieri y Stocker 2002), es decir, durante la mezcla. Sin embargo, considerando que estas fases coinciden con la transición mezcla/estratificación (finales primavera/verano en zona templada, alrededor de abril en Alchichica) y finales de estratificación (otoño en zona templada, diciembre en Alchichica), se deduce que el patrón se mantiene con las “estaciones” corridas (considerando incluso que el presente estudio no analizó la fase de mezcla completa). En Alchichica, las altas densidades ( $12 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup>, 0-5 m) durante la interfase mezcla-estratificación y a finales de la estratificación ( $1.1 \times 10^6$  cél mL<sup>-1</sup>, 0-5 m, Fig. 16) se encuentran relacionadas con aguas de temperaturas entre 18 y 15° C, relativamente bajas en relación con el resto de los meses, en contraste con otros lagos donde se reportan altas densidades cuando la temperatura del agua alcanza su máximo anual (> 26° C, Weisse 1988, Malinsky-Rushansky *et al.* 1995, Gaedke y Weisse 1998, Agawin *et al.*

---

<sup>1</sup> La metodología de filtración para clorofilas en el presente estudio deja abierta la duda de si la presión de filtración a través de membranas con poro de 2 µm es suficiente para desbaratar las colonias de los géneros con mucílago más tenue (*Epigloeosphaera*, *Cyanodictyon*, *Lemmermanniella*); si así fuera, a pesar del tamaño grande de las colonias, se contabilizarían igualmente como picocianoplancton en las clorofilas.

2000). Una marcada diferencia entre el patrón estacional de Alchichica y la mayoría de los lagos es que los grandes picos de primavera de picofitoplancton son comunes en lagos templados eutróficos y hipereutróficos, pero no en lagos monomícticos cálidos (Rojo y Rodríguez 1994, Malinsky-Rushansky *et al.* 1995, Stockner *et al.* 2000).

Pese a las condiciones favorables para el Pcy en el Lago de Alchichica (oligotrófico, monomíctico cálido y salino), las altas concentraciones no se mantuvieron durante todo el periodo de estudio, debido quizás a la depredación, de la cual se ha observado que puede ser responsable de grandes fluctuaciones en las poblaciones de Pcy en lagos (Fahnenstiel *et al.* 1986, Stockner y Antias 1986, Weisse 1988, Stockner y Shortreed 1994, Szeląg-Wasielewska 1999); en apoyo a esta interpretación, en abril se observa que el pico de Pcy ( $12 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup>, en la superficie) declina abruptamente en mayo a  $1.7 \times 10^5$  cél mL<sup>-1</sup>, con un rápido incremento en el picofitoplancton colonial, el cual probablemente es menos depredado. Por otra parte, se ha observado que bajo limitación por nutrientes, el CPcy suele ser más abundante que el Pcy (Stockner y Shortreed 1994, Schallenberg y Burns 2001). Los máximos en la población de Pcy en abril y diciembre, probablemente se ven favorecidos por una aparente entrada de material alóctono (materiales finos procedentes del suelo o de ceniza volcánica) que incrementó la concentración de nutrientes asimilables por el picofitoplancton (Macek y Martínez 2002); esta aparente entrada se ve reflejada en el aumento en los valores de turbidez en el lago.

La distribución vertical del Pcy en el lago Alchichica se asocia con el 1% del PAR y la población se concentra en el metalimnion, excepto en los picos máximos de abril y diciembre registrados en la superficie (Fig. 16). Este comportamiento aparentemente se atribuye a las altas concentraciones de nutrientes registradas en esta capa y, además, parece indicar una posible adaptación de las especies picofitoplanctónicas individuales a bajas intensidades de luz. Fahnenstiel y Carrick (1992), Callieri y Pinolini (1995) Camacho *et al.* (2003) reportan altas concentraciones de Pcy en el metalimnion, e indican que la preferencia del Pcy por esta capa se debe a los bajos niveles de irradiancia (<10% de la luz que entra por la superficie) registrados. Por otra parte, a partir del pico superficial de Pcy en abril, su abundancia decreció en las aguas superficiales, debido posiblemente a la escasez de nutrientes en la superficie durante el resto de los meses estratificados, ya que el crecimiento se encuentra prácticamente impedido por la falta de nutrientes.



## 9. Conclusiones

1.- ¿Determina el régimen de estratificación/mezcla la distribución disímil en la columna de agua del pico-, nano- y microfitoplancton?

La estructura térmica, así como la disponibilidad de nutrientes, producto de la hidrodinámica del lago determinaron la estructuración por tamaños celulares en Alchichica durante el lapso de estudio.

Las mayores densidades de fitoplancton total (cél mL<sup>-1</sup>) se concentran en el metalimnion (excepto en noviembre y diciembre), asociadas al 1% de PAR y a una relativa acumulación de nutrientes.

La fracción dominante por biovolumen y contenido de clorofila *a* fue la nano- y microfitoplanctónica (> 2 µm). En general, el nanofitoplancton (*Cyclotella choctawhatcheeana*, *Chaetoceros elmorei*, *Oocystis parva*, *O. submarina* y *Nodularia* cf. *spumigena*) fue el que dominó en la superficie y metalimnion, favorecidas por adaptaciones morfológicas que contrarrestan el hundimiento.

En el hipolimnion, *Cyclotella* sp. dominó por biovolumen y contenido de clorofila *a*; además se observó un DCM (Deep Chlorophyll Maximum, por sus siglas en inglés) en el metalimnion, ambiente en el que esta especie, de gran tamaño, se encontró en estrecha relación con N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y, un posible decrementó en su velocidad de hundimiento por la disminución relativa de temperatura.

Las cianoprocariontas mostraron dos morfotipos que dieron por resultado dos tallas: el picofitoplancton individual (Pcy: *Synechococcus nidulans* y *Synechocystis* sp.) y el picofitoplancton colonial (CPcy: *Cyandodictyon* cf. *planctonicum*, *Epigloeosphaera* cf. *glebulenta*, *Lemmermanniella* cf. *flexa*, *Eucapsis* cf. *starmachii*). La estructura térmica también incidió en su distribución, con el Pcy dominando durante la mezcla en la columna e inicios de la estratificación, y el CPcy en el metalimnion durante la estratificación.

2.- Si el picofitoplancton llega a dominar en Alchichica, ¿en qué época y profundidad(es) lo hace?

Los valores del picofitoplancton individual fueron altos, en comparación a los reportados para otros lagos, con máximos durante la interfase mezcla-estratificación (abril) y a finales de la estratificación (diciembre). Por contenido de clorofila *a*, el picofitoplancton individual sólo dominó en abril en la superficie y metalimnion.

El picofitoplancton individual se concentró en el metalimnion (excepto en los máximos de abril y diciembre), en asociación con el 1% de PAR y a una relativa acumulación de nutrimentos.

Durante el resto del periodo de estratificación, dominó por densidad (cél mL<sup>-1</sup>) el picofitoplancton colonial (*C. cf. planctonicum*, *L. cf. flexa*, *E. cf. glebulenta* y *E. cf. starmachii*). Esta fracción se concentró principalmente en el metalimnion asociada al 1% de PAR y a una relativa acumulación de nutrimentos.

3.- Con base en la observación de la variación numérica (densidad y biovolumen), ¿cuál puede ser la importancia de los diversos morfos del picofitoplancton en Alchichica?

Por densidad, el picofitoplancton colonial dominó durante la mayor parte del periodo de estratificación (mayo a noviembre). La contribución que tuvo esta fracción en la biomasa fitoplanctónica total fue muy baja.

De las especies coloniales observadas, *Eucapsis cf. starmachii* -de colonias masivas con mucílago- fue dominante en las fases intermedias de la estratificación. Las especies que presentan las células en la periferia del mucílago (*L. cf. flexa* y *E. cf. glebulenta*) se observaron en mayor cantidad al final de la estratificación.

El dominio del picofitoplancton individual en abril (interfase mezcla-estratificación) y diciembre (finales de la estratificación).

En resumen, Alchichica presentó un fitoplancton dominado por las fracciones nano- y microfitoplanctónicas (3-60 µm), con una representación especialmente importante del picofitoplancton colonial, el cual dominó por densidad prácticamente en todo el periodo de estratificación, con cambios en las especies dominantes. Por biovolumen y contenido de clorofila

*a*, la fracción dominante fue la misma, pero con las diatomeas y algas verdes como los grupos representativos. La distribución vertical del fitoplancton se encontró principalmente influida por una combinación del gradiente de densidad y la relativa mayor acumulación de nutrientes en el metalimnion, cuya base generalmente coincidió –además- con la de la zona fótica.

## 10. Perspectivas futuras

Gran parte de la problemática taxonómica que se presentó en el grupo de las cianoprocariotas –lo que provocó el uso frecuente de *confer-* se debió principalmente a la variabilidad ecológica de las especies tipo, por lo que es necesario delimitar su asignación a nivel específico, mediante –por ejemplo- la realización de cultivos, utilizando criterios moleculares y fisiológicos de las especies.

Es necesario realizar cultivos para evaluar el ciclo de vida completo de las especies individuales y coloniales, para confirmar o desmentir una posible formación de especies coloniales a partir de células individuales, debido a la importancia ecológica que este cambio en tamaño-función puede tener en el lago.

En Alchichica, la presencia de especies coloniales se vió favorecida; sin embargo, se ignoran las condiciones que promueven su presencia y dominio numérico, dado que en la mayoría de los lagos estudiados -básicamente templados- no son comunes estas formas coloniales, en las altas densidades observadas en Alchichica.

Dadas las importantes controversias entre las ventajas y desventajas de la presencia de especies coloniales -principalmente por la presencia de un mucílago que posiblemente limite la asimilación de nutrientes-, es necesario definir si en las especies que tienen un mucílago, pero las células se encuentran distribuidas en la parte externa (ej. *L. cf. flexa* y *E. cf. glebulenta*), ocurre esta limitación o si su particular morfología representa verdaderamente una ventaja para ellas.

Dado que en Alchichica de acuerdo a la relación DIN/PRS (<16) el nutriente limitante en la zona fótica es el nitrógeno y que bajo esta condición se favorece la presencia de especies fijadoras de nitrógeno, es preciso definir si algunas de las especies presentes como *Eucapsis cf. starmachii*, con la presencia de un mucílago grueso que facilitaría el abatimiento del oxígeno en la zona central de la colonia, podría funcionar como una especie fijadora de nitrógeno.

Básicamente no existen estudios sobre el picofitoplancton, en los lagos mexicanos por tal motivo es necesario realizar estudios extensivos con el fin de definir si el comportamiento es similar al de Alchichica, en cuanto al patrón estacional, distribución vertical, así como la presencia de especies individuales y un cambio a especies coloniales.

## 11. Literatura Citada

- Agawin R., M. Duarte y S. Agustí. 2000. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnol. Oceanogr.* **45**:591-600.
- Alcocer J. 1995. Análisis holístico de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos litorales de seis lagos-cráter con un gradiente de salinidad. Tesis de doctorado en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 106 pp.
- Alcocer J. y E. Escobar. 1992. La producción primaria en aguas athalasoalinas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* **43**:101-108.
- Alcocer J., A. Lugo, E. Escobar, Ma del R. Sánchez y G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, México. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**:1-4.
- Alcocer J. y A. Lugo. 2003. Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central México. *Geofís. Int.* **42**(3):523-528.
- Anagnostidis K. y J. Komárek. 1985. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 1. Introduction. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **38-39**:291-292.
- Anagnostidis K. y J. Komárek. 1988. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 3. Oscillatoriales. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **50-53**:327-472.
- Anda J., H. Shear, U. Maniak y G. Riedel. 2001. Phosphates in lake Chapala, México. *Lakes Reserv. Manag.* **6**:313-321.
- Ansotegui A., A. Sarobe, M. Trigueros, I. Urrutxurtu y E. Orive. 2003. Size distribution of algal pigments and phytoplankton assemblages in a coastal-estuarine environment: contribution of small eukaryotic algae. *J. Plankton Res.* **25**(4):341-355.
- APHA-AWWA-WPCF. 1980. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. 17ª Edición, Ediciones Díaz de Santos, Madrid España. 221 pp.
- Arredondo F. J. L., E. L. E. Borrego, D. R. M. Castillo y L. M. A. Valladolid. 1983. Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biotica* **8**(1):37-47.
- Arredondo L., O. Vera y A. Ortiz. 1984. Análisis de componentes principales y cúmulos, de datos limnológicos, en el lago de Alchichica, Puebla. *Biotica* **9**(1):23-39.

- Atlas Nacional de México. 1990. *Naturaleza* Vol. II. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Azam F., G. Fenchel, S. Field, A. Gray, Meyer-Reil y F. Thingstad. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **10**:257-263.
- Azevedo M., Souza C. y Meneses M. 1999. Synechococaceae (Cyanophyceae/Cyanobacteria) from a tropical brackish water lagoon, Brazil. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **94**:45-61.
- Battarbee W., C. Keister y J. Bradbury. 1984. *The frustular morphology and taxonomic relationships of Cyclotella quillensis* Bailey. 173-184. In. Mann D. 1884 (Ed.). *Proceedings of the seventh International Diatom Symposium*. Philadelphia, August 22-27. Koenigstein, Germany. 541 pp.
- Bell T. y J. Kalff. 2001. The contribution of picophytoplankton in marine and freshwater systems of different trophic status and depth. *Limnol. Oceanogr.* **46**(5):1243-1248.
- Bertoni R. Y C. Callieri. 1999. Effects of UVB radiation on freshwater autotrophic and heterotrophic picoplankton in a subalpine lake. *J. Plankton Res.* **21**(7):1373-1388.
- Brandon R., E. Maruska y T. Rumph. 1981. A new species of neotenic *Ambystoma* (Amphibia, Caudata) endemic to Laguna Alchichica, Puebla, México. *Bull. Southern California Acad. Sci.* **80**:112-125.
- Caballero M., G. Vilaclara, A. Rodríguez y D. Juárez. 2003. Short-term climatic change sediments from lake Alchichica, Oriental, Mexico. *Geofis. Int.* **42**(3):529-537.
- Callieri C. y M. L. Pinolini. 1995. Picoplankton in lake Maggiore, Italy. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* **80**(3):491-501.
- Callieri C. y J. G. Stockner. 2000. Picocyanobacteria succes in oligotrophic lakes: fact or fiction?. *J. Limnol.* **59**(1): 72-76.
- Callieri C. y J. G. Stockner. 2002. Freshwater autotrophic picoplankton: a review. *J. Limnol.* **61**(1): 1-14.
- Callieri C. y R. Piscia. 2002. Photosynthetic efficiency and seasonality of autotrophic picoplankton in Lago Maggiore after its recovery. *Freshwat. Biol.* **47**:941-956.
- Camacho A., M. Miracle y E. Vicente. 2003. Which factors determine the abundance and distribution of picocyanobacteria in inland waters? A comparison among different types of lakes and ponds. *Arch. Hydrobiol.* **157**(3):321-338.

- Caroppo C. 2000. The contribution of picophytoplankton to community structure in a Mediterranean brackish environment. *J. Plankton Res.* **22**(2): 381-397.
- Comas A. 1996. *Las Chlorococcales dulciacuícolas de Cuba*. Cramer. Stuttgart, Berlín. 192 pp.
- Crosbie N., K. Teubner y T. Weisse. 2003. Flow-cytometric mapping provides novel insights into the seasonal and vertical distributions of freshwater autotrophic picoplankton. *Aquat. Microb. Ecol.* **33**:53-66.
- Danielidis D.B., M. Spartinou y A. Economou-Amilli. 1996. Limnological survey of lake Amvrakia, western Greece. *Hydrobiologia* **318**:207-218.
- Darley W. M. 1987. *Biología de las algas*. Enfoque fisiológico. Ed. Limusa. México. 236 pp.
- De Buen F. 1945. Investigaciones sobre ictiología mexicana. I. Atherinidae de aguas continentales de México. *An Inst. Biol. Univ. Nal. Autón. México* **16**:475-532.
- Desikachary V. 1959. *Cyanophyta. Monographs on algae*. Indian Council of Agricultural Research. New Delhi. 686 pp.
- Drakare S., P. Blomqvist, A. Bergström y M. Jansson. 2003. Relationships between picophytoplankton and environmental variables in lakes along a gradient of water colour and nutrient content. *Freshwat. Biol.* **48**:729-740.
- Eguchi M., T. Oketa, N. Miyamoto, H. Maeda y A. Kawai. 1996. Occurrence of viable photoautotrophic picoplankton in the aphotic zone of lake Biwa, Japan. *J. Plankton Res.* **18**:539-550.
- Fahnenstiel G., L. Sicko-Goad, D. Scavia y E. Stoermer. 1986. Importance of picoplankton in Lake Superior. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **43**:235-240.
- Fahnenstiel G. L. y H. J. Carrick. 1992. Phototrophic picoplankton in lakes Huron and Michigan: abundance, distribution, composition and contribution to biomass and production. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **49**:379-388.
- Falcón L. I., E. Escobar-Briones y D. Romero. 2002. Nitrogen fixation patterns displayed by cyanobacterial consortia in Alchichica crater-lake, Mexico. *Hydrobiologia* **467**:71-78.
- Fritz S. C., Juggins S y Battarbee R. W. 1993. Diatom assemblages and ionic characterization of lakes of the Northern Great Plains, North America: A tool for

- reconstructing past salinity and climate fluctuations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **50**:1844-1856.
- Fuentes L. 1972. *Regiones naturales del estado de Puebla*. Univ. Nal. Autón. México, México. 143 pp.
  - Gaedke U. y T. Weisse. 1998. Seasonal and interannual variability of picocyanobacteria in Lake Constance (1987-1997). *Arch. Hydrobiol. Spec. Iss. Advanc. Limnol.* **53**:143-158.
  - Galat D. L., E. L. Lider, S. Vigg y S. R. Robertson. 1981. Limnology of a large, deep, North American terminal lake, Pyramid Lake, Nevada, U.S.A. *Hydrobiologia* **82**:281-317.
  - Galat D.L., Verdin J. P. y Sims L.L. 1990. Large-scale patterns of *Nodularia spumigena* blooms in Pyramid Lake, Nevada, determined from Landsat imagery: 1972-1986. *Hydrobiologia* **197**:147-164.
  - García E. 1980. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Instituto de Geografía. UNAM. 245 pp.
  - Garzón A. 1990. Caracterización saprotrófica de los lagos cráter de la región de los Llanos, Puebla. Tesis de Licenciatura (Biología), ENEP-Iztacala, UNAM, México. 102 pp.
  - Gasca A. 1981. *Algunas notas de la génesis de los lagos cráter de la Cuenca de Oriental, Puebla, Tlaxcala y Veracruz*. Inst. Nal. Antropol. Hist. Departamento de Prehistoria. México, 55 pp. (Colección Científica Prehistoria No. 98).
  - Håkansson H. y H. Kling. 1994. *Cyclotella agassizensis* nov. sp. and its relationship to *C. quillensis* Bailey and other prairie *Cyclotella* species. *Diatom Res.* **9**(2): 289-301.
  - Håkansson H. 2002. A compilation and evaluation of species in the general *Stephanodiscus*, *Cyclostephanos* and *Cyclotella* with a new genus in the family Stephanodiscaceae. *Diatom Res.* **17**(1):1-139.
  - Hamel K. S. y A. L. Huber. 1985. Relationship of cellular phosphorus in the cyanobacterium *Nodularia* to phosphorus availability in the Peel-Harvey Estuarine System. *Hydrobiologia* **124**:57-63.
  - Hammer U. T., J. Shames y R. C. Haynes. 1983. The distribution and abundance of algae in saline lakes of Saskatchewan, Canada. *Hydrobiologia* **105**:1-26.



- Hammer U. T., J. S. Sheard y J. Kranebetter. 1990. Distribution and abundance of littoral benthic fauna in Canadian prairie saline lakes. *Hydrobiologia* **197**:173-192.
- Han Myung-Soo y K. Furuya. 2000. Size and species-specific primary productivity and community structure of phytoplankton in Tokyo Bay. *J. Plankton Res.* **22**(7):1221-1235.
- Harris G.P. 1986. *Phytoplankton Ecology -structure, function and fluctuation*. Chapman and hall, London, 384 pp.
- Hernández Ma. del C. 2001. Densidad y biomasa de la meiofauna de la zona litoral de los lagos-cráter Alchichica, Quechulac y Tecuitlapa, Puebla, México. Tesis de licenciatura (Biología). ENEP-Iztacala, UNAM, México. 51 pp.
- Hillebrand H., C. Dürselen, D. Kirschtel, U. Pollingher y T. Zohary. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *J. Phycol.* **35**: 403-424.
- Hindák F. 1985. The cyanophycean genus Lemmermanniella Gleitler 1942. . *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **40**:393-401.
- Huber-Pestalozzi G. 1961. *Das Phytoplankton des Süßwassres. Systematik & Biologie. 5. Teil. Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Volvocales*. Stuttgart E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 365 pp.
- Huber-Pestalozzi G. 1962. *Das Phytoplankton des Süßwassres. Systematik & Biologie. 2. Teil. Chrysophyceen. Farblose Flagellaten Heterokonten*. Stuttgart E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 1044 pp.
- Huber-Pestalozzi G. 1983. *Das Phytoplankton des Süßwassres*. E. Scheweizerbartsche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart E.1044 pp.
- Hutchinson E. 1957. *A Treatise on Limnology. Geography, physics and chemistry of lakes*. Vol. 1. John Wiley & Sons, Nueva York. 1015 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2000. *Síntesis Geográfica del Estado de Puebla*. INEGI, México. 124 pp.
- Jeffrey S. y G. Humphrey. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physical. Pflanzen. (BPP)*. **167**:191-194.
- Kalff J. 2002. *Limnology*. Prentice Hall. New Jersey. 592 pp.
- Kalff J. y Watson. 1986. *Phytoplankton and its dynamics in two tropical lakes: tropical and temperate zone comparison*. pp. 161-176. In: Munawar M. y Talling J. F. (Eds.).

*Seasonality of freshwater phytoplankton*. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht. The Netherlands.

- Kiefer D. A. y J. N. Kremer. 1981. Origins of vertical patterns of phytoplankton and nutrients in the temperate, open ocean: a stratigraphic hypothesis. *Deep-Sea Res.* **28**:1087-1105.
- Komárek J. 1996. Towards a combined approach for the taxonomy and species delimitation of picoplanktic cyanoprokaryotes. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **83**: 377-401.
- Komárek J. 1999. Intergeneric characters in unicellular cyanobacteria, living in solitary cells. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **94**: 195-205.
- Komárek J. 2003. Coccoid and colonial cyanobacteria. In: Wehr J. y R. Sheath (Eds.) *Freshwater algae of North America*. Academic Press. U.S.A. pp.59-116.
- Komárek J. y Anagnostidis. 1986. Modern approach to the classification system of Cyanophytes. 2. Chroococcales. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **43**:157-226.
- Komárek J. y Anagnostidis. 1989. Modern approach to the classification system of Cyanophytes. 4. Nostocales. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **56**:247-345.
- Komárek J. y Anagnostidis. 1999. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 19/1: Cyanoprokaryota. 1. Teil: Chroococcales*. Gustav Fischer. 546 pp.
- Komárek J. y G. Cronberg 2001. Some chroococcalean and oscillatorialelean Cyanoprokaryotes from southern African lakes, ponds and pools. *Nova Hedwigia* **73**(1-2):129-160.
- Komárek J. y B. Fott. 1983. *Das phytoplankton des Süßwassers. Chlorophyceae (Grünalgen). Ordnung: Chlorococcales*". E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 1044 pp.
- Komárek J. y Komárková-Legnerová J. 2002. Contribution to the knowledge of planktic cyanoprokaryotes from central Mexico. *Preslia* **74**:207-233.
- Komárková-Legnerová J. 1991. Ephigloeosphaera, a new cyanophyte genus from Nordic lakes. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **62**:7-12.
- Komárková-Legnerová J., y G. Cronberg. 1994. Planktonic blue-green algae from lakes in South Scania, Sweden. Part I. Chroococcales. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **72**:13-51.

- Kononen K. 2001. Eutrophication, harmful algal blooms and species diversity in phytoplankton communities examples from the Baltic Sea. *Ambio* 30 (4-5):172-177.
- Kononen K., S. Nõmmann, G. Hansen, R. Hansen, G. Breuel y E. Gupalo. 1992. Spatial heterogeneity and dynamics of vernal phytoplankton species in the Baltic Sea in April-May 1986. *J. Plankton Res.* 14:107-125.
- Kooistra, W.H.F.C., D. Sarno, I. Percopo, L. Medlin, P. Sims y A. Zingone. 2004. High species diversity in *Skeletonema*. Abstract, 18th International Diatom Symposium, Poland, pág. 27.
- Krammer K. y H. Lange-Bertalot. 1986. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/1: Bacillariophyceae. 2. Teil: Naviculaceae*. Gustav Fischer. 86 pp.
- Krammer K. y H. Lange-Bertalot. 1988. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/2: Bacillariophyceae. 3. Teil: Bacillariaceae, Ephithemiaceae, Surirellaceae*. Gustav Fischer. 596 pp.
- Krammer K. y H. Lange-Bertalot. 1991a. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/3: Bacillariophyceae. 3. Teil: Bacillariaceae (Centrales, Fragilariaceae, Eunotionaceae)*. Gustav Fischer. 576 pp.
- Krammer K. y H. Lange-Bertalot. 1991b. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/4: Bacillariophyceae. 4. Teil: Bacillariaceae (Achnanthes, Kristische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema)*. Gustav Fischer. 437 pp.
- Lampert W. y U. Sommer. 1997. *Limnoecology. The ecology of lakes and streams*. Oxford University Press. Oxford. 382 pp.
- Lanza G. y L. García (comp.). 1995. *Lagos y presas de México. Centro de Ecología y desarrollo*. México. 320 pp.
- Leland H. V. y W. R. Berkas. 1998. Temporal variation in plankton assemblages and physicochemistry of Devils lake, North Dakota. *Hydrobiologia* 377:57-71.
- Lewis M. 1996. *Tropical lakes: how latitude makes a difference*. pp. 43-64. In: Schiemer F. y B. Boland (Eds.). *Perspectives in tropical limnology*. SPB Academic Publishing bv. Amsterdam. The Netherlands.
- Lewis M. Jr. 1973. The thermal regime of lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnol. Oceanogr.* 18:200-217.

- Lewis M. Jr. 1983. Temperature, heat and mixing in Lake Valencia, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.* **28**:273-286.
- Lugo A. 1993. Estudio de las comunidades litorales de protozoarios en seis lagos cráter del estado de Puebla, mediante el método de colonización de sustratos artificiales. Tesis de Maestría (Biología de sistemas y recursos acuáticos), Facultad de Ciencias, UNAM. 76 pp.
- Lugo A. 2000. Variación espacial y temporal de estructura de la comunidad planctónica del Lago Alchichica Alchichica, Puebla con algunos aspectos de interacciones tróficas. Tesis de Doctorado (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM, México. 98 pp.
- Lugo A., J. Alcocer, M. Chávez, G. Vilaclara, M. Gaytán y Ma. del R. Sánchez. 1994. Los axalapascos de Puebla: seis joyas en el desierto. *Información Científica y Tecnológica* **16**(209): 32-36.
- Lugo A., J. Alcocer, Ma. del R. Sánchez y E. Escobar. 1998. Litoral protozoan assemblages from two Mexican hyposaline lakes. *Hydrobiología* **381**:9-13.
- Lugo A., Ma. E. González, Ma. del R. Sánchez y J. Alcocer. 1999. Distribution of *Leptodiatomus novamexicanus* (Copepoda:Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Rev. Biol. Trop.* **47**:145-152.
- Lugo A., J. Alcocer, Ma. del R. Sánchez, E. Escobar y M. Macek. 2000. Temporal and spatial variation of bacterioplankton abundance in a tropical, warm,-monomictic, saline lake: Alchichica, Puebla, México. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**:1-4.
- Macek M., Vilaclara G. y Lugo A. 1994. Changes in protozoan assemblage and activity in a stratified tropical lake. *Marine Microb. Food Webs* **8** (1-2): 235-249.
- Macek M., A. Lugo y G. Vilaclara. 2000. Pelagic ciliate assemblage of high-altitude lake Atexcac (Puebla, Mexico): Comparison with similar lakes in other regions. pp. 45-59, *In*: Munawar, M., Lawrence, S.G., Munawar, I.F. y Malley, D.F. (Eds.): Aquatic ecosystems of Mexico, status and scope. Backhuyst Publishers, Leiden, 435 pp.
- Macek, M. y M. E. P. Martínez 2002. Dinámica temporal y espacial de picoplancton en el Lago de Alchichica (cartel). Congreso de la Asociación Española de Limnología (3er Congreso Iberoamericano de Limnología), 16-21 junio, Madrid, España.
- Malinsky-Rushansky N., T. Berman, y Z. Dubinsky. 1995. Seasonal dynamics of picophytoplankton in Lake Kinneret, Israel. *Freshwat. Biol.* **34**:241-254.

- Malinsky-Rushansky N., T. Berman, T. Berner, Y. Yacobi y Z. Dubinsky. 2002. Physiological characteristics of picophytoplankton, isolated from Lake Kinneret: responses to light and temperature. *J. Plankton Res.* **24**(11):1173-1183.
- Margalef R. 1983. *Limnología*. Omega, Barcelona. 1010 pp.
- Martínez P. M. E. 2002. Reducción de la presencia de *Vibrio cholerae* por bacterivoría de protozoo-plancton en el medio acuático. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias (Biología de Sistemas y Recursos Acuáticos). UNAM, México.
- Martínez-P. M.E., M. Macek, M. T. Castro-G. (2004): *In situ* measured elimination of *Vibrio cholerae* from brackish water. *Tropical Medicine & International Health* **9**: 1-8.
- Meneses L. 2002. Exploración geofísica e hidrogeológica en la Laguna de Alchichica, Cuenca de Libres-Oriental, Estado de Puebla. Tesis de licenciatura (Ingeniero geofísico). Facultad de Ingeniería, UNAM, México. 67pp.
- Montoya Ma. de J. y L. Peralta. 1995. Ecología de los oligoquetos de los lagos maars de la porción suroriental del Altiplano Mexicano. Tesis de licenciatura (Biología). E.N.E.P. Iztacala, UNAM, México. 62 pp.
- Morabito G., A. Oggioni y P. Panzani. 2003. Phytoplankton assemblage at equilibrium in large and deep subalpine lakes: a case study from Lago Maggiore (N. Italy). *Hydrobiologia* **502**:37-48.
- Munawar M. y F. Munawar. 1986. The seasonality of phytoplankton in the North American Great Lakes, a comparative synthesis. pp. 85-115. *In*: Munawar M. y F. Talling (Eds.). *Seasonality of freshwater phytoplankton*. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht. The Netherlands.
- Oliva Ma. G. 2001. Estudio de la variación vertical y temporal de las comunidades fitoplanctónicas durante el florecimiento de cianofíceas en el Lago cráter Alchichica, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. México. 133 pp.
- Oliva Ma. G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta y Ma. del R. Sánchez. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia* **466**:299-306.
- Ordóñez E. 1906. Los xalapascos del estado de Puebla. *Paregones Inst. Geol. México* **1**(8):348-405.

- Osorio-Tafall F. 1942. Un nuevo "Diaptomus" del México Central (Copepoda, Diaptomidae). *Rev. Brasil. Biol.* 2:147-154.
- Pérez J. 1999. Variación de la abundancia de bacterias planctónicas, antes, durante y después del florecimiento algal anual en el Lago de Alchichica, Puebla. Tesis de licenciatura (Biología). ENEP-Iztacala, UNAM, México. 45 pp.
- Pérez M. C., S. Bonilla, L. de León, J. Smarda J. y J. Komárek. 1999. A bloom of *Nodularia baltica/spumigena* group (cyanobacteria) in a shallow coastal lagoon of Uruguay, South America. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* 93:91-101.
- Petrova A. 1986. *Seasonality of Melosira-plankton of the great northern lakes*. pp. 65-73 In: Munawar M. y F. Talling (Eds.). *Seasonality of freshwater phytoplankton*. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht. The Netherlands.
- Pick F. R. y D. A. Caron. 1987. Picoplankton and nanoplankton biomass in Lake Ontario: relative contribution of phototrophic and heterotrophic communities. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44: 2164-2172.
- Ramírez-García P. y A. Novelo. 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 F. Vázquez-Gutiérrez. 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. Nat. Autón. México* 16(1):1-16.
- Raven A. 1986. *Physiological consequences of extremely small size for autotrophic organisms in the sea*. In Platt T. y W. Li. (Eds.) *Photosynthetic picoplankton*. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.* pp. 1-70.
- Reyes M. 1979. *Geología de la Cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*. Colección Científica Prehistoria 71. Inst. Nal. Antrop. Hist. de México, México. 62 pp.
- Reynolds C. S. 1984. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Cambridge 384pp.
- Reynolds C. S. 1994. The long, the short and the stalled: on the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers. *Hydrobiologia* 289:9-21.
- Rojo C. y J. Rodríguez. 1994. Seasonal variability of phytoplankton size structure in a hypertrophic lake. *J. Plankton Res.* 16(4):317-335.

- Round F., Crawford E. and D. Mann. 1990. *The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge G. B. Cambridge University Press. 747 pp.
- Rushforth S., I. Kaczmarek y R. Johansen. 1984. The subaerial diatom flora of Thurston Lava Tube, Hawaii. *Bacillaria* 7:135-157.
- Rushforth S. y J. Johansen. 1986. The inland Chaetoceros (Bacillariophyceae) species of North America. *J. Phycol.* 22:44-448.
- Ryding O. y W. Rast (Eds.) 1989. *The control of eutrophication of lakes and reservoirs*. UNESCO and The Parthenon Publishing Group, Paris. 314pp.
- Sánchez M. 2001. Variación de la clorofila "a" fitoplanctónica y sus mecanismos de control en un Lago atalasoalino tropical. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM, México. 66 pp.
- Schallenberg M. y C. Burns. 2001. Test of autotrophic picoplankton as early indicators of nutrient enrichment in an ultra-oligotrophic lake. *Freshwat. Biol.* 46:27-37.
- Sheath G. R. y K. M. Cole. 1990. Differential alcian blue staining in freshwater Rhodophyta. *Br. Phycol. J.* 25: 281-285.
- Shortreed. K. S. y Stockner J. G. 1990. Effect of nutrient additions on lower trophic levels of an oligotrophic lake with a seasonal deep chlorophyll maximum. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47:262-273.
- Sieburth McN., V. Smetacek y J. Lenz. 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.* 23:1256-1263.
- Stockner J. 1991. Autotrophic picoplankton in freshwater ecosystems: the view from the summit. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* 76:483-492.
- Stockner J.G. y N. J. Antia. 1986. Algal picoplankton from marine and freshwater ecosystems: a multidisciplinary perspective. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43:2472-2503.
- Stockner J. G. y K. S. Shortreed. 1994. Autotrophic picoplankton community dynamics in a pre-alpine lake in British Columbia, Canada. *Hydrobiologia* 274: 133-142.
- Stockner J., C. Callieri y G. Cronberg. 2000. Picoplankton and other non-bloom-forming cyanobacteria in lakes. In: Whitton B. A. y M. Potts (Eds.). *The ecology of cyanobacteria*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

- Stoermer F., M. Edlund, H. Pilskaln y C. Schleske. 1995. Siliceous microfossil distribution in surface sediments of lake Baikal. *J. Paleolimnol.* **14**:69-82.
- Sun J. y D. Liu. 2003. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *J. Plankton Res.* **25**(11):1331-1346.
- Szeląg-Wasielewska E. 1999. Autotrophic picoplankton dynamics in a small shallow lake. *Hydrobiologia* **408/409**: 301-306.
- Szeląg-Wasielewska E. 2003. Phytoplankton community structure in non-stratified lakes of Pomerania (NW Poland). *Hydrobiologia* **506-509**:229-236.
- Tavera R. y J. Komárek. 1996. Cyanoprokaryotes in the volcanic lake of Alchichica, Puebla State, México. *Arch. Hydrobiol./Suppl., Algolog. Studies* **83**:511-538.
- Tavera R. y V. Martínez-Almeida. 2005. Atelomixis as a possible driving force in the phytoplankton composition of Zirahuén, a warm-monomictic tropical lake. *Hydrobiologia* **533**:199-208.
- Taylor H. 1943. A new Ambystomid salamander adapted to brackish water. *Copeia* **3**:151-156.
- Tirado R. 2001. Composición y variación de la asociación de rotíferos pláncnicos del Lago Alchichica, Puebla. Tesis de licenciatura (Biología). ENEP-Iztacala, UNAM, México. 51 pp.
- Torres-Orozco R., Jiménez-Sierra C. y Pérez-Rojas A. 1996. Some limnological features of three lakes from Mexican neotropics. *Hydrobiologia* **341**:91-99
- Tremblay J, L. Legendre y J. Therriault. 1997. Size-differential effects of vertical stability on the biomass and production of phytoplankton in large estuarine systems. *Est. Coastal and Shelf Sci.* **45**:415-431.
- Úbeda M. y S. Estrada. 1994. Variación temporal de las comunidades macrobentónicas de los lagos de la región de Los Llanos, Puebla, México (composición, abundancia, distribución y asociaciones). Tesis de Licenciatura (Biología). E N E P Iztacala, UNAM, México. 44 pp.
- Uysal Z. 2001. Chroococcoid cyanobacteria *Synechococcus* spp. in the Black Sea: pigments, size, distribution, growth and diurnal variability. *J. Plankton Res.* **23**(2):175-189.



- van den Hoek, C. Mann y H. M. Johns. 1995. *Algae. An introduction to phycology*. Cambridge. University Press. 540 pp.
- Vázquez G., M. E. Favila, R. Madrigal, C. M. del Olmo, A. Baltanás y M. A. Bravo. 2004. Limnology of crater lakes in Los Tuxtlas, Mexico. *Hydrobiologia* **523**:59-70.
- Vilaclara G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. Gaytán. 1993. Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla State, México. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **25**:435-440.
- Vilaclara G., Armienta A., Alcocer J., Carrasco G., Baños L. y Ortega B. 2002. Limnogeología de los lagos cráter de la Cuenca de Oriental, México (cartel). II Congreso Nacional de la Asociación Mexicana de Limnología, 23-25 octubre, Cd. México.
- Vollenweider R., F. Talling y F. Westlake (Eds.). 1974. *A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 225 pp.
- Vörös L., C. Callieri, K. V.-Balogh y R. Bertoni. 1998. Freshwater picocyanobacteria along a trophic gradient and light quality range. *Hydrobiologia* **369/370**:117-125.
- Wehr J. y R. Sheath (Eds). 2003. *Freshwater algae of North America*. Academic Press, USA. 897 pp.
- Weisse T. 1988. Dynamics of autotrophic picoplankton in Lake Constance. *J. Plankton Res.* **10**(6):1179-1188.
- Weisse T. 1993. Dynamics of autotrophic picoplankton in marine and freshwater ecosystems. *Adv. Microb. Ecol.* **13**: 327-370.
- Wetzel R. 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Academic Press, San Diego. 1006 pp.
- Wetzel R. y Likens G. 1991. *Limnological Analyses*. Springer-Verlag. New York. 230 pp.

## 12. Apéndice I

### Variación espacio temporal de la clorofila *a* (metanol)

Las concentraciones de clorofila *a* extraídas con metanol fueron generalmente más altas que las que se obtuvieron con acetona. La concentración de clorofila total registró el valor máximo en el mes de octubre, a 33 m ( $17.2 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y el mínimo de  $0.4 \mu\text{g L}^{-1}$  en agosto (61 m) y octubre (superficie), con una concentración promedio de  $4.0 \mu\text{g L}^{-1}$  (mayor a la registrada para la acetona). Como se describió anteriormente la concentración de clorofila mantuvo picos máximos dentro del metalimnion u oxiclina durante todos los meses, con excepción del mes de mayo en el que se registro un máximo de  $6.3 \mu\text{g L}^{-1}$  dentro del epilimnion. *Cyclotella* sp. fue la especie que aportó principalmente las mayores concentraciones de clorofila.

Conforme el epilimnion aumentó en grosor las concentraciones de clorofila en el lago disminuyeron, registrando valores desde  $6.6$  y  $0.4 \mu\text{g L}^{-1}$  (mayo y octubre, respectivamente); en las capas más profundas del hipolimnion, los valores registrados fueron bajos ( $0.8$  y  $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ ), excepto en capas adyacentes al metalimnion u oxiclina.

La fracción mayor a  $2 \mu\text{m}$  fluctuó entre  $15$  y  $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$  (octubre 33m y septiembre 2 m) y registró una concentración promedio de  $3.4 \mu\text{g L}^{-1}$ ; esta fracción mostró un comportamiento similar al descrito para la clorofila total, dado que *Cyclotella* sp. es la especie que contribuyó predominantemente a la concentración de clorofila total.

La fracción menor a  $2 \mu\text{m}$  presentó su concentración máxima en el mes de octubre a 33 m ( $2.2 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y mínimas ( $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ ) durante mayo (56 y 61 metros), julio (32 m), agosto (61 m), septiembre (28 m), octubre (2 m) y noviembre (37 m), con una concentración promedio baja ( $0.6 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Los datos obtenidos con metanol no registraron dominio por parte de esta fracción para ninguno de los meses de estudio. Las concentraciones más altas registradas se encuentran principalmente dentro del metalimnion.

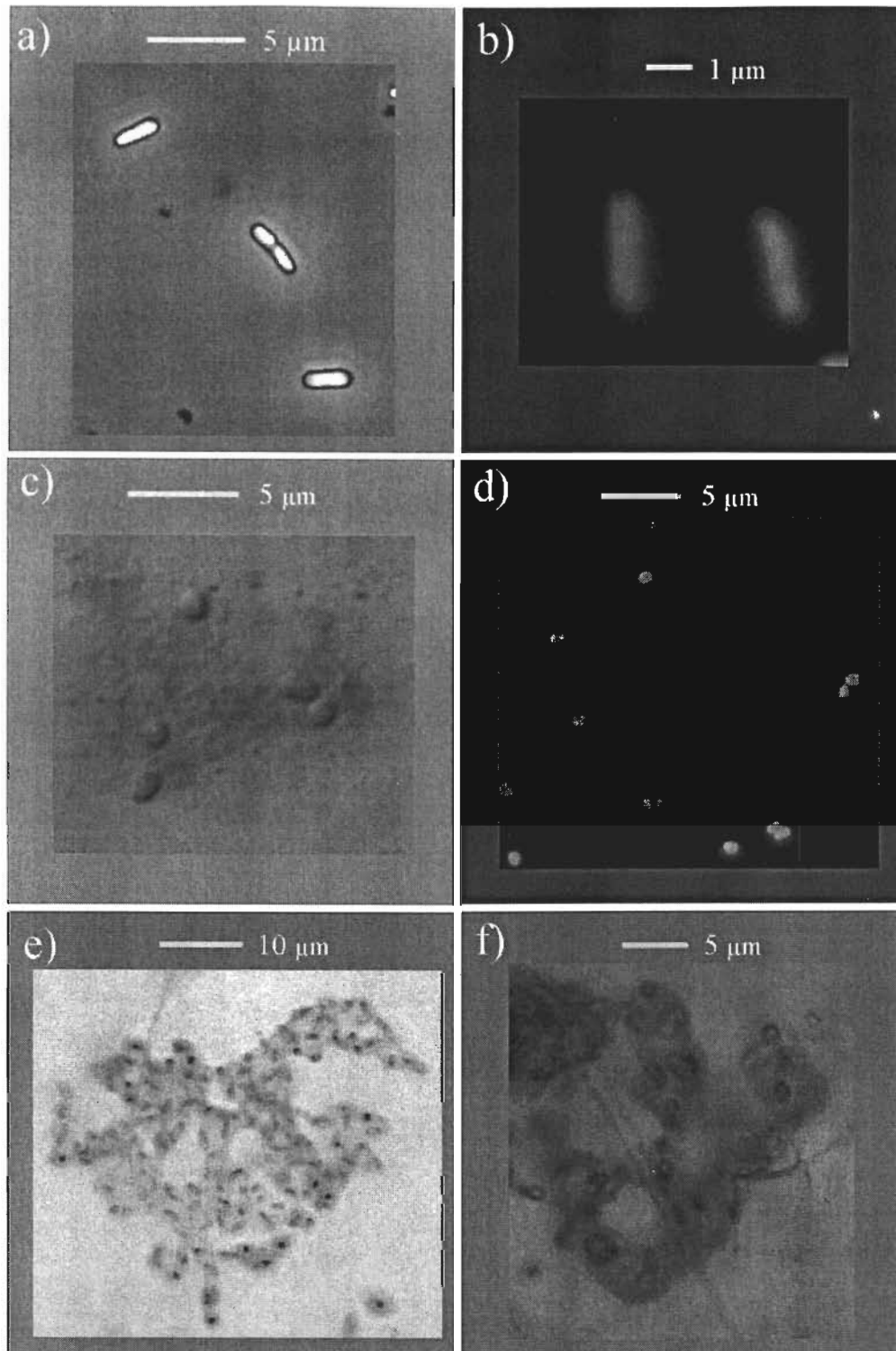


Lámina 1. Fig. 1 a-b) *Synechococcus nidulans*: a) células cilíndricas y en división (fotografía con microscopio invertido de luz transmitida, MI); b) células cilíndricas (fotografía por autofluorescencia, MF). Fig. 2 a-b) *Synechocystis* sp.: a) células esféricas a ovales (fotografía con microscopio de luz transmitida con contraste de fases, MCF); b) células en división (AF). Fig. 3 a-b) *Cyanodictyon* cf. *planctonicum*: a) colonia reticulada, teñida con azul alciano para evidenciar el mucílago (MCF); b) células ovales a forma de bastón recto (MCF).

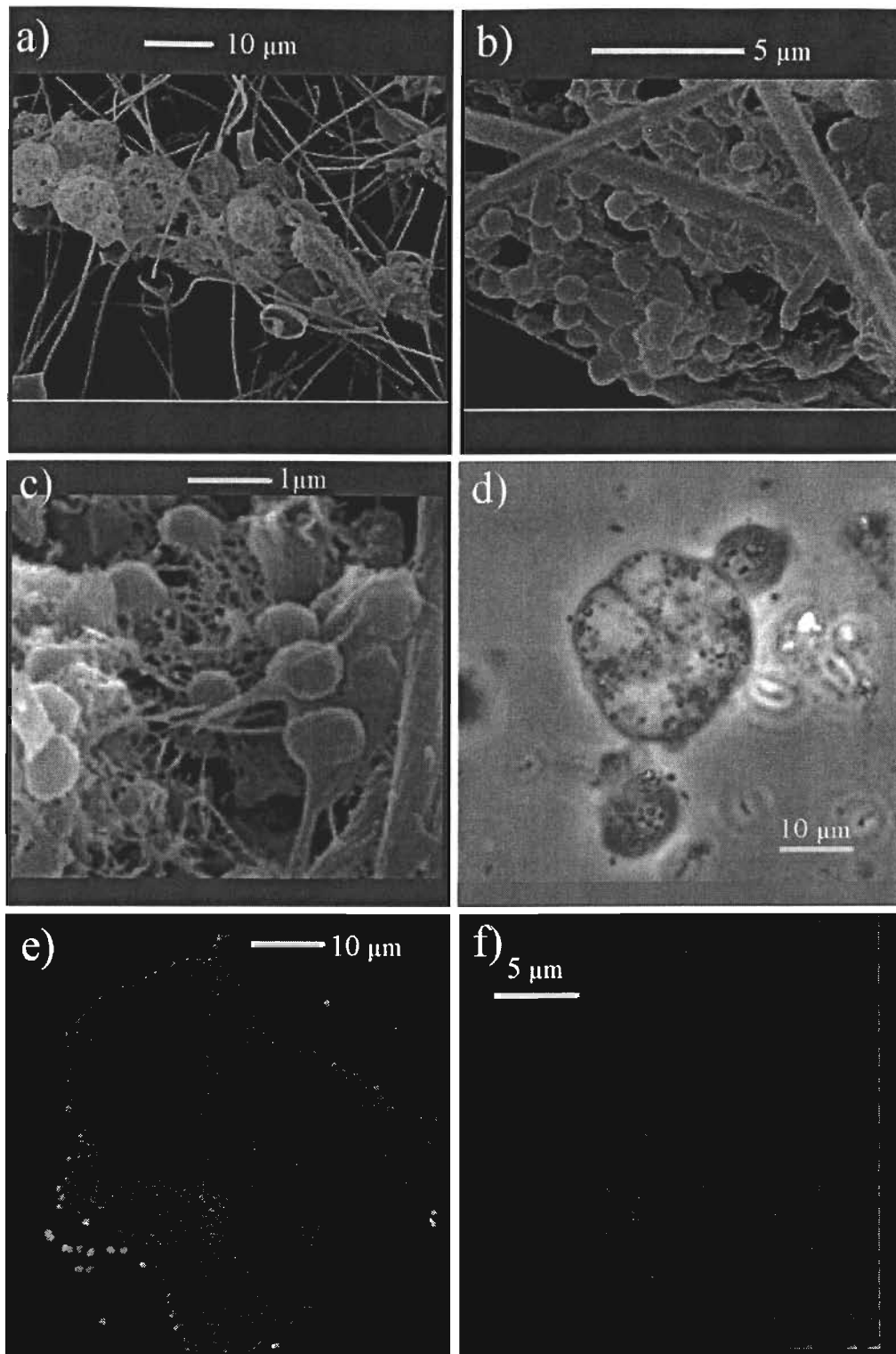


Lámina 2. Fig. 4 a-f) *Epigloesphaera cf. glebulenta*: a) colonia con subcolonias (fotografía con microscopio electrónico de barrido, MEB); b) células en superficie externa de la colonia, algunas en división (MEB); c) células ampliamente ovals (MEB); d) colonia esférica con subcolonias (MI); e) colonia más o menos esférica (AF); f) colonia con células de ovals a forma de bastón cuando están en división (AF).

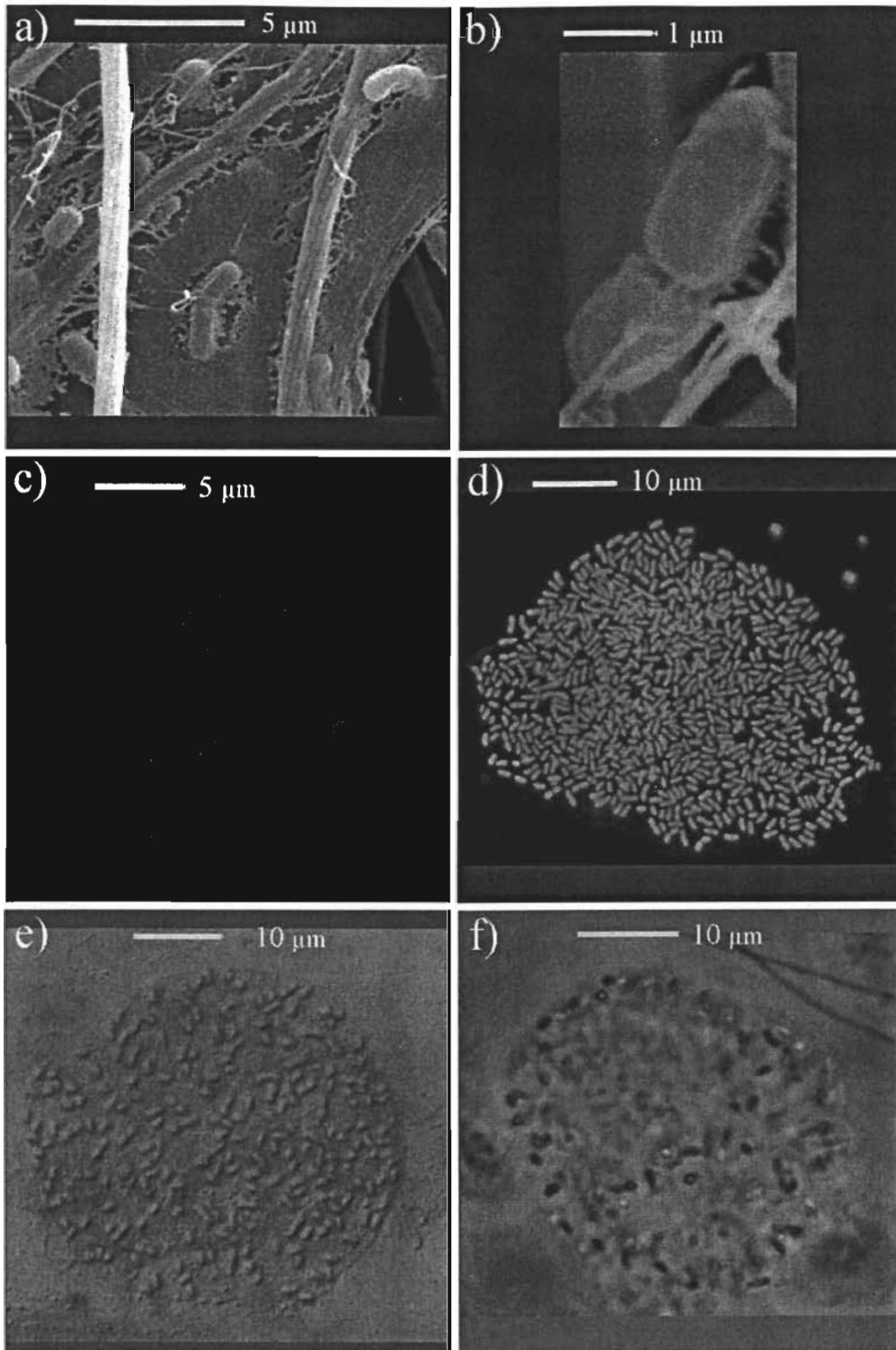


Lámina 3. Fig. 5. a-f) *Lemmermanniella cf. flexa*: a) células en forma de bastón con puntas redondeadas, situadas en la periferia del mucílago (MEB); b) célula en forma de bastón cilíndrico largo en división (MEB); c) células en división ligeramente curvadas (AF); d) colonia más o menos esférica, con células estrechamente agrupadas (AF); e) colonia esférica, teñida con azul de alciano (MCF); f) colonia esférica con células distantes unas de otras (MI).

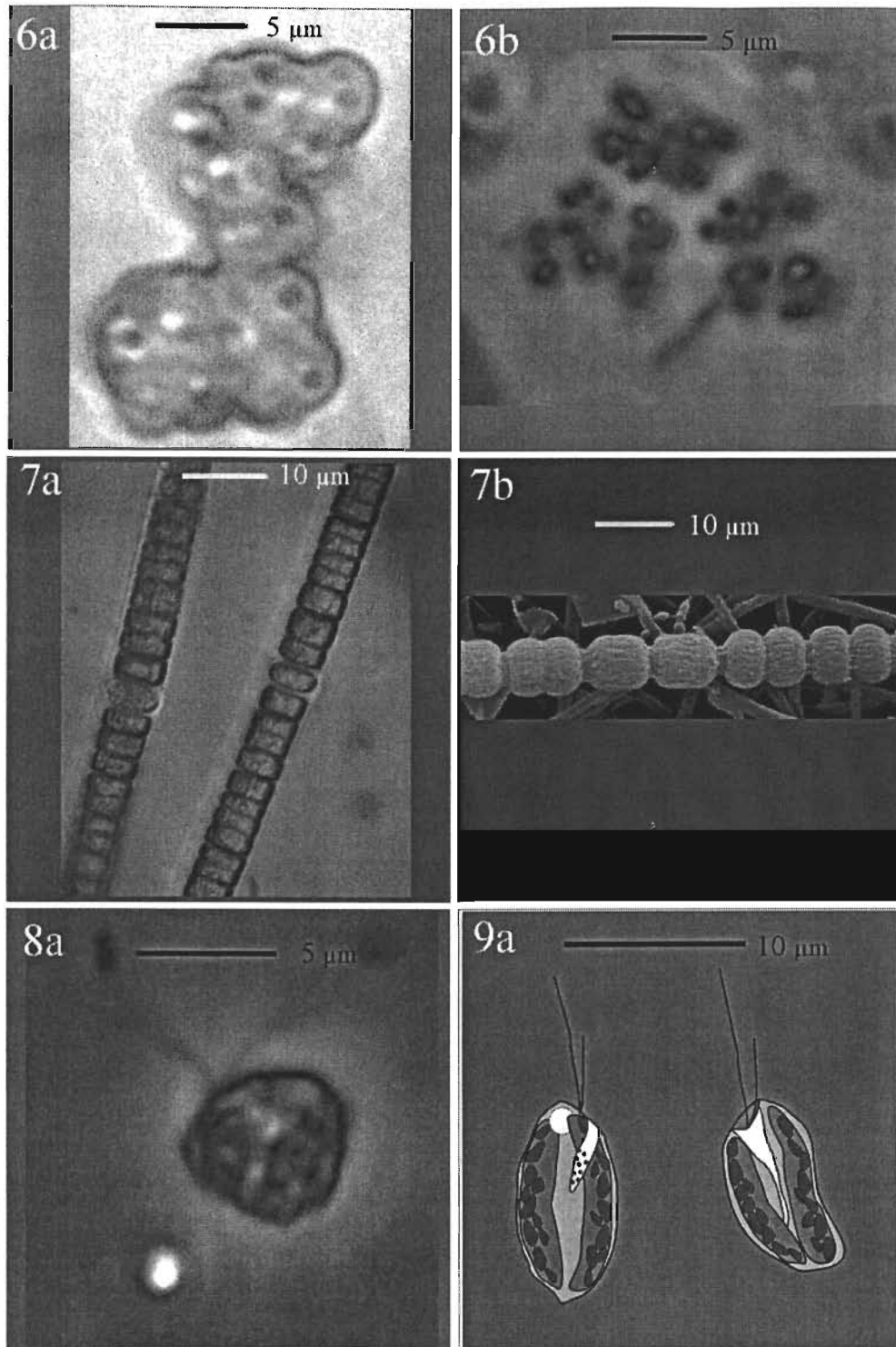


Lámina 4. Fig. 6 a-b) *Eucapsis* cf. *starmachii*: a) colonia en forma cúbica, teñida con azul alciano (MCF); b) células esféricas a ligeramente ovals (MI). Fig. 7 a-b) *Nodularia* cf. *spumigena*: a) filamentos rectos, se observan heterocitos cortos (MCF); b) filamentos rectos, se observan células más cortas que anchas (MEB). Fig. 8 a) *Ochromonas* sp.: a) célula solitaria esférica con dos flagelos (MCF). Fig. 9 a) *Cryptomonas* sp.: dibujo de células reniformes con dos flagelos y dos cloroplastos en posición parietal (MCF).

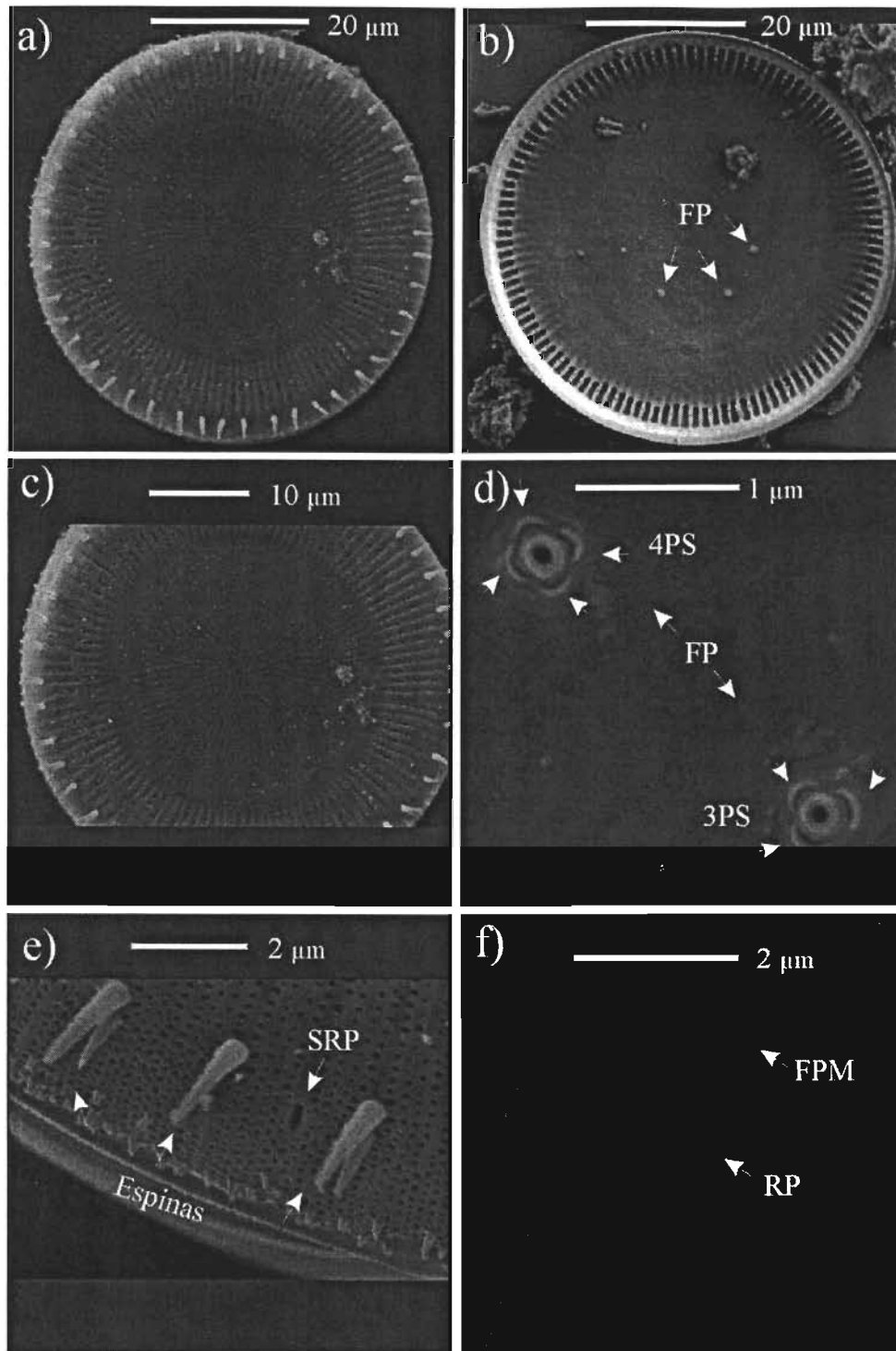


Lámina 5. Fig. 10 a-f) *Cyclotella* sp. en fotografías con MEB: a) vista externa de la valva completa; b) vista interna mostrando el anillo fultopórtulas centrales (FPc); c) valva externa con estrías e interestrías y gránulos; d) detalle de las FPc con 3 y 4 poros satélite (PS); e) detalle de la salida de la rimopórtula (SRP) y de las espinas grandes y numerosas espinas marginales; f) detalle de la rimopórtula (RP) y de alguna de las fultopórtulas marginales (FPM).

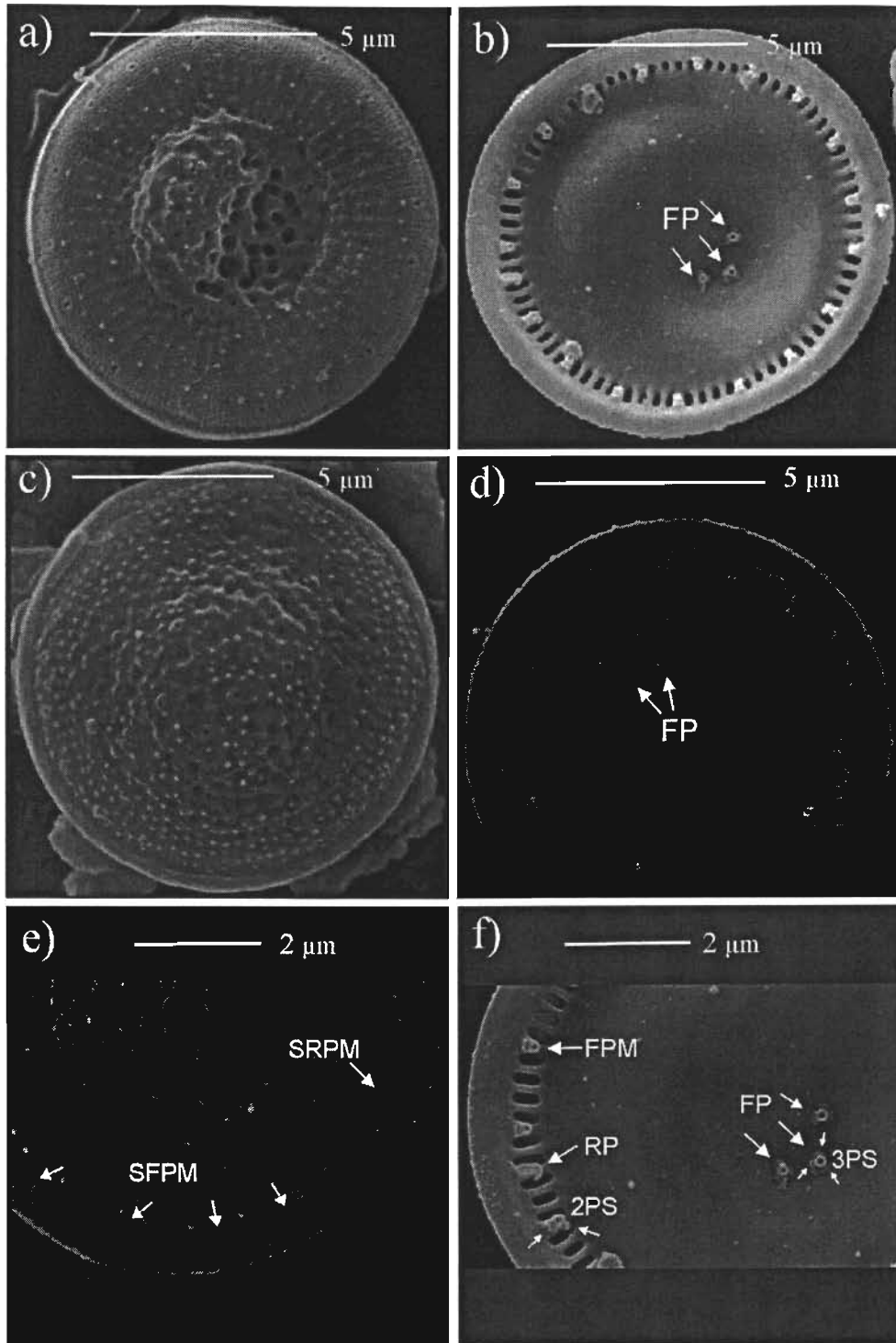


Lámina 6. Fig. 11 a-f) *Cyclotella choctawhatcheeana* (MEB): a) vista valvar externa ondulada, con gránulos; b) vista valvar interna mostrando las FPc; c) valva externa convexa con gránulos; d) detalle de las FPc ubicadas en una ligera depresión; e) detalle de la SRP y de la salida de las fultopórtulas marginales (SFPM); f) detalle de la RP en forma de abanico, FPM con dos poros satélites y FPc con tres poros satélites.



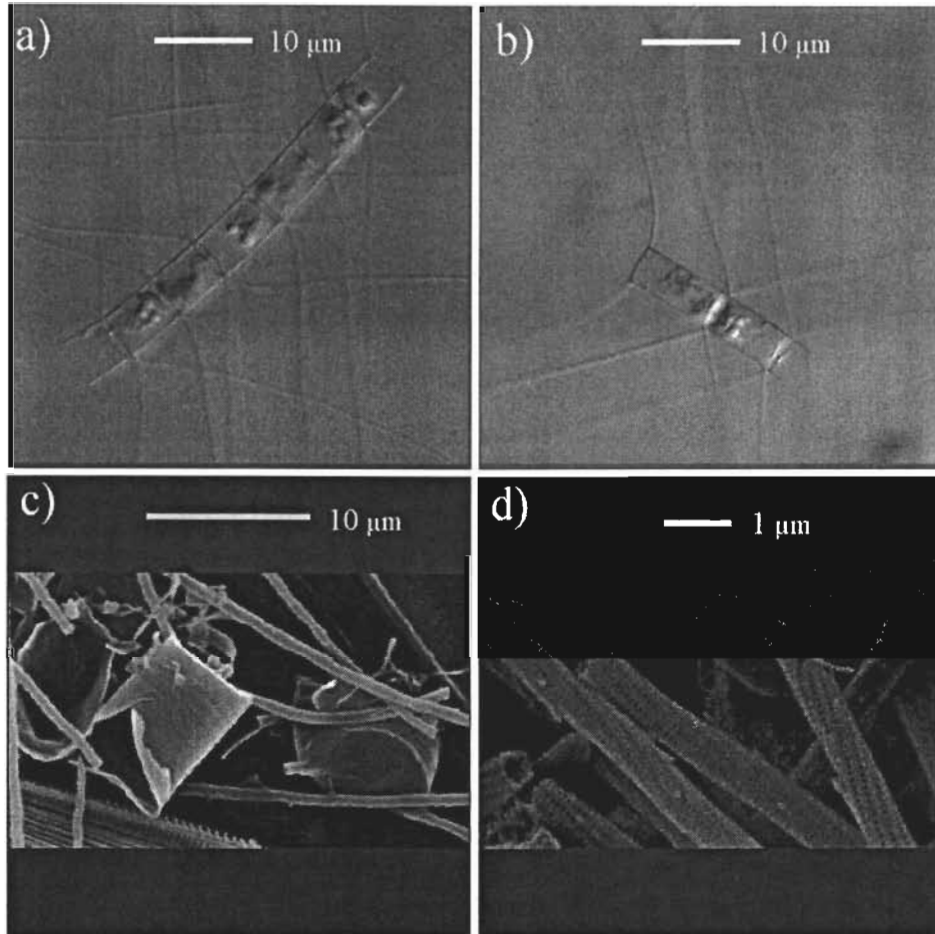


Lámina 7. Fig. 12 a-d) *Chaetoceros elmorei*: a) cadena de células rectangulares en vista conectiva y disposición de sedas (MCF); b) cadena corta de células más largas que anchas (MCF); c) detalle de la superficie externa de la valva (MEB); d) detalle de las sedas (MEB).

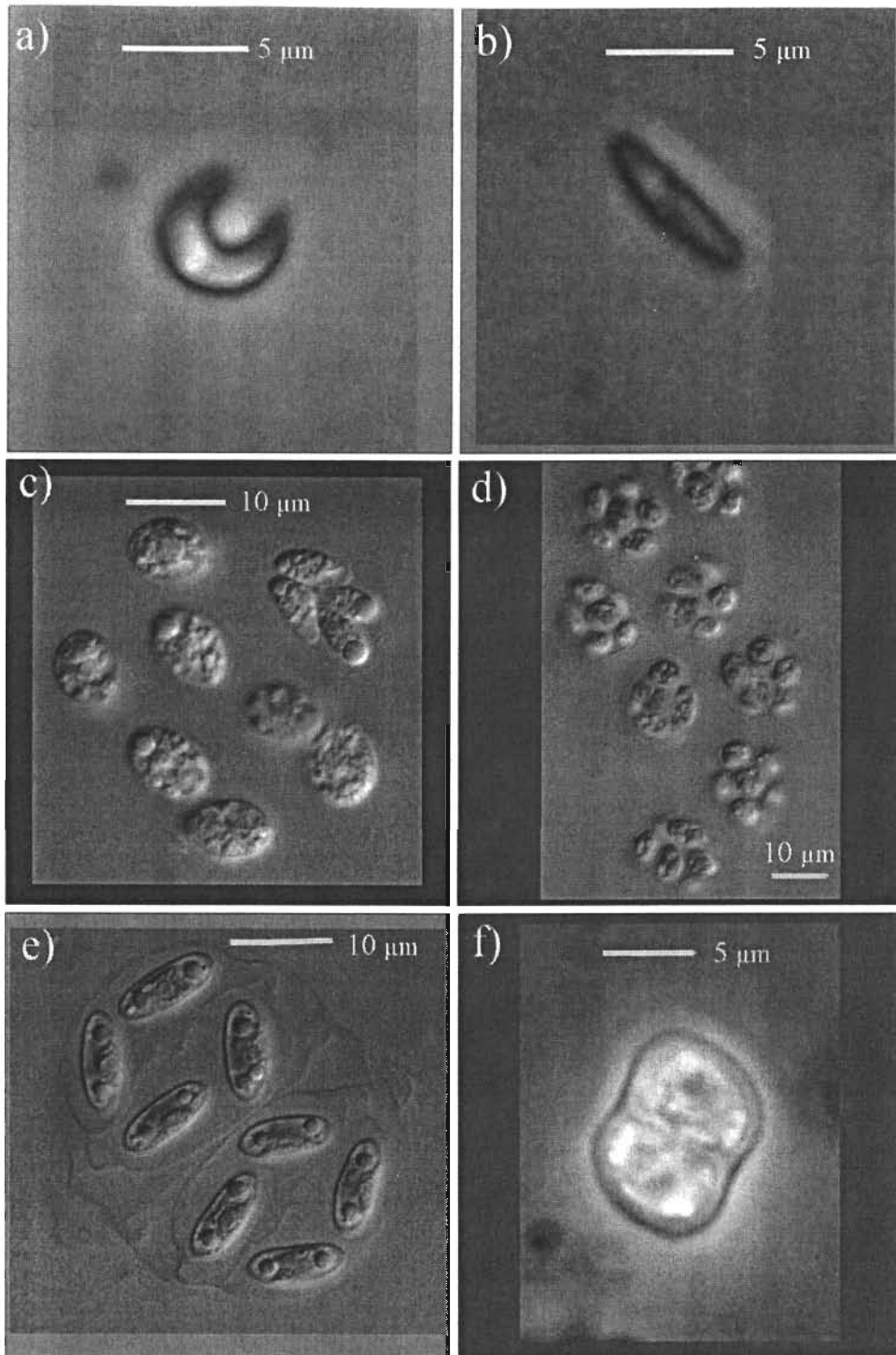


Lámina 8. Fig. 13 a) *Monoraphidium minutum*: célula cilíndrica arqueada con puntas redondeadas (MCF). Fig. 14 a) *M. dybowskii*: célula cilíndrica recta con puntas ligeramente atenuadas (MCF). Fig. 15 a-b) *Oocystis parva*: a) células ovales con un cloroplasto y un pirenoide (MCF); b) células dentro de una pared materna (MCF). Fig. 16 a) *O. submarina*: células elipsoidales con un cloroplasto y un pirenoide, dentro de colonias citrifórmes (MCF). Fig. 17 a) Chlorococcal indeterminada: colonia con pared ligeramente hundida entre las células (MCF).