

Eutrofización, impacto en un ecosistema acuático montañoso

Eutrophication. Impact over a mountain aquatic ecosystem

HERMANN A. MÜHLHAUSER, IRMA VILA P.

Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias Ecológicas,
Casilla 653, Santiago, Chile.

It is assumed that the eutrophication of Aculeo lake results from watershed geomorphological characteristics, the use of water for irrigation, and the leaching of fertilizers derived from agricultural activities around it. So far exists a strong impact on the biocoenosis composition, and the recreational potentials of the lake. A significant contribution to nutrients concentration from allochthonous sources into the lake had lead to a progressive reduction of certain terminal levels of the trophic chain (fishes) and to an accelerated build up of the phytoplankton biomass, mainly cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*). The problem was approached with an interdisciplinary effort. So far we had tipified most of the constituents that give dimension to the eutrophication process. Nevertheless a functional model needs to be developed.

INTRODUCCION

La Laguna de Aculeo (33° 50' 30" S.; 70° 54' 24" W.) ubicada a 50 km al suroeste de Santiago, a pesar de localizarse a 360 m sobre el nivel del mar, es el receptor del escurrimiento de todo un sistema montañoso que la rodea casi en un 90%, con cumbres que superan los 1.300 m como El Maitén 1.320 m y Las Cabras 1.338 m (Fig. 1). Esta laguna se originó principalmente por depósito de sedimentos aluviales en el sistema del río Maipo en la parte noreste de la región. Estos depósitos habrían terminado por represar el drenaje natural de la rinconada de Aculeo.

La laguna capta aguas que bajan a través de las numerosas quebradas que drenan los cordones montañosos a su alrededor. El estero Santa Marta o Aculeo actúa en algunas épocas del año como afluente al aportar aguas desde el estero Pintué y en otras como efluente hacia el río Angostura. De la laguna se extrae además agua por bombeo para regadío en su área adyacente, (Sancha *et al.* 1977). El clima en la región es mediterráneo, con una estación seca prolongada y las precipitaciones concentradas principalmente en invierno. Las riberas de la laguna han sido desde hace algún tiempo aprovechadas como zona de balneario. Los habitantes de las riberas tienen norias para

abastecimiento de agua y pozos negros para eliminación de excretas (Sancha *et al.* 1977). Las zonas aledañas a la laguna principalmente al W, SW, S y SE, como puede observarse de fotografías aéreas (Fig. 1) e imágenes de satélite, presentan un desarrollo apreciable de la agricultura. Esto permite inferir un aporte notorio de material nutriente al sistema, principalmente por percolación (leaching). Las microalgas confieren color verdepardo a las aguas durante la mayor parte del año.

Según las definiciones dadas por Wetzel (1975) y Margalef (1984) se considera a este sistema como eutrofizado. Esta eutrofización resulta de varios factores: sus características geomorfológicas; uso del agua, que ha producido disminución de su volumen original, y actividades agrarias en su entorno. Los cambios inducidos en los ciclos biogeoquímicos en todas sus fases (acuáticas y sedimentarias) por el alto aporte a la componente de nutrientes del sistema han contribuido por una parte a una disminución acelerada y progresiva de ciertos tramos claves de la red trófica (poblaciones de peces por ejemplo) y por otra al aumento exagerado de la biomasa fitoplanctónica especialmente cianobacterias (*Microcystis aeruginosa*), cuyo efecto estético contribuye a la disminución del potencial recreativo de la laguna, sin

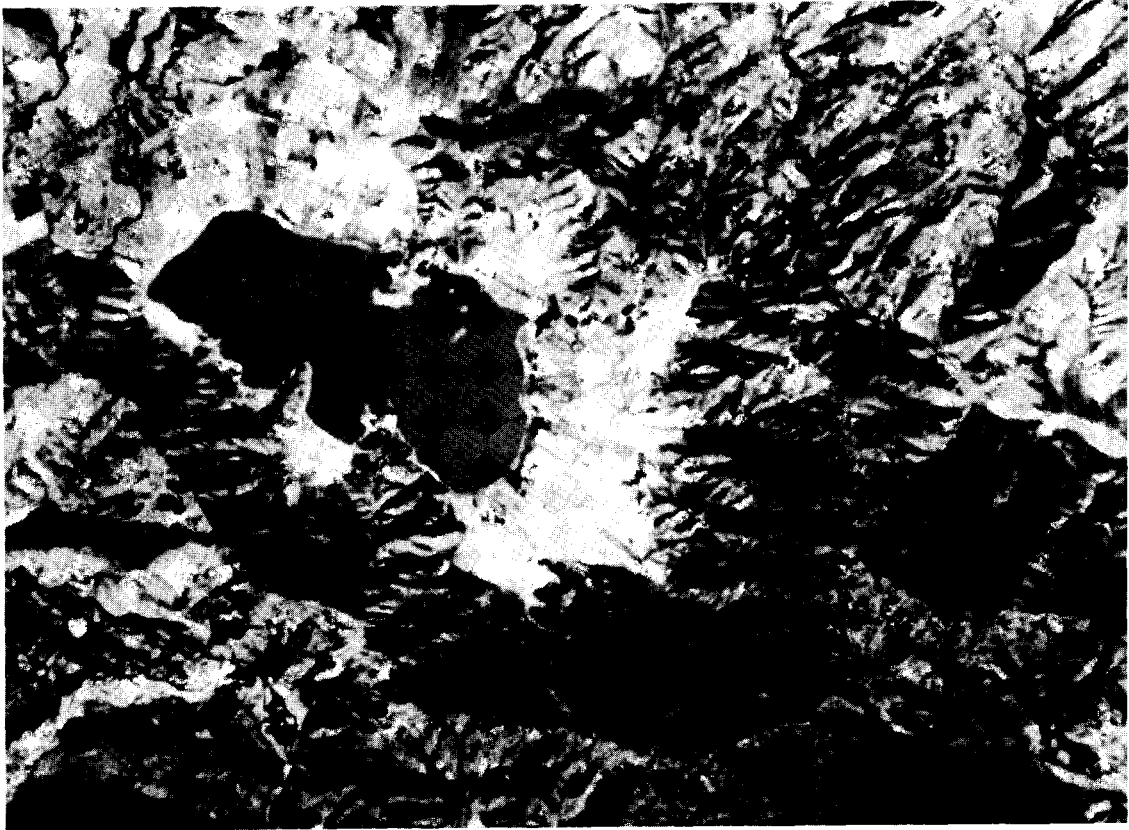


Fig. 1: Fotografía aérea Laguna de Aculeo. Escala original 1 : 100.000. S.A.F. Chile.

perjuicio de la reconocida acción tóxica de cianobacterias en invertebrados y vertebrados (Scharf *et al.* 1979; Carmichael & Schwartz, 1984; Peñaloza com. pers.). Al mismo tiempo un intercambio de agua (afluencia, efluencia), escaso e irregularmente distribuido, resulta ser un factor importante en el reciclamiento interno de los nutrientes de este sistema.

Si bien el fenómeno de eutrofización que afecta a esta laguna es claramente visible en el agua misma, es sabido de acuerdo a la literatura existente (Lerman, 1978; Löffler, 1979, Margalef, 1984) que este problema en lagos someros como Aculeo se hace crónico en los sedimentos con participación de su microbiota actúan como concentradores-liberadores y más aún reguladores del flujo de nutrientes y por ende de la eutrofización.

Los estudios realizados en los últimos años muestran un aumento de variables tales como concentración de nutrientes, clorofila y productividad primaria (Sancha

et al. 1977, Cabrera y Montecino 1982, Montecino y Cabrera 1984). Estos resultados permiten plantear la siguiente hipótesis. Los ciclos biogeoquímicos en la Laguna de Aculeo se encuentran alterados. Esta alteración es producida mayoritariamente por el reciclamiento interno de nutrientes (N y P) y un aporte alóctono sobredimensionado de los mismos. Este exceso de nutrientes está afectando por lo tanto en primer lugar a la biocenosis y sus relaciones tróficas; con un aumento excesivo de la biomasa fitoplanctónica y bacteriana, disminución del oxígeno disuelto en las capas profundas y la consiguiente merma en la diversidad específica de las comunidades biológicas. En segundo lugar, se afecta indirectamente el uso de la laguna con fines recreativos y las condiciones estéticas de la misma. El estudio analiza resultados obtenidos tanto por los autores como por otros investigadores interesados en la calidad ambiental de la Laguna de Aculeo. Al respecto, la hipótesis de trabajo

se está poniendo a prueba en forma interdisciplinaria y tratando de responder a diversas interrogantes tales como: ¿Cuál es el rol de la circulación de nutrientes en el sistema? ¿Qué factores han influido en los cambios de la composición de las comunidades de peces y fitoplancton en la laguna? ¿De qué magnitud es el grado de eutrofia expresado como capacidad de producción primaria del sistema?

MATERIALES Y METODOS

En la laguna se han definido por coordenadas geográficas 14 estaciones de muestreo para obtención de muestras de agua, sedimentos y organismos (Fig. 2).

La problemática se ha enfrentado desde diversos puntos de vista, tratando de dar respuesta a las interrogantes planteadas. Para esto se ha medido:

a) Parámetros abióticos tales como: oxígeno medido por el método de Winkler (modificado por Golterman *et al.* 1978); temperatura

mediante termómetro incluido en botella Van Dorn; pH mediante phmetro portátil; conductividad por conductivímetro YSI, alcalinidad según la metodología de Margalef (1976). Transparencia del agua por disco Secchi. Nutrientes como ortofosfato (Murphy & Rife, 1962), fósforo total (Kjeldahl modificado medido como ortofosfato), nitrato (Zahradnik, 1981), nitrógeno total (Kjeldahl modificado y medición como amonio según Krom, 1980; Zahradnik, 1981) y silicatos (Golterman *et al.*, 1978).

b) Parámetros bióticos tales como productividad primaria (Schindler, 1966; Vollenweider 1974); clorofila "a" (SCOR-UNESCO, 1974, Jeffrey & Humphrey, 1975) han sido medidos por Montecino y Cabrera (1984). Zooplancton se ha determinado por filtración en malla de 76 μm . Los recuentos de fitoplancton se hicieron en muestras directas sin concentrar dada la alta cantidad de algas. De éstas se contaron dos réplicas de 1 ml cada una en una cámara Sedgwick-Rafter (Voekerling *et al.* 1976) y un micrómetro ocular Whipple con unidades estándar de área (U.St.) calibradas a 375 μm^2 . Los peces se capturan con equipo de pesca eléctrica (Coffelt); además se han hecho marcas para aplicación del método de captura y recaptura.

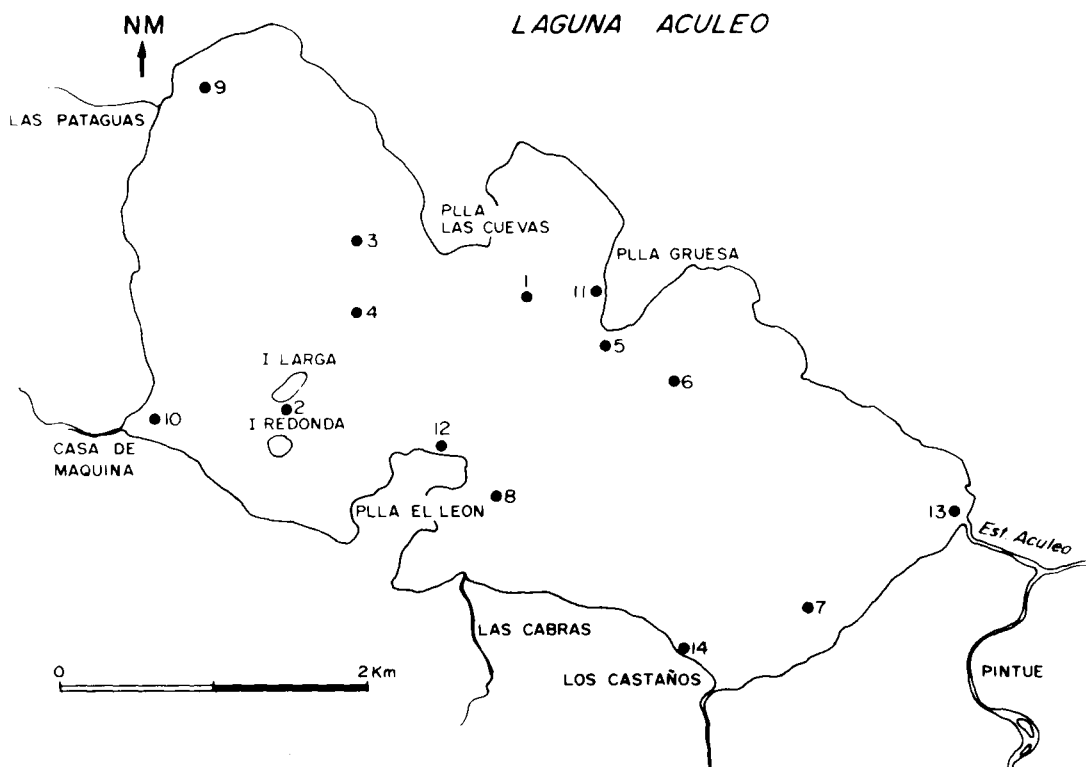


Fig. 2: Estaciones de muestreo en la Laguna de Aculeo. Escala original 1:25.000.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Laguna de Aculeo es un lago somero. En condiciones normales de llenado alcanza una profundidad máxima de 5 m, siendo la profundidad media de 4,4 m. Tiene un área de 11,99 km² y un volumen de 51,6 x 10⁶ m³ (mayor información sobre las características morfológicas de la laguna se encuentran en Cabrera y Montecino, 1982).

Los resultados que diversos autores han obtenido hasta ahora definen principalmente la problemática en las áreas: abiótica, de productividad primaria, fitoplancton, peces y nutrientes. La temperatura en el agua fluctúa entre 10,7°C y 30,4°C. Las concentraciones de oxígeno en la laguna sufren variaciones amplias que oscilan en superficie entre 8-14 mg l⁻¹ y 0-6 mg l⁻¹ en la parte más profunda de la columna de agua. El contenido salino es bajo (0,1-0,2‰). Lo mismo ocurre con las aguas del estero Santa Marta. La conductividad fluctúa en el rango de 218 a 272 μScm^{-1} a 25°C, alcanzando en el estero Santa Marta sólo 152 μScm^{-1} a 25°C. Estos valores son semejantes a los encontrados dentro de la laguna por Sancha *et al.* (1977). El pH medido en la laguna fluctúa alrededor de

8,1. La transparencia medida por disco Secchi dependiendo de la época del año fluctúa entre 0,1 y 1 m de profundidad, alcanzándose los mayores valores de Secchi en primavera. Los valores de alcalinidad total en la laguna fluctúan entre 1,6 y 2,4 mM l⁻¹. Si bien los lagos someros debido a su poca profundidad presentan una tendencia natural a una eutrofia temprana (Löffler, 1979; Margalef, 1984), las condiciones geomorfológicas de la Laguna de Aculeo la convierten en un sistema con un equilibrio frágil, fácilmente perturbable. Es así como en la Tabla 1 podemos observar valores de concentración de nutrientes en este cuerpo léntico comparados con los medidos en otros sistemas acuáticos montañosos de la región andina. Estos valores resultan muy superiores a los determinados para otros sistemas lénticos montañosos, excepto los encontrados para fosfato y silicato por Mladinic *et al.* (1985) para los lagos Chungará y Cotacotani. Siendo los nutrientes, especialmente compuestos fosforados y nitrogenados, un factor clave para el desarrollo de la componente vegetal del sistema, es que un exceso de ellos en el medio ambiente acuático provocará un desarrollo excesivo de las

TABLA I

Concentración de nutrientes en sistemas acuáticos montañosos

Lagos	Rangos de nutrientes (μM) en el agua				
	P-PO ₄	P-total Kjeldahl	N-NO ₃	N-total Kjeldahl	Silicato
Aculeo (Mühlhauser no publicado)	1,72 - 3,845	4,23 - 5,02	11,41 - 45,81	15,92 - 38,82	8,13 - 11,63
Negra (Mühlhauser no publicado)	0,028 - 0,084	0,15 - 0,40	0,11 - 0,77	5,73 - 8,49	2,83 - 3,33
Chungará	66,12 - 107,74	-	1,28 - 22,21	-	15,32 - 116,22
Cotacotani (Mladinic <i>et al.</i> , 1984)	29,35 - 45,16	-	10,28 - 11,28	-	818,18 - 1.073,79
Lagos andinos pequeños sobre 3.000 m (Löffler, 1960; Margalef, 1984)	0 - 0,64	0,19 - ?	0,71 - 21,42	-	-
Región Araucana (Chile, Argentina) (Löffler, 1960; Margalef, 1984)	0 - 0,064	0,032 - 0,48	? - 35,71	-	0,035 - 0,42

TABLA II

Rangos de productividad primaria clorofila "a" y recuento celular y de especies fitoplanctónicas en ecosistemas montañosos

Lagos	Productividad primaria mg C m ⁻³ h ⁻¹	Clorofila "a" mg chl-a m ⁻³	Nº de células (especies) US x 10 ⁶ l ⁻¹
Aculeo (Cabrera y Montecino; 1982; Vila <i>et al.</i> , 1983)	47,8 - 578	84,0 - 120,8	7.339,6 - 25.933 (8)
Negra (Montecino y Cabrera, 1984)	0,05 - 4,22	0,06 - 5,6	-
Yeso (Montecino y Cabrera, 1984)	0,05 - 4,22**	9,44 - 2,3	-
Chungará (Montecino com. pers.)	2,0	2,0	0,22 - 4,66* (14)

* Células l⁻¹ (Sanzana, 1984).

** Montecino comun. personal.

poblaciones fitoplanctónicas del cuerpo de agua (Tabla 2). Es este aumento desproporcionado de la biomasa fitoplanctónica existente en Aculeo el que a su vez ha contribuido para provocar una secuencia de perturbaciones en otras partes del sistema como el zooplancton, los peces y la componente abiótica, con situaciones de agota-

miento temporal del oxígeno disuelto en el agua profunda y gran aumento del pH y las concentraciones de materia orgánica y nutrientes en los sedimentos (Tabla 3, Fig. 3).

Es conocido el efecto de trampa y su influencia en el reciclamiento interno de nutrientes que presentan los sedimentos

ACULEO

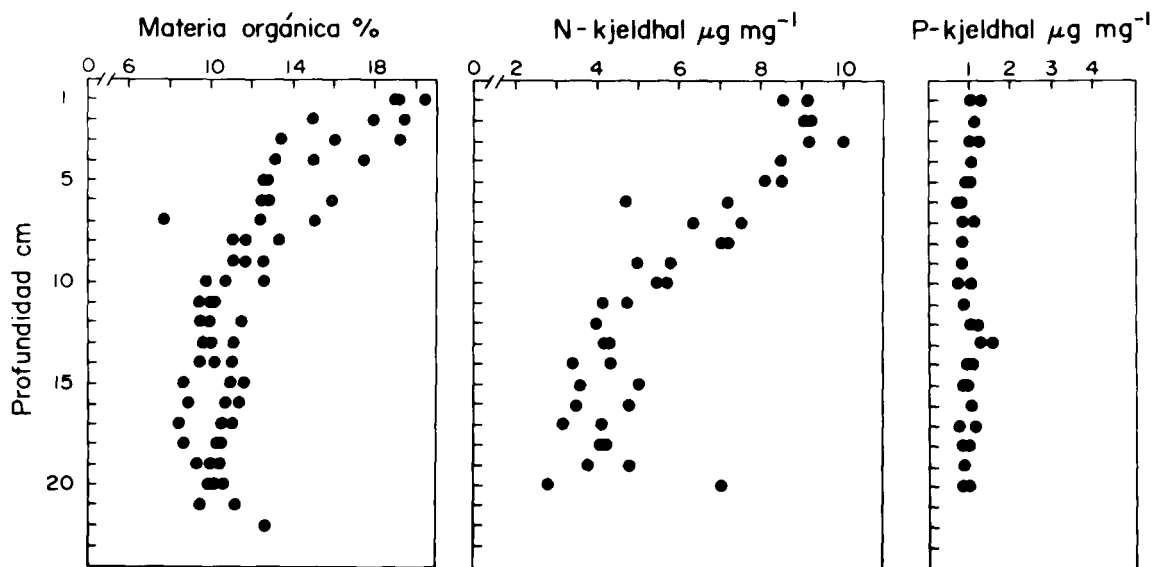


Fig. 3: Perfiles de materia orgánica, nitrógeno Kjeldahl y fósforo Kjeldahl en sedimentos de la Laguna de Aculeo, estación 14 (Los Castaños). La profundidad 0 cm corresponde a la interfase agua-sedimento.

TABLA III

Variación en la composición del fitozooplankton y la comunidad de peces en la Laguna de Aculeo (1976-1985)

Comunidad	Organismos	1976-77	1984-85
Fitoplancton*	<i>Ankistrodesmus</i>	+	-
	<i>Chlorella</i>	+	-
	<i>Cosmarium</i>	+	-
	<i>Pediastrum</i>	+	+
	<i>Scenedesmus</i>	+	+
	<i>Chroococcus</i>	+	-
	<i>Peridinium</i>	+	-
	<i>Cerasterias</i>	+	-
	<i>Staurastrum</i>	+	+
	<i>Diatoma</i>	+	-
	<i>Melosira</i>	+	+
	<i>Nitzschia</i>	+	-
	<i>Synedra</i>	+	-
	<i>Anabaena</i>	+	-
	<i>Gomphosphaeria</i>	+	-
	<i>Lyngbya</i>	+	-
	<i>Microcystis</i>	+	+
	<i>Oscillatoria</i>	+	-
<i>Closterium</i>	-	+	
<i>Closteriopsis</i>	-	+	
<i>Navicula</i>	-	+	
Zooplankton	<i>Boeckella</i> sp.	* s.i.	+
	<i>Bosmina hagmani</i>	s.i.	+
	<i>Chydorus</i> sp.	s.i.	+
	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	s.i.	+
Peces	<i>Cyprinus carpio</i>	+	+
	<i>Basilichthys australis</i>	+	-
	<i>Odontesthes bonariensis</i>	+	-
	<i>Odontesthes mauleanum</i>	+	-
	<i>Percyhtys trucha</i>	±	-
	<i>Carassius</i> sp.	+	+
	Híbridos de carpa + dorado	+	+

* Datos 1976-77 de Sancha *et al.*, 1977; s.i. = sin información.

lacustres (Mühlhauser, 1982; Margalef, 1984). Es así como en la Laguna de Aculeo las concentraciones de materia orgánica en el material que se deposita sobre el fondo alcanzan valores tan altos como 20% (Fig. 3). Las características del sedimento de color negro indican condiciones anóxicas aún en la interfase sedimento-agua. Esta condición de mínima concentración de oxígeno favorece el reciclamiento interno del fósforo. Es sabido que el ciclo del fósforo en ambientes acuáticos parcial o totalmente anóxicos es controlado por la presencia de SO_4^{2-} y Fe en sus formas oxidadas y reducidas (Uhlmann, 1975). Es así como en

situaciones anóxicas del sedimento con producción de H_2S el ortofosfato que en condiciones óxicas se encuentra unido a Fe^{+3} , es liberado por precipitación de pirita (FeS , FeS_2) y queda a disposición para migrar a la columna de agua donde será nuevamente reciclado en un giro sin fin. Siendo éstas las condiciones prevalentes en la laguna, se explicarían las altas concentraciones de fósforo medidas tanto en la columna de agua como en sedimentos durante la mayor parte del año. Algo semejante ocurre con la situación del nitrógeno. El amonio producido por la descomposición de la materia orgánica sedimentada,

principalmente células de *M. aeruginosa*, migra con facilidad a la columna de agua donde una parte de él en condiciones óxicas puede ser rápidamente oxidado hasta nitrato y éste a su vez, ante la escasez del oxígeno, reciclado internamente como principal aceptor de electrones (Margalef 1984). Otra parte se pierde al aire. Este reciclamiento interno explica también los altos contenidos de nitrato medidos en el agua, así como de nitrógeno orgánico (Kjeldahl) medidos en sedimentos de la Laguna de Aculeo.

Los valores más bajos de nutrientes en el agua se obtienen a fines de invierno y comienzo de la primavera, los más altos a fines de la primavera y durante el verano. Esto coincide con máximos y mínimos de productividad primaria y clorofila "a" medidos por Cabrera y Montecino (1982).

Las concentraciones de nutrientes en la Laguna de Aculeo han ido en aumento durante los últimos 8 años; desde las determinaciones realizadas por Sancha *et al.* (1977) hasta las del presente trabajo. Creemos que la extracción de agua para riego y la disminución de volumen pueden estar en parte influyendo estos cambios de concentración. ¿Cómo ha afectado esto al sistema? Por un lado la diversidad de las comunidades del fito, zooplancton y peces ha variado substancialmente (Tabla 3). Respecto del fitoplancton, de 18 grupos descritos por Sancha *et al.* (1977) como presentes en Aculeo, sólo 5 prevalecen actualmente. Agregándose 3 nuevos grupos propios de sistemas eutróficos (Wetzel, 1975) *Microcystis aeruginosa* sigue constituyendo el grupo más numeroso.

Resultados de ensayos de toxicidad que actualmente se realizan en nuestra unidad han demostrado la existencia de un factor tóxico al menos para invertebrados componentes del zooplancton (Peñaloza, com. pers.). No se descarta la posibilidad de toxicidad para peces.

El zooplancton presenta sólo un copépodo, *Boeckella bergi*, de 18 descritos para lagos en la zona central de Chile (Zúñiga & Araya, 1985), tres cladoceros *Ceriodaphnia dubia*, *Eubosmina hagmani* y *Chydorus sphaericus* de 25 descritos en lagos de la zona central (Zúñiga & Araya,

1985), cuatro rotíferos (*Keratella cochlearis*, *K. perfecta*, *Trichocerca similis* y *Collotheca mutabilis*) de 35 rotíferos descritos para lagos de Chile central (Zúñiga & Araya *op. cit.*). Tanto las células del fito como del zooplancton de Aculeo se caracterizan por presentar un tamaño menor al descrito en la literatura.

La comunidad de peces a su vez, como se desprende de la Tabla 3, se ha visto seriamente afectada en el último tiempo. De 7 especies que se han descrito originalmente para la laguna (Vila, no publicado) en la actualidad son más abundantes sólo aquellas especies habituadas a ambientes exigentes (Margalef, 1984) como son *C. carpio* y *Carassius sp.* Experimentos realizados en *B. australis* (Vila *et al.*, 1983), una especie últimamente no capturada en la laguna, han demostrado que las tallas menores de este pez a temperaturas entre 20 y 25°C son incapaces de sobrevivir por más de 35 minutos cuando la concentración de oxígeno en el agua alcanza valores menores que 3,2 mg O₂ l⁻¹, ya que bajo ciertas concentraciones mínimas de oxígeno en el agua, la respiración se hace insuficiente con los consecuentes efectos fisiológicos negativos (Margalef, 1984).

Hasta ahora se han tipificado varias de las interrogantes que suscita el sistema de la Laguna de Aculeo, el cual es evidente que ha estado experimentando un acelerado proceso de eutrofización durante la última década. Sin embargo la información resulta aún insuficiente para definir el funcionamiento del sistema.

REFERENCIAS

- CABRERA, S.; MONTECINO, V. (1982) En Developments In Plant and Soil Sciences. Volume 6 (Robertson, G.P.; Herrera, R.; Rosswall, T., Edts.) Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, pp. 377-387.
- CARMICHAEL, W.W.; SCHWARTZ, L.D. (1984) Farmer's Bulletin N° 2275 US Dept. of Agriculture.
- GOLTERMAN, H.L.; CLYMO, R.S.; OHNSTAD, M.A.M. (1978) IBP Handbook N° 8 Blackwell Scientific Publications, Oxford London 214 pp.
- JEFFREY, W.W.; HUMPHREY, G.F. (1975) Biochemie u. Physiologie d. Pflanzen, 167: 191-194.
- KROM, M.D. (1980) The Analyst 105: 305-316.
- LERMAN, A. (1978) Lakes Chemistry, Geology, Physics. Springer Verlag, New York.
- LÖFFLER, H. (1979) Neusiedlersee. Limnology of a shallow Lake in central Europe. Dr. W. Junk, The Hague 543 pp.

- MARGALEF, R.; PLANAS, D.; ARMENGOL, J.; VIDAL, A.; PRAT, N.; GUISET, A.; TOJA, J.; ESTRADA, M. (1976) Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas, Madrid 422-85 pp.
- MARGALEF, R. (1984) *Limnología*. Editorial Omega, Barcelona 1010 pp.
- MLADINIC, P.A.; QUINTANA, E.H.; HREPIC, N.V. (1985) Actividades de Investigación. Univ. de Trapa-cá, Vicerrectoría Académica. Depto. de Investigación y Desarrollo Científico, Arica.
- MONTECINO, V.; CABRERA, S. (1984) *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 22: 1332-1334.
- MUHLHAUSER, H. (1982) Dissertation, Univ. Wien, Formal und Naturwissenschaftlichen Fakultät.
- MURPHY, RILEY. (1962) *Anal. Chim.* A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Acta*, 27: 31.
- SANCHA, A.M.; CASTILLO, G.; THIERS, R. (1977) Estudio limnológico de la Laguna de Aculeo, factibilidad de uso del agua en riego y recreación. Publicación I. 44. U. de Chile. Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas. 25 pp.
- SCHARF, E.M.; SPLITTER, P.; v. OERTZEN, J.A. (1979); Pieck Universität Rostock, Mathematisch-Natur Wissenschaftliche Reihe, Heft 6: 531-535.
- SCHINDLER, D.W. (1966) A liquid scintillation method for measuring carbon-14. Uptake in photosynthesis. *Nature London* 211: 844-845.
- SCOR-UNESCO. (1964) Report Working Group 17 on Determination of photosynthetic pigments, Sydney.
- UHLMANN, D. (1975) *Hydrobiologie*. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 345 pp.
- VILA, I.; SAUL, C.; MUHLHAUSER, H. XXII Reunion Societas Internationalis Limnologiae 21.28.8.1983, Lyon Francia. (Resumen).
- VOEKERLING, W.J.; KOWAL, R.R.; GOUGH, S.B. (1976) *Hydrobiologia*, 48: 95-107.
- VOLLENWEIDER, R. (1974) *IBP Handbook Vol. 12* Blackwell Scientific Publ. Oxford.
- WETZEL, R.C. (1975) *Limnology*. W.B. Saunders Co. Philadelphia. 753 pp.
- ZAHRADNIK, P. (1981) *Methods for Chemical Analysis of Inland Waters*. Limnologisches Institut. Osterreichische Akademie der Wissenschaften.
- ZUÑIGA, L.; ARAYA, J. (1985) *Bol. Inf. Limnol. Univ. Austral, Valdivia*, 8: 1-110.