

Caracterización limnológica de dos lagunas saladas del sur de la península Ibérica.

M. Rodríguez-Rodríguez; L. Cruz-Pizarro; J.J. Cruz-SanJulián; J. Benavente Herrera; C. Almécija Ruiz.

Instituto del Agua, Universidad de Granada. C/ Ramón y Cajal nº4 . Edificio Fray Luis de Granada; C.P. 18071. Granada (España). Telf.: (34-958)24 80 16 - Fax: (34-958) 24 30 94

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado la caracterización limnológica de dos pequeños lagos de origen kárstico de la provincia de Málaga (Andalucía, España): las lagunas Grande y Chica de Archidona. A pesar de sus similitudes morfogénicas, geográficas y climáticas, muestran variaciones importantes en sus características físicas, químicas y biológicas. La Laguna Chica es marcadamente meromictica, y se ha caracterizado la composición del monimolimnion y del mixolimnion; la Laguna Grande es monomictica, y se han medido las temperaturas de la columna de agua de manera continua durante un periodo anual para caracterizar con detalle el desarrollo de la termoclina. Los mecanismos causales de estas diferencias se relacionan con el nivel de base del acuífero kárstico sobre el que se han formado estas lagunas.

Palabras clave: lagunas kársticas endorreicas, estructura térmica, régimen hipogénico.

ABSTRACT

Two small karstic lakes of the province of Málaga (Andalusia, Spain; Lake Grande and the Lake Chica de Archidona) were monitored for common limnological variables. These two lakes show important differences in their physical, chemical and biological features. Lake Chica is meromictic, while Lake Grande is monomictic. The composition of monimolimnion and mixolimnion of Lake Chica was closely examined. Temperature down the water column of Lake Grande was measured over one year period, to study the development of the thermocline. Causal mechanisms of differences between these two lakes were linked to differences in the watertable upper surface.

Keywords: Karstic endorheic lakes, thermal structure, hypogenic regime

INTRODUCCIÓN

Las Lagunas Grande y Chica se encuentran situadas en el extremo nordeste de la provincia de Málaga (Andalucía, España), en el término municipal de Archidona (Fig. 1), a una altitud de 800 m aproximadamente. Se trata de dos lagunas de pequeña extensión (menos de 10 ha) y relativamente someras, incluidas como Espacio Natural Protegido por la Administración Autonómica (Reserva Natural Lagunas de Archidona). Forman parte de un sistema de lagunas endorreicas en el sur de España protegidas por su gran valor como reserva de avifauna migratoria, algunas de las cuales, como la laguna de Fuente de

Piedra, se incluyen en la Lista Ramsar y son zonas ZEPA. Se ven afectadas por un régimen climático mediterráneo con tendencia semiárida (Almécija, 1997), y son estacionales y someras. Las únicas lagunas de estas características con una mayor profundidad son precisamente las lagunas Grande y Chica, permanente la primera y semipermanente la segunda.

Su génesis se relaciona con la karstificación de los materiales evaporíticos triásicos sobre los que se sitúan (Pezzi, 1977), lo que determina que su morfometría sea similar, aunque con diferencias que más adelante se comentarán. Entre las causas responsables de las diferentes condiciones que aparecen en lagunas próximas, las más común-

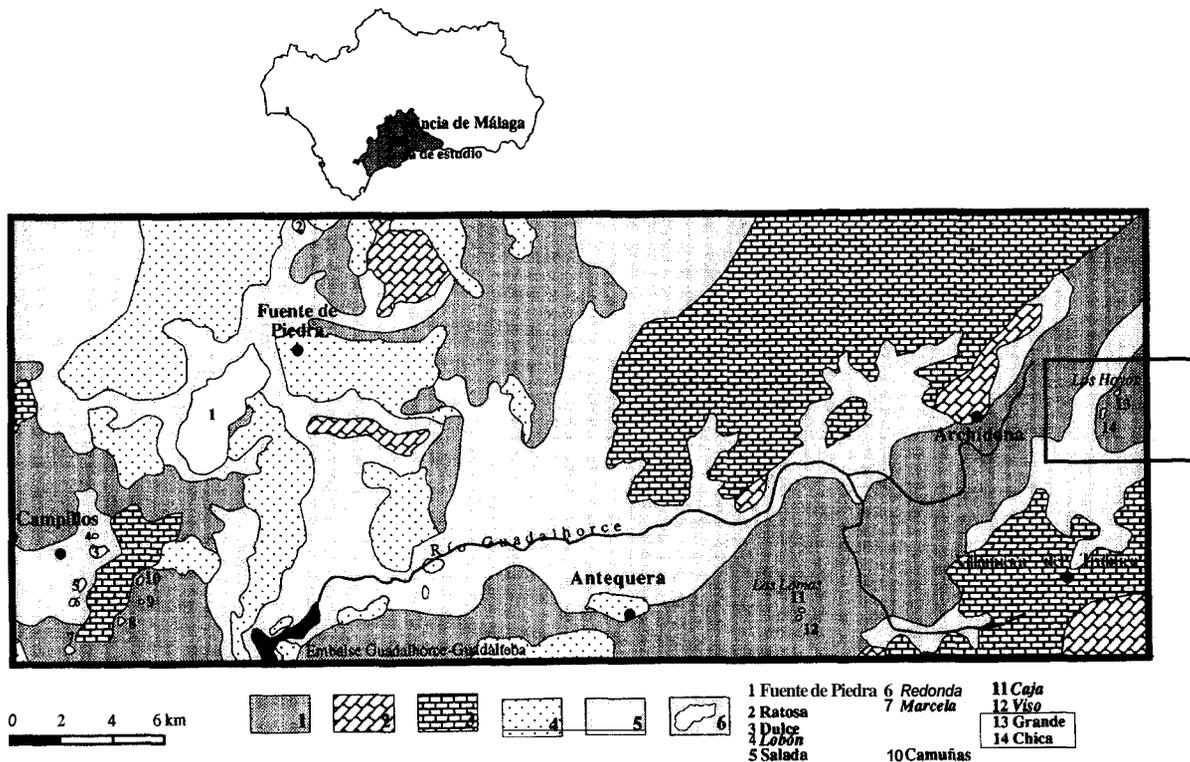


Figura 1. Localización geográfica. *Geographical setting of the Lake Grande and Lake Chica in Spain*

mente implicadas son las relacionadas con las características geológicas y morfológicas de sus cuencas. En el caso aquí estudiado, dichas condiciones son similares en ambas lagunas, y sin embargo aparecen las diferencias antes reseñadas. En el presente trabajo se pretende realizar una investigación detallada de parámetros químicos y térmicos del agua de las lagunas para poder establecer los mecanismos causales responsables de estas diferencias. Por otra parte, se ha realizado una caracterización morfométrica en detalle de ambas lagunas.

La información publicada sobre ambas lagunas es muy parcial y, desde un punto de vista limnológico se reduce a un trabajo de De la Rosa (1992) sobre el fitoplancton en el que se destaca el dominio (sobre una base anual) de cianofíceas en la Laguna Chica y de diatomeas en la Grande. Gómez Nieto (1994) apunta información sobre

indicadores de contaminación fecal que sugiere una contaminación apreciable en la laguna Chica (100 % de los coliformes fecales analizados fueron *E. coli*) y poco apreciable en la laguna Grande (donde tan sólo el 20% correspondían a *E. coli*).

MATERIAL Y MÉTODOS

La geología de la zona se ha determinado a partir de la cartografía geológica existente a escala 1:50000 (MAGNA, hoja 1024, Archidona), apoyada por el análisis difractométrico de muestras de suelo tomadas en diferentes puntos de las cuencas vertientes a las lagunas (método de polvo, fracción arcilla) y la interpretación de fotografías aéreas (escala 1: 18000) en dos periodos (vuelos realizados en mayo de 1990 y septiembre de 1993).

Table 1. Características morfométricas de las lagunas Grande y Chica de Archidona. *Morphometric characteristics of Lakes Grande and Chica de Archidona.*

	GRANDE	CHICA
Area del Lago: A (m ²)	96 784.5	80 261.6
Longitud máxima: L _{máx} (m)	455	525
Longitud de la línea de costa: L (m)	1350	1325
Profundidad máxima: z _{máx} (m)	13.2	8.3
Volumen del lago: V (m ³)	567 613	229 104
Area de la cuenca: Ac (m ²)	146 794	179 893
Anchura media: Bm=A/L _{máx} (m)	212.7	152.9
Profundidad media: z _m =V/A (m)	5.9	2.9
Profundidad relativa: Z _r =50* z _{máx} /(A*p) ^{1/2} (%)	3.8	2.6
Desarrollo de la línea de costa: D _L =L/2 (A*p) ^{1/2} (adim.)	1.2	1.3
Desarrollo del volumen: D _v =3*z _m /z _{máx} (adim.)	1.3	1.0
z _m /z _{máx} (adim.)	0.4	0.3
AJA (adim.)	1.5	2.2
A _c /V (m-1)	0.3	0.8

por el contrario, las vertientes desarrolladas en la formación geoméricamente superior son menos abruptas, con valores generalmente entre el 5 y el 10%.

La karstificación de estos materiales, unido al endorreísmo de las pequeñas cuencas formadas sobre materiales poco permeables son los principales factores que influyen en la formación de estas lagunas.

Morfometría

Algunas de las características morfométricas de estas dos lagunas son semejantes (Tabla 1). Las cuencas de drenaje están situadas a la misma cota (altura máxima: 800 m) y son, en ambos casos, muy reducidas en relación a la superficie de agua libre. A pesar de que la cuenca de la Laguna Chica es un 22 % mayor que la de la laguna Grande, el área superficial del vaso lagunar es sin embargo algo mayor (un 17 %) en esta última. Tanto los valores de longitud máxima, longitud de la línea de costa y desarrollo de la misma (Tabla 1) son similares en ambas lagunas, con diferencias que no superan el 15 % en ningún caso.

Las mayores diferencias se encuentran en las profundidades máximas (13.2 m en la Laguna

Grande y 8.3 m en la Laguna Chica) y medias, así como en el volumen de agua almacenada que, como se puede apreciar, es más del doble en la Laguna Grande que en la Chica.

Para ilustrar la distribución de superficies y volúmenes de agua almacenada a las distintas profundidades se han representado (Fig. 3 (I)) las correspondientes curvas hipsográficas, así como los mapas batimétricos, cortes y bloques diagramas en 3D que nos muestran las diferencias en la forma de los vasos lagunares. El umbral que se aprecia en el centro de la laguna Chica pone de manifiesto que se trata de dos dolinas coalescentes de diferente tamaño (uvala) las que constituyen el vaso. De hecho, en épocas secas la laguna llega a contener agua solamente en su parte meridional, mientras que la parte norte permanece colonizada por vegetación fieatofítica. Eventualmente esta laguna puede llegar a secarse por completo. Esta peculiaridad morfológica se observa en la curva hipsográfica que representa dA/dV en función de la profundidad: a los 5m aproximadamente la curva se inflexiona.

Por último, la profundidad relativa (Z_r) que se define como “profundidad máxima expresada como un porcentaje del diámetro de un círculo cuya área es coincidente con la del lago” (Hutchinson, 1957), resulta muy útil para com-

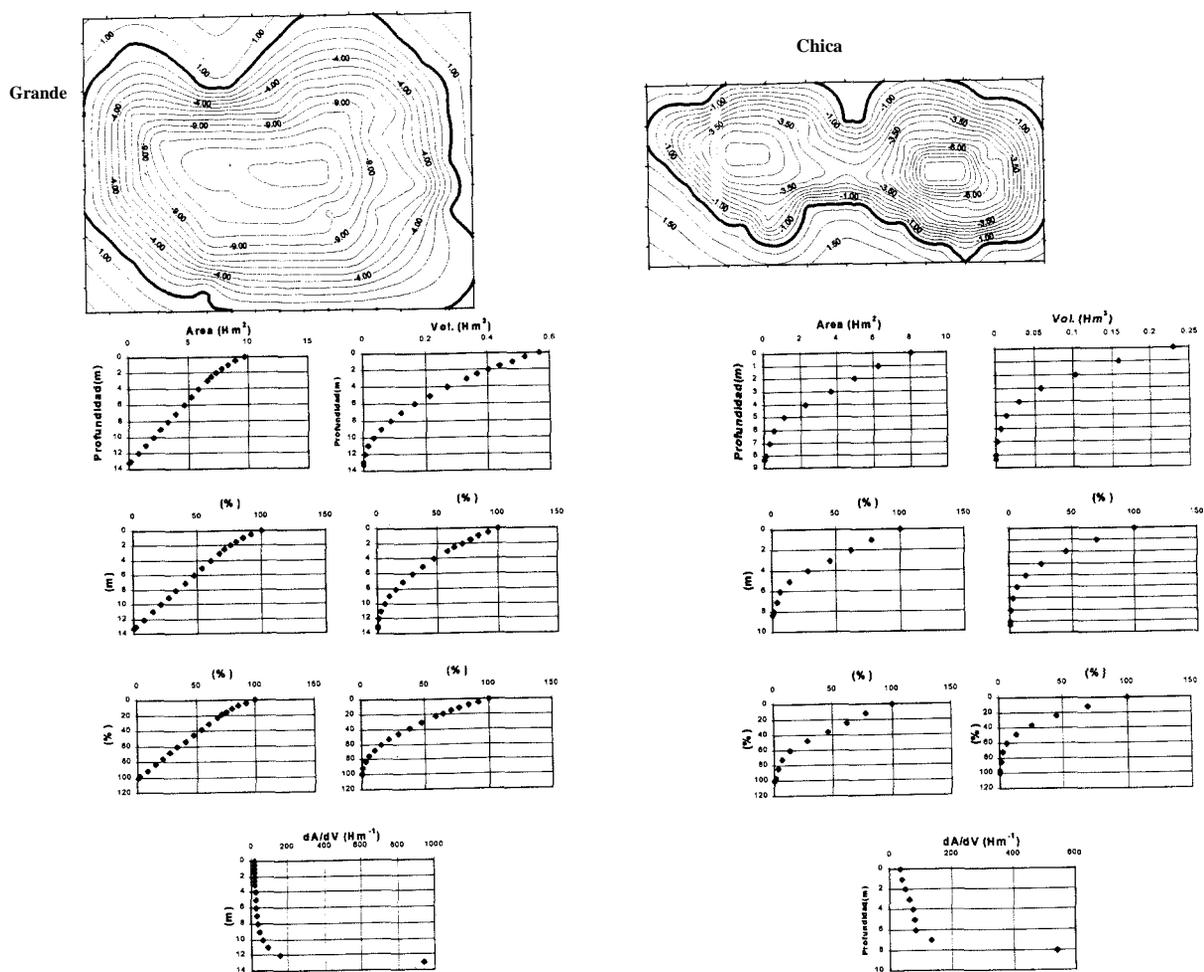


Figura 3 (I). Representación gráfica de la morfología de las lagunas. *Diagram of the shape of studied lakes*

parar, y eventualmente explicar, la diferente susceptibilidad de las lagunas a ser influidas por factores externos, pues relaciona en última instancia el área del lago (entrada de energía externa) y la profundidad (medida del eje principal a través del cual se disipa esa energía). En la laguna Grande, la profundidad relativa es del 3.8 ‰, y del 2.6 ‰ en la Chica (Tabla 1), valores que se encuentran en el rango de los citados en la mayoría de sistemas (ej. Hoyos 1996 para el lago de Sanabria) pero resultan ser suficientemente

diferentes como para explicar algunas de las diferencias relativas en la estratificación térmica que se aprecian en estos dos sistemas.

Composición del zooplancton y características físico – químicas

En la figura 3 (II) se pueden apreciar las abundancias relativas de los grupos zooplanctónicos identificados en las lagunas Grande y Chica en

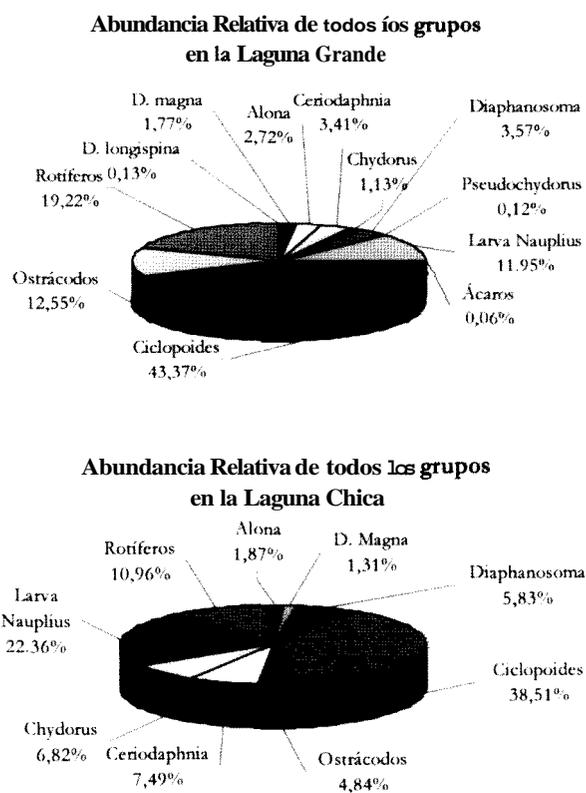


Figura 3 (II). Abundancia relativa de los grupos de zooplancton identificados en las lagunas. *Relative abundance of zooplankton groups identified in the two lakes studied.*

cinco muestreos litorales realizados durante el año 1998. En estos gráficos se puede apreciar que son los Copépodos el grupo dominante en ambas lagunas, 55 % en la laguna Grande y 60 % en la laguna Chica, la mayoría adultos (12 % de larvas Nauplius frente a 43 % de adultos del orden Ciclopoides). Algunos grupos, como los Ostrácodos, tienen menor importancia relativa en la laguna Chica, 4.84 % frente a 12.55 % en la laguna Grande, mientras que otros como *Diaphanosoma*, *D. magna* o *Ceriodaphnia*, aparecen en proporciones similares. La especie *D. longispina* no se identificó en la laguna Chica. La dinámica poblacional de los distintos grupos taxonómicos pone de manifiesto una relación inversa entre *D. magna* y los Rotíferos en la laguna Grande, la población de cladóceros experimenta su máximo en la muestra de 30/6/98, época en la cual la población de Rotíferos muestra un importante descenso. En siguientes muestreos, como el del 20/8/98, la situación se invierte. En la laguna Chica aparece, a partir de la época estival, el género *Diaphanosoma*, y se aprecia en general que todos los grupos experimentan una dinámica semejante durante el periodo de muestreo.

En la figura 4 se han representado perfiles de conductividad y temperatura para cada una de las lagunas. A pesar de que se trata de muestras puntuales, son evidentes notables diferencias tanto en

Table 2. Características físico - químicas del agua de las lagunas Grande y Chica (agosto 1998). *Physical and chemical characteristics of Lakes Grande and Chica during August 1998.*

CHICA	Mixolimnion	Monimolimnion	GRANDE	Epilimnion	Hipolimnion
pH	7.9	7.7	pH	8.3	7.7
C.E. (mS/cm)	4.140	7.830	C.E. (mS/cm)	3.200	3.280
Na ⁺	340	644	Na ⁺	116	124
K ⁺	2.9	180.0	K ⁺	8.9	10.3
Mg ²⁺	116	373	Mg ²⁺	112	114
Ca ²⁺	463	383	Ca ²⁺	458	511
Cl ⁻	466	919	Cl ⁻	183	195
SO ₄ ²⁻	1475	2 036	SO ₄ ²⁻	1550	1586
HCO ₃ ⁻	96	445	HCO ₃ ³	67	192
NH ₄ ⁺	0.01	3.60	NH ₄ ⁺	0.02	1.47
NO ₃ ⁻	3.30	1.80	NO ₃ ⁻	2.28	2.13
Salinidad	2 958	4 981	Salinidad	2 494	2 730

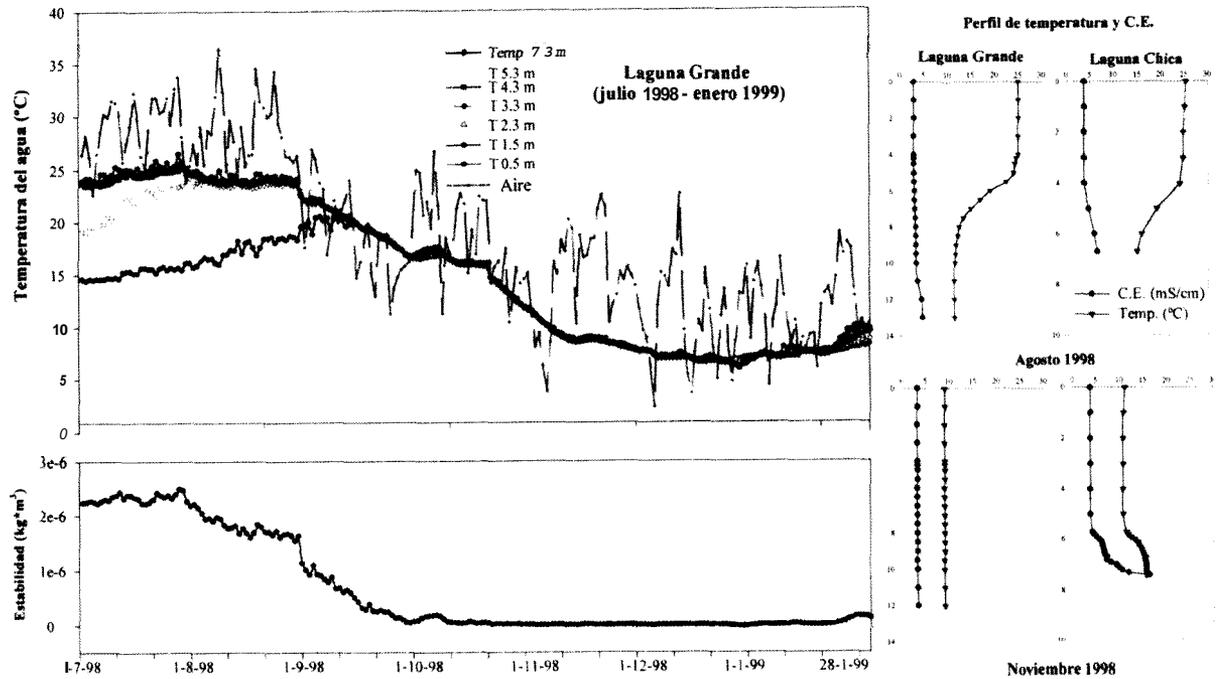


Figura 4. Perfiles de Conductividad Eléctrica (mS/cm) y temperatura (°C), y evolución de la estabilidad térmica en la Laguna Grande. Conductivity (mS cm⁻¹) and temperature (°C) depth profiles, and evolution of the thermal stability in Lake Grande.

la estructura térmica como en la distribución vertical de la salinidad. La laguna Grande se comporta como templada monomítica, con un amplio periodo de mezcla que durante el tiempo en que realizamos este estudio, se extendió desde mediados de Septiembre hasta comienzos de Febrero. En los meses de verano se desarrolla una termoclina manifiesta hacia los 5-6 m de profundidad y la laguna muestra una notable estratificación. Los valores de conductividad se mantienen durante prácticamente todo el año invariables en el perfil vertical, alrededor de 3 mS/cm.

En la laguna Chica, los valores de conductividad muestran un incremento hacia los 6 m de profundidad permitiendo diferenciar dos estratos: uno menos denso con valores en torno a los 4 mS/cm y otro inferior de conductividad y, por tanto, de salinidad mucho más elevada, que llega a ser hasta de 16 mS/cm en las proximidades del fondo. Esta diferencia, que se mantiene a lo largo de todo el ciclo estudiado (si bien sólo en la parte central de la laguna), permite calificarla como

meromítica: existencia de una capa profunda de aguas muy saladas (monimolimnion) separada por una quimioclina de la capa suprayacente en la cual se distinguen periodos de estratificación estival y mezcla invernal (mixolimnion). En el incremento de temperatura que se observa en el monimolimnion es probable que jueguen un papel relevante tanto procesos físicos (absorción de radiación solar) como biológicos (descomposición anaerobia de la materia orgánica).

En relación con las características químicas de sus aguas hemos encontrado, igualmente, notables diferencias que se refieren especialmente a los patrones de distribución vertical en ambas lagunas. El pH, muestra un ligero descenso en profundidad. Los valores máximos se han obtenido, en ambos casos, a 1 m de la superficie, lo cual debe ser consecuencia de una mayor actividad fotosintética en dicha zona teniendo en cuenta que las medidas se efectuaron durante el periodo de estratificación térmica (agosto de 1998).

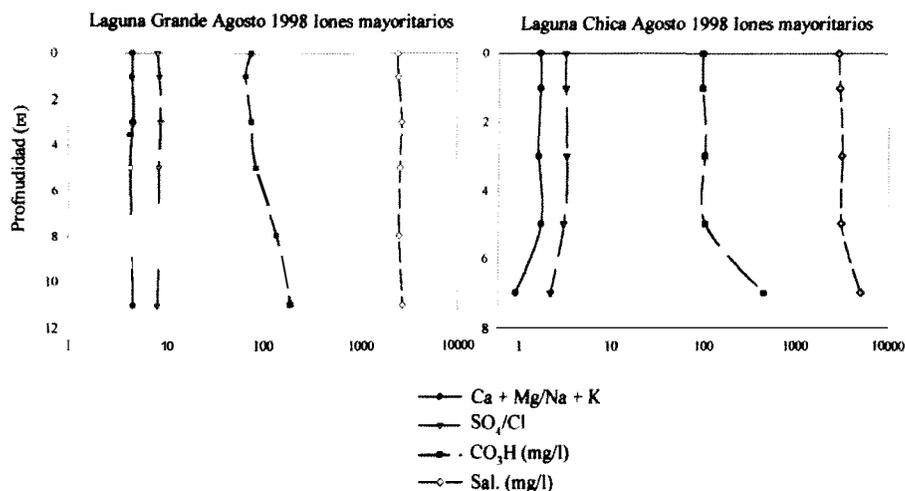


Figura 5. Perfiles de distribución de las concentraciones iónicas en el agua de las lagunas (agosto 1998). *Depth changes in ion concentrations in the water column during August 1998 in the two lakes studied.*

Los cationes calcio, magnesio y potasio muestran, en ambas lagunas, concentraciones similares excepto en el monimolimnion de la laguna Chica donde el magnesio y, sobre todo, el potasio, muestran concentraciones más elevadas. El sodio es del orden de tres veces más abundante en la laguna Chica que en la Grande y también se incrementa su concentración en el agua en profundidad (Tabla 2). Es interesante comentar que en el monimolimnion de la laguna Chica hay una disminución en el contenido de nitratos y un aumento de la concentración de ion amonio, lo cual parece confirmar la prevalencia de procesos de reducción. Las medidas de oxígeno disuelto realizadas durante el periodo de estudio en muestras de agua del fondo de la laguna Chica resultaron ser siempre inferiores a 2 mg/l; en la laguna Grande, por el contrario, las concentraciones de oxígeno en el hipolimnion oscilaron en torno a 5 mg/l.

Las mayores diferencias en la química entre ambas lagunas se observan en las concentraciones de los aniones estudiados (Fig. 5). El ion cloruro muestra concentraciones de casi 200 mg/l en la laguna Grande y valores promedio próximos a los 500 mg/l en la laguna Chica, aunque en el fondo de dicha laguna se llegan a

medir valores superiores a los 900 mg/l. En el caso del ion sulfato, se midieron valores de 1550 mg/l en el agua de ambas lagunas pero, como en el caso anterior, dicho valor asciende hasta algo más de 2000 mg/l en las aguas del fondo de la laguna Chica.

En la figura 5 se han representado las relaciones catiónicas y aniónicas, que muestran en detalle el patrón de distribución iónico en la columna de agua de las lagunas. Mientras que en laguna Grande se aprecia un ligero incremento del ion bicarbonato con la profundidad, en la laguna Chica la concentración es prácticamente uniforme hasta el último metro de profundidad en el que se aprecia un aumento. En estudios similares realizados en lagunas meromíticas, como es el caso del Big Soda Lake en Nevada, U.S.A. (Cloern, J.E. *et al.* 1983) las diferencias entre el quimismo del mixolimnion y el monimolimnion mostraron patrones similares (tales como el aumento de la concentración de ion bicarbonato y sulfato y la disminución del ion calcio en el monimolimnion).

Para caracterizar la facies hidroquímica del agua de las lagunas se han representado las proporciones iónicas (% meq/l) en los diagramas de Piper y Schoeller - Berkloff (Fig. 6).

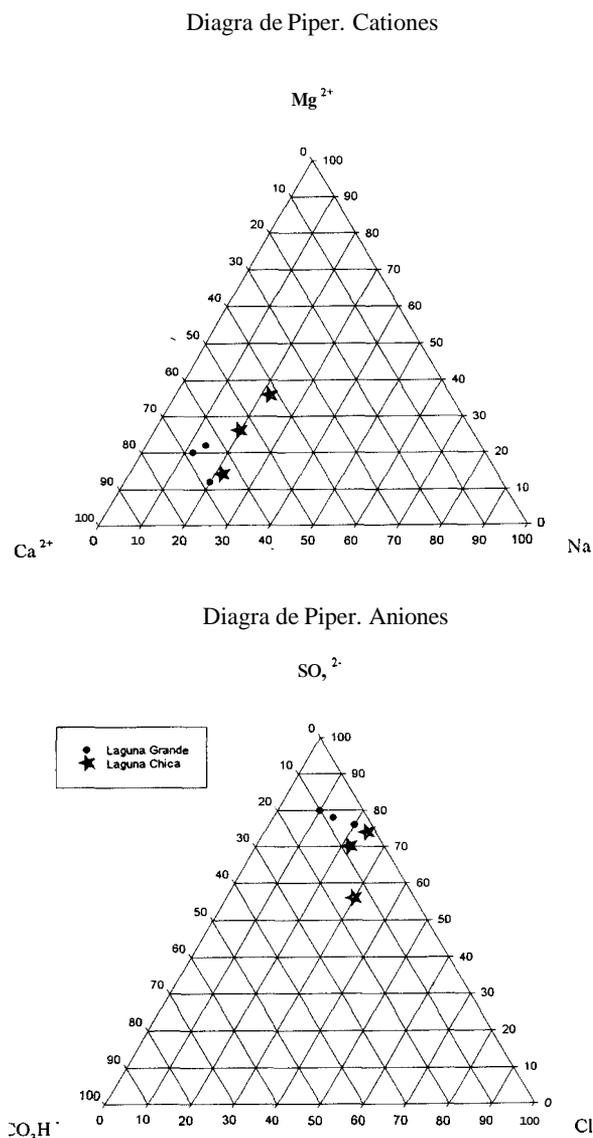


Figura 6. Facies hidroquímicas del agua de las lagunas de Archidona (diagramas de Piper) durante un ciclo anual. *Hydrochemical facies in the water of the Archidona area (Piper diagrams) during an annual cycle.*

Si bien según la clasificación de Piper, el agua de ambas lagunas es del tipo sulfatada - cálcica, existen diferencias en las proporciones catiónicas que con la sistematización de Eugster & Hardie (1978) se ponen de manifiesto. La laguna Grande de Archidona presenta facies $\text{SO}_4\text{-(Cl) / Ca-(Mg)-$

(Na) y la laguna Chica presenta facies $\text{SO}_4\text{-(Cl) / Ca-(Na)-(Mg)}$. Esta última laguna, de carácter estacional, presenta notables variaciones en las características químicas de sus aguas entre los periodos húmedos (como el que aquí se analiza) y periodos secos. Concretamente, la comparación de este ciclo húmedo 1997-98 con un periodo de extrema sequía, anterior (1992-94), del cual se tiene información analítica similar, pone de manifiesto un cambio en la facies hidroquímica del agua de esta laguna, que es $\text{SO}_4\text{-Cl / Na-Mg-(Ca)}$. La laguna Grande, sin embargo, mantiene en este periodo la misma facies (Almécija, 1997).

Esta diferencia también se pone de manifiesto en las concentraciones iónicas. El valor medio del total de sólidos disueltos (T.S.D.) es, para el periodo estudiado, de 2.5 g/l en el agua de la laguna Grande y de 3.0 g/l en el agua de la laguna Chica. En el periodo seco antes citado, los valores medios de ese parámetro fueron de 4.5 g/l en el agua de la laguna Grande y algo más de 13 g/l en el agua de la laguna Chica.

Estos resultados permiten resaltar dos diferencias principales entre ambas lagunas. La primera de ellas es la diferencia en la concentración iónica de sus aguas, a pesar de que sus facies hidroquímicas son similares y, en segundo lugar, el patrón de distribución térmica de las mismas.

Los grandes contrastes observados en profundidad para los iones mayoritarios y otras variables físico-químicas analizadas en la laguna Chica (Tabla 2), evidencian una estratificación salina que divide el sistema en dos estratos: mixolimnion (superior) y monimolimnion (inferior, de mayor salinidad).

La laguna Grande, por el contrario, sobre la base de los valores de salinidad en la columna de agua y el patrón térmico estacional se comporta como un lago monomítico típico.

Las características morfo-genéticas son coincidentes en ambas lagunas y están relacionadas con la disolución de las evaporitas triásicas que constituye la litología predominante de los materiales sobre los que se encuentran las mismas. También son similares la situación geográfica y, por tanto, sus condiciones climáticas. Si bien existen algunas diferencias tanto en la morfo-

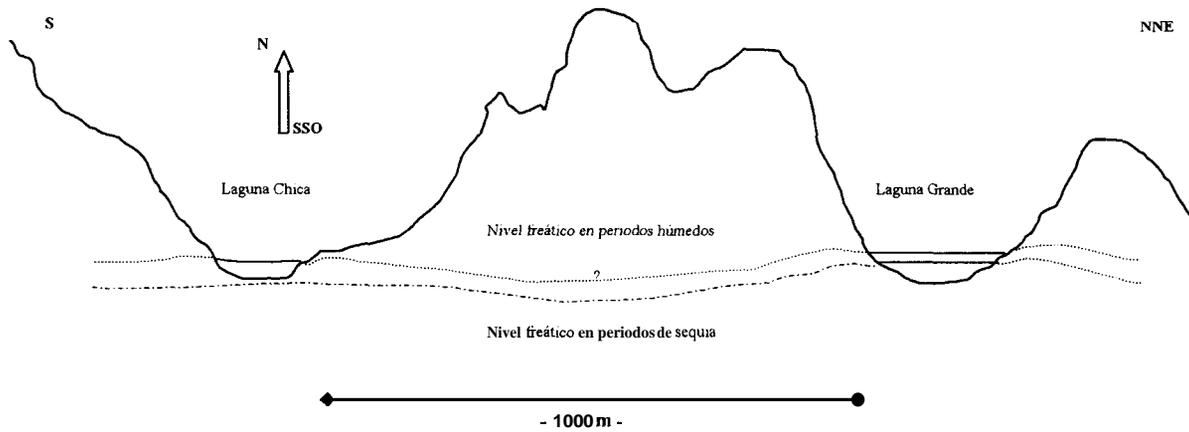


Figura 7. Perfil topográfico esquemático del área de estudio. *Topographic cross-section of the study area.*

metría del vaso lagunar como en la de las cuencas, éstas no parecen ser suficientes para explicar los contrastes en la concentración iónica del agua de las lagunas, ni su diferente patrón de circulación.

Además, aunque en el periodo anual estudiado no se han producido cambios importantes en el nivel de la lámina de agua de ambas lagunas, se tiene información a este respecto de épocas más secas en las que la evolución de dicho nivel fue muy diferente en cada una de ellas y, por ejemplo, durante el extremo periodo de sequía de comienzos de los años 90, la laguna Chica llegó a secarse por completo. Estas lagunas reciben aportaciones subterráneas ya que se sitúan en una zona kárstica bien desarrollada (Almécija, 1997), pero (y teniendo en cuenta que el nivel de agua libre, o nivel piezométrico se sitúa en las dos lagunas a la misma cota), el fondo de la laguna Grande está a mayor profundidad (aproximadamente 4 m) que el de la laguna Chica (Fig. 7). Por esto el nivel de base del acuífero kárstico regional llega a situarse, en épocas de sequía, bajo el fondo de la laguna Chica pero nunca bajo el de la laguna Grande. La consecuencia hidrogeológica es evidente: la laguna Grande recibe alimentación subterránea aunque el nivel piezométrico sea bajo, mientras que la Chica recibirá

aportes hipogénicos tan sólo en los periodos en los cuales el nivel freático esté lo suficientemente cerca de la superficie como para que alcance el fondo de la laguna.

Este condicionamiento hidrogeológico es, por tanto, el factor fundamental que determina el hidroperiodo de las lagunas y que en última instancia ha condicionado el que los sistemas sean tan diferentes en cuanto a patrones de distribución térmica y concentración iónica de las aguas. Estas diferencias tienen también lógicas implicaciones desde el punto de vista de la gestión administrativa de estos espacios naturales y sugiere interesantes cuestiones limnológicas de estudio.

AGRADECIMIENTOS

A la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y al Dr. M. Rendón, director - conservador de la Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra y Lagunas de Campillos, por su colaboración. Este trabajo ha recibido financiación del proyecto SINAMBA (Caracterización Ambiental de las zonas húmedas de la provincia de Málaga y su inclusión en el Sistema de Información Ambiental de Andalucía).

REFERENCIAS

- ALMÉCIJA RUIZ, C. 1997. *Estudio hidrológico e hidroquímico de los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- BLUMENTHAL, M. M. 1927. Versuch einer tektonischen Gliederung der Betischen Cordillera von Central und Südwest (Andalusien). *Eclog. Geol. Helv.*, 20: 487 - 532.
- CLOERN, J. E., COLE, B. E. Y OREMLAND, R. S. 1983. Seasonal changes in the chemistry and biology of a meromictic lake (Big Soda lake, Nevada, U.S.A.). *Hydrobiologia*, 105: 195 - 206.
- DE LA ROSA, J. 1992. *Estudio del fitoplancton de varias lagunas de las provincias de Granada y Málaga*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.
- EUGSTER, H. P. Y HARDIE, L. A. 1978. Saline lakes. En: *Physics and chemistry of Lakes*. Lerman, A. (ed.): 237-293. Springer Verlag.
- GOMEZ NIETO, M. A. 1994. *Estudio comparativo de indicadores de contaminación fecal aislados en los sistemas lagunares de Antequera (Málaga)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.
- HOYOS ALONSO, C. 1996. *Limnología del lago de Sanabria: variabilidad interanual del fitoplancton*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca.
- HUTCHINSON, G. E. 1957. *A Treatise on Limnology. Vol. I. Geography, Physics and Chemistry*. Willey, New York. 1015 pp.
- PEZZI, M. 1977. *Morfología kártica del sector central de la Cordillera Subbética*. Tesis Doctoral. Cuad. Geogr. Univ. Granada, S.M. 2, 289 pp.
- STAUB, R. 1926. Gedanken zur Tektonik Spaniens. *Vierteljahrsschr. Naturf. Ges. Zürich*, 71: 196 - 261.