

APORTE DE NUTRIENTES POR LOS TRIBUTARIOS SUPERFICIALES DEL LAGO DE BANYOLES

L.J. García-Gil¹, C.A. Abellà² & R. Moreno-Amich²

1. Laboratori Municipal de Limnologia de Banyoles.

2. Institut d'Ecologia Aquàtica.

RESUM

Els nutrients que rep l'estany de Banyoles, principalment nitrats i fosfats, es canalitzen a través dels tributaris superficials que hi arriben pels costats sud i oest. S'han analitzat les principals característiques físico-químiques de l'aigua que porten els anomenats tributaris i s'ha calculat l'aportació de nutrients a l'estany en condicions d'alt i baix cabal. Es proposa una classificació dels tributaris en relació amb l'origen i característiques de llurs aigües. Per altra banda s'ha pogut comprovar que la quantitat de nutrients aportats a l'estany depèn de la pluviometria, mentre que llur origen sembla ser el mateix (els camps de cultiu adjacents) en no variar la relació entre ells al llarg del temps. Es discuteix la importància d'aquesta aportació de nutrients en el procés d'eutrofització de l'estany de Banyoles, juntament amb els mecanismes intrínsecs d'amortiment davant d'aquesta (quimisme i temps de residència mitjana de l'aigua). Aquests factors antagònics s'han de tenir en compte a l'hora d'entendre els processos externs i interns que controlen l'eutrofització de l'estany de Banyoles.

RESUMEN

Los nutrientes que recibe el lago de Banyoles, principalmente nitratos y fosfatos, se canalizan a través de los tributarios superficiales que llegan a él por sus lados sur y oeste. Se han analizado las principales características físico-químicas del agua que llevan los citados tributarios y se ha calculado el aporte de nutrientes al lago en condiciones de alto y bajo caudal. Se propone una clasificación de los tributarios en relación al origen y características de sus aguas. Por otro lado se ha podido comprobar que la cantidad de nutrientes aportados al lago depende de la pluviometría, mientras que su origen parece ser el mismo (los campos de cultivo adyacentes) al no variar la relación entre ellos a lo largo del tiempo. Se discute la importancia de este aporte de nutrientes en el proceso de eutrofización del lago de Banyoles, juntamente con los mecanismos intrínsecos de amortiguación ante dicha carga (quimismo y tiempo de residencia media del agua). Estos factores antagónicos deben tenerse en cuenta para entender los procesos externos e internos que controlan la eutrofización del lago de Banyoles.

ABSTRACT

The nutrient loading of Banyoles Lake is canalized through several superficial streams reaching the lake from both the South and the West side. The main physico-chemical

variables of the water of these tributaries have been analyzed and the load of nutrients have been calculated under conditions of both high and low flux. A typology of the tributaries have been proposed according to the physico-chemical characteristics of their waters. Besides, the amount of nutrients entering the lake depends on the rainfall, though its composition remains fairly stable along the time, thus indicating that the origin of the nutrients is the same (crop fields surrounding the lake). The significance of this nutrient loading in the eutrophication process of Banyoles Lake is discussed together with intrinsic limiting factors of the load (chemistry and turn-over of the lake). These are two antagonist factors that should be considered for a better understanding of the external processes controlling eutrophication in Banyoles Lake.

Key words: nutrient loading, tributaries, Banyoles Lake, eutrophication.

INTRODUCCIÓN

El lago de Banyoles recibe sus aguas mayoritariamente de forma subterránea, entrando por esta vía el 80% del total. El resto entra mediante los arroyos que llegan por su lado oeste, recogiendo las aguas en una cuenca de recepción de 12,8 Km² (Brusi, 1985) circulando de oeste a este, en el mismo sentido en que circulan las aguas del sistema hidrogeológico de Banyoles (Sanz, 1985).

Abellà et al. (1986) han destacado la importancia de los tributarios superficiales en la carga de fosfatos del Lago de Banyoles, atribuyéndola a las actividades agrícolas que se desarrollan en su cuenca de recepción de aguas.

En épocas lluviosas, las aguas que fluyen por los arroyos provienen en su mayoría del lavado de los campos, los cuales suelen ser abonados de forma sobredimensionada. Esto hace que lleven gran cantidad de sólidos en suspensión, materia orgánica y una alta concentración en nutrientes (PO_4^{3-} y NO_3^-). Son conocidos los efectos que la agricultura tiene en lagos templados, por mediación de las cargas externas de nutrientes, incrementando el grado de eutrofia y provocando cambios en las poblaciones de fitoplancton y zooplancton (Malthus & Mitchell, 1988; Inoue et al., 1981). Generalmente las cargas de nutrientes sobre ecosistemas acuáticos ayudan a suplementar a los productores primarios aquellos nutrientes que les son limitantes. En el lago de Banyoles el fosfato es uno de esos factores limitantes debido principalmente al alto contenido en calcio de sus aguas (Abellà, 1980).

En el presente trabajo se caracterizan físico-químicamente los principales tributarios del lago de Banyoles y se analiza la incidencia que tienen conjunta e individualmente sobre el aporte de nutrientes a este lago. También se discute sobre el origen de sus aguas en épocas no lluviosas, a partir de sus características físico-químicas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los tributarios llegan al lago de Banyoles por sus lados sur y oeste (Fig. 1). Se tomaron cinco muestras a lo largo del tiempo de cada tributario, poco antes de llegar

al lago. La primera toma de muestras (14 de noviembre de 1988) tuvo lugar durante unas lluvias intensas en las que cayeron 93 l.m^{-2} en 24 horas (datos de la Estación Meteorológica del Laboratorio Municipal de Limnología de Banyoles).

El flujo fue estimado por flotación a partir de la sección y la velocidad calculadas en un tramo de longitud conocida (Dutras et al., 1986). La temperatura fue medida con un termistor CRISON T-637 y la conductividad con un conductivímetro YSI modelo 33 siendo corregida para 20°C . El oxígeno se midió con un oxímetro YSI modelo 57. Todas estas variables fueron medidas «in situ».

Los nitratos y fosfatos se analizaron en el laboratorio dentro de las 24 horas siguientes a la recogida de las muestras. Los nitratos se determinaron mediante un electrodo selectivo ORION modelo 93-07 utilizando como referencia un electrodo de doble unión ORION modelo 90-02. Los fosfatos se analizaron en su for-

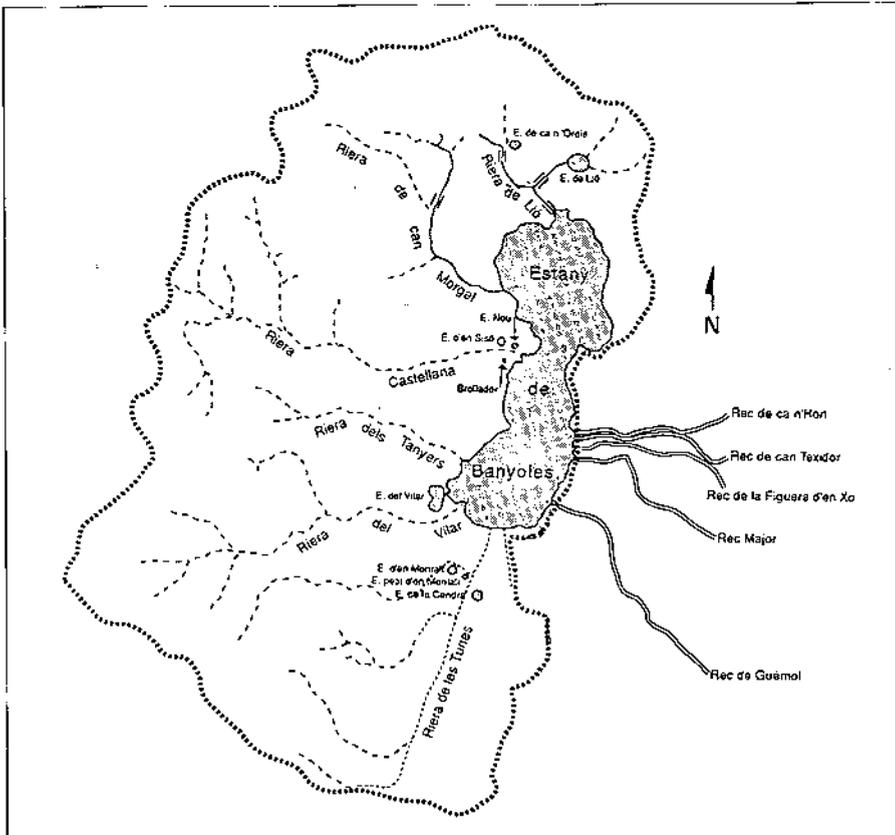


Figura 1. Mapa del lago de Banyoles y su cuenca de recepción, con los tributarios superficiales. (Según Brusi 1985). *Mape of Banyoles Lake area including its drainage basin (From Brusi 1985)*

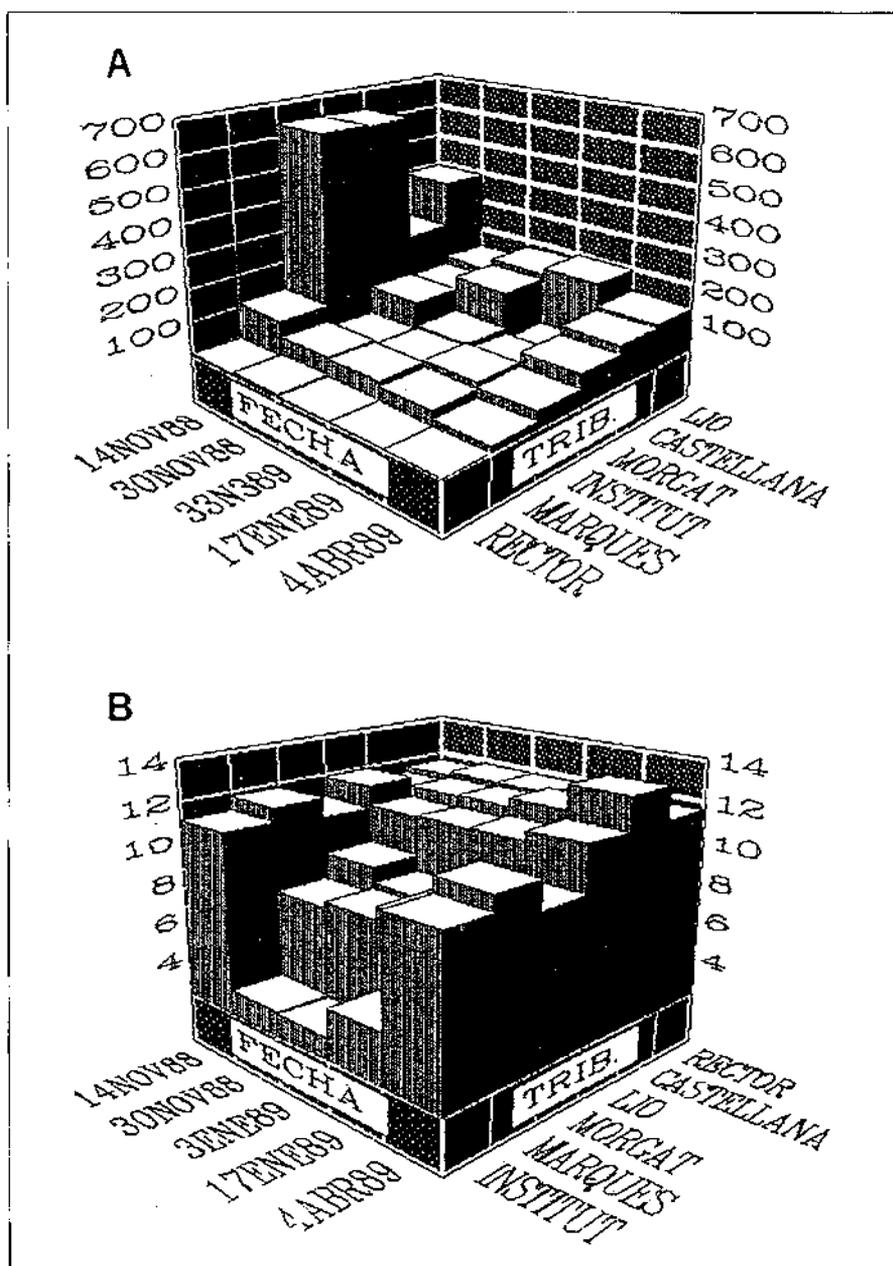


Figura 2, A y B. Caracterización físico-química de los tributarios superficiales del lago de Banyoles en diferentes fechas de muestreo. *Physico-chemical characterization of the superficial tributaries of Banyoles Lake. A: Flujo ($m^3 \cdot h^{-1}$). B: Temperatura ($^{\circ}C$).*

A: Water flux ($m^3 \cdot h^{-1}$). B: Temperature ($^{\circ}C$).

ma de fosfato reactivo soluble, siguiendo el método colorimétrico descrito por la ASMT (1981). La turbidez fue medida como absorción a 550 nm.

Las similitudes entre los diferentes tributarios se han puesto de manifiesto mediante un análisis de «clusters» (Sneath & Sokal, 1973), utilizando el algoritmo UPGMA (Sokal & Michener, 1958), cuyo resultado es un dendrograma. Como índice de similitud se ha utilizado la distancia euclídea en base a las variables que presentaron variación significativa (Folwkes et al., 1988) en el análisis de la varianza, previa estandarización, reescalando cada variable entre 0 y 1 a partir de su rango (Milligan & Cooper, 1988).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujo

Aunque todos los arroyos llevan un nivel basal de unos $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ durante todo el tiempo que duró el estudio, se observa un claro efecto de la lluvia sobre el flujo en Morgat e Institut ($633 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para los dos) y en menor grado Lió con $391 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y Castellana con $249 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Fig. 2A).

Cuando el aporte de las aguas pluviales cesa, los arroyos vuelven a su nivel basal, observándose un mayor flujo de los tributarios del norte (Lió, Morgat y Castellana) en relación al resto. Rector es un tributario cuyas aguas provienen de una fuente de agua freática. Este hecho podría estar relacionado con el bajo flujo que presenta el citado arroyo, independientemente de las precipitaciones.

El mantenimiento del flujo de agua de los tributarios en épocas secas nos da información acerca del origen subterráneo de estas aguas que emergen en distintas zonas de la cuenca de recepción del Lago en forma de surgencias. Esto se verá apoyado por los datos de conductividad que, en épocas secas, presentan unos valores parecidos a los del lago de Banyoles apuntando a un origen común de sus aguas (García-Gil et al., 1985).

Temperatura

En la Fig. 2B se observa cómo la temperatura de los arroyos en el primer muestreo es bastante homogénea siendo independiente del origen de sus aguas. Dos semanas más tarde (30 de noviembre), las diferencias entre las temperaturas de los distintos tributarios son sustanciales. Se observa por un lado como Rector, Castellana y Lió mantienen su temperatura independientemente de las condiciones invernales externas. En cambio Morgat, Marquès e Institut muestran una mayor dependencia de la temperatura ambiente. La distancia desde la surgencia de las aguas de los arroyos hasta el punto de toma de muestras podría explicar esta dependencia de las condiciones externas en cuanto a la temperatura se refiere. La temperatura del agua surgente es de $16 \text{ }^\circ\text{C}$ y en esta parte del año se va enfriando durante su recorrido hacia el lago.

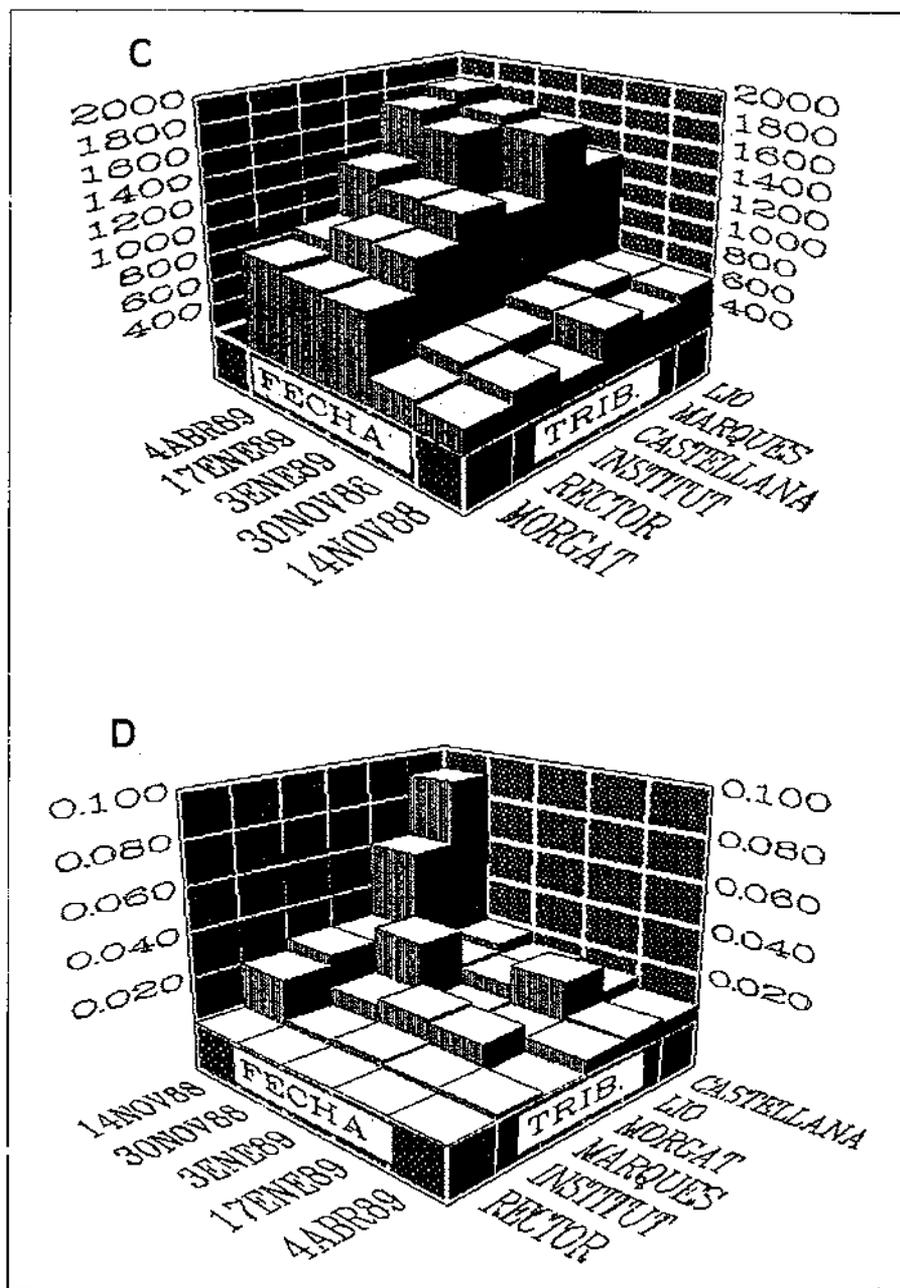


Figura 2, C y D. C: Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). D: Turbiedad medida como absorción a 550 nm.
 C: Conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). D: Turbidity measured as optical absorption at 550 nm.

Conductividad

La Fig. 2C recoge los valores de conductividad de los distintos tributarios a lo largo del tiempo. Se observa un salto brusco de esta variable que va desde los 400-600 $\mu\text{S cm}^{-1}$ el 30 de noviembre a valores que oscilan entre 800 y 1800 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Estas diferencias hay que atribuir las a dos factores principalmente:

1. Las aguas de lluvia actúan como un factor diluyente de los sulfatos que llevan las aguas surgentes. Esta dilución se verá reflejada en los valores de conductividad.

2. El propio flujo surgente es un indicador del tiempo de contacto entre el agua freática y los yesos. A menor flujo surgente, mayor concentración de sulfatos y, por tanto, mayor conductividad.

Esto es aplicable de forma permanente al lago de Banyoles. Hay trece surgencias agrupadas en dos grandes clases en función de su flujo. Las que tienen un flujo elevado tienen menor conductividad (Casamitjana, comunicación personal). Cuando el efecto de las fuertes lluvias ha pasado, los valores vuelven a lo que podría considerarse normal, teniendo en cuenta la conductividad de las surgencias de bajo flujo del lago de Banyoles.

Existe, por otra parte, una clara variabilidad para este parámetro entre los diferentes arroyos que es discutida más adelante.

Turbidez

La turbidez medida como la densidad óptica (absorbancia a 550 nm) es una variable de gran utilidad que nos indica el aporte al lago de material en suspensión y con él, de materia orgánica y nutrientes. Por otro lado suele haber una buena relación entre la turbidez de la muestra y determinados tipos de contaminación ya sean químicos o microbiológicos (Vila et al., 1987).

La Fig. 2D muestra cómo Lió y Morgat mantienen una turbidez algo superior al resto debido a que estos dos arroyos recogen las aguas fecales de sendos núcleos de población. Es destacable la alta transparencia de Rector, explicable si se tiene en cuenta que las muestras fueron tomadas en la misma fuente donde se forma el arroyo, de la cual sale agua freática sin material en suspensión.

Nutrientes

La Fig. 3 muestra los niveles de aporte de nutrientes de los distintos tributarios al lago de Banyoles. Las altas tasas de aporte, tanto de fosfatos como de nitratos observadas el 14 de noviembre, día de máxima pluviosidad, reflejan el *lavado* que tiene lugar en los campos. Parte de los nutrientes y materia orgánica que son disueltos por las aguas se acumulan en las depresiones de la cuenca de recepción. También lo hace en forma de agua de infiltración (Linsley et al., 1982) llegando al agua de una forma más lenta y continuada. Estas aguas aseguran un aporte constante de fosfatos y nitratos al lago de Banyoles durante un período de tiempo

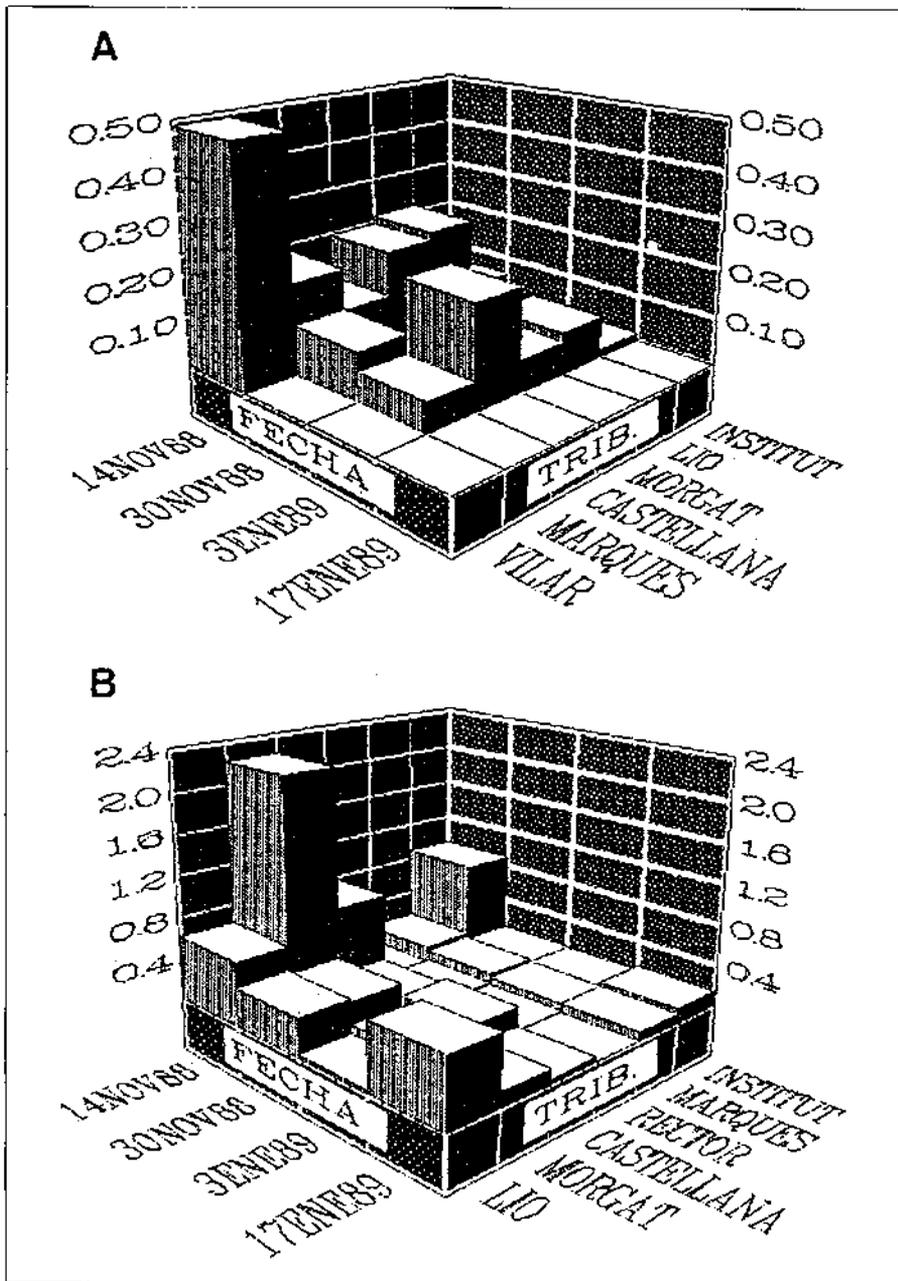


Figura 3. Tasas de aporte de nutrientes al lago de Banyoles (en $g \cdot h^{-1}$). A: fosfatos (fracción soluble, SRP) y B: Nitratos. Nutrient loading rates into Banyoles Lake (units in $g \cdot h^{-1}$). A: phosphates (SRP) and B: Nitrates.

relativamente largo, aunque no necesariamente se canalicen a través de los tributarios. Mediante este proceso, gran parte de la materia orgánica que se encuentra esparcida en los campos de la cuenca de recepción de aguas, llega, antes o después, al lago. Vilar es el tributario que aporta más fosfatos en época lluviosa, aunque en los posteriores muestreos no llevaba agua.

El aporte de nitratos (A) es de un orden de magnitud mayor que el de fosfatos (B), lo cual puede ser un reflejo de la composición de los abonos orgánicos aplicados en los campos. Los aportes de fosfatos son continuados a lo largo del tiempo, lo cual significa que el descenso en el flujo se ve compensado por un aumento en la concentración.

Los valores de aporte de nutrientes presentados son estimativos y no hay que dejar a un lado la importancia y dificultad del muestreo de las primeras aguas del lavado, ya que son las que llevan una mayor carga de nutrientes, aunque por un período de tiempo relativamente corto. Para ello sería necesario tomar muestras simultáneamente de cada uno de los arroyos desde el momento en que empieza a llover.

La Tabla 1 muestra la variación que sufre la relación entre fósforo y nitrógeno indicando que los fosfatos son de alguna manera más persistentes que los nitratos. Para hallar respuestas satisfactorias a este hecho habría que realizar estudios más intensivos tanto sobre esta variación en la proporción P/N en el agua a lo largo de un período de tiempo determinado, como sobre los cambios relativos de fósforo y nitrógeno contenidos en el suelo.

Tipología de los tributarios

En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis de la varianza de las distintas variables medidas respecto a los diferentes tributarios y fechas de muestreo. En ella se observa cómo existen diferencias significativas ($p < 0,001$) entre los tributarios para las variables que definen las características intrínsecas del agua, es decir, pH, temperatura y conductividad, evidenciando que el agua que llevan no sólo proviene de la lluvia, sino que, en distinto grado para cada tributario, proviene del sistema hidrogeológico que alimenta al lago de Banyoles. Estas mismas variables no experimentan cambios significativos ($p > 0,05$) con la fecha de muestreo, refor-

Tabla 1. Proporción entre fosfatos y nitratos (P/N) pocas horas después de fuertes lluvias (14 de noviembre de 1988) y tras un período de un mes y medio sin lluvias (3 de enero de 1989).

Tributario	14 Nov. 88	3 Ene. 89
Lío	0,188	0,128
Morgat	0,048	0,293
Castellana	0,065	0,503
Marquès	0,724	0,390
Institut	0,130	0,073

Tabla 2. Análisis de la varianza de las distintas variables respecto a los diferentes tributarios y las fechas de muestreo.

Variable	Sig. de F entre tributarios	Sig. de F entre fechas
pH	p<0,001	p=0,013
Temperatura	p<0,001	p=0,021
Conductividad	p<0,001	p<0,001
Oxígeno	p=0,005	p=0,147
Flujo	p=0,045	p=0,001
Nitratos	p=0,257	p=0,017
Fosfatos	p=0,056	p=0,006

zando la idea de que las características físico-químicas del agua de los tributarios dependen en gran manera de su origen, independientemente de las condiciones externas, el cual establece las diferencias expresadas en la Fig. 4. El análisis de «cluster» se realizó a partir de las variables intrínsecas citadas anteriormente, que varían significativamente, y nos ofrece dos tipos distintos de agua: un grupo formado por Lió, Castellana, Marquès y Rector, otro formado por Morgat e Institut. Las aguas del primer grupo, aunque muestran un cierto gradiente de condiciones, tienen en común el ser fuertemente sulfatadas y de características similares a las que alimentan subterráneamente el lago. Por el contrario, las del segundo no lo son tanto, al recoger aguas de un pozo artesiano.

De lo expuesto anteriormente se puede deducir que los tributarios superficiales del lago de Banyoles presentan dos tipos de regímenes totalmente distintos. Por un lado se comportan como colectores de toda el agua de lluvia caída en la cuenca de recepción del lago (Brusi, 1985) y por otro tienen un aporte basal de agua, de cantidad variable según el tributario, cuyo origen es generalmente subterráneo. Las concentraciones de nitratos y fosfatos no varían significativamente de unos tributarios a otros, pero sí lo hacen en función de la fecha de muestreo, mostrando el efecto de las lluvias sobre el aporte de nutrientes al lago de Banyoles.

Implicaciones en el nivel trófico del lago de Banyoles

El fosfato tiende a formar compuestos muy insolubles con el calcio, cuando éste está en exceso, con valores para el logaritmo de K_s (constante de solubilidad) que van desde -27 hasta -55,6. (Stumm & Morgan, 1970). Teniendo en cuenta el quimismo del agua del lago de Banyoles, con concentraciones de Ca^{2+} de 350 mg.L⁻¹ (Abellà, 1980) se explica que el fosfato sea factor limitante para el desarrollo de la biomasa algal.

Las fuertes lluvias derivan en una importante carga de nutrientes como el fosfato, a través de los tributarios superficiales, que puede ser responsable de un in-

cremento sensible en el desarrollo de comunidades fitoplanctónicas. Paralelamente debe tenerse en cuenta que las lluvias afectan a la carga hidráulica y al tiempo medio de residencia (TMR) teórico. La disminución del TMR debido a las lluvias conlleva un descenso en la producción del lago, por lo que, en teoría, un exceso de precipitaciones rebajaría la carga de biomasa de los lagos, mientras que, por el contrario, las épocas secas registran niveles de producción muy superiores

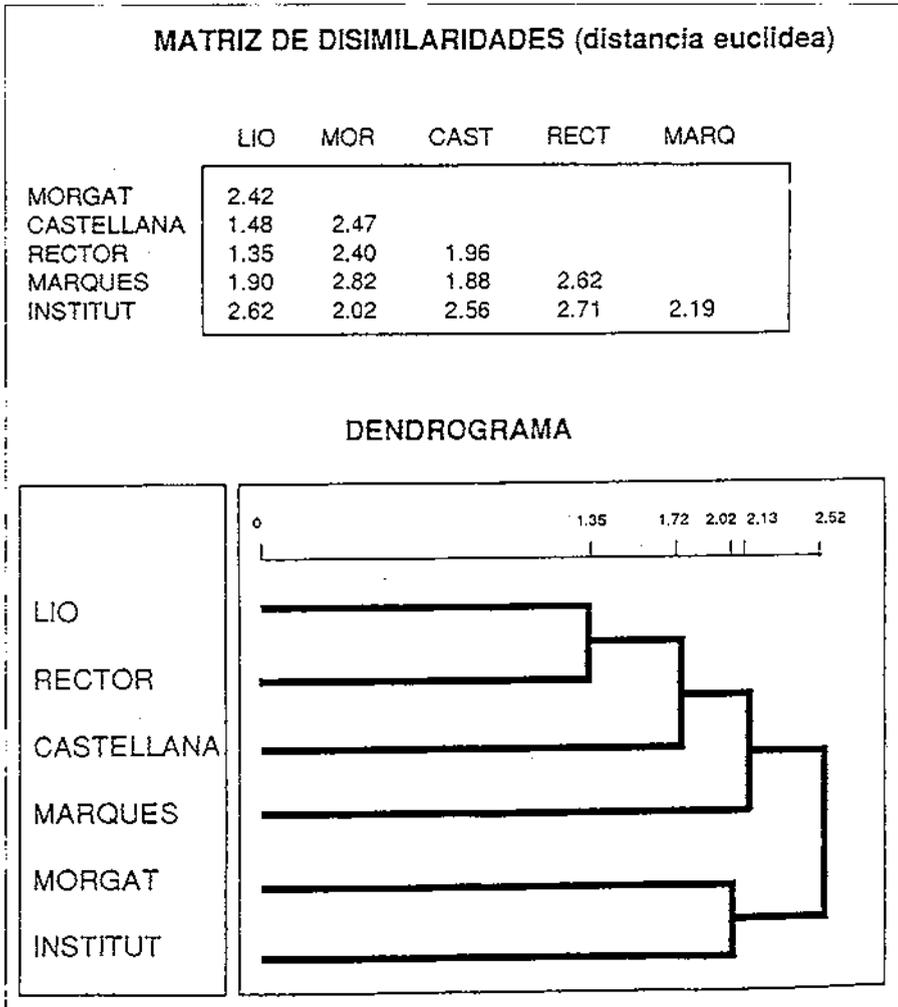


Figura 4. Matriz de disimilaridades y dendrograma correspondientes al análisis de cluster (véase texto). *Disimilarity matrix and dendrogramme corresponding to the cluster analysis (see text).*

(Hamm & Kucklantz, 1981). Ante esta presión externa representada por la carga de nutrientes, el sistema formado por el lago de Banyoles es capaz de responder amortiguando sus efectos mediante dos mecanismos distintos (Fig. 4). En primer lugar, el quimismo del agua (pH elevado y altas concentraciones de calcio) reducen extremadamente la concentración de fosfatos disponibles. A su vez, el tiempo de residencia media del agua en el lago de Banyoles oscila alrededor de un año, el cual es sin duda extraordinariamente alto a tenor del volumen del lago (16 Hm³ Moreno-Amich & García-Berthou, 1989). Por tanto, en el lago de Banyoles la carga de nutrientes se ve frenada por el quimismo del agua y por el aumento de la carga hidráulica. Este último solamente se hace efectivo dos veces al año como máximo, por lo que la mayor parte del año es el quimismo del agua el que amortigua esta carga de fosfatos.

Finalmente, cabe señalar que, aunque el aporte de nutrientes por los tributarios superficiales es el más aparente, no deben soslayarse las entradas de nutrientes a través de la filtración por el freático, las cuales se producen de forma continuada a diferencia de los tributarios estudiados en el presente trabajo. Hacen falta, pues, estudios que desarrollen técnicas de lísimetría para ver cuál es el peso específico de este aporte por filtración en la carga total de nutrientes del lago de Banyoles.

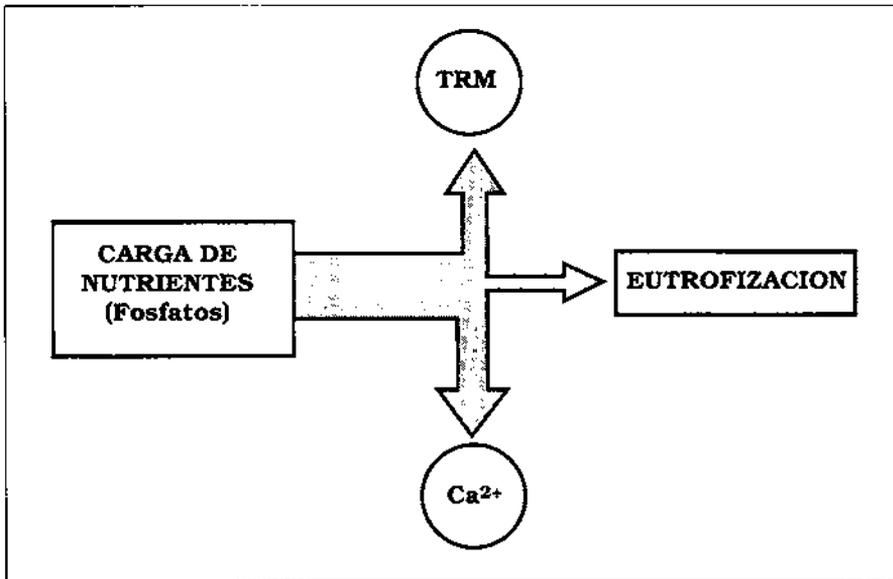


Figura 5. Respuesta del lago de Banyoles a la carga de nutrientes. Los círculos representan los factores intrínsecos que amortiguan y contrarrestan los efectos (véase texto). TMR: tiempo de residencia media del agua. *Response of Banyoles Lake to nutrient loadings. Circles represent intrinsic dimming factors of the lake (for more explanation see text). TMR: mean residence time of the water.*

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento al Excm. Ajuntament de Banyoles por las facilidades dispensadas para la realización de este trabajo y a Francesc Lleonsí por su colaboración en la recogida de muestras.

Bibliografia

- ABELLÀ, C. (1980). *Dinàmica poblacional comparada de bacterias fototróficas del Lago de Banyoles*. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona.
- ABELLÀ, C.A.; DUTRAS, A. & BRUNET, R.C. (1986). Balanç del fosfat soluble i dels paràmetres de contaminació bacteriològica a l'estany de Banyoles durant el període primavera-estiu de (1984). En: *Primeres Jornades sobre l'Estany de Banyoles*. Ajuntament de Banyoles. Diputació de Girona. 312 pp.
- ANNUAL BOOK FOR ASTM STANDARDS. (1981). Part 31. *Water*. American Society for Testing and Materials.
- BRUSI, D. (1985). *El Pla de Santa Maria dins el sistema hidrogeològic de Banyoles*. Tesina de Licenciatura. UAB.
- BRUSI, D. (1988). Caracterització geològica de l'acabament meridional del sistema hidrogeològic de Banyoles. *Quad. del Cent. d'Est. Comarcals de Banyoles*. 1986-1987: 147-169.
- FOWLKES, E.B.; GNANADESIKAN, R. & KETTENRING, J. R. (1988). Variable selection in clustering. *Journal of Classification*, 5: 205-228.
- GARCÍA-GIL, L.J.; BRUNET, R.C.; MONTESINOS, E. & ABELLÀ, C.A. (1985). Estudi comparatiu de l'evolució de la morfometria dels estanyols de la Riera Castellana (Banyoles): Estanyol Nou, Sisó i Brollador. *Scientia Gerundensis*, 11: 81-90.
- HAMM, A. & KUCKLENTZ, V. (1981). Effects of hydraulic load changes on the eutrophication of an alpine lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 21: 466-472.
- INOUE, Y.; IWAI, S. & IKEDA, S. (1981). Eutrophication of lake Biwa- Nutrient loadings and ecological model. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 21: 248-255.
- LINSKEY, R.K. (JR.); KOHLER, M.A. & PAULHUS, J.L.H. (1982). *Hydrology for engineers*. pp: 221-249. McGraw Hill.
- MALTHUS, T.J. & MITCHELL, S.F. (1988). Agricultural development and eutrophication of lake Mahinerangi, New Zealand. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 23: 1028-1031.
- MILLIGAN, G. W. & COOPER, M. C. (1988). A study of standarization of variables in cluster analysis. *Journal of classification*, 5: 181-204.
- MORENO-AMICH, R. & GARCIA-BERTHOU, E. (1989). A new bathymetric map based on echo-sounding and morphometrical characterization of the Lake of Banyoles. obtained by echosounding profiles. *Hydrobiologia.*, 185: 83-90.
- SANZ, M. (1985). Estudi hidrogeològic de la Conca de Banyoles/Garrotxa. *Quaderns del Centre d'Estudis Comarcals de Banyoles*, 1980-1984: 171-250.
- SNEATH, P.H.A. & SOKAL, R.R. (1973). *Numerical taxonomy*. W. H. Freeman and Co. San Francisco.
- SOKAL, R. R. & MICHENER, C. D. (1958). *A statistical method for evaluating systematic relationships*. Univ. Kansas Sci. Bull., 38: 1409-1438.
- SPSS INC. (1983). *SPSS[®] users guide*. Mc Graw-Hill Book Co. New York 806 pp.
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. (1970). *Aquatic chemistry*. Willey Interscience, N. Y., 583 pp.
- VILA, X.; TORRENT, C.; MORENO-AMICH, R. & ABELLÀ, C.A. (1987). Avaluació d'indicadors físico-químics de contaminació als recs de sortida de l'Estany de Banyoles. *Scientia Gerundensis*, 13: 53-64.