CALENTAMIENTO DIFERENCIAL DEL MONIMOLIMNION DE LA CUBETA III DEL LAGO DE BANYOLES. EFECTO DEL SEDIMENTO EN SUSPENSION.

Xavier CASAMITJANA y Elena ROGET

Departamento de Física y Institut d'Ecologia Aquàtica.
Col·legi Universitari de Girona. Universitat Autònoma de Barcelona
Hospital, 6. 17071 GIRONA.

Palabras clave: meromixis, temperatura, conductividad, sedimento.

SUMMARY

MONIMOLIMNION DIFERENTIAL HEATING OF BASIN III IN
BANYOLES LAKE. SUSPENDED SEDIMENT EFFECT.

Key words: meromixis, temperature, conductivity,
sediment.

The water of basin number III in Banyoles lake presents a special thermal stratification originated by crenogenic meromictic phenomena. At a depth of 18 m the temperature increases $1,5^{\circ}\text{C}$ in a layer where salinity increases too (monimolimnion). The heating of the monimolimnion can be originated by solar radiation or by incoming water from the underground which is at a higher temperature. The distribution of temperature and conductivity have been measured frequently during 45 days and it has been verified that the most important influence in the heating of the monimolimnion comes from underground incoming water.

INTRODUCCION

El presente trabajo se inscribe dentro de un estudio hidrodinámico más amplio del lago de Banyoles, muy conocido por la limnología española gracias a las contribuciones entre otros de PLANAS (1973), ABELLÀ (1980) y MARGALEF (1983). La presencia de sedimento en suspensión a partir de una cierta profundidad en unas regiones del lago conocidas como cubetas, unida a la existencia de fenómenos meromícticos en algunas de ellas dan al lago de Banyoles una notable especificidad desde el punto de vista estrictamente físico.

Una de las cubetas más interesantes es la conocida como Banyoles III, descrita por ABELLÀ (1980), donde podemos ver la evolución de la columna de agua a lo largo de un ciclo anual. Esta cubeta se encuentra situada en la orilla oriental del lago en una región en la cual dada su configuración batimétrica queda bastante aislada del régimen de corrientes

IV CONGRESO ESPAÑOL DE LIMNOLOGIA

Actas : 47-53

del resto del lago (ver figura I). La máxima profundidad observada es de 130 m pero la región donde se encuentra el sedimento en suspensión está alrededor de los 25,5 m de profundidad.

Entre el 5 de noviembre y el 17 de diciembre de 1986 se midieron a intervalos de 5 días los perfiles de temperatura y conductividad a lo largo de la cubeta. En la figura II se representan los correspondientes a la temperatura de los días 5 de noviembre y 10 de diciembre. En la figura III se representa el perfil de conductividades del día 5 de noviembre.

MATERIAL Y METODOS

La temperatura y la conductividad se han medido "in situ" con sondas conectadas a un termistor y a un conductivímetro ambos CRISON. La sensibilidad del primero es de $0,1^{\circ}\text{C}$, y la del segundo, en la escala utilizada es de 10 micro S./cm. Cuando ha sido necesario se ha utilizado una botella limnológica, tipo Ruttner para el muestreo. El coeficiente de extinción de la luz se ha medido con una fotocélula de Selenio especialmente sensible para la luz de la zona visible del espectro.

Figura I:
Mapa batimétrico de
la cubeta III según
ABELLÀ (1980).
Bathimetric map of
III basin according
to ABELLÀ (1980).

Figura II. Perfiles de temperatura correspondientes al día 5 de noviembre (a la izquierda), y al día 10 de diciembre (a la derecha) de 1986. Temperature profile on november 5th, 1986 (on the left) and december 10th, 1986 (on the right).

Figura III. Perfil de conductividades correspondiente al día 5 de noviembre de 1986. Conductivity profile on november 5th, 1986.

Figura IV. Variación del coeficiente de extinción de la luz con la profundidad. Variation of light extinction coefficient related to depth.

RESULTADOS**ESTRATIFICACION TERMICA Y QUIMICA DE BANYOLES III**

La estratificación térmica se caracteriza, además de por el epilimnion, termoclina e hipolimnion, por el hecho de presentar fenómenos de meromixis crenogénica. Así la existencia de una capa de agua altamente mineralizada, cuya conductividad roza los 2000 micro-S./ cm provoca un aumento de temperatura de 1,5 °C al llegar a los 18 m de profundidad. Es interesante observar que este fenómeno tiene lugar no sólo en la parte central de la cubeta, sino que se obtiene el mismo perfil de temperatura y conductividad en cualquier parte de ella. Este aumento de temperatura es bastante característico de los lagos meromícticos, como por ejemplo Ulmener Maar (RUTTNER, 1953), y de los lagos conocidos como heliotérmicos, como el lago Hot (ANDERSON, 1958). En Catalunya presenta también un comportamiento de este tipo la laguna costera de la Massona (ARMENGOL et al., 1981).

El agua más densa del monimolimnion retiene el calor con más facilidad dada su alta estabilidad provocada por su alto índice de salinidad. Este calor puede provenir bien de la radiación solar, bien de la energía geotérmica provocada por el calentamiento subterráneo del lago. En el caso de Banyoles III y como veremos más adelante la radiación solar puede despreciarse totalmente. Este hecho es bastante característico de nuestro lago y está íntimamente ligado a la dinámica del sedimento en suspensión.

A partir de los 25 m otro aumento brusco de temperatura tiene lugar con la llegada de la zona ocupada por el agua con material en suspensión. Aquí la temperatura sube 6,5 °C en pocos centímetros. La densidad aumenta bruscamente (de 1,000 hasta 1,200 g/cm³) manteniéndose prácticamente constante en la zona ocupada por el material en suspensión. El caudal de agua que entra a la cubeta y su velocidad, pueden calcularse conociendo la velocidad de sedimentación de las partículas que forman el material en suspensión, la porosidad y la superficie de la cubeta. Estos cálculos han sido ampliamente desarrollados para todas las cubetas (ver ROGET et al. 1987, en este mismo volumen). En el período de tiempo anteriormente citado la velocidad del agua cuando abandona la zona del material en suspensión es de $v = 0,001 \pm 0,0001$ cm/s. El perfil de conductividades (normalizado a 20°C) viene caracterizado por la presencia de un fuerte gradiente de conductividad (quemoclina), ya citado anteriormente, donde la conductividad aumenta desde 1150 hasta 1980 micro-S./ cm en un espacio de 150 cm aproximadamente. Con la llegada del agua con material en suspensión (25,5 m), la conductividad desciende hasta los 1680 micro S./cm, ya que la presencia del sedimento, que es un aislante eléctrico, disminuye la movilidad de los iones, y por tanto, su conductividad. Esta disminución de conductividad puede cuantificarse a través de la ley de ARCHIE (1942).

INFLUENCIA DE LA RADIACION SOLAR EN EL CALENTAMIENTO DEL MONIMOLIMNION

Las aguas de Banyoles son en general poco aptas para la penetración de radiación solar dada la turbiedad que presentan. Se ha medido el coeficiente de extinción de la luz en la época de la experiencia con una fotocélula sensible al espectro visible el cual será el responsable directo del calentamiento por radiación a partir de cierta profundidad (figura IV). La radiación media incidente en esta época (noviembre-diciembre) puede evaluarse a partir de los datos de PLANAS (1973) y tomarse del orden de $100 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Así, si en la relación de Lambert Beer $I = I_0 \exp(-kz)$, tomamos $I_0 = 100 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el valor de $kz = -\ln I/I_0$ correspondiente a 18 m, que según la figura IV resulta ser 12, obtenemos un valor de la intensidad de radiación $I = 6 \times 10^{-4} \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Si esta cantidad de calor se invierte en calentar el monimolimnion, que está entre los 18 y los 25 m, el aumento de temperatura que experimentaría dicho monimolimnion puede evaluarse por medio de la ley de conservación de la energía:

$$Q/A = \rho c h \Delta T$$

Es decir, el calor incidente por unidad de superficie es igual al producto de la densidad, el calor específico, la altura del monimolimnion y el incremento de temperatura. Si de esta expresión despejamos ΔT , obtenemos que el aumento de temperatura del monimolimnion en un día es:

$$\Delta T = 6 \cdot 10^{-4} \text{ cal cm}^{-2} / (1 \text{ g cm}^{-3} \times 1 \text{ cal g}^{-1} \text{ °C}^{-1} \times 700 \text{ cm}) = 10^{-6} \text{ °C}$$

Obsérvese que la altura del monimolimnion es de 7 m por estar comprendido entre los 18 y los 25 m. Los valores de la densidad del agua y del calor específico de ésta se han tomado igual a 1 g cm^{-3} y $1 \text{ cal g}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ respectivamente.

El ritmo de calentamiento del monimolimnion entre los días 5 de noviembre y 10 de diciembre fué de $0,24 \text{ °C}$ por semana por tanto el calentamiento por radiación puede ser totalmente despreciado.

INFLUENCIA DEL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN EN EL CALENTAMIENTO DEL MONIMOLIMNION

La temperatura a la que se encuentra la región ocupada por el material en suspensión aumentó desde el día 5 de noviembre que se encontraba a $17,6 \text{ °C}$ hasta $18,8 \text{ °C}$ el día 10 de diciembre de una manera prácticamente uniforme, a razón de $0,24 \text{ °C}$ por semana. Este calentamiento es exactamente el mismo que sufrió el monimolimnion, pasando también de $11,2 \text{ °C}$ el día 5 de noviembre a $12,4 \text{ °C}$ el día 10 de diciembre. Conviene resaltar el hecho de que esta coincidencia numérica puede ser meramente casual. Pero lo importante radica en que la dinámica de calentamiento del monimolimnion es la misma que la del sedimento en suspensión, contrariamente a la del epilimnion (comprendido entre los 0 y los 14 m), que en el mismo período de tiempo fue de constante enfriamiento, variando su temperatura desde los $15,8 \text{ °C}$ hasta los $12,5 \text{ °C}$, correspondiendo a una disminución de $0,66 \text{ °C}$ por semana.

DISCUSION

La aplicación de la ley de conservación de la energía ($Q = m c \Delta T$) permite evaluar la cantidad de calor necesaria para calentar el monimolimnion $0,24^{\circ}\text{C}$, multiplicando este valor por el volumen de agua en esta región $((66,8 \pm 11,8) \times 10^3 \text{ m}^3)$, su capacidad calorífica ($1 \text{ cal g}^{-1} \text{ cm}^{-3}$) y su densidad (1 g cm^{-3}), resultando:

$$Q_1 = (1,60 \pm 0,30) \times 10^{10} \text{ cal}$$

Para corroborar la hipótesis que apunta al calentamiento del monimolimnion debido al aporte energético del agua al abandonar el sedimento en suspensión calcularemos el calor cedido en una semana por el agua debido al enfriamiento que sufre al abandonar la región del sedimento. Si suponemos un flujo meramente advectivo, es decir si ignoramos por el momento la difusión, este calor puede evaluarse también a través del principio de conservación de la energía:

$$Q = (\rho c v \Delta T) A t$$

y será el producto de la densidad (1 g cm^{-3}), el calor específico ($1 \text{ cal g}^{-1} \text{ cm}^{-3}$), la superficie en la interfase agua - agua con sedimento ($669 \pm 276 \text{ m}^2$), la velocidad del agua ($0,001 \text{ cm s}^{-1}$), la variación de temperatura en la interfase ($6,5^{\circ}\text{C}$) y el tiempo (1 semana); este producto resulta ser:

$$Q_2 = (2,63 \pm 1,34) \times 10^{10} \text{ cal}$$

En el calentamiento del monimolimnion también intervendrá la difusión de calor. Para evaluarla necesitaremos calcular el valor de la conductividad térmica en la interfase agua - agua con sedimento, mediante el perfil de temperatura. Si ajustamos el perfil térmico en la interfase a la ecuación diferencial de la energía en estado estacionario:

$$(k/\rho c) \times (\partial^2 T / \partial z^2) = v (\partial T / \partial z)$$

obtenemos un valor de la conductividad: $k = 4,76 \times 10^{-3} \text{ cal } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ seg}^{-1}$, unas cuatro veces mayor que la conductividad térmica molecular del agua. Esta diferencia se explica por el hecho de que parte de esta conductividad es debida a la turbulencia, parte al sedimento, y parte a la propia conductividad molecular del agua. El flujo será el producto resultante de la conductividad por el gradiente de temperatura (ley de Fourier):

$$Q = k (dT/dx)$$

El valor de dT/dx en nuestro caso se obtiene de los perfiles de temperatura y vale: $0,54^{\circ}\text{C seg}^{-1}$. El calor resultante en una semana se obtendrá multiplicando el flujo anterior por el tiempo (una semana) y la superficie de la cubeta, resultando:

$$Q_3 = (1,05 \pm 0,53) \times 10^{10} \text{ cal}$$

El relativamente alto margen de error en estos cálculos se debe fundamentalmente a la dificultad en evaluar correctamente el área de la zona ocupada por el sedimento. No obstante es perfectamente compatible con los resultados el que $Q_2 + Q_3$ sea mayor que Q_1 , indicando que parte del calor entrante en el monimolimnion se ha empleado en calentar a éste y el resto se ha perdido de diferentes formas: por viscosidad, en las paredes de la cubeta o en la parte superior del monimolimnion que está cediendo calor continuamente al resto del lago.

BIBLIOGRAFIA

ABELLÀ, C. 1980. **Dinámica poblacional comparada de bacterias fotosintéticas planctónicas**. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

ANDERSON, G.C. 1958. Some limnological features of a shallow saline meromictic lake. **Limnol. Oceanogr.**, 3, 9: 259-270.

ARCHIE, G. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **A.I.M.E.**, 146, 54-62

ARMENCOL, J., COMIN, F.A., LOPEZ, P. 1981. Balance térmico anual de la laguna de la Massona (Alt Empordà, Girona). **Actas del primer congreso español de limnología**, 1: 7-16.

MARGALEF, R. 1983. **Limnología**. Ed. Omega. Barcelona: 1.010 pp.

PLANAS, M.D. 1973. Composición, ciclo y productividad del fitoplancton del lago de Banyoles. **Oecología acuática**, 1: 3-106.

RUTNERN, F. 1953. **Fundamentals of limnology**. University of Toronto Press. Toronto: 295 pp.