

DIFUSION VERTICAL Y ESTABILIDAD TERMICA EN UNA LAGUNA HIPEREUTROFICA

M. Alvarez Cobelas*; A. Rubio**; F.J. Acosta***

*Instituto de la Grasa y sus Derivados (CSIC). Avda. Padre García Tejero. 4. 41012 Sevilla.

**Centro de Investigaciones del Agua (CSIC). La Poveda, Arganda del Rey. Madrid.

***Dpto. de Ecología. Facultad de Biología. Universidad Complutense de Madrid.

Palabras clave: Vertical diffusion, thermal stability, solar radiation, density currents, hypertrophic lake.

ABSTRACT

VERTICAL DIFFUSION AND THERMAL STABILITY IN A HIPERTROPHIC LAKE

Thermal stability and vertical diffusion of heat in the thermocline have been studied during the stratification period of 1984 (June, 14th up to September, 5th) in a hypertrophic gravel pit lake close to Madrid (Spain). Stability, measured by means of Brunt-Väsälä frequency, decreased as stagnation proceeded, showing a negative correlation with incident solar radiation. Richardson number in the first metre layer was always higher than 0.25, also indicating thermal stability. Average fraction of temperature change in the thermocline due to radiation only accounted for 14% out of the total. Vertical distribution of Brunt-Väsälä frequency in the thermocline showed an inverse correlation with depth, but not in bottom layers, where solids because of density currents, increased stability values. Thermocline was slowly eroding, its entrainment rate into epilimnion being 6.8×10^{-8} m./sec. $^{-1}$; there was a negative correlation between the upper thermocline level and the incident solar radiation. Thermal diffusion in the vertical column of the thermocline showed a high variability, increasing mostly at bottom layers. They were sometimes very close to molecular conductivity. A negative correlation between stability and eddy diffusivity was demonstrated, differing its slope from heating to cooling period.

When heating vertical turbulence could partly be due to processes other than diffusion (bottom density currents) whereas «casca-de» processes from large-scale horizontal turbulence were likely to be the main cause of turbulence when cooling.

INTRODUCCION

No toda la energía que hace funcionar un ecosistema acuático estancado pertenece a la banda del visible. El calor y la eólica –careciendo de incidencia directa sobre los organismos– son fundamentales en la dinámica cíclica circulación/estratificación. Este hecho es un lugar común en los libros de texto, pero el número de estudios concretos sobre él no abunda. Una de las manifestaciones de la interacción entre ambas energías es la turbulencia, importante tanto en sí misma como por su influencia sobre los seres vivos. Se sabe que en una masa de agua estratificada el transporte vertical de calor predomina sobre el horizontal en y debajo de la termoclina (Schmidt, 1925). Este es el motivo por el cual se acostumbra a estudiar la difusión turbulenta en el clinolimnion utilizando como trazador la temperatura. La estabilidad térmica sí puede conocerse en toda la columna de agua, puesto que depende del gradiente vertical de densidades.

El objetivo del presente trabajo es la observación

del comportamiento térmico y de la dinámica turbulenta en la termoclina de la laguna El Porcal, cercana a Madrid. Que sepamos, el único trabajo realizado en nuestro país que presenta puntos de contacto con este es el de Margalef & Andreu (1958) en la ría de Vigo. Sin embargo, nos gustaría recalcar el interés de estudios físicos en Limnología como –en su modestia– el presente, puesto que ayudan a comprender mejor términos tan poco precisos como *turbulencia* y su ejecución no resulta económicamente costosa.

METODOS

Una descripción de El Porcal puede encontrarse en Alvarez Cobelas et al., (1985). Hemos empleado la metodología de Jassby & Powell (1975) para conocer la difusión vertical del calor en cada capa de termoclina e hipolimnion. Los datos de base proceden de perfiles térmicos realizados con un termistor YSI-57 al menos una vez por semana en una de las zonas

Limnética 2: 1-9 (1986)

O Asociación Española de Limnología, Madrid. Spain

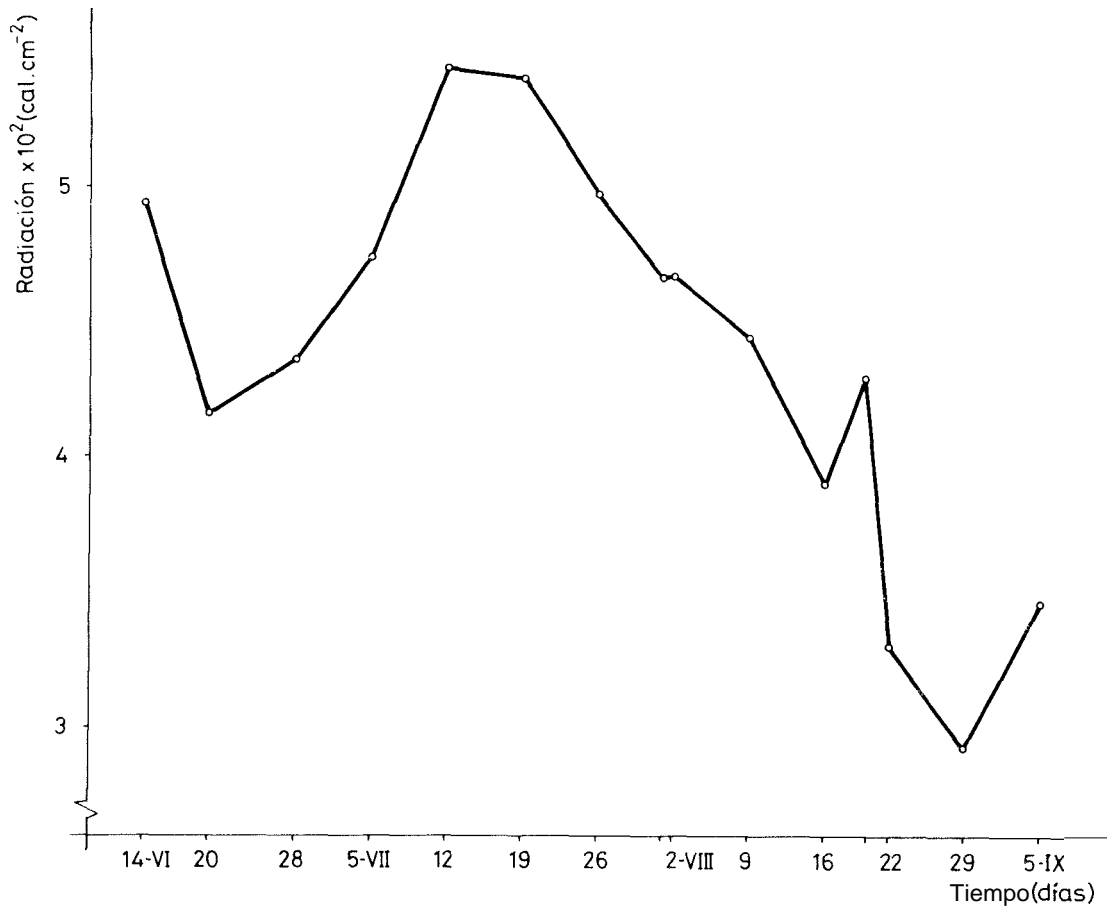


Figura 1.—Radiación solar incidente durante la estratificación de 1984 en la laguna El Porcal.
Incident solar radiation during 1984 stratification on El Porcal lake.

más profundas (seis metros) de la laguna El Porcal, casi siempre a la misma hora, durante la estratificación de 1984. Consideramos que existe estratificación térmica cuando se produce una variación de temperatura de 1°C. m⁻¹; este valor es arbitrario, pero es el más usado en la bibliografía; el límite superior de la termoclina correspondería al primer metro donde se produjera ese gradiente. Paralelamente en los muestreos se midió la radiación visible en el agua con un fotómetro Li-Cor 188B dotado de un sensor esférico y se tomó agua a distintas profundidades en toda la columna a fin de determinar su residuo seco a 110°C. Esta cifra se utilizó para corregir la densidad debida a las variaciones de temperatura. Los datos de radiación total incidente pertenecen al año precedente (1983) y fueron tomados mediante un piranómetro localizado sobre un plano inclinado en la Estación Experimental de Energía Solar del C.S.I.C., sita a 5

Km. de la laguna. La radiación sobre el plano horizontal se calculó empleando las fórmulas de Duffie & Beckman (1980). Se han realizado varias «jidos» entre los escasos datos existentes para el año 1984 y los del año anterior, tanto para las distintas horas del día como para dos periodos temporales comunes, con resultado carente de significación estadística; previamente, las radiaciones del año 1983 se habían promediado para conjuntos de cinco días centrados en cada fecha de interés al objeto de eliminar variabilidad.

Otros datos necesarios para calcular la difusión vertical fueron: ángulo cenital, ángulo horario, ángulo de refracción del agua (fórmulas dadas en Brock, 1981), el albedo (Gates, 1980), la latitud (40°18'), el área de cada sección vertical (estimada a partir de la morfometría, Alvarez Cobelas et al., 1985), el índice de refracción ($n = 1,333$; Hutchinson, 1957), la fracción de energía incidente debida a cada banda del es-

pectro y los coeficientes de extinción en el agua para cada banda (tabla 1). El porcentaje del cambio de temperatura debido a la radiación incidente se ha estimado también con la fórmula mencionada en Jassby & Powell (1975). Además en todos los cálculos se han supuesto errores de medida del 10% del valor original, tanto en la radiación como en la temperatura, obteniéndose estimaciones en torno al 10%.

La estabilidad térmica se ha considerado análoga a la frecuencia de Brunt-Vasala. La tasa de erosión de la termoclina ((vertical entrainment rate)) se ha calculado según el método de Blanton (1973). Finalmente se dispone también de valores del número de Richardson para el primer metro de profundidad, obtenidos a partir de la frecuencia de Brunt-Väsälä y de medidas de la velocidad del agua siguiendo el método de Hrbáček & Straskraba (1966).

RESULTADOS

Los datos utilizados como medida de la radiación incidente se representan en la figura 1. La termoclina quedó bien establecida hacia el 14 de junio de 1984 (figura 2). Fechas más tarde puede apreciarse la existencia de un breve hipolimnion, desvanecido al poco tiempo y ocupado por la termoclina hasta el final de la estratificación.

La correlación entre la profundidad superior de la termoclina y el tiempo es significativa ($r = 0,93$ $p < 0,05$); la velocidad de erosión de aquella fue de $6,8 \cdot 10^{-8}$ m. seg^{-1} ($0,5$ cm. día^{-1}). Existe una correlación inversa mucho menor que la anterior de la profundidad superior de la termoclina con la radiación incidente ($r = 0,44$ $p < 0,1$). La estructura térmica vertical es compleja, puesto que pueden discriminarse zonas más densas no ligadas directamente a la termoclina (figura 2). Obsérvese sin embargo, que la estratificación no presentaba demasiada resistencia a la mezcla. ya que los vientos persistentes -pero no muy intensos- pueden homogeneizar con facilidad la columna vertical (días 26-VII, 1, 9 y 29-VIII). La estratificación estricta, gradiente térmico igual o superior a $1^{\circ}\text{C. m}^{-1}$, desapareció hacia comienzos de septiembre.

En la figura 3 se indican las temperaturas por capas. A medida que se desciende, el máximo se alcanza más tarde. Las tasas de calentamiento son muy parecidas en los cuatro primeros metros, pero disminuyen hacia el fondo (tabla 2). Por el contrario, las tasas de enfriamiento parecen más uniformes, menos en los dos primeros metros donde pequeñas variaciones en la radiación incidente condicionan decisivamente la pérdida de calor. El cambio de temperatura en la termoclina debido a la radiación muestra, como era de esperar, una relación inversa con la profundi-

dad (tabla 3), pero en promedio no es muy elevado ($14 \pm 17\%$)

La estabilidad vertical, medida según la frecuencia de Brunt-Vasala, muestra una tendencia a aumentar con la profundidad, excepción hecha de la zona más próxima al fondo (tabla 4). Su promedio es $2,7 \pm 2,0 \times 10^{-3}$ seg^{-2} . Para toda la columna vertical su correlación con el tiempo es significativa (figura 4). El número de Richardson, calculado para el primer metro de profundidad, no ofrece tendencia alguna (tabla 5) aunque en alguna ocasión se acerca a los valores umbral de inestabilidad ($0,25$: días 1 y 29 de agosto).

Por último en la tabla 6 se representan los valores del coeficiente de difusión turbulenta vertical en y bajo la termoclina; a todos ellos se les ha descontado $0,12 \times 10^{-2}$ $\text{cm}^2 \text{seg}^{-1}$, correspondiente a la conductividad molecular (Grote, 1934). El promedio es $1,29 \pm 2,28 \times 10^{-2}$ $\text{cm}^2 \text{seg}^{-1}$. Obsérvese que en varias ocasiones los valores son casi nulos, lo cual indica que en esas capas el transporte de calor se debe casi exclusivamente a la conducción molecular. La correlación entre los datos de la frecuencia de Brunt-Väsälä y los de la difusión turbulenta vertical (transformación log-log) resulta estadísticamente significativa ($r = -0,47$ $p < 0,05$) -figura 5-.

DISCUSION

La dinámica térmica de un lago durante su fase de estratificación se halla sometida a muchos factores que interactúan de manera, a menudo, muy compleja (Mortimer, 1974). En el caso de la laguna de El Porcal hay tres decisivos para comprender dicha dinámica: la somera profundidad media (3 metros, Alvarez Cobelas et al., 1985), la escasa protección respecto al viento (Alvarez Cobelas et al., 1985) y el hecho de que se estuviera extrayendo mineral de la laguna durante el periodo de estudio. Los dos primeros factores determinan la rapidez de homogeneización térmica en la columna vertical tras un periodo breve de vientos persistentes ligado a una disminución de la radiación incidente. Estas fases de enfriamiento convectivo se intercalan dentro de la fase de estratificación con otras de calentamiento y todo ello en el marco de una destrucción paulatina del estancamiento. La radiación contribuye en sí misma relativamente poco al calentamiento de la termoclina (14% en promedio), debiéndose ésta en buena parte a la difusión turbulenta del calor desde las capas superiores. Este hecho es un efecto de la exposición al viento: en otros lagos más protegidos (Castle lake, por ejemplo, Jassby & Powell, 1975) el porcentaje es muy superior. Queremos señalar aquí la importancia que tiene la enorme cantidad de materia particulada presente en el epilimnion de El Porcal (unos 300 mg. l^{-1} , datos inéditos).

BANDA (nm.)	PORCENTAJE	EXTINCIÓN (m^{-1})
UV	2 §	0,68 §
Visible	46 §	Estimada en cada muestreo
700-770	8 ç	1,46 ç
770-800	4 ç	2,26 ç
800-860	6 ç	3,38 ç

Tabla 1.-Fracción de la energía incidente que llega a la superficie del agua debida a cada banda del espectro y extinción de cada una en el agua. No se indican las longitudes de onda superiores a 860 nm. porque su extinción es muy elevada. §: según Jassby & Powell (1975); §: según Talling (1957); ç: según Collins (1925).

Percentage of incident solar energy associated with each band and their extinction coefficients in water. Wavelengths higher than 860 nm. are not considered because their water extinction is too great. §: according to Jassby & Powell (1975); §: according to Talling (1957); ç: according to Collins (1925).

	1 mt.	2 mt.	3 mt.	4 mt.	5 mt.	6 mt.
Tasa de calentamiento ($^{\circ}C. día^{-1}$)	0,160	0,168	0,152	0,157	0,105	0,075
Tasa de enfriamiento ($^{\circ}C. día^{-1}$)	0,052 0,090 ç	0,023 0,053 ç	0,044	0,039	0,040	0,042

Tabla 2.-Tasas de calentamiento y enfriamiento por capas de agua durante el periodo de estudio. ç: medida hasta el 29-VIII, la semana siguiente vuelve a ascender la temperatura por aumento de la radiación incidente.

Heating rates and cooling rates for each water layer in the period under study. ç: measured up to 29-VIII, water temperature increases in the following week as a result of increasing incident solar radiation.

Fecha	1 mt.	2 mt.	3 mt.	4 mt.	5 mt.	6 mt.
14-VI	40,71	19,37	10,42	7,62	3,54	1,72
20-VI		24,94	9,39	5,67	3,02	1,82
28-VI	68,16	39,79	15,00	6,46	3,51	5,08
5-VII			12,24	8,40	4,86	2,42
12-VII			18,84	6,08	22,49	11,21
19-VII	ç	99,59	ç	24,04	4,44	3,69
26-VII					42,15	10,06
1-VIII					22,04	10,91
2-VIII		12,96	27,99	11,92	5,49	2,72
9-VIII						8,28
16-VIII			ç	9,67	3,42	1,80
20-VIII		ç	33,75	7,14	19,45	9,15
22-VIII				15,94	7,20	1,68
29-VIII						10,76
5-IX			13,91	9,57	6,38	3,68

Tabla 3.-Porcentaje del cambio de temperatura en termoclina e hipolimnion debido a la radiación incidente durante la estratificación de 1984 en la laguna El Porcal. ç: los valores son superiores al 100% debido a los errores sistemáticos y del azar mencionados en la sección de Métodos.

Percentage of the temperature change due to incident solar radiation at thermocline and hypolimnion during 1984 stratification in El Porcal lake. ç: values are greater than 100% due to random and systematic errors mentioned in the Methods section.

Fecha	1 mt.	2 mt.	3 mt.	4 mt.	5 mt.	6 mt.
14-VI	1,94	6,41	2,33	2,23	0,87	2,13
20-VI	2,62	3,40	3,01	2,91	2,42	1,26
28-VI	1,55	7,77	3,20	3,20	2,91	2,91
5-VII	1,45	2,33	2,13	4,66	3,88	3,20
12-VII	0,29	0,68	3,01	4,76	5,24	3,88
19-VII	0,38	4,95	4,08	3,40	5,44	4,37
26-VII	1,16	2,49	1,26	2,42	6,12	3,01
1-VIII	0,29	0,19	3,69	3,10	7,77	4,66
2-VIII	1,84	2,13	2,23	3,10	7,77	4,66
9-VIII	1,84	0,29	0	0	0	5,53
16-VIII	1,45	4,17	2,23	0,97	0,97	1,65
20-VIII	0	2,91	2,04	1,45	2,23	2,62
22-VIII	0,68	2,91	1,06	2,91	2,33	2,13
29-VIII	0,09	0,38	0,68	0,38	1,65	2,52
5-IX	9,91	0,58	5,63	6,80	2,72	4,37

Tabla 4.-Frecuencia de Brunt-Väsälä ($\times 10^{-3} \text{ seg.}^{-2}$) durante la estratificación de 1984 en la laguna El Porcal
Brunt-Väsälä frequency ($\times 10^{-3} \text{ seg.}^{-2}$) during 1984 stratification of El Porcal lake.

Fecha	Número de Richardson
14-VI	4,85
20-VI	
28-VI	62,00
5-VII	58,00
12-VII	0,72
19-VII	15,52
26-VII	2,90
1-VIII	0,32
2-VIII	
9-VIII	4,60
16-VIII	3,60
20-VIII	
22-VIII	
29-VIII	0,24
5-IX	506,00

Tabla 5.-Número de Richardson en el primer metro de agua durante el periodo de estudio
Richardson number in the first 1 metre layer during the period under study.

Fecha	1 mt.	2 mt.	3 mt.	4 mt.	5 mt.	6 mt.
14-VI	2,93	0,20	0,01	0,48	5,83	3,90
20-VI		1,69	0,13	0,01	0,02	2,55
28-VI	5,40	0,22	0,01	0,14	0,49	2,00

Tabla 6.-Difusión térmica turbulenta ($\times 10^{-1} \text{ cm.}^2 \text{ seg.}^{-1}$) en la columna vertical de termoclina e hipolimnion durante la estratificación de 1984 de la laguna El Porcal.
Vertical thermal eddy diffusivities ($\times 10^{-1} \text{ cm.}^2 \text{ sec.}^{-1}$) at thermocline and hypolimnion of El Porcal lake during 1984 stratification.

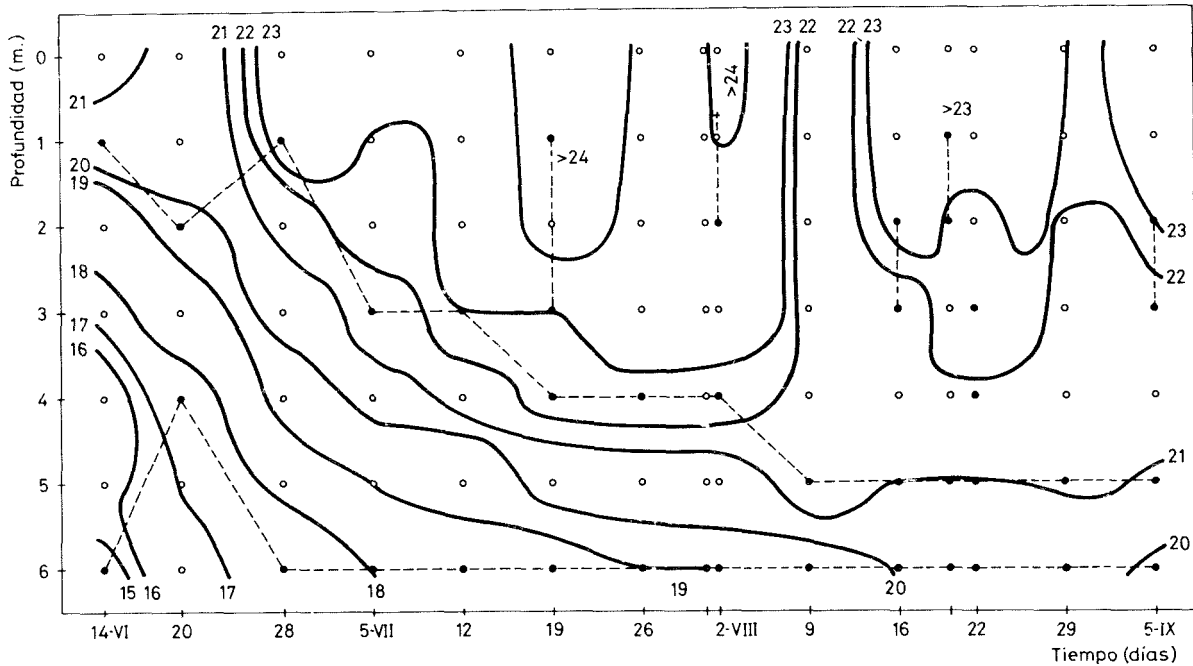


Figura 2.-Distribución de la temperatura en la columna vertical durante la estratificación de 1984 en la laguna El Porcal. (---) indica gradientes superiores a $1^{\circ}\text{C. m}^{-1}$.

Water temperature in the vertical column during 1984 stratification in El Porcal lake. Dashed lines indicate temperature gradients higher than $1^{\circ}\text{C. m}^{-1}$.

tos), puesto que absorbe una proporción muy elevada de la radiación incidente hasta el extremo de que se podría haber prescindido de ese dato para calcular la difusión térmica vertical, como hace Rippey (1983) basándose en condiciones similares. Debe recalarse que en algunas ocasiones la difusión vertical no fue turbulenta, sino molecular; este fenómeno de transporte térmico también se ha detectado en otros lagos (Cowhill, 1967), aunque casi siempre de forma episódica (Jassby & Powell, 1975). Los valores de la difusión turbulenta muestran bastante dispersión comparados con los referidos para otros lagos (Quay et al., 1980), pero se encuentran dentro de la amplitud mencionada en la literatura (Hutchinson, 1957; Denman & Gargett, 1983).

Otro mecanismo de transporte de calor que probablemente actúe en El Porcal es el de las corrientes de densidad. Tanto Hutchinson (1941) como Cowhill (1970) las mencionan para dos ciclos anuales distintos en Linsley Pond durante la fase de estancamiento bajo el hielo y aquél sugiere que también podrían desarrollarse en verano, aunque Mortimer (1974) indica que este fenómeno sólo se produce en lagos protegidos respecto al viento. La causa de dichas corrientes es la anoxia en las capas profundas que libera sustan-

cias del sedimento y hace aumentar la densidad, provocando un movimiento a favor de la gravedad hacia zonas más profundas. Quizá ese fenómeno se produzca en El Porcal, teniendo en cuenta la carencia de oxígeno experimentada durante toda la estratificación (Rubio, datos inéditos), pero además el hecho de que estuvieran extrayendo mineral durante el periodo abarcado por este estudio provocó un aumento considerable de la materia en suspensión (Rubio, datos inéditos) cuyo movimiento cerca del fondo -se sabe que existen corrientes apreciables en el hipolimnion de los lagos (Imboden et al., 1983)- contribuyó seguramente al transporte de calor. Este es el motivo probable del escaso número de correlaciones significativas entre la frecuencia de Brunt-Väsälä y la profundidad que debieran ser negativas como suele ocurrir en los lagos donde se ha estudiado esta frecuencia con detalle (Jassby & Powell, 1975). No han podido estudiarse las secas y por ello no se ha comprobado el transporte de calor debido a ellas, pese a que Idso & Cole (1973) lo suponen importante en lagos expuestos al viento.

Salvo los episodios de enfriamiento ya descritos, la pauta de estratificación observada es la normal en lagos templados (Hutchinson, 1957); sin embargo, la

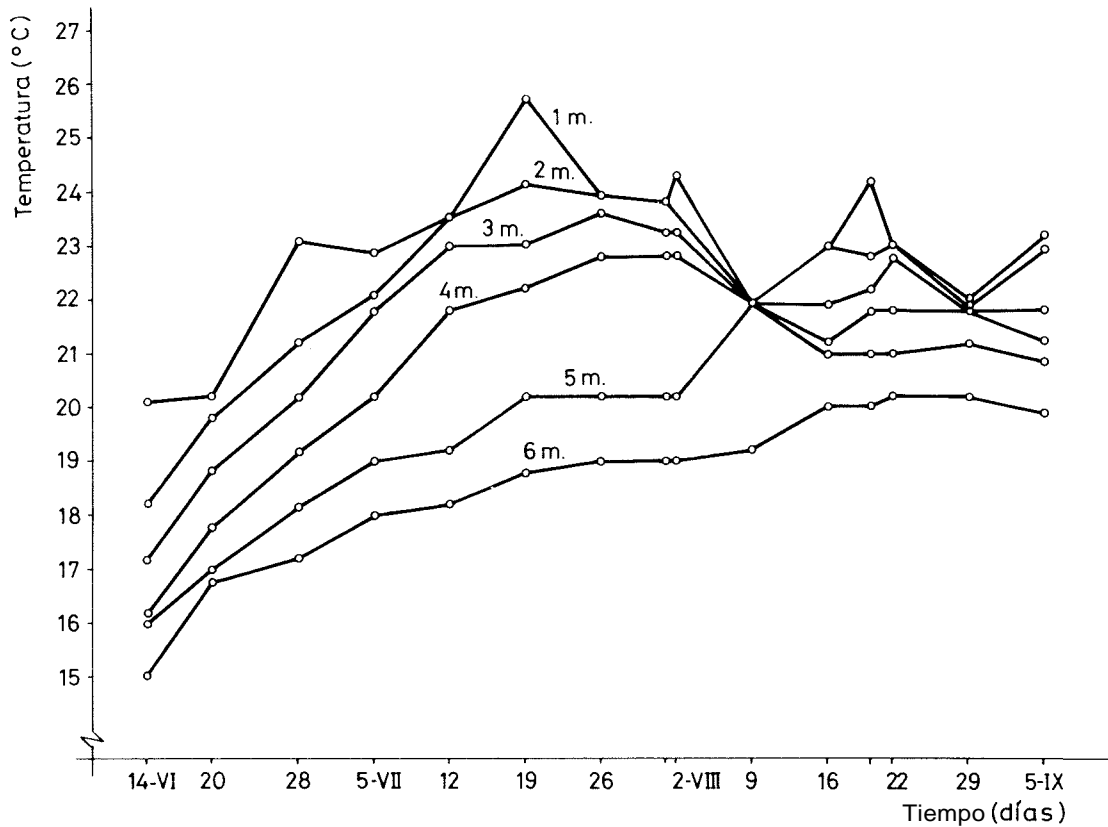


Figura 3.-Evolución temporal de la temperatura del agua por capas durante la estratificación de 1984 en la laguna El Porcal. Time course of water temperature for each layer during 1984 stratification in El Porcal lake.

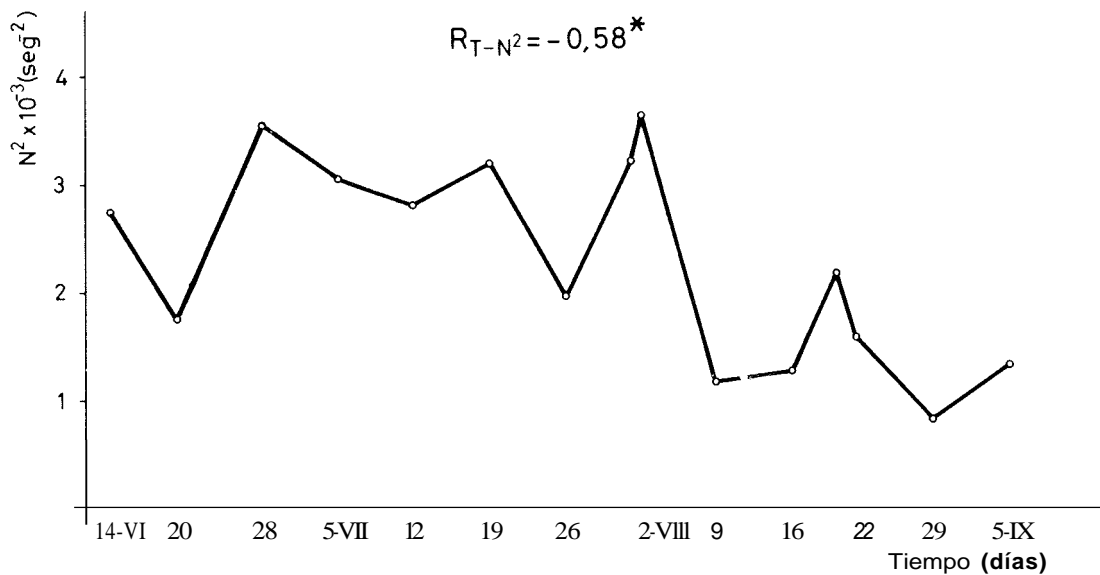


Figura 4.-Variación temporal de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2) para toda la columna vertical durante la estratificación de 1984 en la laguna El Porcal. $R =$ correlación entre dicha frecuencia y el tiempo; * = estadísticamente significativa $p < 0.05$. Brunt-Väisälä frequency (N^2) of the water column plotted against time during 1984 stratification at El Porcal lake. $R =$ correlation between such a frequency and time; * = statistically significant at $p < 0.05$.

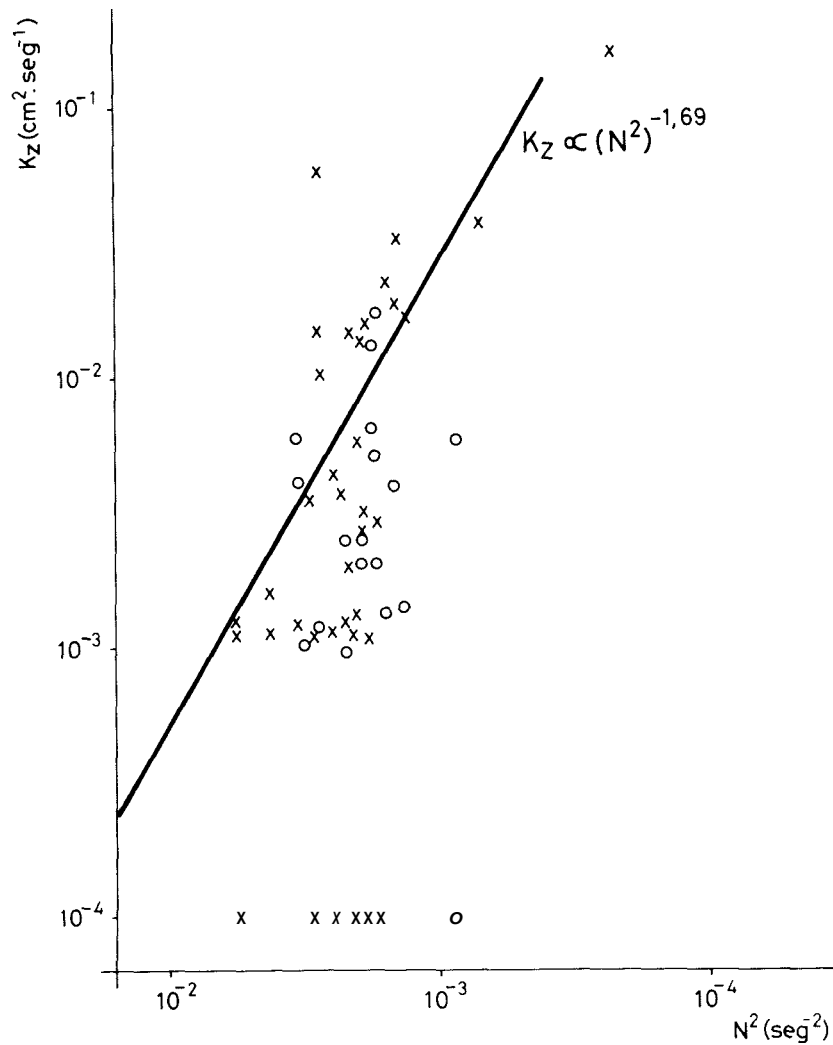


Figura 5.—Relación logarítmica entre la difusión turbulenta vertical del calor (K_z) y la frecuencia de Brunt-Väsälä (N') para la estratificación de 1984 en la laguna El Porcal. *: valores durante la fase de calentamiento; o: valores durante la fase de enfriamiento. Log-log plot of vertical thermal eddy diffusivity (K_z) vs. Brunt-Väsälä frequency for the whole 1984 stratification at El Porcal lake. *: values during heating period; o: values during cooling period.

complejidad de la estructura vertical de la densidad provoca a veces la existencia de capas de estabilidad pequeña o nula (tabla 4) cuyo efecto sobre la difusión turbulenta en la termoclina debe ser importante, aunque difícil de cuantificar. La velocidad de erosión de aquella se halla dentro de las predicciones de Blanton (1973), tanto en relación con la estabilidad térmica como con la profundidad promedio. Las tasas de calentamiento y enfriamiento, muy elevadas, podrían ser debidas al importante efecto del viento sobre el calentamiento de la termoclina y al efecto de la disminución de la radiación incidente (asociada proba-

blemente a procesos convectivos) sobre el enfriamiento de la misma, respectivamente.

En este estudio se ha comprobado una correlación estadísticamente significativa entre la estabilidad térmica y la difusión turbulenta en la columna vertical. La relación entre ambas es distinta según se trate de la fase de calentamiento (pendiente ≈ 2) o de enfriamiento (pendiente ≈ 1). Si se sigue el análisis teórico de Welander (1968) los procesos difusivos debidos a la disipación energética del viento serían los responsables de la turbulencia durante la segunda fase citada, mientras que en el calentamiento la turbulencia

en y debajo de la termoclina no sería fundamentalmente efecto de procesos difusivos, sino quizá de las corrientes de densidad; de hecho, si se eliminan los valores próximos al fondo, el coeficiente de regresión para todo el muestreo resulta ser la unidad. Debe señalarse, sin embargo, que las condiciones impuestas por el autor sueco en su trabajo son demasiado restrictivas para El Porcal, por lo cual todas estas explicaciones habrán de acogerse con reservas. Tanto Rippey (1983) como Imboden et al., (1983) obtienen regresiones no interpretables mediante los criterios de Welander.

AGRADECIMIENTOS

Marcelo Izquierdo nos ha proporcionado los datos de radiación incidente e instruido sobre su uso.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez Cobelas, M.; Rubio, A.; Araúzo, M.; Alarcón, P.; Alario, V. 1985. Morfometría y composición química de una laguna de gravera. *Actas III Congr. Esp. Limnol.*
- Blanton, J.O. 1973. Vertical entrainment into the epilimnia of stratified lakes. *Limnol. Oceanogr.* 18: 697-704.
- Brock, T.D. 1981. Calculating solar radiation for ecological studies. *Ecol. Modelling* 14: 1-19.
- Collins, J.R. 1925. Infrared absorption spectrum of water; variation with temperature. *Phys. Rev.*, 26: 771-779.
- Cowhill, U.M. 1967. Heat transfer solely by molecular conduction in the metalimnion. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 57: 198-200.
- Cowhill, U.M. 1970. The hydrogeochemistry of Linsley Pond, North Brandford, Connecticut. I. Introduction, field work and chemistry by X-ray emission spectroscopy. *Arch. Hydrobiol.*, 68: 1-95.
- Denman, K.L. & Gargett, A.E. 1983. Time and space scales of vertical mixing and advection of phytoplankton in the upper ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 28: 801-815.
- Duffie, J.A. & Beckman, W.A. 1980. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley Interscience, New York. 762 pp.
- Gates, D.M. 1980. *Biophysical Ecology*. Springer Verlag, New York. XXIII, 611 pp.
- Grote, A. 1934. *Der Sauerstoffhaushalt der Seen*. Die Binnengewasser, XIV. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, VIII, 217 pp.
- Hrbáček, J. & Straskraba, M. 1966. Horizontal and vertical distribution of temperature, oxygen, pH and water movements in Slapy reservoir (1958-1960). *Hydrobiol. Stud.*, 1: 7-40.
- Hutchinson, G.E. 1941. Limnological studies in Connecticut. IV. The mechanism of intermediary metabolism in stratified lakes. *Ecol. Monogr.*, 11: 21-60.
- Hutchinson, G.E. 1957. *A treatise on Limnology. Volume I. Geography, Physics, and Chemistry*. J. Wiley & Sons, Inc., New York. XIV, 1.015 págs.
- Idso, S.B. & Cole, G.A. 1973. Studies on a Kentucky Knobs Lake. V. Some aspects of the vertical transport of heat in the hypolimnion. *J. Ecol.*, 61: 413-420.
- Imboden, D.M.; Lemmin, U.; Joller, T.; Schurter, M. 1983. Mixing processes in lakes: mechanisms and ecological relevance. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 45: 11-14.
- Jassby, A. & Powell, T. 1975. Vertical patterns of eddy diffusion during stratification in Castle Lake, California. *Limnol. Oceanogr.*, 20: 530-543.
- Margalef, R. & Andreu, B. 1958. Componente vertical de los movimientos del agua de la ría de Vigo y su posible relación con la entrada de la sardina. *Inv. Pesquera*, 11: 105-126.
- Mortimer, C.H. 1974. Lake hydrodynamics. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* 20: 124-197.
- Quay, P.D.; Broecker, W.S.; Hesslein, R.H.; Schindler, D.W. 1980. Vertical diffusion rates determined by tritium tracer experiments in the thermocline and hypolimnion of two lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 25: 201-218.
- Rippey, B. 1983. The physical limnology of Augher Lough (Northern Ireland). *Freshwater Biology*, 13: 353-362.
- Schmidt, W. 1925. *Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Probleme der kosmischen Physik*, 7. H. Grand, Hamburg. VIII, 118 pp.
- Talling, J.F. 1957. Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton Diatoms in relation to underwater radiation. *New Phytol.*, 56: 29-50.
- Welander, P. 1968. Theoretical forms for the vertical exchange coefficients in a stratified fluid with application to lakes and seas. *Acta Reg. Soc. Sci. Litt. Gothoburgensis, Geophys.*, 1: 1-26.