

EL EMBALSE DE EL VELLÓN EN 1983. FACTORES FÍSICOS

M. ALVAREZ COBELAS, A. RUBIO OLMO¹, J. L. VELASCO DÍAZ y M. ARAÚZO SÁNCHEZ

RESUMEN

Se ha realizado un estudio físico del embalse de El Vellón (Madrid) durante 1983. Las corrientes subsuperficiales, a un metro de profundidad, fueron superiores durante la mezcla que durante la estratificación. La penetración de la luz en el agua fue superior durante la estratificación. La extinción de la misma se debió más, en promedio, a las partículas en suspensión que a la clorofila «a» del fitoplancton. El embalse fue monomítico, almacenando calor de marzo a agosto y liberándolo posteriormente. El balance térmico anual ascendió a unas $10 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$ en 1983, pero globalmente el embalse perdió calor en dicho año. La radiación fue más importante que el viento como causa de turbulencia en la termoclina y en el hipolimnion, aunque la conducción molecular del calor fue un fenómeno frecuente en ambas zonas. La turbulencia pudo ser debida directamente a procesos locales dependientes de la distribución vertical de las corrientes.

INTRODUCCION

Tras muchos años de primarse el análisis de la química para la interpretación de la dinámica de los organismos en las masas de agua, comienza a darse a los factores físicos la importancia que merecen en dicha interpretación (LEGENDRE & DEMERS, 1984). No es nuestro deseo sustituir aquí la química por la física como marco interpretativo de los procesos ecológicos que suceden en el agua, sino señalar su complementariedad.

Por ello, hemos estudiado algo más pormenorizadamente de lo habitual en nuestro país la física del agua en el embalse de El Vellón (Madrid) durante un ciclo anual: 1983. Dicho embalse ya ha sido objeto de otros estudios previos, pero apenas se ha considerado desde el punto de vista físico (véanse MARGALEF *et al.*, 1977; ALVAREZ COBELAS, 1982; ALVAREZ COBELAS *et al.*, 1983; ALVAREZ COBELAS *et al.*, 1984a, b).

El embalse de El Vellón se halla situado en la cuenca del río Miraflores-Guadalix (provincia de Madrid). Tiene una superficie máxima de 4 km^2 , un volumen de $41,2 \text{ Hm}^3$ y una pro-

fundidad media de $10,3 \text{ m}$ —datos adicionales en ALVAREZ COBELAS *et al.* (1984).

MATERIAL Y METODOS

Los muestreos se llevaron a cabo durante todo el año 1983, con periodicidad semanal durante la primera mitad del año y con periodicidad, aproximadamente, mensual en la segunda. El lugar de muestreo fue la estación B (véase ALVAREZ COBELAS *et al.*, 1984a), de características promedio para El Vellón, según se deduce de estudios anteriores (ALVAREZ COBELAS, 1982). Aunque la profundidad de la misma con el embalse lleno es de 25 m , a comienzo del año superaba los 17 m y paulatinamente fue disminuyendo hasta los 12 m a mediados del verano, para ascender más tarde.

En el curso del estudio se midieron la velocidad y la orientación de la corriente a un metro de profundidad (método de HRBÁČEK & STRAŠKRABA, 1966), perfiles térmicos de metro en metro —con termistor YSI-57— y la profundidad de visión del disco de Secchi. Se ha considerado el espesor de la capa de mezcla como aquél cuya variación de la temperatura con profundidad es inferior a $1^\circ \text{ C} \cdot \text{m}^{-1}$ y el espesor de la capa iluminada como profundi-

¹ Centro de Investigaciones del Agua (CSIC). La Poveda, Arganda del Rey (Madrid).

dad de visión del disco de Secchi multiplicada por 2,7 (TALLING, 1977). El disco de Secchi fue calibrado con respecto a un fotómetro LI-COR 188B dotado de sensor cilíndrico (profundidad de visión del disco = 10% de la radiación incidente bajo la superficie del agua). La constante de extinción de la luz se calculó a partir de la profundidad a la cual desaparece el disco, suponiendo que la extinción sigue la ley de Lambert. Sabiendo que los valores de la extinción son aditivos (ÅBERG & RODHE, 1942), se estimaron las extinciones debidas a la clorofila «a» del fitoplancton, la materia en suspensión y la materia disuelta. Para ello se midió la clorofila de la capa iluminada siguiendo el método de MARKER *et al.*, (1980) y la materia en suspensión a partir de la conductividad del agua (conductímetro ORION) y posterior calibrado mediante regresión con datos de dicha materia procedentes del embalse. El método de estimación de las extinciones parciales se debe a VERDUIN (1982).

Con los perfiles térmicos se estimaron el balance térmico del embalse (método de HUTCHINSON, 1957, evaluado por planimetría y por cálculo discreto simultáneamente) y las constantes de difusión vertical en termoclina e hipolimnion. Estas fueron obtenidas siguiendo la fórmula de JASSBY & POWELL (1975), para la cual, además, se usaron los datos de radiación global incidente en 1983 en Madrid (Instituto Nacional de Meteorología, 1984) —tomados a 30 km del embalse— promediados cada cinco días centrados en cada fecha de muestreo con objeto de eliminar variabilidad y la constante de extinción de la luz en el agua. El resto de las constantes de extinción necesarias para dichos cálculos proceden de COLLINS (1925), calculadas para la extinción de la radiación infrarroja en agua pura, que apenas difieren de las de otra clase de agua. Una planimetría previa del embalse (ALVAREZ COBELAS, 1982) permitió conocer la superficie por estratos, dato necesario adicional para calcular tanto el balance térmico como las constantes de difusión vertical. El porcentaje de la variación de la temperatura del agua, debido a la radiación solar, fue obtenido mediante otra fórmula debida a JASSBY & POWELL (1975).

Por otro lado, los datos de temperatura permitieron calcular la densidad del agua directamente, dada la escasa concentración de sustancias en la misma. A partir de la densidad se estimó la frecuencia de Brunt-Väссälä para toda la columna vertical, indicador de la estabilidad térmica de aquella, así como dicha frecuencia para cada profundidad de termoclina e hipolimnion. También se calculó la tasa de erosión de la termoclina (método de BLANTON, 1973).

Aparte de la extracción preliminar de nuevas variables a partir de los datos originales, con una y otros se han efectuado correlaciones, regresiones, análisis de la varianza y análisis de componentes principales precedidas (o no, según la distribución estadística de aquéllos) de transformaciones diversas para normalizarlos.

RESULTADOS

La velocidad de la corriente (Fig. 1) en el primer metro de profundidad fue muy variable ($2,87 \pm 2,40 \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$), pareciendo superior en la mezcla que en la estratificación, aunque el número de datos en este segundo período es demasiado escaso para poder asegurarlo estadísticamente. La orientación de la corriente fue predominantemente hacia el Este y hacia el Sur (65%), es decir, más o menos en dirección a la presa.

La radiación incidente durante el año 1983, medida en Madrid, siguió las pautas habituales (Fig. 2A). La penetración de la luz en el agua fue estadísticamente inferior durante la circulación (análisis de la varianza con la constante de extinción: $F = 8,26$, $p < 0,05$) respecto al período de estratificación (Fig. 2B). El cociente «capa iluminada/capa mezclada» mostró la evolución característica, presentando sus valores máximos en el estancamiento y mínimos en la mezcla (Fig. 2C). Este cociente es estadísticamente superior durante la estratificación ($F = 19,58$, $p < 0,05$).

El promedio de la extinción total fue de $0,65 \pm 0,24 \text{ m}^{-1}$, debiéndose $0,07 \text{ m}^{-1}$ a la clorofila, $0,51 \text{ m}^{-1}$ a la materia particulada, $0,43 \text{ m}^{-1}$ a las partículas sin clorofila y $0,11 \text{ m}^{-1}$ a la materia disuelta. La relación en-

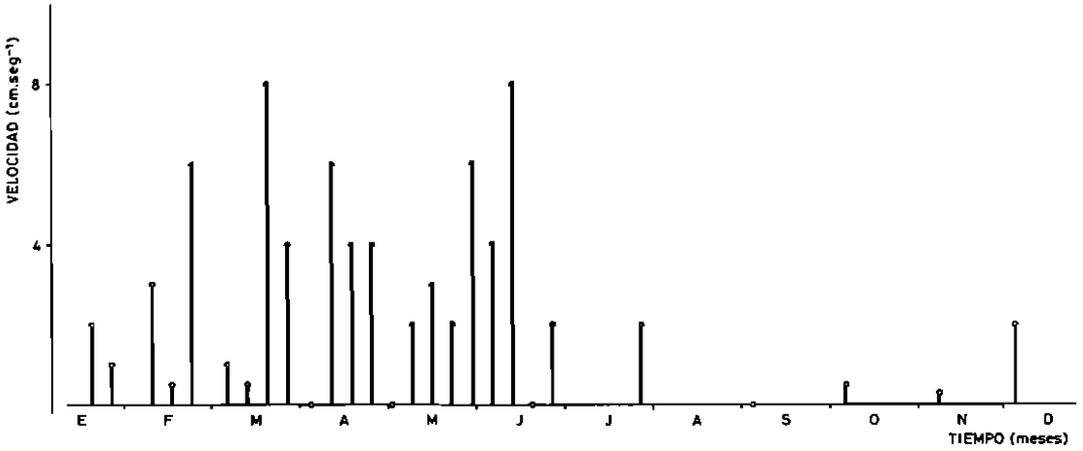


Fig. 1. Velocidad de la corriente subsuperficial (1 m de profundidad) en el embalse de El Vellón durante 1983.

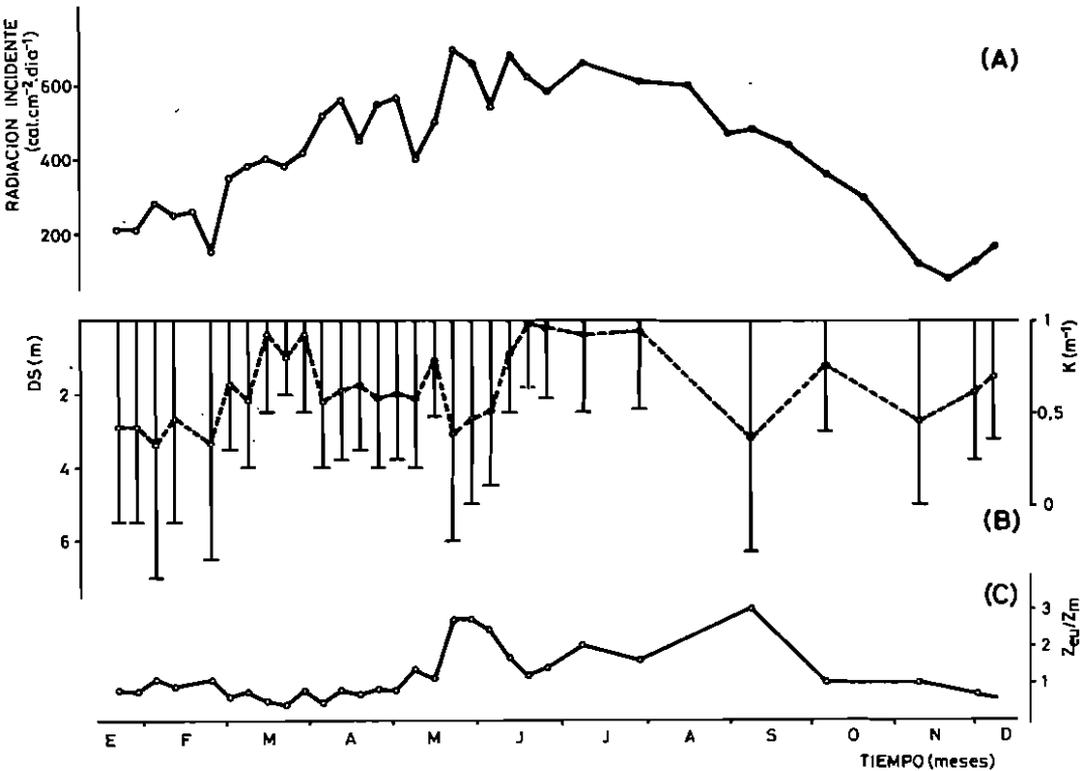


Fig. 2. A: Radiación global incidente sobre Madrid capital en 1983. B: Profundidad de visión del disco de Secchi (escala de izquierda) y constante de extinción de la luz en el agua del embalse de El Vellón 1983. C: Cociente «capa iluminada/capa mezclada» en el embalse de El Vellón durante 1983.

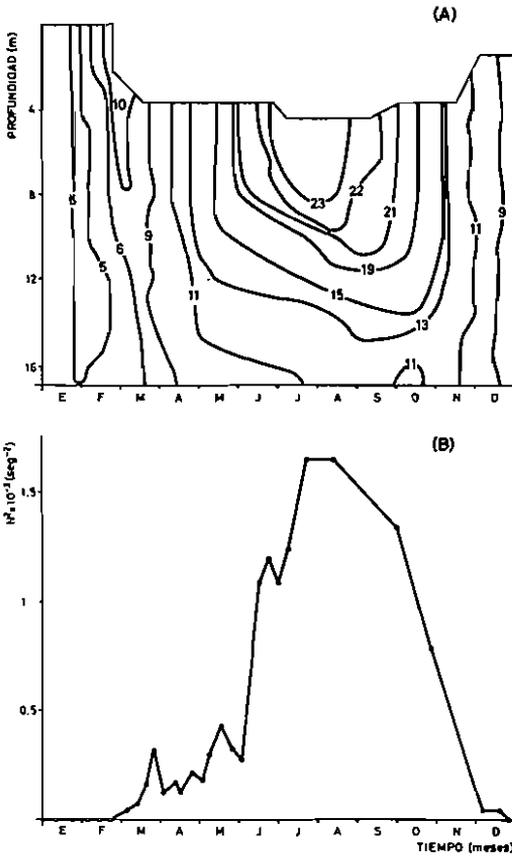


Fig. 3. A: Distribución de la temperatura (° C) en el embalse de El Vellón durante 1983. B: Frecuencia de Brunt-Väisälä para la columna vertical del embalse de El Vellón en 1983.

tre la constante de extinción de la luz y la clorofila fue:

$$K_{ds} = 0,019 (C1 a) + 0,426.$$

$$K_{ds} = ct. \text{ extinción (m}^{-1}\text{)}.$$

$$r = 0,607, p < 0,05.$$

$$C1 a = \text{clorofila «a» (mg/m}^{-3}\text{)}.$$

r = coeficiente de correlación,

de donde se deduce que la extinción de la luz en el agua se debe en un 37% a su absorción por la clorofila «a» del fitoplancton.

El embalse es monomítico. Su estratificación, entendiéndose por tal la aparición de termoclina con variaciones de temperatura iguales o superiores a 1° C por metro, se inició a mediados de mayo y finalizó en octubre. El agua alcanzó la máxima densidad en febrero, tras una helada que congeló la superficie del embalse a comienzos del mes. La temperatura máxima del agua se produjo a principios de julio, 23,8° C (Fig. 3A). Las tasas de calentamiento, calculadas desde el momento del primer perfil térmico no homogéneo hasta el momento de máxima temperatura, se presentan en la Tabla I y son máximas en los estratos más superficiales. Las tasas de enfriamiento, sin embargo, resultan superiores en los estratos de la termoclina que en los del epilimnion (Tabla I). La erosión de la termoclina fue de $7,46 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{día}^{-1}$ ($= 8,64 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{seg.}^{-1}$). La estabilidad de la

TABLA I
TASAS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO (° C · DIA⁻¹) DURANTE LA ESTRATIFICACION DEL EMBALSE DE EL VELLON EN 1983

Profundidad (m)	Caleantamiento	Enfriamiento
1	0,145	0,088
2	0,145	0,088
3	0,138	0,084
4	0,098	0,093
5	0,087	0,126
6	0,057	0,114
7	0,056	0,097
8	0,035	0,055
9	0,019	0,030
10	0,016	0,016
11	0,014	0,008
12	0,010	—
13	0,008	—

columna vertical fue máxima durante la estratificación (Fig. 3B), aunque por estratos durante ese período en y bajo de la termoclina no siempre hubiera una relación inversa con la profundidad (Tabla II). Apreciamos una correlación significativamente inversa entre la radiación incidente y el nivel de inicio de la termoclina ($r = -0,73$, $p < 0,05$) y una directa entre la frecuencia de Brunt-Vässälä y el espesor de la termoclina ($r = 0,87$, $p < 0,05$).

El embalse gana calor desde marzo a agosto y lo pierde de septiembre a febrero (Fig. 4A). La ganancia de calor durante la fase de calentamiento fue de $9.400 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$, estimada por el método planimétrico, y de $10.859 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ por el cálculo discreto. Estas cifras son válidas si suponemos que la estación de muestreo corresponde a la más profunda del embalse. Como no es así, añadiendo las zonas más profundas el balance debe incrementarse en $944 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$. La pérdida de calor fue de $12.150 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$, calculada por el método planimétrico, y de $13.642 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ por el cálculo discreto. El balance neto anual, pues, no es nulo sino ligeramente negativo (Fig. 4B).

Las constantes de difusión vertical turbulenta en y bajo la termoclina no mostraron pauta alguna en relación a la profundidad. Fueron bastante variables, siendo su promedio:

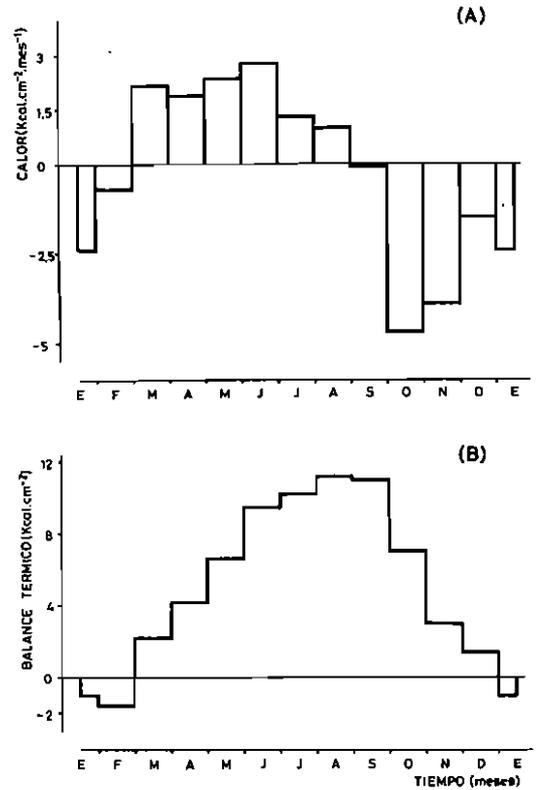


Fig. 4. A: Ganancias y pérdidas de calor por el embalse de El Vellón en 1983. B: Balance térmico del embalse de El Vellón en 1983.

TABLA II
CORRELACIONES ENTRE LA FRECUENCIA DE BRUNT-VÄSSÄLÄ Y LA PROFUNDIDAD EN Y BAJO LA TERMOCLINA DEL EMBALSE DE EL VELLON DURANTE 1983

Fecha	Correlación
10-V	-0,623 ^{ns}
18-V	-0,586 ^{ns}
31-V	-0,586 ^{ns}
6-VI	-0,647*
14-VI	-0,658*
20-VI	-0,645 ^{ns}
26-VI	-0,775*
8-VII	-0,856*
27-VII	-0,895*
8-IX	-0,799*
6-X	-0,978*

* = Estadísticamente significativo para $p < 0,05$.
^{ns} = No significativo para dicho nivel.

$4,69 \cdot 10^{-2} \pm 9,14 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg.}^{-1}$ (Tabla III).

En muchas ocasiones (45 %) la conducción molecular resultó el proceso de transporte vertical predominante. El porcentaje de cambio de temperatura debido a la radiación fue del $63,69 \pm 41,23 \%$ (Tabla IV) y presentó una tendencia inversa con la profundidad. Este porcentaje permite estimar que las constantes de difusión turbulenta debidas a la radiación supusieron en promedio:

$2,98 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg.}^{-1}$, mientras que las debidas al viento ascendieron a: $1,71 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{seg.}^{-1}$.

La relación entre las constantes de difusión vertical turbulenta y la frecuencia de Brunt-Vätsälä de cada profundidad es estadísticamente significativa, aunque no muy alta ($r = -0,25$, $p < 0,05$), siendo la ecuación que las liga:

$$K_z = -3,24 (N^2)^{-0,46}$$

K_z = corriente difusión ($\text{cm}^2 \cdot \text{seg.}^{-1}$).

N^2 = frecuencia de Brunt-Vätsälä (seg.^{-2}).

TABLA III
CONSTANTES DE DIFUSION VERTICAL TURBULENTA ($10^{-2} \cdot \text{cm}^2/\text{seg.}^{-1}$) EN LA TERMOCLINA Y EL HIPOLIMNION DEL EMBALSE DE EL VELLON DURANTE 1983

Profundidad	10-V	18-V	31-V	6-VI	14-VI	20-VI	26-VI	8-VIII	27-VII	8-IX	6-X
2				50,29							
3			34,49	12,60				14,15			
4			7,06	4,94	2,46	0,92	1,37	1,70	6,81		
5	3,03		6,84	2,47	0,24	0,16	0,33	0,52	0,38		
6	1,59		6,27	8,20	0,36	—	—	0,14	0,06	8,14	
7	0,92		34,04	2,55	0,02	—	—	—	—	3,83	
8	1,45	0,02	7,49	6,76	0,15	—	—	—	—	1,05	—
9	—	—	3,68	1,14	—	—	—	—	—	1,16	—
10	0,26	—	2,43	1,78	—	—	—	—	—	1,64	—
11	0,58	—	0,85	0,34	—	—	—	—	—	2,41	—
12	0,73	—	1,39	0,18	—	—	—	—	—	1,69	—
13	—	—	—	0,10	—	—	—	—	—	3,14	—

— = Valor igual o inferior al de la conducción molecular.

TABLA IV
PORCENTAJE DEL CAMBIO DE TEMPERATURA EN TERMOCLINA E HIPOLIMNION DEBIDO A LA RADIACION INCIDENTE SOBRE EL EMBALSE DE EL VELLON EN 1983

Profundidad	10-V	18-V	31-V	6-VI	14-VI	20-VI	26-VI	8-VII	27-VII	8-IX	6-X
2				100							
3			100	100	100			100			
4			100	100	83	100	100	100	100		
5	57		100	100	62	100	—	100	100		
6	49		100	100	47	37	31	54	100	100	
7	100		100	100	100	6	—	29	—	100	16
8	77	7	100	100	—	8	—	40	—	100	6
9	16	18	100	100	—	3	12	9	—	100	7
10	34	—	55	—	—	0,5	—	—	—	100	—
11	—	4	100	—	—	0,4	2	—	—	100	—
12	—	3	23	—	—	0	—	6	—	100	—
13	—	—	—	—	0,3	—	—	—	—	—	—

— = Temperatura constante entre muestreos sucesivos.

Por último, se efectuaron tres análisis de componentes principales sobre los datos físicos de El Vellón en 1983 (Fig. 5). El primero de ellos consideró las siguientes variables durante el período de estratificación: radiación incidente, temperatura promedio de la columna vertical, frecuencia de Brunt-Väссälä, profundidad de desaparición del disco de Secchi, constante de extinción de la luz, nivel de la termoclina (= capa mezclada), espesor de la termoclina, espesor de la capa iluminada, cociente «capa iluminada: capa mezclada», velocidad de la corriente en el primer metro de agua y orientación de la corriente. La matriz de correlación obtenida se ofrece en la Tabla V y, aparte de las correlaciones ya mencionadas más arriba, el resto de las mismas resulta en su mayoría de la naturaleza dependiente de los datos. Los dos primeros ejes del análisis absorben un 71% de la varianza total. El primer eje puede asimilarse al efecto térmico de la radiación, mientras que el segundo, al efecto luminoso de la misma, según se deduce de los coeficientes de correlación con las componentes principales (Tabla V). En la proyección ortogonal de los dos primeros ejes las variables aparecen bastante agrupadas (Fig. 5A).

El segundo análisis se aplicó al período de mezcla, considerando las mismas variables que en el anterior, a excepción del espesor de la termoclina. La matriz de correlación indica algu-

nas correlaciones significativas nuevas respecto al análisis anterior (Tabla VI). Los dos primeros ejes del análisis contribuyen en un 61% a la absorción de la varianza y la interpretación de los mismos sería similar a la del anterior análisis (Tabla VI). La proyección de las variables ofrece una mayor dispersión (Fig. 5B).

Por último, el análisis de las variables físicas, aplicado a todos los datos, recalca las tendencias antes apuntadas (Tabla VII), segregando al transporte horizontal (velocidad de la corriente), absorbiendo los dos primeros ejes el 71% de la varianza total y dispersando mucho las variables en el plano ortogonal (Fig. 5C). El primer eje aparece inequívocamente ligado a la radiación (Tabla VII), pero el segundo parece redundante. La velocidad de la corriente y su orientación se correlacionan estadísticamente con los ejes III y IV.

DISCUSION

El embalse de El Vellón, a partir de los datos obtenidos en la estación de muestreo elegida, depende fundamentalmente de la radiación incidente para su funcionamiento. El viento no contribuye demasiado al establecimiento de la estratificación. El modelo de RAGOTZKIE (1978) confirma que, a partir de la profundidad de la termoclina en la época de máxima estratificación, la exposición al viento es muy

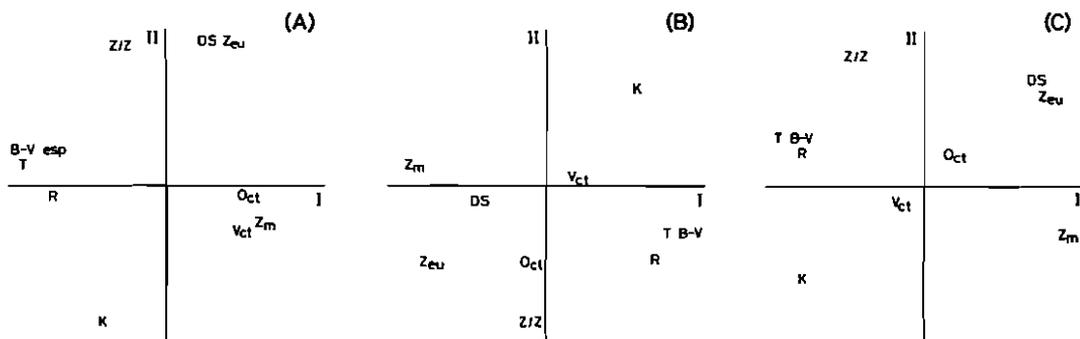


Fig. 5. A: Proyección de las variables físicas medidas en el embalse de El Vellón durante la estratificación de 1983 sobre el plano definido por los dos primeros ejes (I, II) del análisis de componentes principales. B: Ibid. para el período de mezcla de 1983. C: Ibid. para todo el año 1983. Los símbolos representantes de las variables como los de la Tabla V.

TABLA V

MATRIZ DE CORRELACION ENTRE VARIABLES FISICAS Y CUADRADOS DE LA CORRELACION DE ESTAS CON LAS DOS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA ESTRATIFICACION DEL EMBALSE DE EL VELLON EN 1983. SE HAN SUBRAYADO LAS CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS AL NIVEL $P < 0,05$

	Rad	Temp	B-V	DS	K	zm	z/z	zeu	vct	oct	esp
Rad	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Temp	0,45	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B-V	0,55	<u>0,95</u>	1	—	—	—	—	—	—	—	—
DS	-0,29	<u>-0,07</u>	-0,12	1	—	—	—	—	—	—	—
K	0,37	0,22	0,23	<u>-0,94</u>	1	—	—	—	—	—	—
zm	<u>-0,73</u>	-0,40	-0,51	0	-0,03	1	—	—	—	—	—
z/z	<u>0,30</u>	0,35	0,37	<u>0,78</u>	<u>-0,67</u>	-0,44	1	—	—	—	—
zeu	-0,29	-0,21	-0,23	<u>0,96</u>	<u>-0,97</u>	-0,08	<u>0,72</u>	1	—	—	—
vct	0,09	<u>-0,64</u>	<u>-0,52</u>	<u>-0,10</u>	0	0,21	<u>-0,16</u>	-0,03	1	—	—
oct	-0,59	<u>-0,35</u>	-0,40	0,05	-0,24	0,34	-0,36	0,18	-0,12	1	—
esp	0,20	<u>0,90</u>	<u>-0,87</u>	0,01	0,05	-0,18	0,30	-0,11	<u>-0,62</u>	-0,16	1

	Componente I	Componente II
Rad	0,49	0
Temp	<u>0,85</u>	0,03
B-V	<u>0,90</u>	0,02
DS	0,07	<u>0,89</u>
K	0,17	<u>0,80</u>
zm	0,35	<u>0,06</u>
z/z	0,07	<u>0,81</u>
zeu	0,14	<u>0,84</u>
vct	0,24	<u>0,06</u>
oct	0,27	0
esp	<u>0,59</u>	0,06

Rad = Radiación incidente.

Temp = Temperatura promedio de la columna vertical.

B-V = Frecuencia de Brunt-Väissälä para toda la columna.

DS = Profundidad de visión del disco de Secchi.

K = Constante de extinción de la luz.

zm = Capa mezclada (= nivel de la termoclina).

z/z = Capa iluminada/capa mezclada.

zeu = Capa iluminada.

vct = Velocidad de la corriente a un metro de profundidad.

oct = Orientación de la corriente.

esp = Espesor de la termoclina.

reducida (0,56 km), lo cual también se comprueba mediante inspección visual. La radiación genera turbulencia en termoclina e hipolimnion, como hemos visto, y en los niveles más inferiores de la columna vertical el transporte vertical de calor se realiza predominantemente por conducción molecular (valores de las constantes de difusión inferiores a $0,12 \text{ cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$: GROTE, 1934). Esta situación es frecuente en lagos muy protegidos del viento, como, por ejemplo, en Linsley Pond (Connecticut, USA: COWHILL, 1967).

turbulenta se encuentran entre los referidos en la literatura (BACHMANN & GOLDMAN, 1965; JASSBY & POWELL, 1975; EFFLER & FIELD, 1983; IMBODEN *et al.*, 1983), si bien presentan una variabilidad elevada. La relación, significativa, con la estabilidad de la columna vertical definida por una pendiente de $-0,46$ indica, siguiendo los criterios de WELANDER (1968), que la turbulencia se debe en El Vellón a procesos de pequeña escala generados por la distribución vertical de las corrientes de agua en el embalse. Esta situación contrasta con la de la laguna El Porcal (cuenca del río Jarama), donde la turbulencia se debe directamente a la disipación en cascada de la

Los valores obtenidos para la difusión vertical

TABLA VI

MATRIZ DE CORRELACION ENTRE VARIABLES FISICAS Y CUADRADOS DE LA CORRELACION DE ESTAS CON LAS DOS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA MEZCLA DEL EMBALSE DE EL VELLON EN 1983

	Rad	Temp	B-V	DS	K	zm	z/z	zeu	vct	oct
Rad	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Temp	0,50	1	—	—	—	—	—	—	—	—
B-V	0,78	0,73	1	—	—	—	—	—	—	—
DS	-0,15	-0,36	-0,25	1	—	—	—	—	—	—
K	0,21	0,18	0,18	-0,29	1	—	—	—	—	—
zm	-0,67	-0,74	-0,73	0,19	-0,33	1	—	—	—	—
z/z	0,31	0,22	0,14	0,14	-0,55	-0,06	1	—	—	—
zeu	-0,36	-0,41	-0,53	0,39	-0,80	0,53	0,50	1	—	—
vct	0,10	-0,01	0,12	-0,20	0,12	-0,09	-0,06	-0,12	1	—
oct	0,20	-0,04	-0,03	-0,22	-0,26	0,25	0,37	0,21	0,23	1

	Componente I	Componente II
Rad	0,54	0,19
Temp	0,61	0,09
B-V	0,73	0,09
DS	0,20	0,01
K	0,32	0,44
zm	0,74	0,02
z/z	0	0,81
zeu	0,62	0,25
vct	0,03	0
oct	0,01	0,27

Rad = Radiación incidente.

Temp = Temperatura promedio de la columna vertical.

B-V = Frecuencia de Brunt-Värsälä para toda la columna.

DS = Profundidad de visión del disco de Secchi.

K = Constante de extinción de la luz.

zm = Capa mezclada (= nivel de la termoclina).

z/z = Capa iluminada/capa mezclada.

zeu = Capa iluminada.

vct = Velocidad de la corriente a un metro de profundidad.

oct = Orientación de la corriente.

esp = Espesor de la termoclina.

energía cinética del viento (ALVAREZ COBELAS *et al.*, 1985).

Por otro lado, un hecho curioso en este estudio es la pérdida neta de calor por parte del embalse cuando concluye el ciclo anual. Lo más probable es que el calor proceda de los sedimentos que, al descubierto durante el verano, fueron inundados en el otoño. Las discrepancias entre nuestras dos medidas del balance térmico se deben al método empleado; en principio, por razones matemáticas, parece más fiable la planimetría. En cualquier caso, la cantidad de calor acumulada por el embalse fue inferior a la del grupo de embalses españoles al que pertenece éste (MARGALEF *et al.*, 1977), lo cual pudiera deberse a la enorme superficie del

mismo desprovista de agua (13 m por debajo de la cota máxima durante el verano de 1983). Con respecto a un ciclo anual anterior en El Vellón el balance térmico ha disminuido (ALVAREZ COBELAS *et al.*, 1984a) probablemente por el descenso del volumen de agua embalsado respecto a aquel ciclo (1980-81). La tasa de erosión de la termoclina se incluye entre las de aquellos ecosistemas acuáticos con profundidades medias similares (BLANTON, 1973).

En cuanto a la radiación luminosa, resulta escasa su intercepción por la clorofila y muy importante la debida a la materia en suspensión. Cálculos propios a partir de los datos de RULL *et al.* (1984) indican que en los embalses españoles la extinción por unidad de clorofila as-

TABLA VII

MATRIZ DE CORRELACION ENTRE VARIABLES FISICAS Y CUADRADOS DE LA CORRELACION DE ESTAS CON LAS CUATRO PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA TODO EL CICLO ANUAL DEL EMBALSE DE EL VELLON EN 1983

	Rad	Temp	B-V	DS	K	zm	z/z	zeu	vct	oct
Rad	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Temp	0,69	1	—	—	—	—	—	—	—	—
B-V	0,67	0,88	1	—	—	—	—	—	—	—
DS	-0,37	-0,41	-0,37	1	—	—	—	—	—	—
K	0,44	0,47	0,50	-0,86	1	—	—	—	—	—
zm	-0,69	-0,88	-0,90	0,39	-0,49	1	—	—	—	—
z/z	0,53	0,63	0,66	0,29	-0,12	-0,66	1	—	—	—
zeu	-0,48	-0,51	-0,46	0,97	-0,86	0,45	0,16	1	—	—
vct	0,19	0,06	0	-0,16	0,14	-0,18	0,04	-0,15	1	—
oct	-0,01	-0,07	-0,13	0,17	-0,22	0,09	0,02	0,19	0,03	1
	Componente I		Componente II		Componente III		Componente IV			
Rad	0,62		0,04		0,02		0			
Temp	0,79		0,09		0		0			
B-V	0,77		0,10		0,02		0			
DS	0,47		0,48		0		0			
K	0,56		0,31		0		0			
zm	0,79		0,11		0		0			
z/z	0,20		0,73		0		0			
zeu	0,58		0,36		0		0			
vct	0,03		0		0,62		0,32			
oct	0,03		0,04		0,38		0,52			

Rad = Radiación incidente.

Temp = Temperatura promedio de la columna vertical.

B-V = Frecuencia de Brunt-Väisälä para toda la columna.

DS = Profundidad de visión del disco de Secchi.

K = Constante de extinción de la luz.

zm = Capa mezclada (= nivel de la termoclina).

z/z = Capa iluminada/capa mezclada.

zeu = Capa iluminada.

vct = Velocidad de la corriente a un metro de profundidad.

oct = Orientación de la corriente.

esp = Espesor de la termoclina.

ciende a $0,022 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, mientras que en El Vellón dicha extinción es muy inferior, $0,010 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ (KIRK, 1983). La extinción de la luz en la estación B de El Vellón fue aparentemente inferior durante el ciclo 1980-81 (ALVAREZ COBELAS, 1982) que en 1983, pero un análisis de la varianza no presenta significación alguna ($F = 0,02$).

Para finalizar sólo nos resta destacar el elevado número de correlaciones en el análisis de componentes principales, debido a la falta de independencia de muchas de las variables entre sí y la segregación que presenta entre los efectos luminosos y los térmicos de la radiación durante la estratificación frente a la falta de dicha diferenciación durante la mezcla.

SUMMARY

A physical survey on El Vellón reservoir (Madrid, Spain) during 1983 has been undertaken. Subsurface currents (1 m deep) appeared to be higher in the mixing period than in the stagnation. Light penetration in water was higher during stratification. Averaging extinction of light was mainly due to suspended solids rather than to chlorophyll. The reservoir was monomictic, storing heat from March to August and releasing

it onwards until February. The annual heat budget amounted to 10 kcal/cm² in 1983 but on a year-round basis the reservoir lost heat. Radiation was more important than wind in causing turbulence in thermocline and hypolimnion, though molecular conduction of heat was very common in such areas. Turbulence might directly be due to local shear stress.

BIBLIOGRAFIA

- ÅBERG, B.; RODHE, W., 1942: «Ueber die Milieufaktoren in einigen südschwedischen Seen». *Symbol. Bot. Upsal.*, 5: 1-256.
- ALVAREZ COBELAS, M., 1982: *Una limnología de la cuenca del embalse de El Vellón (Madrid)*. Tesis doctoral. Universidad Complutense. Madrid.
- ALVAREZ COBELAS, M.; VELASCO, J. L.; RUBIO, A.; COLMENAREJO, M. F., 1983: «Las tendencias de la eutrofización en el embalse de El Vellón (Madrid)». *Actas V Congreso Nacional Química*, 3: 565-573.
- ALVAREZ COBELAS, M.; VELASCO, J. L.; RUBIO, A.; ACOSTA, F. J., 1984a: «A limnology of El Vellón reservoir in 1980 and 1981. I. Some physicochemical conditions, with special reference to horizontal patterns». *Studia Oecologica*. En prensa.
- ALVAREZ COBELAS, M.; VELASCO, J. L.; RUBIO, A.; ACOSTA, F. J., 1984b: «A limnology of El Vellón reservoir in 1980 and 1981. II. Phytoplankton dynamics». *Studia Oecologica*. En prensa.
- ALVAREZ COBELAS, M.; RUBIO, A.; ACOSTA, F. J., 1985: «Difusión vertical y estabilidad térmica de una laguna hipereutrófica». *Limnetica*. En prensa.
- BACHMANN, R. W.; GOLDMAN, C. R., 1965: «Hypolimnetic heating in Castle Lake, California». *Limnol. Oceanogr.*, 10: 233-239.
- BLANTON, J. O., 1973: «Vertical entrainment into the epilimnia of stratified lakes». *Limnol. Oceanogr.*, 18: 697-704.
- COLLINS, J. R., 1925: «Infrared absorption spectrum of water; variation with temperature». *Phys. Rev.*, 26: 771-779.
- COWHILL, U. M.: «Heat transfer solely by molecular conduction in the metalimnion». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 57: 198-200.
- EFFLER, S. W.; FIELD, S. D., 1983: «Vertical diffusivity in the stratified layers of the mixolimnion of Green Lake, Jamesville, NY». *J. Freshwat. Ecol.*, 2: 273-286.
- GROTE, A., 1934: *Der Sauerstoffhaushalt der Seen*. Die Binnengewässer, XIV. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart.
- HRBÁČEK, J.; STRÁŠKRABA, 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., 1957: *A treatise on Limnology. Volume I. Geography, physics and Chemistry*. J. Wiley & Sons, Inc. New York.
- IMBODEN, D. M.; LEMMIN, U.; JOLLER, T.; SCHURTER, M., 1983: «Mixing processes in lakes: mechanisms and ecological relevance». *Schweiz. Z. Hydrol.*, 45: 11-44.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA, 1984: *Calendario meteorológico 1983*. INM, Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid.
- JASSBY, A.; POWELL, T., 1975: «Vertical patterns of eddy diffusion during stratification in Castle Lake, California». *Limnol. Oceanogr.*, 20: 530-543.
- KIRK, J. T. O., 1983: *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge.
- LEGNENDRE, L.; DEMERS, S., 1984: «Towards dynamic biological oceanography and limnology». *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41: 2-19.

- MARGALEF, R.; PLANAS, M. D.; ARMENGOL, J.; VIDAL, A.; PRAT, N.; GUISET, A.; TOJA, J.; ESTRADA, M., 1977: *Limnología de los embalses españoles*. MOPU. Madrid.
- MARKER, A. F. H.; NUSCH, E. A.; RAI, H.; RIEMANN, B., 1980: «The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: conclusions and recommendations». *Ergebn. Limnol.*, 14: 91-106.
- RAGOTZKIE, R. A., 1978: «Heat budgets of lakes». In: *Lakes: Chemistry, Geology, Physics* (A. Lerman, ed.), pp. 1-19. Springer Verlag. New York.
- RULL, V.; VEGAS, T.; NAVARRO, J., 1984: «Extinción de la luz en los embalses españoles. Relaciones con la concentración de clorofila y las partículas en suspensión». *Oecol. Aquat.*, 7: 25-26.
- TALLING, J. F., 1971: «The underwater light climate as a controlling factor in the production ecology of freshwater phytoplankton». *Mitt. Internat. Verein. Limnol.*, 19: 214-243.
- VERDUIN, J., 1982: «Components contributing to light extinction in natural waters: Method of isolation». *Arch. Hydrobiol.*, 93: 303-312.
- WELANDER, P., 1968: «Theoretical forms for the vertical exchange coefficients in a stratified fluid with application to lakes and seas». *Acta R. Soc. Sci. Litt. Gothoburgensis, Geophysica*, 1: 1-27.