
VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS TASAS DE SEDIMENTACIÓN DEL NITRÓGENO Y FÓSFORO EN EL SESTON DEL EMBALSE DEL NEUSA, COLOMBIA

SPACE-TEMPORAL VARIATION OF SEDIMENTATION RATES OF NITROGEN AND PHOSPHORUS AT SESTONIC MATERIAL: NEUSA'S RESERVOIR, COLOMBIA

Juan Pablo Niño G.^{1,2}, Gabriel Guillot M.¹

Resumen

Se estudió la variación espacio-temporal de las tasas de sedimentación del seston, nitrógeno y fósforo durante tres épocas, en dos zonas contrastantes en cuanto a la influencia de la macrofita sumergida *Egeria densa*, en el embalse del Neusa. Se utilizaron tres series de trampas de seston cilíndricas ubicadas en tres profundidades para la estimación de las tasas de sedimentación totales. Las dos zonas fueron diferentes en cuanto a la magnitud del flujo de seston y nitrógeno y mostraron patrones temporales de variación distintos para todas las variables. Se detectaron diferencias en los flujos verticales de seston, nitrógeno y fósforo, que parecen estar relacionadas con la estabilidad de la columna de agua en la zona de la presa. El efecto de la comunidad litoral sobre el flujo de material particulado hacia los sedimentos, se relacionó con la liberación de material detrítico proveniente de la necromasa de *E. densa*, especialmente con los cambios de nivel del agua del embalse.

Palabras clave: tasas de sedimentación, embalse, seston, nitrógeno y fósforo, *Egeria densa*, flujo de nutrientes.

Abstract

Space-temporal variation of sedimentation rates of sestonic material, nitrogen and phosphorus, was studied during three periods at two zones with different influence of the submerged macrophyte *Egeria densa*, at Neusa's reservoir. Three series of cylindrical seston traps were placed at three depths, in order to measure the total sedimentation rates. The two zones were different in the magnitude of sestonic and nitrogen fluxes and show dissimilar temporal patterns for all the variables. The differences on vertical fluxes of seston, nitrogen and phosphorus may be related to water column stability at the dam. The litoral community result on particulated material flux toward the sediments, was related with the detritic material release from *E. densa*'s necromas, especially during the drawn-down of the reservoir.

Key words: sedimentation rates, reservoir, seston, nitrogen and phosphorus, *Egeria densa*, nutrients fluxes.

INTRODUCCIÓN

El material particulado en un sistema léntico puede tener dos orígenes: uno autóctono y otro alóctono. La importancia relativa de estos aportes depende de la génesis de los lagos y de sus cuencas, así como de factores climático-ambientales y morfológicos. En el caso de los sistemas regulados, los aportes directos suelen ser numéricamente más significativos que en los lagos debido a las diferencias en el área de las cuencas respecto al área del espejo y

a la reducción de las tasas de renovación de materiales como consecuencia del represamiento de los ríos (Thornton *et al.*, 1990).

El transporte y distribución de los materiales suspendidos en la columna de agua está relacionado con factores morfológicos como la profundidad y el área total, que determinan la estabilidad de la columna de agua frente a factores dinámicos

Recibido: abril de 2003; aceptado para publicación: mayo de 2004.

¹ Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

² Autor para correspondencia: nigaju@gmx.net, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

como las fuerzas de convección y advección-turbulencia que son generadas por las corrientes de los tributarios y los vientos (Milton, 1985; Thornton *et al.*, 1990).

A pesar de que diferentes fuerzas actúen en la distribución y redistribución de materiales, como en la mezcla vertical de las aguas y la resuspensión de sedimentos, la fuerza de gravedad ejerce un papel trascendental en el transporte de los materiales en un eje vertical; todo el material particulado, bien autóctono o alóctono, sedimenta como resultado de la fuerza gravitacional. La consecuencia de este hecho es que gran parte de la energía química almacenada en la materia particulada tiende a depositarse en los sedimentos.

El seston, que define tanto el componente biótico como abiótico particulado (Margalef, 1983), es el resultado de los procesos de transformación que tiene la materia en el sistema. En un embalse, su composición está ampliamente determinada por el estado trófico, las fluctuaciones de nivel, los procesos de transporte, y la descomposición y mineralización microbiana (Callieri *et al.*, 1991; Gibson y Guillot, 1997; Verschuren, 1999), en consecuencia, el seston puede considerarse el resultado del metabolismo del sistema. Esta composición y su relación con las tasas de hundimiento del seston afectan los tiempos de residencia que tienen los nutrientes en la columna de agua y por tanto las concentraciones de nutrientes solubles producidos mediante mineralización microbiana.

Dentro de la amplia variedad de elementos que pueden formar parte del material sestónico, el nitrógeno y el fósforo son especialmente relevantes debido a su carácter limitante de la producción y su relación estrecha con los procesos de eutrofia. Las tasas de deposición del nitrógeno y fósforo en el seston pueden entonces indicar y controlar la producción de los ecosistemas acuáticos, ya que la sedimentación asegura la pérdida de nutrientes, debido a las bajas tasas de renovación que tienen los sedimentos, especialmente en cuerpos de agua profundos o con estratificaciones marcadas.

La sedimentación de material particulado se puede ver afectada tanto cuantitativa como cualitativamente, por el metabolismo litoral que favorece indirectamente el aumento de las tasas de transferencia de los nutrientes entre los sedimentos y la columna de agua a través de la producción de biomasa y necromasa litoral, mediante la absorción que las macrofitas enraizadas hacen a través de su sistema radicular.

En el embalse del Neusa, la macrofita sumergida *Egeria densa* ocupa cerca del 30% del área total del embalse. Su distribución espacial ocurre de acuerdo con la variación de la pendiente y la profundidad en las diferentes zonas del embalse con un límite máximo de siete metros y una zona de transición de aproximadamente un metro desde la orilla (Carrillo y Guarín, 2000).

Con el fin de evaluar el papel de la comunidad de macrofitas sobre la variación espacial y temporal del nitrógeno y fósforo particulado en el embalse del Neusa, en este trabajo se determinó el comportamiento de las tasas de sedimentación del seston total (TSS), las del nitrógeno (TSN) y las del fósforo (TSP) en dos zonas del embalse contrastantes en cuanto a la influencia de la comunidad de macrofitas, para épocas con regímenes hidroclimáticos diferentes. Se predice que si la comunidad de macrofitas tiene un efecto sobre la distribución del nitrógeno y fósforo en una escala espacial y temporal, las tasas de sedimentación serán diferentes entre las dos zonas estudiadas y sus patrones de variación temporal mostrarán comportamientos no relacionados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El embalse del Neusa, ubicado en la cordillera oriental de los Andes colombianos a 2.960 msnm, 5° 8' 30" N y 73° 58' 28" O, es un cuerpo de agua oligomesotrófico con una estratificación de oxígeno bien caracterizada (Gómez *et al.*, 1997; Rivera, 1997; Uchima, 1987). La cuenca de drenaje se caracteriza por un ciclo bimodal de lluvias con dos picos de precipitación entre abril-mayo y octubre-noviembre con

máximos multianuales en octubre y mínimos en febrero. Otros detalles de la descripción del área y del embalse pueden consultarse en Gómez *et al.* (1997), Rivera (1997) y Uchima (1987). El embalse presenta heterogeneidad espacial debido a la variación de la superficie de la topografía subacuática. La zona sur, de pendientes fuertes y escaso desarrollo litoral, corresponde al antiguo canal del río Cubillos, que va desde la entrada del río hasta la presa (figura 1). La zona norte entre el río Las Juntas y Loma Gorda, más amplia pero con menores pendientes, da cabida al desarrollo de la macrofita sumergida *Egeria densa*, donde ocupa cerca del 70-80% de la fitomasa total (Carrillo y Guarín, 2000).

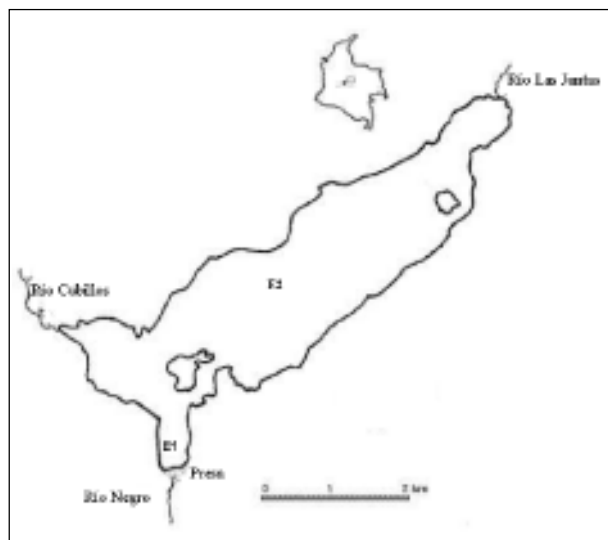


Figura 1. Ubicación aproximada del embalse del Neusa y de las zonas de muestreo

Colección de muestras y análisis. En dos estaciones ubicadas en las zonas E1 y E2, se midieron las tasas de sedimentación del seston total (TSS), del nitrógeno total (TSN) y del fósforo total (TSP) durante tres meses (noviembre de 1999, octubre de 2000 y marzo de 2001) (figura 1). Para ello se dispuso un juego tres trampas de seston en cada zona, en tres profundidades distintas definidas de acuerdo con la variación de la estratificación del oxígeno en el embalse (1-5, 5-10 m y > 10 m). Este experimento fue concebido con el fin de estimar el efecto de la profundidad y la

estratificación sobre los procesos de deposición. Las trampas fueron expuestas durante cinco días, para prevenir la descomposición del seston (Bloesch y Burns, 1980; Blomqvist y Hakanson, 1981; Callieri *et al.*, 1999). Los montajes fueron contruidos con cilindros de PVC con una altura de 23 cm, diámetro de 5,5 cm y una relación altura diámetro de 4. Los tubos fueron montados sobre estructuras de aluminio que se encontraban unidas por una cuerda a una boya y un lastre. No se hizo ninguna corrección para la resuspensión, por lo cual los datos corresponden a las tasas de sedimentación totales.

Para estimar los sólidos suspendidos totales (SST), las muestras recuperadas fueron homogeneizadas manualmente y filtradas a través de filtros Millipore de fibra de vidrio con diámetro de poro de 0,45 mm, previamente calcinados a una temperatura de 500 °C y pesados. Los SST fueron calculados a partir de las muestras filtradas después de secado hasta un peso constante a una temperatura de 95 °C (APHA, 1992). Para el análisis de los contenidos de nitrógeno y fósforo fue necesario hacer una digestión ácida en caliente (nitrógeno total de Kjeldahl y ácido sulfúrico-nítrico) y posterior detección volumétrica para el nitrógeno y espectrofotométrica para el fósforo por método del molibdato de amonio (APHA, 1992).

Los valores de TSS, TSN y TSP en $\text{mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$ fueron calculados de acuerdo con Callieri *et al.* (1991), quien tuvo en cuenta los contenidos de cada una de las variables dentro de la trampa de seston, el área de la misma y el tiempo de exposición.

Los análisis estadísticos incluyeron métodos descriptivos como medidas de tendencia central y dispersión relativa así como el uso de cajas esquemáticas para observar el comportamiento y distribución de los datos con respecto a la mediana, previa transformación logarítmica. Con el fin de evaluar la significancia de las diferencias encontradas entre las zonas (E1-E2) y las épocas de muestreo (noviembre de 1999 y octubre de 2000) se llevó a cabo un análisis factorial de varianza de 2 x 2. Para evaluar el efecto de la época (noviembre 1999, octubre de 2000 y marzo de 2001)

y la profundidad (1, 2 y 3) en E1 se utilizó un análisis factorial 3 x 2. En ambos se consideró la interacción simple: zona x época en el primero y época x profundidad en el segundo.

RESULTADOS

Tasas de sedimentación del seston total. El promedio menor de TSS para el embalse se detectó en noviembre: $2,063 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$ (rango: $6,66 \times 10^{-2}$ - $4,26$) y el mayor en marzo ($4,29 \times 10^{-1}$). El valor medio general fue de $2,57 \pm 2,13 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$ (rango: $5,03 \times 10^{-2}$ - $5,43$). En promedio los valores de TSS fueron más altos en E2 (figura 2).

El comportamiento de las TSS en E1 y E2 difiere notablemente en las tres épocas climáticas: en E1 los valores mayores se encontraron en marzo ($0,429 \pm 0,259 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$) y los menores en noviembre y octubre ($0,166 \pm 0,139$ y $0,296 \pm 0,059 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$, respectivamente). El promedio general fue: $0,317 \pm 0,214 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$ (figura 3).

Los flujos más altos para el embalse se detectaron en E2: máximo de $5,43 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$ con una media de $2,57 \pm 1,87$. Los flujos mayores de seston se registraron en noviembre (media: $3,96 \pm 0,81$). Estos corresponden a valores con un orden de magnitud mayor que los obtenidos para E1. En este mes también se encontró el promedio más alto de TSS en todo el embalse ($1,44 \pm 1,042$). Se evidenció en E1 un gradiente consistente en el que las mayores TSS se presentaron por debajo de los 10 m de profundidad (figura 4).

Tasas de sedimentación del nitrógeno. Las TSN presentaron una media general de $0,0328 \pm 0,0418 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$. Los promedios más altos se encontraron durante noviembre ($0,0292 \pm 0,0058$) mientras los más bajos fueron en octubre. Se presentó además un descenso leve en marzo. Sin embargo, este comportamiento no reflejó lo ocurrido en las dos zonas del embalse (figura 3).

En E1, con media general de $0,0211 \pm 0,0165 \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$, el comportamiento fue similar al

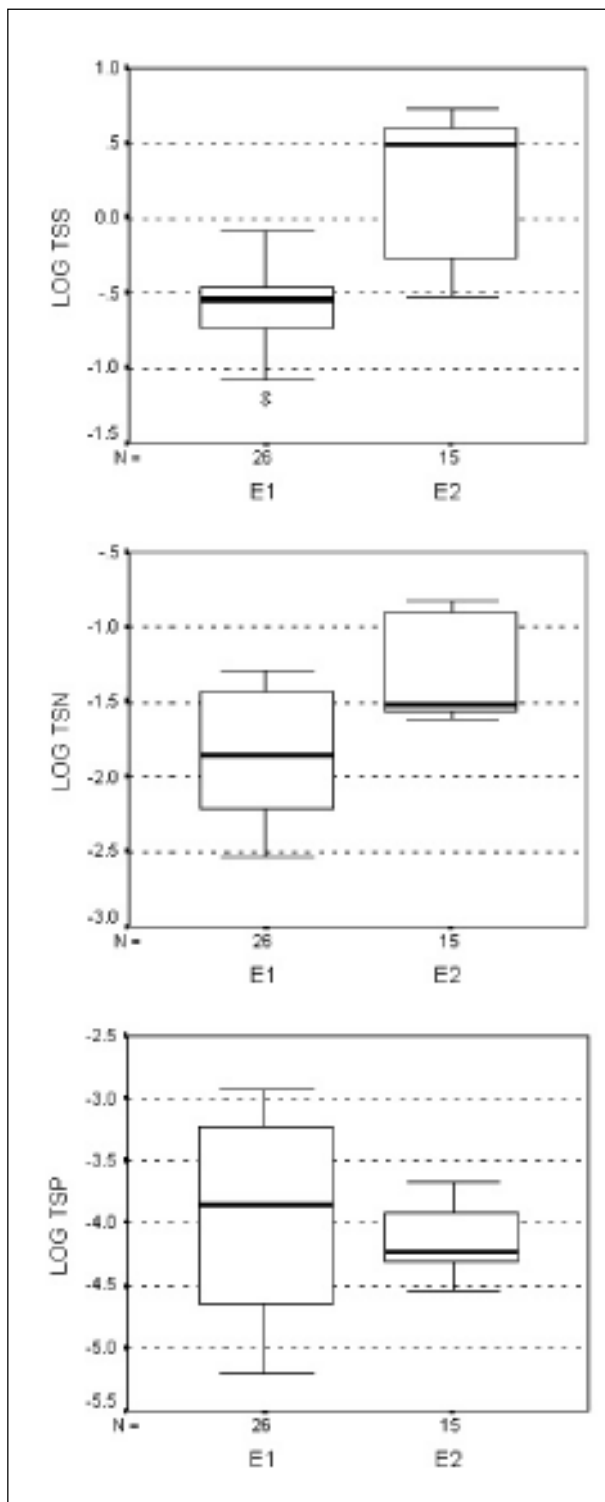


Figura 2. Comportamiento de las tasas de sedimentación del seston (TSS), del nitrógeno (TSN) y del fósforo (TSP) en las dos zonas muestreadas

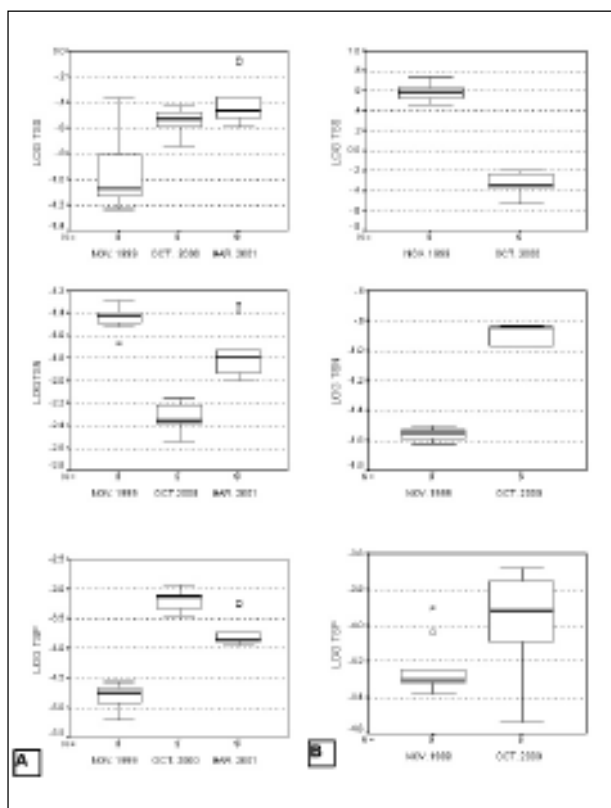


Figura 3. Comportamiento de las tasas de sedimentación del seston (TSS), del nitrógeno (TSN) y del fósforo (TSP) en los meses estudiados, en la primera (A) y en la segunda (B) estación

mostrado por los promedios del embalse, probablemente porque en esta zona se encontraron los valores mínimos ($0,00286$) en octubre; mes que coincide con el promedio general más bajo. En E2, la media más baja se encontró en noviembre ($0,0207 \pm 0,0025$) mientras que en octubre los valores fueron notablemente más altos ($0,133 \pm 0,019$). Por tanto, aunque el comportamiento general del embalse para las TSN fue similar al de las TSS, la variación por zona y época parece tener influencia de factores distintos. Al igual que para las TSS, las TSN fueron mayores en E2 (figura 2). Por debajo de 10 metros hubo un leve descenso en los valores de TSN promedio, aunque en noviembre de 1999 y marzo de 2001 parece que hubo un aumento importante (figura 3).

Tasas de sedimentación del fósforo. Las TSP mostraron comportamiento totalmente opuesto al de las TSN (figura 2). El promedio menor se

encontró en E2 ($7,3 \times 10^{-5} \pm 4,7 \times 10^{-5} \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$) mientras que E1 mostró el valor máximo ($3,28 \times 10^{-4} \pm 3,61 \times 10^{-4} \text{ mg (cm}^2 \text{ d)}^{-1}$) (figura 2). Con respecto a las diferentes épocas, en E1, las mayores TSP fueron en octubre ($4,14 \times 10^{-4} \pm 3,38 \times 10^{-4}$) y las más bajas en noviembre y marzo, cuando las TSN son más altas. El aumento en octubre se correlacionó con un incremento en E2 (figura 3). En esta zona del embalse los valores mayores se encontraron en octubre, aunque con gran variación. En promedio, los flujos del fósforo fueron menores en E2 (embalse: $7,35 \times 10^{-5} \pm 4,7^{-5}$; presa: $3,28 \times 10^{-4} \pm 3,61 \times 10^{-4}$) aunque E1 presentó variación muy amplia. Con respecto al comportamiento vertical, las TSP aumentaron por debajo de los 10 m, en E1 (figura 4).

Estadística. Los coeficientes de variación (CV) para las réplicas de las TSS estuvieron entre 1 y 30%. Estos coeficientes, exceptuando algunos valores cercanos al 30%, se encontraron dentro de los rangos reportados por otros autores como error experimental normal con el uso de trampas de sedimentos (Bloesch y Burns, 1980; Gasith, 1976). El 43% de los datos tuvo valores de CV menores del 10%, y el 72% fueron coeficientes de variación menores del 25%. La variación temporal en E1 fue del 67% en promedio; la variación vertical osciló entre el 20 y el 84%. En E2 la variación vertical estuvo entre el 20 y el 25%.

Los CV para las TSP y las TSN fueron más altos que los encontrados para las TSS. Esta observación es similar a la de Bloesch y Burns (1980) y Gasith (1976) para el contenido de nitrógeno y fósforo en trampas de seston.

Los análisis de varianza, mostraron que las diferencias indicadas arriba para TSS y TSP fueron significativas tanto para las épocas como para las profundidades (tabla 1). Los valores de probabilidad para el nitrógeno fueron significativos y presentaron interacción, que señala la presencia de efectos confundidos de los factores sobre la variable. Éstos están relacionados con el efecto de las épocas climáticas sobre la distribución vertical de los nutrientes particulados.

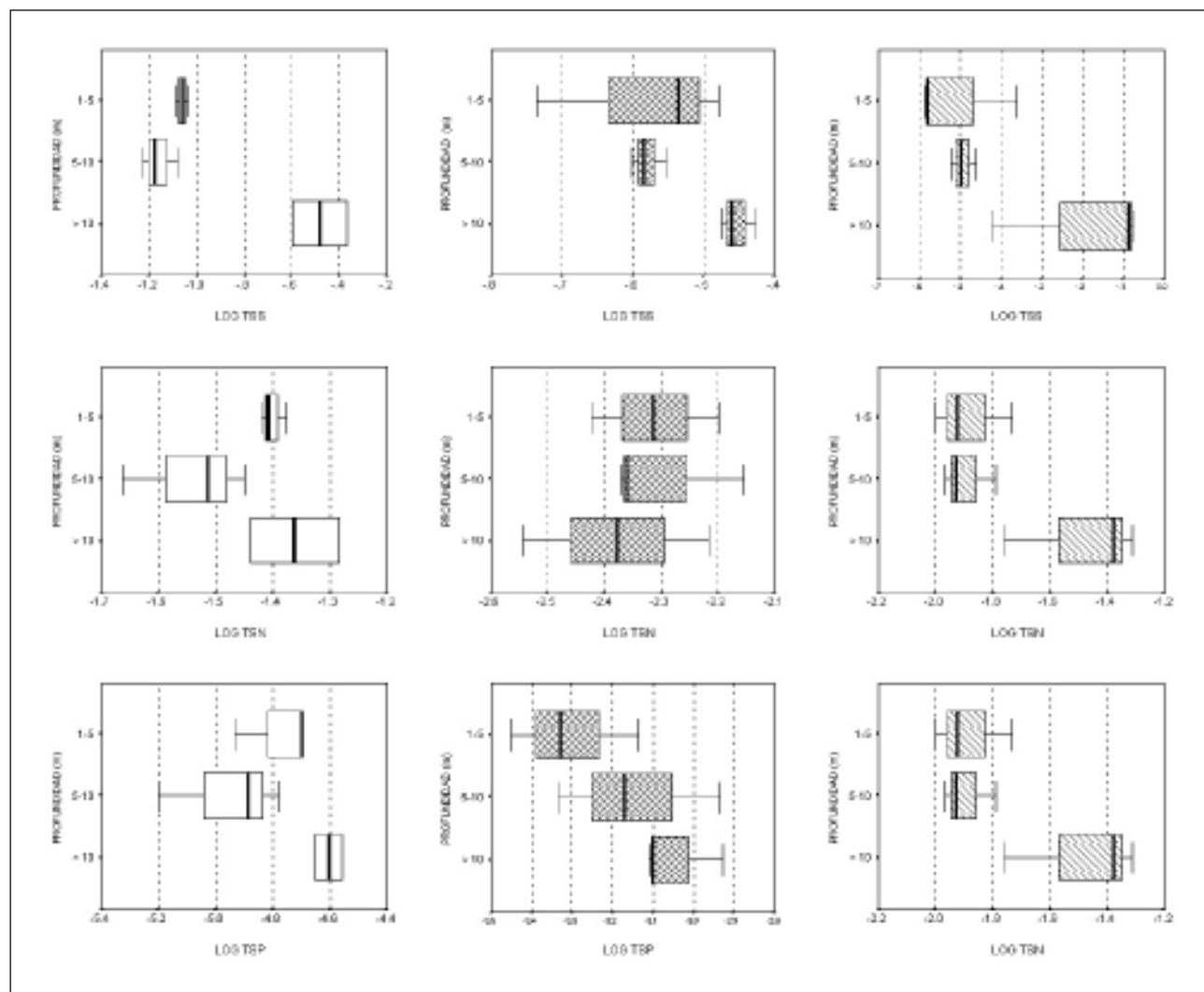


Figura 4. Comportamiento de las tasas de sedimentación del seston (TSS), del nitrógeno (TSN) y del fósforo (TSP) en los tres meses estudiados (noviembre de 1999 en blanco, octubre de 2000 rombos, marzo de 2001 diagonales)

En general, los coeficientes de variación de las TSS, TSP y TSN fueron mayores en la Presa, especialmente en marzo de 2003 (tabla 2). En E2 se pueden observar también los valores medios más altos para TSS y TSP.

DISCUSIÓN

Los datos encontrados sugieren que en E1 y E2, los factores dominantes de la dinámica del material sestónico son diferentes. Aunque en promedio la dispersión relativa es similar entre las dos zonas, variables biológicas y relacionadas con el

ciclo hidrológico anual parecen relacionarse con la variación de cada zona en una escala temporal.

Las poblaciones planctónicas pueden ser importantes reguladores de las tasas de sedimentación en E1 debido a que transforman material disuelto en particulado; aunque es de esperarse que durante los meses lluviosos las cargas del río Cubillos introduzcan mayor cantidad de materiales en suspensión; en marzo, que es el mes con menores afluencias, se registraron las mayores TSS.

Este comportamiento es inesperado teniendo en cuenta que durante los periodos poco lluviosos

Tabla 1. Resumen del análisis de varianza para diferentes factores de variación y su interacción con las tasas de sedimentación del seston (TSS), del nitrógeno (TSN) y del fósforo (TSP) en el embalse del Neusa

Variable (Logaritmo)	Fuente de variación	F	P
TSS	Zona	796,400	0,000
	Época	14,420	0,000
	Profundidad	13,930	0,010
	Interacción	1,753	0,060
TSN	Zona	389,700	0,000
	Época	4,320	0,000
	Profundidad	0,590	0,053
	Interacción	3,440	0,030
TSP	Zona	0,220	0,640
	Época	206,620	0,000
	Profundidad	9,470	0,002
	Interacción	1,689	0,190
Prueba de Levene (homogeneidad de varianzas)			
TSS			0,593
TSN			0,194
TSP			0,453

los valores de nitrógeno y fósforo disueltos suelen ser bajos y limitan el crecimiento de las poblaciones planctónicas. Es factible que los valores altos de TSS en marzo sean consecuencia del transporte de material particulado. Sin embargo, los valores de TSN, TSP y los cocientes NT:PT para este mes (78-140) señalaron cantidades de nitrógeno altas en el seston; por tanto, la resuspensión es poco probable. Por otra parte, las mayores evaporaciones van de enero a marzo, sugiriendo que el aumento en los valores de TSS se debió al efecto de la concentración del material particulado. Sin embargo, este efecto podría ser mayor sobre la conductividad y por tanto, las poblaciones planctónicas, que encuentran los nutrientes más disponibles, incrementan su producción en un menor volumen de agua favoreciendo el incremento encontrado. Adicionalmente, en esta zona los caudales del río Cubillos cumplen un papel importante en los procesos de mezcla de la columna de agua (Gómez *et al.*, 1997; Uchima, 1987). Teniendo en cuenta que en marzo se encuentran las menores afluencias mensuales multi-anales, es de esperarse que la columna de agua

sea más estable favoreciendo la sedimentación de las partículas en suspensión.

Por otro lado, las diferencias en las TSS existentes entre los dos meses lluviosos están de acuerdo con la variación mensual multianual de los caudales del río Cubillos, lo que sugiere que en periodos de lluvia los aportes de los tributarios pueden explicar la variación de las TSS en El.

La variación de los contenidos de nitrógeno y fósforo en el seston no siguió el mismo patrón que las TSS. A pesar del aumento de éstas durante marzo con respecto a octubre y noviembre, se observó importante una baja en las TSN y aumento en las TSP, lo cual indica enriquecimiento relativo del seston con fósforo en marzo con respecto a noviembre y empobrecimiento con respecto a octubre (figura 3). Es posible que el transporte horizontal de necromasa de las macrofitas provocado por el descenso de los niveles del agua del embalse, reduzca los contenidos de nitrógeno del seston en marzo comparado con noviembre.

En octubre, con valores mayores de TSS, se encontraron TSN bajas y TSP altas (figura 3). Este hecho mostró que la fuente de material particulado este mes tuvo un origen diferente al de noviembre. Los bajos contenidos de nitrógeno podrían deberse a la influencia de material particulado proveniente de la resuspensión de los sedimentos de zonas menos profundas que generalmente tienen bajos contenidos de nitrógeno y mayores de fósforo, debido a la relativa facilidad con que se solubiliza el nitrógeno y la mayor estabilidad del fósforo.

Los valores de N:P encontrados en octubre (4-15) son bastante cercanos a los de los sedimentos (4,8), lo cual sugiere que la resuspensión de zonas menos profundas y el transporte horizontal pueden ayudar a los valores de TSS encontrados en octubre. Estos fenómenos podrían ser causados por turbulencia en el embalse, generada por los vientos, las corrientes que ingresan al embalse y los gradientes físicos y químicos. La importancia de estos procesos depende de la relación existente entre el área del espejo de agua, la profundidad máxima y la dirección predomi-

Tabla 2. Valores medios ($\text{mg (d cm}^2\text{)}^{-1}$) y de dispersión (desviación estándar De, coeficiente de variación CV y máximos Máx y mínimos Mín) para las tasas de sedimentación del seston (TSS), del nitrógeno (TSN) y del fósforo (TSP) en diferentes épocas de muestreo (época 1 = noviembre de 1999, época 2 = octubre de 2000, época 3 = marzo de 2001)

TSS							
	Época	Media	Mediana	De	CV	Máx	Mín
Presa	1	$1,7 \times 10^{-1}$	$8,7 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	84	$4,3 \times 10^{-1}$	$5,9 \times 10^{-2}$
	2	$3,0 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-1}$	$5,9 \times 10^{-2}$	20	$3,7 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$
	3	$4,3 \times 10^{-1}$	$3,4 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-1}$	60	$8,4 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-1}$
Piscícola	1	$4,0 \times 10^0$	$3,9 \times 10^0$	$8,1 \times 10^{-1}$	20	$5,4 \times 10^0$	$3,0 \times 10^0$
	2	$4,8 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	25	$6,3 \times 10^{-1}$	$3,0 \times 10^{-1}$
TSN							
Presa	1	$3,8 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-3}$	24	$5,2 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$
	2	$4,9 \times 10^{-3}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	28	$7,0 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-3}$
	3	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	69	$4,9 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Piscícola	1	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	12	$3,2 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$
	2	$1,3 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-2}$	14	$1,5 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$
TSP							
Presa	1	$1,8 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-6}$	38	$2,8 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-6}$
	2	$7,3 \times 10^{-4}$	$7,3 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$	40	$1,2 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-4}$
	3	$2,3 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	81	$1,2 \times 10^{-23}$	$6,3 \times 10^{-6}$
Piscícola	1	$5,4 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	28	$9,2 \times 10^{-5}$	$4,2 \times 10^{-5}$
	2	$1,0 \times 10^{-6}$	$9,9 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-5}$	62	$2,1 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-5}$

nante del viento, así como de su duración y de la estabilidad de la columna de agua, entre otros (Hakanson, 1982; Thornton, 1990). Es posible entonces que el curso del río Cubillos y sus corrientes sean las causantes de la resuspensión de los sedimentos, que se acumulan en las zonas de deltas y de transición en épocas de baja turbulencia y que pueden ser transportados a una zona más profunda en E1, o que el mismo río aporte mayores cantidades de material alóctono que suele tener bajos porcentajes de nitrógeno, gracias a la mineralización parcial que sufre el material particulado durante su llegada a la zona más baja del embalse.

Aunque los promedios anuales de precipitación y afluencias en noviembre y octubre son ligeramente diferentes, el efecto de la corriente sobre los sedimentos está relacionado con el nivel de la columna de agua. En octubre, el embalse suele alcanzar los niveles más bajos del año; por lo tanto, el ingreso de la corriente del río que tiene agua más fría y densa, puede llegar a los sedimentos

con mayor facilidad que en noviembre cuando los niveles casi logran su máximo.

En E2, los valores encontrados sugieren que hay factores adicionales relacionados con la variación de las tasas de sedimentación. Aunque las épocas muestreadas en esta zona son similares en cuanto al régimen pluvial y teniendo en cuenta que los valores de biomasa fitoplanctónica y productividad primaria y su variación no son muy diferentes entre E1 y E2 (Rivera, 1997), es posible que las macrofitas sumergidas puedan explicar los valores de las TSS, TSP y TSN encontradas aquí.

Esta influencia puede deberse al aporte de material particulado, proveniente de las cuencas de drenaje, que queda atrapado en las masas de *E. densa* o por los cambios en el nivel del embalse que pueden liberar material particulado proveniente de la necromasa de *E. densa*. Esto es factible teniendo en cuenta que las fluctuaciones del nivel del agua en el embalse del Neusa pueden alcanzar dos a

tres metros en la zona más profunda y por tanto un cambio mucho mayor en la zona litoral de menor pendiente. Lo anterior sugiere que en esta zona del embalse, la dinámica temporal de la fitomasa de macrofitas afecta la distribución de los materiales particulados, especialmente por la liberación de necromasa. Teniendo en cuenta que la necromasa representa entre el 10-21 % de la fitomasa total y E2 está ampliamente influenciado por la cola del embalse, que tiene los valores más elevados de peso seco de fitomasa (Carrillo y Guarín, 2000), es importante cuantificar el papel de las macrofitas en E2 y el embalse en general.

Las macrofitas acuáticas son importantes porque retienen y liberan materiales y nutrientes en los ecosistemas lacustres (Barko y James, 1998; Godshalk y Barko, 1985). En el caso del embalse del Neusa, la distribución horizontal de *E. densa* parece estar controlada por la pendiente y por la profundidad (Carrillo y Guarín, 2000).

Cerca del 60% del material particulado de los tributarios se queda en la zona de delta del embalse (Thornton, 1990). Si se tiene en cuenta que las zonas adyacentes a las desembocaduras de los afluentes principales se encuentran colonizadas por una franja de varios metros de *E. densa* y que estas macrofitas pueden actuar como un filtro que reduce rápidamente la energía de las partículas provenientes de los tributarios, es posible que este porcentaje sea mucho mayor. Entonces, ¿de dónde provienen los mayores valores de TSS registrados en E2?

En las zonas templadas, las macrofitas acumulan material durante los meses de sol y lo liberan casi en su totalidad durante el periodo estival (Getsinger y Dillon, 1984; Haramoto y Ikusima, 1988), pero en las zonas tropicales no hay un periodo de liberación total y por tanto la producción de biomasa puede llegar a ser más alta. Sin embargo, gracias a los cambios de nivel que se presentan en el embalse como consecuencia de la regulación de los caudales del río Neusa, es posible que durante los periodos secos se genere gran cantidad de necromasa, la cual se descompone en las orillas. Cuando los niveles aumentan du-

rante los periodos de lluvia, el material puede ser lavado y reingresado al sistema como sólidos en suspensión y material disuelto; este material puede contener menores porcentajes de nitrógeno debido a la mineralización previa (Hestand *et al.*, 1973). Esta hipótesis concuerda con los bajos contenidos de nitrógeno del seston en noviembre de 1999.

Rivera (1997) encontró en noviembre que la columna de agua presentó una marcada estratificación de oxígeno; las bajas afluencias y las mayores TSS sugieren que en marzo ocurre lo mismo. Octubre por el contrario, es un mes con afluencias importantes y una columna de agua menos profunda que se puede mezclar fácilmente gracias a la energía de los afluentes, particularmente en E1 donde el río Cubillos puede llegar a algunos estratos profundos. Esta observación concuerda con las diferencias horizontales encontradas. En E1, donde la estratificación es más marcada debido a la profundidad y por tanto el hipolimnio es más amplio, los coeficientes de variación fueron mayores en la mayoría de los casos. En conclusión, en E1 la variación vertical de las TSS parece estar relacionada con la estabilidad de la columna de agua; mientras que en E2 tal variación parece estar relacionada con los contenidos de nitrógeno y el fósforo del seston por la resuspensión de sedimentos y el ingreso de material detrítico de la orilla.

Si las condiciones de estabilidad son lo suficientemente constantes a lo largo del ciclo anual, lo que es posible según la variación anual de los perfiles de oxígeno registrada en esta investigación y por Rivera (1997), los tiempos de residencia del material particulado en la columna de agua pueden verse reducidos considerablemente. Esta tendencia se observó en los perfiles de las tasas de sedimentación del seston, nitrógeno y fósforo aunque para el nitrógeno las diferencias no fueron significativas.

Teniendo en cuenta que el nitrógeno puede ser metabolizado por los microorganismos, incluso en condiciones anaerobias, es posible que la ho-

homogeneidad aparente de las TSN, encontrada en este trabajo, a diferentes profundidades se deba a la pérdida de nitrógeno del compartimiento particulado. Tal pérdida se da a través de procesos como la amonificación y la desnitrificación que se relacionan con el aumento en las concentraciones de amonio en el hipolimnio y las menores concentraciones de NT en esta zona con respecto a zonas superficiales.

No era de esperar las similitudes en las TSP entre E1 y E2 por las diferencias encontradas para las TSS; es posible que el transporte horizontal fuese el causante de este comportamiento. Como el fósforo tiene un ciclo sedimentario y puede adherirse con facilidad a la materia orgánica e inorgánica particulada a través de la formación de complejos metálicos en tanto que el nitrógeno se solubiliza con facilidad debido a su ciclo de carácter microbiano, es posible que el transporte horizontal de material particulado desde la zona litoral hacia la Presa genere la homogeneidad encontrada. Bloesch & Uehlinger (1986), evaluaron las diferencias horizontales en la sedimentación de un lago suizo; a pesar de las diferencias encontradas para cuatro estaciones diferenciadas (zona limnética profunda, somera, zona litoral con influencia de afluentes y sin ella) muestreadas durante un año, consideraron irrelevante la diferencia espacial debido a la importancia de los procesos de transporte horizontal que mueven material desde todas las zonas muestreadas hasta la zona central. Por lo tanto, es importante su evaluación y cuantificación que evidentemente afecta las tasas de transporte vertical medidas en este trabajo.

Los valores encontrados para las TSS son comparables con los de Vargas y Ramírez (2002) en la represa de La Fe. Éstos últimos tienden a ser mayores debido a la resuspensión que causa el bombeo de aguas del río Pantanillo. Ramírez y Noreña (2001) reportan datos de TSS superiores a los mostrados aquí, para la laguna del Parque Norte (Medellín, Colombia), probablemente porque la laguna es bastante somera y está sometida a procesos de mezcla favorecidos por el viento.

El comportamiento vertical del seston encontrado en la presa (figura 4) mostró que la estabilidad del hipolimnio reduce el tiempo de residencia del material particulado. Esto sumado a las bajas concentraciones de oxígeno y las bajas temperaturas del embalse, dificulta los procesos de mineralización haciendo que los sedimentos profundos puedan convertirse en un sumidero de nutrientes.

En conclusión, se encontraron diferencias significativas para las TSS, TSP y TSN entre las dos zonas muestreadas y los patrones de variación en las épocas de muestreo, lo cual concuerda con la predicción planteada al inicio de este trabajo. Tales disimilitudes se atribuyeron a la distribución espacial de la macrofitas sumergida *E. densa* en el embalse y posiblemente a su dinámica temporal, que aún no ha sido estudiada. Se registraron los mayores valores de TSS con bajos contenidos de nitrógeno en la zona de influencia litoral y altas TSS con altos contenidos de nitrógeno en la zona limnética, en un periodo con altos niveles de agua que sugieren lavado de material de macrofitas (detritos) en la primera zona e influencia de la producción de plancton y de partículas alóctonas en la segunda zona. Aunque en este trabajo se vislumbra la importancia de las macrofitas en los procesos de sedimentación del nitrógeno y el fósforo, es importante la cuantificación de los procesos de transporte horizontal, que en definitiva regulan los flujos de nutrientes hacia zonas profundas donde no se da la resuspensión haciendo que los sedimentos se conviertan en un sumidero de sustancias nutritivas, controlando la disponibilidad de nutrientes asimilables para la producción general del embalse.

AGRADECIMIENTOS

A los laboratorios de Ingeniería Ambiental y de Química Agrícola de la Universidad Nacional (sede Bogotá) por facilitar la infraestructura para algunos análisis. A la Corporación Regional Autónoma, CAR, por facilitar la información hidrológica y la ayuda logística de campo. A los profesores

Amparo Canosa y Gabriel Pinilla por sus comentarios y discusiones sobre este trabajo. Esta es una producción del proyecto de investigación “Flu-

jos de nitrógeno y fósforo en el embalse del Neusa” financiado por la Universidad Nacional y Colciencias.

REFERENCIAS

- American Public Health Association (APHA).** 1992. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. 18 ed. Baltimore, USA.
- Barko J, James W.** 1998. Effects of submerged macrophytes on nutrient dynamics, sedimentation and resuspension. *En: Jeppesen S, Sondergaard C (eds.). The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*. Springer-Verlag, New York, pp. 197-214.
- Bloesch J, Burns N.** 1980. A critical review of sedimentation trap technique. *Schweiz Z Hydrol* 42:15-55.
- Bloesch J, Uehlinger U.** 1986. Horizontal sedimentation in a eutrophic Swiss lake. *Limnol Oceanogr* 31:1094-1109.
- Blomqvist S, Hakanson L.** 1981. A review on sediment trap in aquatic environments. *Arch Hydrobiol* 91:101-132.
- Callieri C, Bertoni C, De Marco C, Contesini M.** 1991. Settling flux and sinking velocity of seston in Lago di Mergozzo (Northern Italy) and influence of microbial activity on the decomposition of entrapped organic material. *Hidrobiología* 213:155-165.
- Carrillo Y, Guarín A.** 2000. Dinámica de la biomasa de *Egeria densa* en el embalse del Neusa. Tesis de pregrado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Gasith A.** 1976. Seston dynamics and tripton sedimentation in the pelagic zone of a shallow eutrophic lake. *Hidrobiologia* 51:225-231.
- Getsinger KD, Dillon CR.** 1984. Quiescence, growth and the senescence of *Egeria densa* in Lake Marion. *Aquat Bot* 20:239-338.
- Gibson CE, Guillot J.** 1997. Sedimentation in a large lake: the importance of fluctuations in water level. *Freshwater Biol* 37:597-604.
- Godshalk G, Barko J.** 1985. Vegetative succession and decomposition in reservoirs. *En: Gunnison D (ed.). Microbial Processes in Reservoirs*. Dr W Junk, Dordrecht, Boston, Lancaster, pp. 59-77.
- Gómez G, Guillot G, Medina R.** 1997. Estudio limnológico del embalse del Neusa: Informe Final de Investigación. Universidad Nacional de Colombia y Fondo para la Protección del Medio Ambiente José Celestino Mutis, FEN, Bogotá, Colombia.
- Hakanson L.** 1982. Bottom dynamics in lakes. *Hidrobiología* 91:9-22.
- Haramoto T, Ikusima I.** 1988. Life cycle of *Egeria densa* planch. An aquatic plant naturalized in Japan. *Aquatic Botany* 30:389-403.
- Hestand RS, May BE, Schultz DP, Walker CR.** 1973. Ecological implications of water levels on plant growth in a shallow water reservoir. *Hyacinth Control J* 11:54-58.
- Hilton J.** 1985. A conceptual framework for predicting the occurrence of sediment focusing and redistribution in small lakes. *Limnol Oceanogr* 30:1131-1143.
- Margalef R.** 1983. *Limnología*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Ramírez JJ, Noreña J.** 2001. Comportamiento de las tasas de sedimentación del material seston en dos periodos climáticos contrastantes en un lago urbano raso: laguna del Parque Norte, Medellín (Colombia). *Actual Biol* 23:65-74.
- Rivera C.** 1997. Variaciones en la composición y abundancia vertical y horizontal del fitoplancton del embalse del Neusa. Tesis de pregrado, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Thornton K, Kimmel B, Payne F.** 1990. *Reservoir Limnology: ecological perspectives*. John Wiley and Sons Inc, USA.
- Uchima J.** 1987. Aspectos limnológicos del embalse del Neusa. Tesis de pregrado, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Vargas RA, Ramírez JJ.** 2002. Variación espacio-temporal de las tasas de sedimentación del material seston en un embalse tropical de alta montaña: represa de La Fe, El Retiro, Antioquia, Colombia. *Actual Biol* 24:163-170.
- Verschuren D.** 1999. Influence of depth and mixing regimen on sedimentation in a small, fluctuating tropical lake. *Limnol Oceanogr* 44:1103-1113.