

## DETERMINACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE FÓSFORO EN EL LAGO DE TOTA

### SPATIAL TEMPORAL DETERMINATION OF PHOSPHORUS CONCENTRATION IN LAKE OF TOTA

Rubén D. Cordero\*, J. Efraín Ruiz\* y Edgar F. Vargas\*

Recibido: 18/08/05 – Aceptado: 12/12/05

#### RESUMEN

Durante los meses de julio a noviembre del año 2003 se llevó a cabo el estudio sobre la determinación espacio-temporal de la concentración de fósforo en el Lago de Tota (Boyacá, Colombia). Las muestras se tomaron con la botella Van-Dorn tipo horizontal de dos litros de capacidad en el estrato superficial hasta 20 cm en la columna de agua y a 10 m de profundidad. Las distintas formas de fósforo estudiadas demuestran que existen diferencias significativas en sus concentraciones; los mayores valores se encontraron en el sector denominado Lago Chico y los menores en el área de Lago Grande; este comportamiento se encuentra muy asociado con los usos agrícolas del suelo en la zona litoral y con los factores climáticos, especialmente la precipitación en el área de estudio.

**Palabras clave:** fósforo orgánico, fósforo hidrolizable, fósforo reactivo, Lago de Tota.

#### ABSTRACT

The lapse from July to November of 2003 a study was made to determine the spatial and temporal concentration of phosphorus in the lake of Tota (Boyacá, Colombia). Samples were taken with a Van-Dorn bottle of the horizontal type of two liter capacity in the superficial stratum up to 20 cm in the water column and at 10 m depth. The different forms of phosphorus studied, show that there are significant differences in their concentrations, the highest values being found in the sector known as Lago Chico and the lowest in the area of Lago Grande; this behavior is found to be closely related to the agricultural uses of the land in the littoral zone and additionally with the climatic factors especially the precipitation in the area investigated.

**Key words:** organic phosphorus, hydrolysable phosphorus, reactive phosphorus, Lake of Tota.

\* Departamento de Química, Universidad de los Andes, Carrera 1 No. 18A-10, Bogotá, D. C., Colombia. Correo electrónico: edvargas@uniandes.edu.co

## INTRODUCCIÓN

El fósforo es el elemento limitante de todo ecosistema y de aquí surge la importancia de conocer su concentración disponible en un medio, ya que ésta puede determinar su grado de productividad biológica (1-3).

El conocimiento acerca de la dinámica del fósforo en lagos y lagunas del mundo se ha obtenido desde finales del siglo XIX cuando se iniciaron estudios en Europa y Norteamérica (3, 4). En Colombia, sin embargo, estos estudios son escasos y los realizados (5-10) se hicieron con técnicas menos exactas que las disponibles en la actualidad. La importancia de conocer la dinámica del fósforo de los lagos y lagunas que existen en Colombia radica en la determinación de la calidad del agua y el conocimiento del tipo de cuerpo de agua que se estudia.

Desde el punto de vista ecológico, el crecimiento de las algas y macrófitos acuáticos tanto en los lagos como en las ciénagas depende fundamentalmente de la cantidad de fósforo disponible y de su ritmo de reciclado en la zona trofógena. Es importante anotar que concentraciones altas de fósforo en forma de fosfatos en la fase soluble propician el proceso de eutrofización, lo cual lleva a la proliferación de organismos fitoplanctónicos, especialmente algunos géneros de los grupos de las cianofíceas y clorofíceas. También se dan las condiciones favorables para que se presenten organismos zooplanctónicos, como ciertos rotíferos, protozoarios y cladóceros. Se sostiene que un lago eutrofizado es un cuerpo de agua muy enriquecido donde las plantas proliferan de manera excesiva. Este proceso se basa en

el concepto de red alimentaria y se explica diciendo que en una biocenosis en equilibrio: la producción neta de los productores primarios por unidad de tiempo es consumida o descompuesta totalmente. Si el ritmo de producción por unidad de tiempo supera el proceso de destrucción y consumo, la cantidad de materia vegetal aumenta, suministrando más materia orgánica al ecosistema, de manera que si no llega un momento en que alguna carencia frena la fertilidad del medio, el lago se hará cada vez más rico y experimentará una eutrofización acelerada, lo cual no es deseable para el cuerpo de agua.

En este estudio se determinó la dinámica del fósforo en el Lago de Tota, situado en el departamento de Boyacá, Colombia, el cual es el principal cuerpo de agua del país. Para esto se determinaron las concentraciones de fósforo reactivo, hidrolizable y orgánico para los tres tipos de fósforo: filtrado, particulado y total, en siete sitios del lago y en tres épocas del año. Se analizaron muestras tomadas superficialmente y muestras tomadas a 10 m de profundidad. Para la determinación del fósforo se utilizaron dos procedimientos generales, el primero fue la conversión de la forma de fósforo de interés a ortofosfato soluble y el segundo la determinación colorimétrica de este último. El método utilizado para la determinación colorimétrica fue el de ácido ascórbico (11), el cual se encuentra entre las técnicas más precisas desarrolladas.

## ÁREA DE ESTUDIO

El Lago de Tota (5°28'13'', 5°39'14'' N, 72°51'38'', 73°0'00'' O) se localiza sobre la cordillera Oriental colombiana, en el centro-oriente del departamento de

Boyacá. El nivel máximo del lago corresponde a la cota de 3.015 m.s.n.m. y su forma es subrectangular elongada, con un eje principal en la dirección noroeste. Ver Figura 1.

El lago tiene un área de 60 km<sup>2</sup> con un área de cuenca tributaria de 170 km<sup>2</sup>. La longitud máxima del lago es de 12 km y su ancho máximo es de 6,5 km. El volumen es de 1.920 millones de metros cúbicos, con una profundidad media de 30 m y una profundidad máxima de 60 m. La temperatura media durante el día es de 11 °C.

#### PARTE EXPERIMENTAL

Se determinaron las concentraciones de fósforo reactivo, hidrolizable y orgánico para los tres tipos de fósforo: filtrado, particulado y total. Se seleccionaron siete sitios de muestreo, (Figura 1), y en cada sitio se tomaron muestras superficiales y

a diez metros de profundidad utilizando la botella de Van-Dorn. Se realizaron tres muestreos durante el segundo semestre del año 2003, en los meses de julio, septiembre y noviembre.

Las muestras tomadas se fijaron con HgCl<sub>2</sub> para evitar alteración por posteriores procesos metabólicos y catabólicos (1, 12). Para la determinación de las concentraciones de fósforo disuelto y fósforo particulado las muestras se pasaron por una membrana de 0,45 μm. La determinación de las concentraciones de fósforo reactivo, hidrolizable y orgánico se obtuvo siguiendo el procedimiento descrito en las referencias 11 y 13; en la determinación de la concentración de fósforo reactivo la muestra se sometió directamente al método del ácido ascórbico, sin realizar una previa hidrólisis ácida o digestión oxidativa; para la determinación de la concentración de fósforo hidrolizable las muestras se sometie-

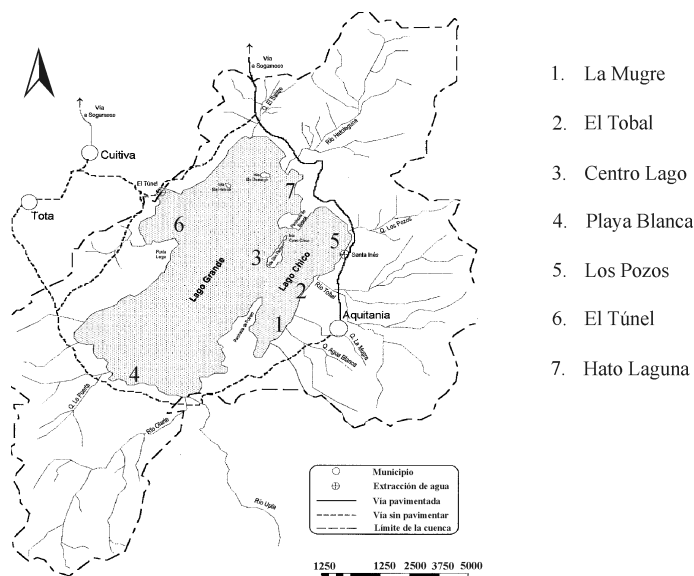


Figura 1. Mapa del Lago de Tota con sitios de muestreo.

ron a hidrólisis ácida con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico a una temperatura de 100 °C y una presión de 100 kPa por 30 min. Para la determinación del fósforo orgánico se realizó una digestión oxidativa con persulfato de potasio y ácido sulfúrico a una temperatura de 100 °C y una presión de 100 kPa por 30 min. Una vez realizadas la hidrólisis ácida y la digestión oxidativa, las muestras se sometieron al método del ácido ascórbico para la cuantificación de fósforo. Para la hidrólisis ácida y la digestión oxidativa se utilizó un digestor Analitical. La lectura de las absorbancias para la determinación de fósforo se realizó en un espectrofotómetro Genesys 5 utilizando una longitud de onda de 880 nm. Cada determinación se realizó por triplicado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las concentraciones de las tres clases de fósforo: reactivo, hidrolizable y orgánico, se relacionaron con las siguientes variables:

– Estrato: nivel de profundidad donde se tomó la muestra: superficial (1) a 10 m de profundidad (2).

– Muestreo: mes del año en que se realizó la toma de la muestra: julio (1), septiembre (2), noviembre (3).

– Sitio: punto o lugar del lago donde se tomó la muestra: La Mugre (1), El Tobal (2), Centro Lago (3), Playa Blanca (4), Los Pozos (5), El Túnel (6), Hato Laguna (7).

– Tipo: tipo de fósforo al que corresponde la muestra: total o no filtrado (1), filtrado o disuelto (2), particulado (3).

El análisis estadístico se realizó con el programa Statistix 7.0. Se analizaron las varianzas generales para las tres clases de fósforo en forma independiente, tomando como variable aleatoria la concentración de fósforo medida en mg/L y como variables categóricas o de agrupamiento el estrato, el muestreo, el sitio y el tipo. Una vez concluido el análisis de varianza, se realizó para cada clase de fósforo la prueba de Tukey de comparación de medias de los datos de los grupos que presentaron diferencias significativas en la media de concentración de fósforo. Para determinar las diferencias en la concentración de fósforo para cada clase, se compararon las medias totales entre las tres clases de fósforo (reactivo, hidrolizable y orgánico) mediante un análisis de varianza. Se fijó un intervalo de confianza, que indica el rango en que se encuentran los valores de concentración de fósforo, del 95%.

Los resultados de la concentración de fósforo mostraron que para las variables muestreo, sitio y tipo existen diferencias significativas para las tres clases de fósforo (Figuras 2 a 5), mientras que para la variable estrato sólo se encontraron diferencias significativas en el fósforo orgánico, con una concentración de 0,2276 mg/L a diez metros de profundidad y una concentración de 0,2182 mg/L para la muestra superficial. La diferencia de concentración de fósforo entre estratos se debe a que las muestras se tomaron a la luz del día y por lo tanto gran parte del zooplancton desciende para evitar la exposición solar (14-17).

Las concentraciones más altas de fósforo de todas las clases y tipos (Figura 2), se encuentran en los sitios La Mugre, El Tobal y Los Pozos, ubicados en Lago

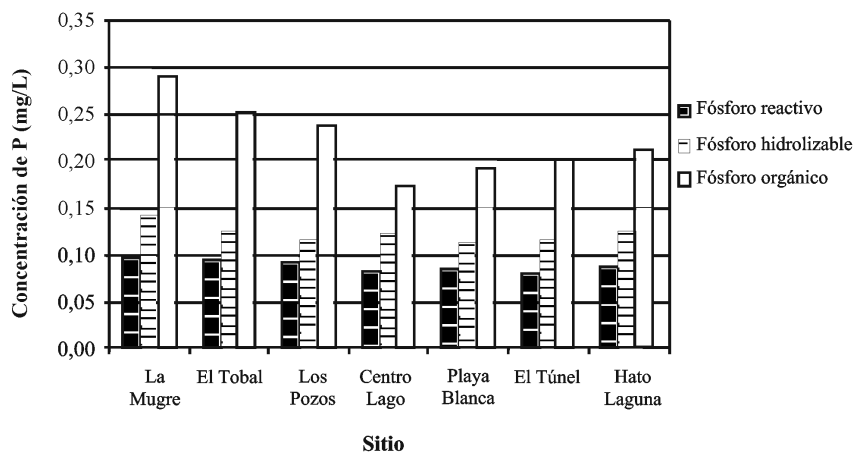


Figura 2. Concentración de las clases de fósforo en los sitios de muestreo.

Chico. En estos sitios desembocan afluentes que traen consigo gran cantidad de materia orgánica proveniente del lavado que se realiza en los cultivos agrícolas de las zonas más altas y la quebrada La Mugre que trae las aguas residuales del municipio de Aquitania.

La concentración más baja de fósforo se encuentra en Centro Lago, sitio localizado hacia la mitad del lago. Este resultado puede explicarse considerando que el reciclado del fósforo hacia la parte superior de la columna de agua es menor debido a la mayor profundidad y a la mayor distancia respecto a la orilla, lo que trae como consecuencia que el fósforo que se precipita tenga mayor dificultad para alcanzar la superficie y por tanto el material exógeno es muy bajo en este sitio.

En sitios como El Túnel, Playa Blanca y Hato Laguna las concentraciones de fósforo fueron muy parecidas, debido a su similitud en lo que se refiere a ubicación, distancia a la orilla del lago y a su baja profundidad, por lo cual la entrada de material exógeno es alta, muy similar

y el reciclado desde la profundidad es más fácil debido a los efectos del viento y las olas.

Al comparar la concentración media de las tres clases de fósforo (Figura 3), se observa que el fósforo orgánico es el que presenta mayor valor con respecto al fósforo reactivo y al fósforo hidrolizable. Este resultado concuerda con lo reportado en la literatura (18-20) y se explica por el hecho que la fracción que corresponde al fósforo orgánico la compone el fósforo proveniente de los ácidos nucleicos, fosfoproteínas, ésteres de bajo peso molecular, ADP, ATP y fósforo adsorbido a materia orgánica particulada muerta (21). Por su parte, el fósforo reactivo e hidrolizable está constituido de ortofosfatos y polifosfatos procedentes principalmente de detergentes sintéticos y coloides orgánicos y en su mayor parte se encuentran adsorbidos a rocas y a coloides presentes en los sedimentos (21).

En lo referente a los muestreos, se hallaron diferencias significativas en la concentración de fósforo. El segundo mues-

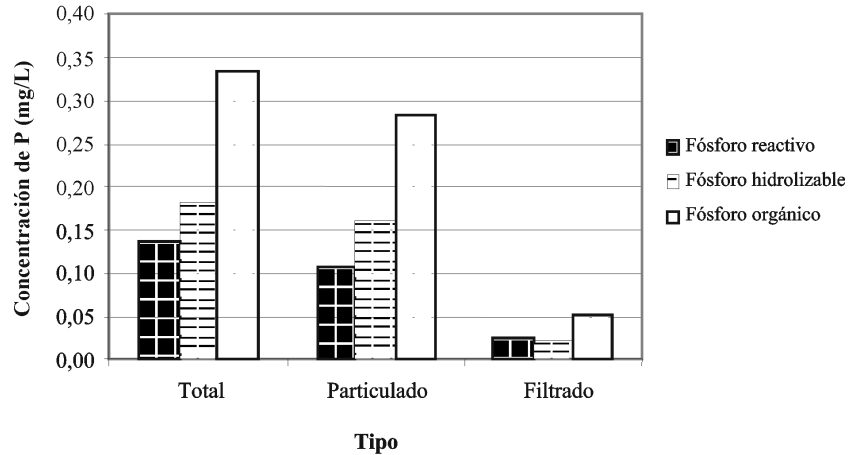


Figura 3. Concentración de las clases de fósforo según los distintos tipos de fósforo.

treo realizado en septiembre arrojó la media de fósforo más alta (Figura 4). Este fenómeno se atribuye a la mayor pluviosidad registrada con respecto a los meses de julio y noviembre (Figura 5), cuyos niveles de pluviosidad fueron muy similares.

De los resultados anteriores se concluye que la concentración de fósforo en el Lago de Tota presenta una dinámica en el tiempo y que a pesar de ser un lago de zona tropical y no presentar fluctuaciones

tan grandes como las que se observan en lagunas y lagos de zonas templadas donde existen variaciones climáticas drásticas de una estación a otra, sí muestra variaciones significativas en la concentración del fósforo presente en diversas temporadas del año. También existen diferencias significativas de la concentración de fósforo entre los sitios del lago debido a la ubicación y a las diferencias en la profundidad de los sitios. Se observaron ligeras diferencias significativas en la concentra-

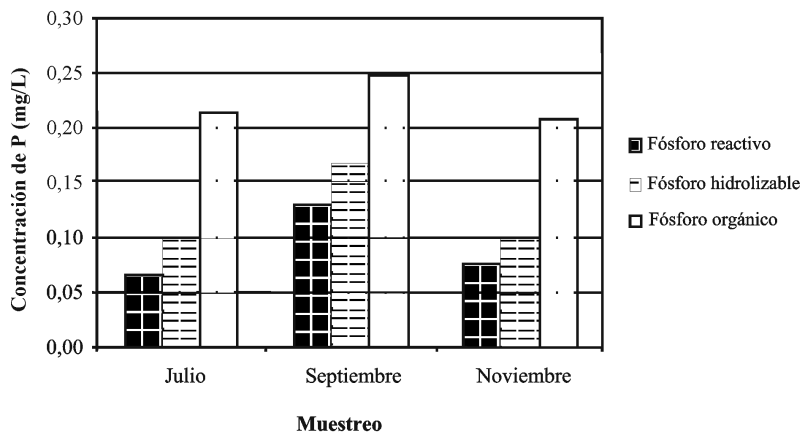


Figura 4. Concentración de las clases de fósforo según los muestreos realizados.

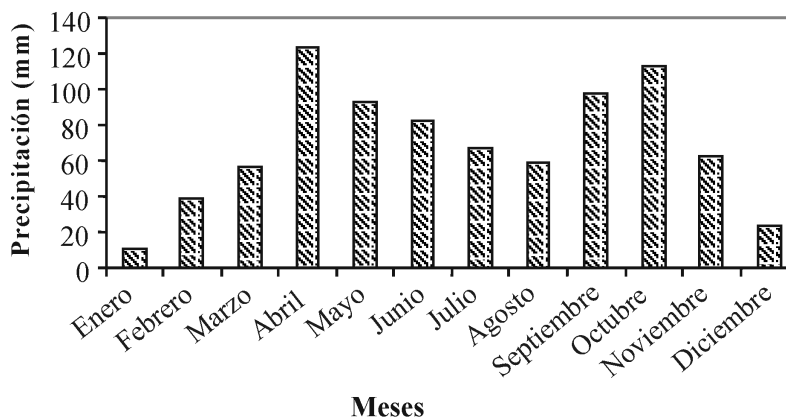


Figura 5. Precipitación media anual en el Lago de Tota en el año 2003.

ción de fósforo entre los estratos, esto es, en muestras tomadas de la superficie y muestras tomadas a diez metros de profundidad, debido a la capacidad de reciclado del fósforo precipitado en algunos sitios. Se presentaron diferencias significativas en la concentración de fósforo entre los tipos. Además, es importante concluir que en la época en que se realizaron los muestreos hubo diferencias significativas en la concentración de fósforo y que el segundo muestreo llevado a cabo en septiembre presentó la concentración de fósforo más alta, debido a las lluvias en este mes.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Fondo de Investigaciones de la Facultad de Ciencias de la Universidad de los Andes por el soporte financiero.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Valderrama, J. C. (1981). The Simultaneous Analysis of Total Nitrogen and Total Phosphorus in Natural Waters. *Marine Chemistry*. **10**, 109.

2. Beeton, A. M. Edmondson, W.T. (1969). The Eutrophication problem. *J. Fish. Res. Bd. Canada*. **29**, 673.
3. Forel, F. A. (1869) Introduction à l'étude de la faune profonde du Lac Léman. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.* **10**, 217.
4. Hutchinson, G. E. (1957). *A Treatise on Limnology*, Vol. 1. New York: John Wiley & Sons.
5. Molano, J. (1954). *Limnología colombiana: lagos, lagunas, represas, ríos y quebradas de Colombia*. División de Recursos Naturales del Ministerio de Agricultura de Colombia. Bogotá.
6. Molano, J. (1960). *El Lago de Tota*. Bogotá: Ediciones Universidad Jorge Tadeo Lozano.
7. Ducharme, A. (1975). Estudio físico-químico y biológico del Lago de la Tota. Revisión Bibliográfica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

8. Alvarado, O.; Pinilla, L. (1977). Distribución estacional, constitución y abundancia relativa del zooplancton en el Lago de la Tota (Boyacá), durante el periodo comprendido desde septiembre de 1974 a agosto de 1975. Tesis de grado, Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá.
9. Flórez, F. (1978). Contribución al estudio ecológico del Lago de Tota. Revisión bibliográfica, Universidad Nacional-Fonade-Colciencias. Bogotá.
10. Ruiz, J. E.; Molina, J. A.; Saavedra, G. E.; Contreras, M.; Mojica, J. I. (1984). Incidencias de la precipitación, eutrofización y calidad bacteriológica en la composición planctónica del Lago de Tota. Bogotá: HIMAT. División de Hidrología.
11. Eaton, A. D.; Clesceri, L. S.; Greenberg, A. E. (1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington D. C: American Public Health Association, 19<sup>th</sup>.
12. Ruiz, J. E. (2002). Método de análisis físicoquímicos en aguas superficiales. En: Manual de métodos en Limnología. ACI. Limos.
13. Spivakov, B.; Maryutina, T. A.; Muntau, H. (1999). Phosphorus Speciation in Water and Sediments. *Pure App. Chem.* **71**, 2161.
14. Dillon, P. J.; Rigler, F. H. (1974). The Phosphorus-Chlorophyll Relationship in Lakes. *Limnol. Oceanogr.* **19**, 767.
15. Margalef, R. (1983). Limnología. Barcelona: Ediciones Omega.
16. Wetzel, R. G. (1981). Limnología. Barcelona: Ediciones Omega.
17. Wetzel, R. G.; Linkens, G. (1991). Limnological Analyses. New York: Springer-Verlag.
18. Carpenter, S. R.; Kitchell, J. F.; Cole, J. J.; Pace, M. L. (1999). Predicting Responses of Chlorophyll and Primary Production to Changes in Phosphorus, Grazing and Dissolved Organic Carbon. *Limnol. Oceanogr.* **44**, 1179.
19. Gibor, A.; Meehan, W. R. (1961). Diurnal Variations in Chlorophyll Content of Some Fresh-Water Algae. *Ecology.* **42**, 156.
20. Canfield, D. E.; Bachmann, R. W. (1981). Prediction of total phosphorus concentration, chlorophyll a and Secchi disk depths in natural and artificial Lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **38**, 414.
21. Roldán, G. (1992). Fundamentos de limnología tropical. Editorial Universidad de Antioquia, 1<sup>a</sup> ed.