

MODELACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DEL HUMEDAL DE JABOQUE, BOGOTÁ D. C., COLOMBIA

Modeling the Trophic State of Wetland Jaboque, Bogotá D. C., Colombia

JULIO EDUARDO BELTRÁN VARGAS¹, Ph. D.; JESÚS ORLANDO RANGEL CHURIO², Ph. D.

¹ Programa de Doctorado en Ciencias, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia / Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

² Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Autor de correspondencia: Julio Eduardo Beltrán Vargas
jebeltranva@unal.edu.co; jebeltran@udistrital.edu.co

Presentado el 6 de noviembre de 2012, aceptado el 9 de febrero de 2013, correcciones el 14 de febrero de 2013.

RESUMEN

Se construyó un modelo de simulación dinámica con la intención de explicar el comportamiento del fósforo total en el agua y su relación con el estado trófico del humedal de Jaboque, Bogotá D. C., Colombia. En el modelo se incluyen los flujos de entrada y salida del agua y los aportes de fósforo total en cada una de las tres secciones de la cubeta con características morfométricas y condiciones físicas y químicas del agua muy diferentes. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales y para ella se utilizó el programa computacional Stella 9.1[®]. En los meses con mayores caudales (época de lluvias), la carga de fósforo disminuye en las tres secciones del humedal, mientras que en los meses con menores caudales (época de sequía), la misma se incrementa. En la sección uno (tercio alto) el valor del índice de estado trófico fue de 45,09 mg/m³ y el tiempo de retención hidráulica de 14 días/año. En la segunda sección (tercio medio) el valor del mencionado índice fue de 35,89 mg/m³ y el THR fue de 34 días/año. Finalmente, en la tercera sección (tercio bajo) los valores fueron 19,5 mg/m³ y 40 días/año respectivamente. Estos valores indican que la primera y segunda sección se encuentran en condiciones de eutrofia y la tercera de mesotrofia. El análisis de sensibilidad permitió estimar que con una carga de 0,62 mg/m³ de fósforo total se podrían mantener las condiciones de mesotrofia en la tercera sección y que para las dos primeras secciones se debería reducir la carga hasta 0,2 mg/m³, para alcanzar un estado de mesotrofia.

Palabras clave: humedales, Jaboque, índice de estado trófico (IST), modelación dinámica, tiempo hidráulico de retención (THR), índice de estado trófico (ist).

ABSTRACT

A dynamic simulation model to explain the behavior of the total phosphorus in water and its relationship to the trophic status of wetland Jaboque, Bogotá D. C., Colombia, in three sections with particular physical and chemical characteristics is presented. The model includes the inflow and outflow flows of water and total phosphorus contributions in each of the three sections of the wetland with morphometric and water physicochemical conditions very different. The dynamic modelling was based on differential equations; we used the computer program Stella 9.1®. In the months with higher flow (rainy season), the phosphorus load decreases in the three sections of the wetland, while in the months with lower flow (dry season) increases. In section one (third highest) trophic state index was 45.09 mg/m³ and hydraulic retention time of 14 days/year in the second section (middle third) trophic state index was 35.89 mg/m³ and the THR was 34 days/year. In the third section (lower third) values were 5.19 mg/m³ and 40 days/year respectively. These values indicate that the first and second sections are able to eutrophic state and third to mesotrophic. Sensitivity analysis allowed estimating that with a load of 0.62 mg/m³ total phosphorus could be maintained mesotrophic conditions in the third section and for the first two sections should be reduced to 0.2 mg/m³ load to achieve a mesotrophic state.

Keywords: dynamic modelling, hydraulic retention time, wetlands, trophic state, Jaboque.

INTRODUCCIÓN

ÁREA DE ESTUDIO

El fósforo (P) es un elemento cuya disponibilidad normalmente es reducida en el medio natural, pero es muy importante porque juega un papel fundamental en los procesos metabólicos de los seres vivos. Es un limitante para la vida y para el desarrollo de la agricultura por lo cual se utilizan fertilizantes con fósforo (Lassaletta, 2004). En Colombia la aplicación indiscriminada de abonos en la agricultura se manifiesta en una carga extra de nutrientes entre los que figura el fósforo. Estos abonos son lavados y llegan a los ríos, los lagos y los humedales en lo que, dependiendo de las capacidades disipativas del sistema afectado, promueven el avance del proceso de eutrofización. Actualmente, la mayoría de los humedales de Colombia se encuentran en proceso de colmatación y eutrofización por la influencia de sustancias alóctonas, como el fósforo proveniente de la actividad del hombre (Donato, 1998). Situación similar a la que evidencia en el humedal urbano de Jaboque (Álvarez, 2005; Álvarez, 2007; Álvarez, 2010; Álvarez, 2012). El humedal de Jaboque posee una extensión de 75 Ha. Es una zona de inundación del río Bogotá y está ubicado en un cuadrante con las coordenadas geográficas en 4,728570° N; 4,696868° S; -74,115514 E; -74.149692 W. Daton WGS84 (Google Earth™, DigitalGlobe™). Se caracteriza por presentar áreas permanentemente anegadas con espejos de agua, vegetación acuática (flotante o enraizada) y vegetación de ribera. En este ecosistema se diferenciaron tres zonas, una muy intervenida y situada dentro de la ciudad; una de transición, con áreas semiurbanas; y una mejor conservada. La profundidad media del humedal es de 0,6 m. En las últimas cuatro décadas el humedal ha

visto reducida su extensión por la variación del drenaje, las cargas orgánicas de las aguas y vertimientos, la colmatación y la pérdida de superficie y profundidad de la cubeta por la deposición de escombros provenientes de la construcción; ha ocasionado el fraccionamiento del humedal en tres secciones. Esta situación ha incidido para que en el humedal se alteraran atributos relacionados con la estructura y composición de sus comunidades bióticas, con lo cual se han reducido los servicios ecosistémicos que el humedal ofrece.

En esta contribución se documenta la variación del contenido total del fósforo en el agua a partir de su entrada al humedal (vía descarga) y se relaciona su marcha y transporte a partir de la variación en las condiciones morfométricas de la cubeta y los cambios en la condición física y química del agua durante un ciclo anual, y buscó responder las siguientes preguntas de investigación: ¿la precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en el comportamiento del fósforo total?, ¿el estado trófico del humedal depende del ciclo hidrológico y la descarga de fósforo?. Se planteó un modelo dinámico del fósforo en el humedal, el cual sigue el enfoque de Vollenweider, 1970, para calcular la carga crítica de fósforo. Es el enfoque más utilizado por centros de investigación y autoridades mundiales con intereses en la investigación en humedales. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982) adelantó investigaciones sobre las relaciones cuantitativas de nutrientes y la eutrofización ocasionada por estas cargas en lagos y embalses; una de las clasificaciones (Janus y Vollenweider, 1981; OCDE, 1982) que propusieron para determinar los diferentes estados tróficos se basa en variables de fácil medición (Tabla 1).

| VARIABLES CATEGORÍA TRÓFICA | Pt (OCDE) (mg/m ³) | Pt Vollenwei. (mg/m ³) | chl_a (OCDE) (mg/m ³) | chl_a Vollenwei. (mg/m ³) | (OCDE) Media de Secchi (m) | Vollenwei. Secchi (m) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--|---|---|----------------------------------|--------------------------|
| Ultraoligotrófico | < 4,0 | <2,5 | <2,5 | | | >12,0 |
| Oligotrófico | <10,0 | 2,5-8,0 | <8,0 | 4,2 | 9,9 | >6,0 |
| Mesotrófico | 10-35 | 8,0- 25 | 8,25 | 16,1 | 4,2 | 6-3 |
| Eutrófico | 35-100 | 25-80 | 25-75 | 42,6 | 2,45 | 3-1,5 |
| Hipertrófico | >100 | >80 | >75 | | 0,4-0,5 | <1,5 |

Tabla 1. Valores límite de clasificación trófica. Pt: Fósforo total/media anual de la concentración de fósforo total en el agua (mg/m³). Chl_a media: media anual de la concentración de clorofila en aguas superficiales (mg/m³). Media de Secchi: media anual de transparencia de la profundidad de Secchi (m). Fuente: OCDE (1982) y Janus y Vollenweider (1981).

Mediante la construcción de modelos, la simulación dinámica permite observar el comportamiento de los sistemas así como predecir sus respuestas frente a una intervención a través del tiempo. Los modelos dinámicos consisten en ecuaciones que describen el cambio como una función del tiempo. La simulación incrementa la capacidad de hacer predicciones relativamente acertadas acerca de futuros estados de un sistema determinado. Por ello, al igual que otros modelos, este describe la realidad con una cierta precisión. Aunque la modelación en humedales es relativamente reciente (Van der Peijl y Verhoeven, 1999), sus resultados son muy útiles para comprender los problemas que los afectan y lograr un cambio sostenible y eficaz en su manejo (Winz *et al.*, 2009).

METODOLOGÍA

SIMULACIONES

Se realizaron utilizando Stella 9.1 ®, software recomendado para realizar modelos hidrológicos y ecológicos (Jørgensen y Bendricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Jørgensen, 2008). Se simuló los cambios mensuales en condiciones normales y extremas (mayores y menores) de descarga del caudal y de la precipitación. De igual manera para realizar los análisis de sensibilidad del modelo se relacionó la precipitación con las variables dependientes como volumen, concentración del fósforo total y estado trófico.

El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos. Para cada una de las variables (Tabla 2) se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, las independientes y las de estado del modelo (Anexo 1). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones del fósforo total y del estado trófico del humedal en sus tres secciones, con relación a la carga de entrada, en especial a la que proviene de los canales Ángeles y Carmelo que transfieren la carga de la cuenca aferente inicialmente en la sección uno (Fig. 1).

| | Variables e índices | Valores/unid. | Fuente |
|-----------------|---|----------------------|--|
| Humedal Jaboque | Área cuenca aferente humedal Jaboque | km ² | Universidad Javeriana (2007) |
| | Aporte cuenca aferente (Canales los Ángeles + Carmelo flujo de entrada) | m ³ /mes | Estimación a partir de datos de IDEAM, 1972-2010. Estación el Dorado |
| | Precipitación anual | mm | Fuente IDEAM, 1972-2010. Estación el Dorado |
| | Concentración Pt /Sec - Zona de ingreso a la Sec1 | mg/m ³ | Datos de campo (Álvarez, 2005) - Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia |
| | Concentración Pt /Sec - Zona de ingreso a la Sec2 | mg/m ³ | Datos de campo (Álvarez, 2005) - Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia |
| | Concentración Pt /Sec - Zona de ingreso a la Sec3 | mg/m ³ | Datos de campo (Álvarez, 2005) - Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia |
| | Cantidad de Pt estimado | mg/m ³ | Modelado |
| | Pt Vollenweider/Humedal | mg/m ³ | Modelación /Modelo Vollenweider |
| | Pt OCDE/ Humedal | mg/m ³ | Modelación/ Modelo OCDE |
| | Tiempo hidráulico de retención (THR) | días/año | Modelación submodelo hidrológico |
| | Volumen de sección | m ³ /mes | Modelación submodelo hidrológico |
| | Profundidad sección | m | Datos de campo (Álvarez, 2005) - Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia |
| | Área sección | m ² | Datos de campo - Universidad Nacional de Colombia |
| | Tasa de sedimentación | mg/m ² /t | Hakanson y Peters (1992); Hakanson y Boulion (2002) |

Tabla 2. Variables del modelo, unidades y fuentes.

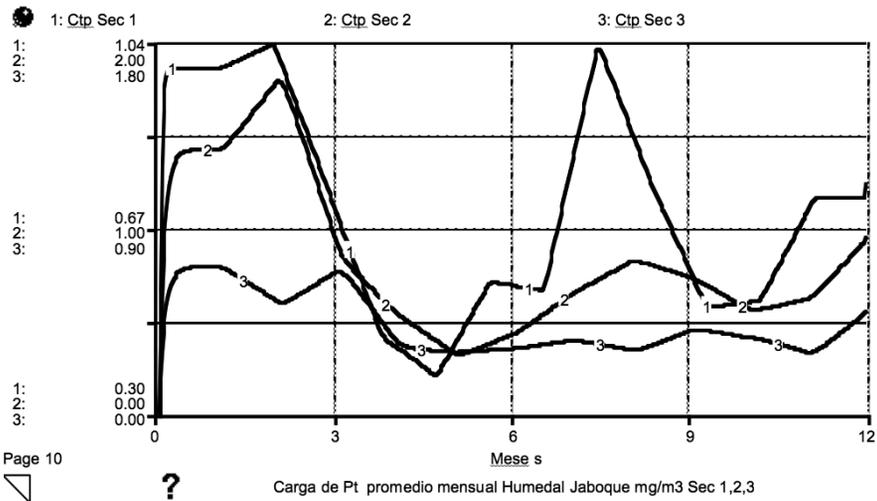


Figura 1. Modelación de concentraciones de fósforo para cada sección. 1: Ctp sec1. Concentración de fósforo Sec1 mg/m^3 . 2: Ctp sec2. Concentración de fósforo Sec2 mg/m^3 . 3: Ctp sec3. Concentración de fósforo Sec3 mg/m^3 .

ESTRUCTURA DEL MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA

Con el fin de evaluar el estado trófico del humedal en cada una de sus secciones se desarrolló un modelo de balance de masas (Hakanson y Peters, 1992; Fraile *et al.*, 1995; Hakanson, 2009). El modelo tiene en cuenta la dinámica del almacenamiento del fósforo total en cada sección del humedal (IST), de acuerdo con el patrón de carga de ingreso ($C_{in} \cdot Q$). También sirve el modelo para simular el comportamiento trófico del humedal, de acuerdo con la concentración influente de fósforo total en cada sección. Con el fin de determinar el estado trófico de cada sección se relaciona el tiempo hidráulico de retención (THR) con la carga de ingreso de fósforo (C_{in}) de acuerdo con los modelos propuestos por la OCDE (1982) y por Vollenweider, (1970). Se simuló la concentración máxima estimada de fósforo total, definida como “la concentración del tributario corregida por la renovación hidráulica”. Así la carga normalizada de fósforo no tiene en cuenta los aportes difusos por vertimientos provenientes de procesos naturales y/o vertimientos urbanos o agrícolas.

BALANCE DE MASAS Y DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL

Los modelos de eutroficación de Vollenweider (1970) y la OCDE (1982), se basan fundamentalmente en la teoría de balance de masas, para explicar los flujos de fósforo total (Pt) en lagos y humedales y se describen de acuerdo con las siguiente ecuación diferencial (Hakanson y Boulion, 2002).

$$V \cdot dC/dt = Q(C_{in} - C) - R_{sed} \cdot V \cdot C \quad (1)$$

Donde:

V = Volumen del humedal (m³)

dC/dt = El cambio de la concentración (dC) de una sustancia en el cuerpo de agua, para el caso fósforo total (Pt), por unidad de tiempo (mg/m³/año)

C = Concentración de una sustancia en el cuerpo de agua (mg/m³)

C_{in} = Concentración de una sustancia en el tributario (mg/m³)

Q = Descarga del tributario (m³/año)

R_{sed} = Tasa de sedimentación de una sustancia (L/año)

El tiempo teórico de retención de un químico o de una partícula en suspensión se define como la relación entre el volumen del cuerpo de agua y la descarga, $T_w = V/Q$. Este valor es asumido con registros mensuales. El tiempo de retención de una partícula en suspensión o de una sustancia es definido de la siguiente manera:

$$T = V.C/(Q.C_{in}) \quad (2)$$

En el primer modelo de carga para humedales, presentado por Vollenweider (1970), la ecuación básica de balance de masas fue alterada un poco. Los referentes de datos empíricos indican que una mejor predicción de carga interna de fósforo total puede ser obtenida de la siguiente fórmula (Hakanson y Boulion, 2002):

$$C = C_{in}/(1+\sqrt{TW}) \quad (3)$$

Basados en las mismas variables y parámetros del modelo original de Vollenweider, se desarrolla el modelo empírico de la OCDE (1982), de la siguiente manera:

$$C = 1,55(1/(1+\sqrt{TW}))^{0,82} \quad (4)$$

SUPUESTOS DEL MODELO

1. La carga interna (C_{in}) de fósforo total se calcula a partir del punto de entrada de cada sección y no se tienen en cuenta los posibles aportes difusos por vertimientos y/o escorrentías posteriores a la entrada de cada sección.
2. Los datos de fósforo total disponibles corresponden a un año de muestreo, realizado por el grupo de investigación en Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional (Álvarez, 2005) representando periodos húmedos y secos (Tabla 3).
3. El modelo no incluye las cargas internas de fósforo generadas por la descomposición de macrófitas y los derivados de la excreciones del zooplankton y macroinvertebrados.
4. El modelo supone una condición estable de mezcla, toda vez que por la profundidad promedio del humedal de 60 cm, es poco probable la existencia de una condición estratificada de la masa de agua.
5. En la modelación del estado trófico del humedal se tuvo en cuenta la concentración de fósforo total proveniente de la cuenca aferente corregida por la renovación hidráulica (Fraile *et al.*, 1995).
6. Con el fin de facilitar la modelación se tuvieron en cuenta las medias mensuales de

fósforo total encontradas en las zonas de flujo de entrada a cada sección.

7. De acuerdo con la zonificación del humedal Jaboque, se asume cada sección como un subsistema interconectado debido a que cada una tiene características morfo-métricas, físicas y biológicas propias.

| Humedal Jaboque | Pt Sec1 | Pt Sec2 | Pt Sec3 | Pt Sec3 Modelado mg/m ³ | IST OCDE Sec1 | IST OCDE Sec2 | IST OCDE Sec3 | THR Sec1 Días/ año | THR Sec2 Días/ año | THR Sec3 Días/ año |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | Estimado mg/m ³ | Modelado mg/m ³ | Estimado mg/m ³ | | | | | | | |
| Enero | 0,98 | 1,4 | 0,92 | 0,97 | 59,84 | 55,26 | 29,7 | 24 | 59 | 68 |
| Febrero | 1,03 | 1,8 | 1,1 | 0,58 | 60,13 | 67,01 | 22,95 | 17 | 43 | 50 |
| Marzo | 0,74 | 0,83 | 0,87 | 0,69 | 42,87 | 34,64 | 28,52 | 12 | 29 | 33 |
| Abril | 0,45 | 0,51 | 0,55 | 0,36 | 27,65 | 22,18 | 13,94 | 8 | 20 | 24 |
| Mayo | 0,37 | 0,3 | 0,33 | 0,3 | 28,47 | 14,52 | 13,35 | 9 | 22 | 26 |
| Junio | 0,36 | 0,43 | 0,45 | 0,32 | 36,11 | 20,32 | 14,53 | 14 | 34 | 41 |
| Julio | 0,546 | 0,65 | 0,65 | 0,36 | 50,3 | 29,07 | 16,59 | 17 | 43 | 50 |
| Agosto | 1,03 | 0,82 | 0,82 | 0,72 | 52,19 | 34,94 | 14,52 | 15 | 38 | 44 |
| Septiembre | 0,75 | 0,72 | 0,74 | 0,46 | 36,58 | 30,46 | 18,17 | 11 | 28 | 32 |
| Octubre | 0,51 | 0,54 | 0,57 | 0,37 | 32,14 | 23,12 | 15,67 | 8 | 20 | 23 |
| Noviembre | 0,52 | 0,61 | 0,62 | 0,3 | 41,97 | 25,98 | 12,97 | 9 | 23 | 26 |
| Diciembre | 0,72 | 0,94 | 0,94 | 0,69 | 58,14 | 53,84 | 28,71 | 14 | 34 | 40 |
| Promedio anual | 0,67 | 0,8 | 0,71 | 0,51 | 45,09 | 35,89 | 19,95 | 14 | 34 | 40 |
| Desviación estándar | 0,25 | 0,42 | 0,22 | 0,23 | 12,3 | 16,5 | 6,89 | 5,43 | 13,34 | 15,361 |

Tabla 3. Valores medios mensuales estimados de fósforo total en cada sección, valores medios mensuales de fósforo total modelados. Resultados de la modelación del índice de estado trófico (IST) y tiempo hidráulico de retención (THR). Fuente: OCDE (1981) y Volenweider (1982); Datos de P total (Álvarez, 2005).

RESULTADOS

Las variaciones de la concentración del fósforo total en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al de la precipitación y la descarga de caudal de la cuenca aferente. En los meses secos (valores bajos de precipitación) las concentraciones de fósforo aumentan en cada una de las secciones. Las variaciones de concentración de fósforo en la sección uno son más altas que en la sección dos (tercio bajo) en donde las mismas tienden a disminuir debido a que la mayor capacidad de almacenamiento de agua diluye parcialmente la carga de fósforo. Los resultados globales indican que el proceso depende estrechamente del ciclo hidrológico (Mitsch *et al.*, 1995; Wetzel, 2001; Hakanson y Boulion, 2002).

En la figura 1 y en la Tabla 3 se muestran las estimaciones de la marcha mensual de la carga de fósforo (Cin) para cada sección. Nótese que en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y julio, agosto, septiembre, los de menores precipitaciones, se presentan las concentraciones más altas de fósforo y en los meses de mayores precipitaciones abril, mayo, junio, octubre, noviembre, disminuye la concentración de fósforo en todas las secciones. La tercera sección muestra un comportamiento más homogéneo con variaciones menos drásticas que las secciones uno y dos. En esta sección (tercio alto del humedal) el tiempo hidráulico de retención del agua (THR) debe incidir en el comportamiento del fósforo total (Fraile *et al.*, 1995; Hakanson y Boulion, 2002).

Mediante un análisis de regresión se compararon los valores estimados de fósforo total con los resultados de la modelación (Tabla 3) para cada una de las secciones. Se encontró una buena correspondencia para todas las secciones. Para la primera sección fue de $r^2 = 0.72$ y $y = 0,6906x + 0,2368$, $p < 0,001$ para la segunda sección fue de $r^2 = 0,81$, $p < 0,001$ y $y = 0,4778x + 0,3331$ y para la tercera $r^2 = 0.85$; $y = 0,8597x + 0,0751$, $p < 0,001$ (Tabla 3).

Las diferencias entre los valores de campo y los valores modelados se presentaron en mayo, junio, julio, agosto, septiembre y noviembre, lo cual se puede asociar con las complejas características morfológicas del humedal originadas especialmente por la construcción de obras de control de inundaciones en las dos primeras secciones y de los diques y jarillones (precolombinos) en la tercera sección.

MODELACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO (IST)

Los valores resultantes en la primera sección (tercio alto) oscilan entre 27,6 mg/m³ y 60,13 mg/m³ de fósforo total e indican condiciones de eutrofia. En la segunda sección (tercio medio) fluctúan entre 14,52 mg/m³ y 53,8 mg/m³ de fósforo total que se asocian con condiciones de eutrofia (Tabla 3). Sin embargo en los meses con valores mayores en la precipitación las condiciones tienden a ser mesotróficas, lo cual puede ser ocasionado por un menor tiempo de retención del fósforo debido al aumento de la descarga de la cuenca aferente que parcialmente lava y transporta a mayor velocidad el elemento (Jorgesen, 2003). También a este respecto, cabe mencionar que en esta sección hay otros factores que pueden asociarse con el estado eutrófico, como son la abundancia de macrófitas, las altas concentraciones de clorofila_a (Chl_a) y las bajas concentraciones de oxígeno (hipoxia), seguramente relacionadas con la construcción de vasos (materas) y jarillones (Álvarez, 2005). En la tercera sección (tercio bajo), los valores fluctúan entre 12,97 mg/m³ y 29,7 mg/m³ que corresponden a condiciones me-

sotróficas (Tabla 3 y Fig. 2). Acá, durante todo el año predominan las condiciones mesotróficas, que indican mejores condiciones ecológicas, igualmente el tiempo de retención hidráulica aumenta, con lo cual en esta sección se mejoran los ciclos biogeoquímicos, entre estos el del fósforo (Fig. 2).

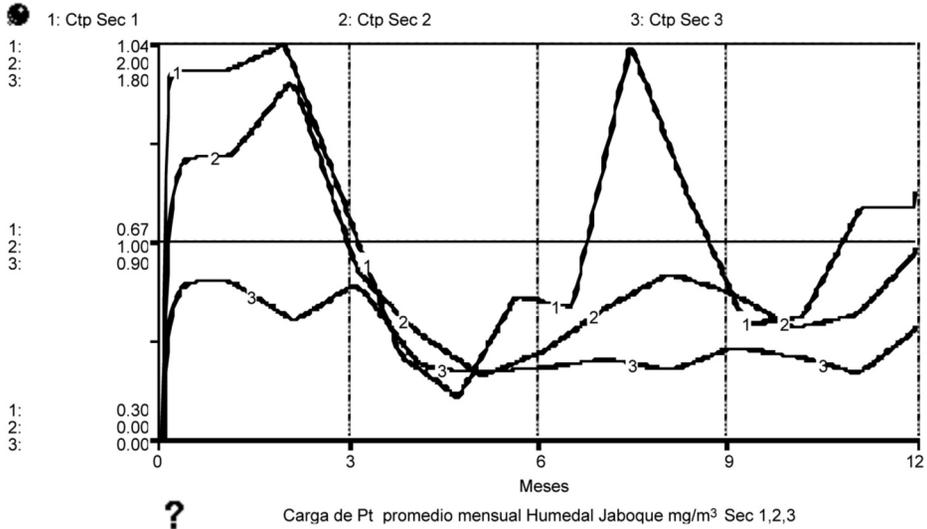


Figura 2. Modelación del índice de estado trófico y tiempo de retención. 1: Ist - índice de estado trófico - OCDE Sec1 - mg/m³. 2: TRH - tiempo hidráulico de retención Sec1 - días/año. 3: Ist - índice de estado trófico - OCDE Sec3 - mg/m³. 4: TRH - tiempo hidráulico de retención Sec3 - días/año.

En la figura 2 y en la tabla 3 se muestran los resultados de la modelación del índice de estado trófico (IST) del humedal y el tiempo hidráulico de retención y se comparan los resultados entre la secciones del humedal. Se aprecia que en todas las secciones del humedal, a mayor tiempo hidráulico de retención, el índice de estado trófico tiende a ser mayor, especialmente en diciembre, enero, febrero y agosto y julio, meses con menores precipitaciones. A menor tiempo hidráulico de retención, se observa menor valor del índice de estado trófico, lo cual indica que el comportamiento del IST se encuentra en función del THR. Los valores bajos del índice de estado trófico se presentan en abril y mayo y coinciden con los valores bajos de THR, correspondencia que se manifiesta en las tres secciones. También es evidente que el tercio bajo del humedal se encuentra en condiciones de mesotrofia, mientras que los dos primeros tercios las condiciones son de eutrofia, con variaciones fuertes del índice de estado trófico. Estas variaciones se traducen en la pérdida del papel amortiguador/depurador de la carga trófica en estas secciones (Tabla 3). Los resultados muestran que en la temporada de mayor lluvia (invierno) las concentraciones de fósforo y el tiempo hidráulico de retención se reducen, lo cual puede asociarse con un efecto de lavado de nutrientes debido al aumento de la descarga de agua y como lo señala Jørgensen (2003) un mejoramiento del estado trófico del humedal. A este respecto, Zhang y Mitsch, 2005, sugieren tiempos hidráulicos de retención superiores a 15 días, para que se ejerza un función depuradora en humedales. Se podría afirmar que solamente en la

tercera sección de humedal, se combinan condiciones de carácter físico y biológico que indicarían una función depuradora en el sistema de Jaboque.

ERROR RELATIVO

Los resultados de la estimación del error relativo muestran en la primera sección un promedio de 0,09 con una desviación estándar de 0,24, que indican la no sobrestimación de los valores y variación relativamente baja por el modelo. En la segunda sección el promedio fue de - 0,03 y la desviación estándar de 0,16. Cuando el valor es negativo se podría inferir que existe una tendencia a la subestimación de los resultados pero su variación no es fuerte. En la tercera sección el promedio del error relativo fue de 0,03 y la desviación estándar de 0,16, que indican poca variación.

Se puede afirmar que los resultados de la modelación para todas las secciones del humedal indican una buena capacidad descriptiva del modelo, debido a que reproduce el comportamiento general de la dinámica de acuerdo con los datos recogidos/estimados en campo.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

El análisis de sensibilidad del modelo (Jørgensen y Bendoricchio, 2001; Hakanson, 2004) permitió verificar la influencia de la concentración de fósforo en la marcha del indicador de estado trófico y probar la solidez del modelo por la relación proporcional entre las cargas de fósforo que ingresan a cada sección, (Tabla 4). Los resultados de este análisis mostraron que en la sección uno, los límites de la carga de fósforo oscilan entre

| Serie | Fósforo total variación (mg/m ³) | Índice de estado trófico (mg/m ³) OCDE Sec. 1 | Índice de estado trófico (mg/m ³) OCDE Sec. 2 | Índice de estado trófico (mg/m ³) OCDE Sec. 3 |
|---------------------|--|---|---|---|
| 1 | 0,2 | 15,79 | 10,92 | 10,28 |
| 2 | 0,34 | 24,57 | 16,99 | 15,99 |
| 3 | 0,48 | 32,7 | 22,6 | 21,28 |
| 4 | 0,62 | 40,39 | 27,92 | 26,28 |
| 5 | 0,77 | 47,78 | 33,03 | 31,09 |
| 6 | 0,91 | 54,92 | 37,96 | 35,74 |
| 7 | 1,06 | 61,87 | 42,76 | 40,26 |
| 8 | 1,2 | 68,64 | 47,45 | 44,67 |
| 9 | 1,34 | 75,28 | 52,03 | 48,98 |
| 10 | 1,49 | 81,78 | 56,53 | 53,21 |
| 11 | 1,63 | 88,18 | 60,95 | 57,38 |
| 12 | 1,77 | 94,47 | 65,3 | 61,47 |
| 13 | 1,91 | 100,67 | 69,59 | 65,51 |
| 14 | 2,06 | 106,79 | 73,82 | 69,49 |
| 15 | 2,2 | 112,84 | 77,99 | 73,42 |
| Promedio | | 67,11 | 46,38 | 43,67 |
| Desviación estándar | | 30,6 | 21,19 | 19,94 |

Tabla 4. Análisis de sensibilidad. La serie corresponde a los niveles de Pt como variable independiente y los de IST a las respuestas.

0,2 mg/m³ y 0,35 mg/m³ para mantener un estado mesotrófico, para la sección dos entre 0,62 mg/m³ y 0,77 mg/m³ para lograr un estado mesotrófico y para la sección 3 debe mantenerse una carga máxima de 0,77 mg/m³ para sostener una condición mesotrófica. Las suposiciones anteriores, son apenas aproximaciones de eventos probables en el humedal, si no se disminuyen las cargas de fósforo. El modelo propuesto es una aproximación que se debe complementar con más datos e incorporar otras variables para lograr una mayor definición de la dinámica de la eutrofización.

En términos de gestión y manejo del humedal, es importante plantear logros en términos de recuperación. El análisis de sensibilidad muestra, que lograr la meta de un estado oligotrófico es casi imposible. Con una carga de 0,2 mg/m³ de fósforo, se estaría llegando a niveles de mesotrofia, condición aceptable para la recreación y uso del agua para riego; obviamente, si la oferta hídrica del humedal lo permite. Dadas las actuales condiciones y los resultados de la modelación, es urgente mejorar las condiciones tróficas de la sección tres (tercio bajo, conservado) e iniciar las investigaciones necesarias que permitan recuperar las condiciones cercanas a las originales en las dos primeras secciones.

CONCLUSIONES

El modelo desarrollado constituye una aproximación a la comprensión del proceso de transporte de fósforo total en el agua y su relación con la eutrofización en el humedal de Jaboque. Básicamente el instrumento facilita la comprensión de las relaciones entre el ciclo hidrológico y la marcha del fósforo total en el humedal. Las variaciones de la modelación mostraron que las variaciones de la concentración del fósforo total en cada sección del humedal, siguen un patrón inverso al de la precipitación y al de la descarga de la cuenca aferente. En el periodo de altas precipitaciones en mayo - junio y en octubre - noviembre, las concentraciones disminuyen y la carga de fósforo se diluye en un mayor volumen de agua como lo señaló Jørgensen (2003).

El índice de estado trófico (IST) en la primera sección fue de 45,9 mg/m³ y el THR de 14 días/año; en la segunda sección el IST fue de 35,89 mg/m³ y el THR de 34 días/año respectivamente. En la tercera sección el IST fue de 19,9 mg/m³ y el THR de 40 días/año. Los datos muestran que la tercera sección (tercio bajo del humedal) se encuentra en mejores condiciones tróficas (mesotróficas), mientras que en las dos primeras secciones predominan las condiciones de eutrofia. Se podría afirmar que en la tercera sección de humedal se combinan condiciones de carácter físico y biológico que se asocian directamente con su función depuradora en el humedal. En Jaboque existe una alta dependencia entre el ciclo hidrológico y el estado trófico.

El análisis de sensibilidad mostró que podría existir cierta independencia de la marcha del fósforo total del ciclo hidrológico en la tercera sección (tercio bajo del humedal), porque esta zona amortigua la descarga proveniente de las dos primeras secciones. En las actuales condiciones, lograr la meta de un estado oligotrófico en todo el humedal es casi imposible.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación en Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia y a la Empresa de Acueducto y Alcan-

tarillado de Bogotá - EAAB - ESP, por la información relacionada con el estudio del caso. A la Rectoría de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y a la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales por el apoyo económico otorgado para realizar el programa de doctorado. Al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico - CIIDC y al Grupo de Investigación INDESOS, quienes apoyaron la financiación para la adquisición de los programas computacionales, el equipo de computo y la bibliografía especializada que se utilizó en la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ JP. Evaluación del estado trófico del Humedal de Jaboque: Análisis espacial y temporal de las características físico - químicas del agua y de la comunidad planctónica. Informe final de actividades. Convenio cooperación Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá D. C. 2005.

ÁLVAREZ JP. Caracterización limnológica de la ciénaga de Zapatosa. En: Rangel-Ch JO, editor. Estudio de inventario de fauna, flora, descripción biofísica y socioeconómica y línea base ambiental ciénaga de Zapatosa. Informe final de actividades. Convenio inter-administrativo Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, CORPOCESAR. 2007. p.422- 473.

ÁLVAREZ, JP. Caracterización limnológica de las ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura (río San Jorge) y Bañó, Charco Pescao y Pantano Bonito (río Sinú), departamento de Córdoba. En: Rangel-Ch JO, editor. Colombia diversidad biótica IX: Ciénagas de Córdoba: Biodiversidad-ecología y manejo ambiental; 2010. p. 509-558.

ÁLVAREZ, JP. Caracterización limnológica de las ciénagas del sur del Cesar. Informe interno. Convenio inter-administrativo Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales, CORPOCESAR. 2012.

DONATO J. Los sistemas acuáticos de Colombia: síntesis y revisión. En: Fondo FEN Colombia. Una aproximación a los humedales de Colombia. Guadalupe Ltda. Bogotá D. C.; 1998. p. 31-47.

FRAILE H, ORIVE E, POZO J. Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (río Tera, Zamora). *Limnética*. 1995;11(2):29-37.

GURKAN Z, ZHANG J, JØRGENSEN S. Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration on Lake Fure, Denmark. *Ecol Modell*. 2006;197:89-102.

HAKANSON L, PETERS H. Predictive limnology: methods for predictive modelling. SPB Academic publishing. Amsterdam; 1992. p. 18-23

HAKANSON L, BOULION V. The lake foodweb: Modelling predation and abiotic - biotic interactions. *Biol Sci*. 2002;I-XIV:1-344.

HAKANSON L. Break-through in predictive modelling opens new possibilities for aquatic ecology and management a review. *Hydrobiologia*. 2004;518(1):135-157.

HARTE J. Confronting visions of a sustainable future. *Ecol Appl*. 1996;6(1):27-29.

IDEAM. Registros climatológicos del Sistema de Información Hidrometeorológica. Estación El Dorado. 1972-2010.

JANUS L, VOLLENWEIDER R. The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Canadian Contribution, summary report. Natural Water Research Institute Scientific. Serie 131, 1981.

JØRGENSEN S. The application of models to find the relevance of residence time in lake and reservoir management. Papers from Bolsena Conference en Papers from Bolsena Conference: Residence time in lakes: science, Management, Education. *J Limnol.* 2003;62(1):16-20.

JØRGENSEN S. Overview of the model types available for development of ecological models. *Ecol Modell.* 2008;215(1-3):3-9.

JØRGENSEN S, BENDORICCHIO G. Fundamentals of ecological modelling: Elsevier Science Ltda. Amsterdam. 2001.

KADLEC R, HAMMER D. Modeling nutrient behavior in Wetlands. *Ecol Modell.* 1988;40(1):37-66.

LASSALETTA L. Agricultura intensiva, alteración de ciclos bioquímicos y cambio global. Universidad Complutense de Madrid. España; 2004. p. 52-55

MITSCHE W, CRONK J, WU X, NAIRN R. Phosphorus retention on constructed freshwater riparian marshes. *Ecol Appl.* 1995;5(3):830-845.

SCHENONE N, VOPPEDO A, FERNÁNDEZ A. Estado trófico y variación estacional en los ríos y canales del humedal mixo-halino de Bahía Samborombón (Argentina). *Limnética.* 2008;27(1):143-150.

UNIVERSIDAD JAVERIANA. Informe técnico - obras para la restauración hidrodinámica y ecológica del humedal Jaboque. Bogotá D. C. 2007.

VAN DER PEIJL M, VERHOEVEN J. A model of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics and their interactions in river marginal wetlands. *Ecol Modell.* 1999;118:95-130.

VOLLENWEIDER R. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD Report, September. 1970.

WETZEL R. Fundamental processes within natural and constructed wetland ecosystems: short-term versus long-term objectives. *Wetland Systems for Water Pollution Control 2000.* 2001;44(11-12):1-8.

WINZ I, BRIERLEY G, TROWSDALE S. The use of system dynamics simulation. *Water Resour Manag.* 2009;23(7):1301-1323.

ZACHARIAS I, DIMITRIOU E, KOUSSOURIS T. Integrated water management for wetland protection: application in Trichonis Lake. *Environ Modell Softw.* 2005;21:177-185.

ZHANG L, MITSCHE W. Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. *Environ Modell Softw.* 2005;20(7):935-946.

ANEXO

Ecuaciones del modelo de simulación ecológica humedal Jaboque - estado trófico.

$$M_TP(t) = M_TP(t - dt) + (IN - Salida) * dt$$

$$INIT\ M_TP = 25$$

INFLOWS:

$$IN = (Promedio_anual_de_Q_año * Cin_Sec_1)$$

OUTFLOWS:

$$Salida = M_TP / TW_1$$

$$M_TP_2(t) = M_TP_2(t - dt) + (IN_2 - Salida_2) * dt$$

$$INIT\ M_TP_2 = 25$$

INFLOWS:

$$IN_2 = Promedio_anual_de_Q_año * Cin_Sec_2$$

OUTFLOWS:

$$Salida_2 = M_TP_2 / TW_2$$

$$M_TP_3(t) = M_TP_3(t - dt) + (IN_3 - Salida_3) * dt$$

$$INIT\ M_TP_3 = 25$$

INFLOWS:

$$IN_3 = Promedio_anual_de_Q_año * Cin_Sec_3$$

OUTFLOWS:

$$Salida_3 = M_TP_3 / TW_3$$

$$Area_de_cuenca_afereente = 5.7 * 10^6$$

$$A_sec2 = 261132.4$$

$$A_sec3 = 315308.4$$

$$A_Sec_1 = 116396$$

$$Ctp_Sec_1 = ((M_TP / Vol_sec1))$$

$$Ctp_Sec_2 = ((M_TP_2 / Vol_sec2))$$

$$Ctp_Sec_3 = ((M_TP_3 / Vol_sec3))$$

$$Profundidad_media = (Zsec1 + Zsec2 + Zsec3) / 3$$

$$Promedio_anual_de_Q_año = \begin{cases} \text{if } Promedio_emp_de_Q_anual = 0 & \text{then} \\ 0 * (0.38 * P_precipitacion * Area_de_cuenca_afereente * 0.001) + 1 * (Area_de_cuenca_afereente * (P_precipitacion / 840) * 0.01 * 60 * 60 * 24 * 365 * 10^{(-6)}) & \text{else } Promedio_emp_de_Q_anual \end{cases}$$

$$Promedio_emp_de_Q_anual = 0$$

$$Promedio_mensual_de_Q = Promedio_anual_de_Q_año / 12$$

$$P_Cin = 0.98$$

$$P_precipitacion = 840$$

$$P_Q = 1.79755e+006$$

$$Temperatura_fondo_de_agua_3 = 15$$

$$TRH_Sec2 = TW_2 * 365$$

$$TRH_Sec_1 = TW_1 * 365$$

$$TSI_TP_OECD_2 = 10 * (1 * 1.55 * (Cin_Sec_2 / (SQRT(TW_2)))^{0.82})$$

$$TSI_TP_OECD_3 = 10 * (1 * 1.55 * (Cin_Sec_3 / (SQRT(TW_3)))^{0.82})$$

$$TSI_TP_OECD_1 = 10 * (1 * 1.55 * (Cin_Sec_1 / (SQRT(TW_1)))^{0.82})$$

$$TW_1 = (Vol_sec1 / Promedio_anual_de_Q_año)$$

$$TW_2 = (Vol_sec2 / Promedio_anual_de_Q_año)$$

$$TW_3 = (Vol_sec3 / Promedio_anual_de_Q_año)$$

$$Volumen_total = (Vol_sec1 + Vol_sec2 + Vol_sec3)$$

Vol_sec1 = A_Sec_1*Zsec1

Vol_sec2 = A_sec2*Zsec2

Vol_sec3 = A_sec3*Zsec3

Cin_Sec_1 = GRAPH(MOD(TIME, 12))

(1.00, 0.98), (2.00, 1.03), (3.00, 0.74), (4.00, 0.45), (5.00, 0.37), (6.00, 0.555), (7.00, 0.54), (8.00, 1.03), (9.00, 0.75), (10.0, 0.51), (11.0, 0.52), (12.0, 0.72)

Cin_Sec_2 = GRAPH(MOD(TIME,12))

(1.00, 1.40), (2.00, 1.80), (3.00, 0.83), (4.00, 0.51), (5.00, 0.3), (6.00, 0.43), (7.00, 0.65), (8.00, 0.82), (9.00, 0.72), (10.0, 0.54), (11.0, 0.61), (12.0, 0.94)

Cin_Sec_3 = GRAPH(MOD(TIME,12))

(1.00, 0.7), (2.00, 0.52), (3.00, 0.7), (4.00, 0.31), (5.00, 0.29), (6.00, 0.31), (7.00, 0.35), (8.00, 0.3), (9.00, 0.41), (10.0, 0.36), (11.0, 0.28), (12.0, 0.5)

Precipitacion = GRAPH(MOD(TIME,24))

(1.00, 29.0), (2.00, 41.0), (3.00, 65.0), (4.00, 103), (5.00, 92.0), (6.00, 54.0), (7.00, 41.0), (8.00, 47.0), (9.00...)..

