



Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque, Bogotá D.C.

Modeling of primary production of phytoplankton in the wetland Jaboque, Bogotá D.C.

Julio Eduardo Beltrán Vargas¹

Fecha de recepción: 4 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 18 de septiembre de 2015

Cómo citar: Beltrán Vargas, J. E. (2016). Modelación de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque – Bogotá D.C. *Revista Tecnura*, 20(47), 85-95. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a07

Resumen

Se presenta un modelo de simulación dinámico para explicar el comportamiento general de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal de Jaboque – Bogotá D.C., Colombia, en tres secciones con características físicas y químicas diferenciales. El modelo tiene en cuenta las variables fisicoquímicas, área de la cubeta, profundidad, precipitación media anual, temperatura del agua, pH y concentración de clorofila_a. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales y se utilizó el método Euler de integración, la modelación se desarrolló utilizando el programa computacional Stella 9.1®. El modelo permite cuantificar la producción primaria fitoplanctónica del humedal de Jaboque a partir de la concentración promedio mensual de clorofila_a, para cada sección. Los resultados de la modelación de la Ppf evidencian que las variaciones de la concentración de la Ppf en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al comportamiento bimodal de la precipitación. Se encontró un alto grado de correspondencia entre los valores de clorofila_a de campo y la Ppf modelada de la siguiente

manera $r^2 = 0.86$ para la primera sección y $r^2 = 0.86$ y $r^2 = 0.79$ para las secciones restantes. La determinación del error relativo fue de 0,57, para la primera sección y 0,35; 0,46, indicando que los resultados no están sobrestimados. El modelo muestra en términos generales los aspectos funcionales del comportamiento de la Ppf y su relación con el proceso de eutroficación, y permite hacer recomendaciones para el manejo y restauración del humedal.

Palabras clave: humedal, Jaboque, modelación, dinámica, producción fitoplanctónica

Abstract

A dynamic simulation model is presented to explain the general behavior of the primary production of phytoplankton in the wetland Jaboque–Bogota, Colombia, in three sections with differential physical and chemical characteristics. The model takes into account the physicochemical variables, the basin area, depth, annual rainfall, water temperature, pH and concentration of chlorophyll _a. The dynamic modeling is based on differential equations and the Euler integration method is used, the modeling was

¹ Biólogo Marino, magister en Planificación y Administración del Desarrollo Regional, máster en Ecoauditoría y Gestión Ambiental Empresarial, doctor en Ciencias – Biología. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: jebeltran@udistrital.edu.co

developed using Stella 9.1® computer program. The model allows quantifying the primary production of phytoplankton in wetland Jaboque from chlorophyll_a monthly average concentration for each section. The results of the Ppf modeling show that Ppf concentration variations in each section of the wetland follow a reverse pattern to the bimodal behavior of precipitation. A high degree of correspondence between the values of chlorophyll_a Ppf field and modeled in the following manner $r^2 = 0.86$ for the first

section and $r^2 = 0.86$ and $r^2 = 0.79$ for the remaining sections was found. Error determination was 0,57 relative to the first section and 0,35; 0,46, indicating that the results are not overstated. The model shows in general terms the functional aspects of behavior Ppf and its relation to the process of eutrophication, and it allows recommendations for the management and restoration of wetlands.

Keywords: dynamic, modeling, Jaboque, production of phytoplankton, wetland

INTRODUCCIÓN

En los lagos la producción primaria puede considerarse de dos modos: la que se da dentro del mismo lago (producción primaria autóctona) y la que llega al sistema luego de haber sido sintetizada en áreas diferentes (producción primaria alóctona). En los ecosistemas acuáticos, las microalgas y las cianobacterias constituyen el primer eslabón de la cadena trófica (Grimshaw *et al.*, 1997). En su condición de productor primario, el fitoplancton permite la entrada de energía al sistema (Gómez, Larduet y Abrahantes, 2001). La producción primaria está determinada por la cantidad de luz, CO₂ y la variación de formas nitrogenadas y fosfatadas. Según la cantidad de nutrientes disueltos, los ecosistemas acuáticos pueden ser calificados como oligotróficos, con pocos nutrientes y, por tanto, con baja producción primaria, o en el otro extremo, hipereutrófico, en donde la generación continua de biomasa, principalmente de fitoplancton, genera problemas en los flujos energéticos

(Contreras, Castañeda y Torres, 1997). En los humedales, donde el flujo de agua es mínimo, la mayoría de la materia orgánica en partículas permanece cerca de o en los sitios de producción, y los nutrientes son reciclados y retenidos por la microbiota allí presente a medida que la materia orgánica se descompone (Grimshaw *et al.*, 1997). La cantidad de clorofila es proporcional a la cantidad de fitoplancton y esta es a su vez proporcional al estado trófico del cuerpo de agua. Como tal, la concentración de clorofila_a (Ryding y Rast, 1989) y la producción primaria fitoplántonica (Hakanson y Boulion, 2003) pueden ser usadas como indicadores apropiados para determinar el grado de eutroficación en lagos y en humedales (tabla 1).

Los valores de la producción primaria fitoplántonica son medidos en unidades de energía o masa de carbono orgánico (C) y se utiliza frecuentemente para estimar la productividad biológica o el estado trófico de los cuerpos de agua (Hakanson y Boulion, 2002). La cantidad de clorofila_a en el agua es correspondiente con la cantidad de fitoplancton

Tabla 1. Estado trófico basado en la concentración de clorofila_a y la producción primaria

Estado trófico	Chl_a / mg/m ³	Producción primaria fitoplancton mgC m ³ *año
Oligotrófico	<2,5	<30
Mesotrófico	2-8	25-60
Eutrófico	6-35	40-200
Hipertrófico	30-400	130-600

Fuente: Boulion y Hakanson (2003).

(Hakanson y Peters, 1995; Wetzel, 2001; Gocke, Mancera, Vidal y Fonseca, 2003). La cantidad de fitoplancton es proporcional al estado trófico de los cuerpos de agua. Se puede utilizar la concentración de clorofila_a y su equivalente en mgC/m^3 para establecer la producción primaria fitoplanctónica. Para estimar la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque se elaboró un modelo de simulación dinámica basado en el principio de balance de masas, el cual permite relacionar la concentración de clorofila_a con la producción primaria fitoplanctónica expresada en unidades de $C\ mg/m^3$ (Hakanson y Boulion, 2003; Rivera, 2006).

METODOLOGÍA

Área de estudio

El humedal Jaboque se ubica en la localidad de Engativá, en el occidente de la ciudad de Bogotá, Colombia (figura 1); está contiguo a la cuenca del río Juan Amarillo, entre el Aeropuerto Internacional El Dorado y la Autopista Medellín. Abarca aproximadamente 57 ha y presenta una forma alargada en dirección sur-oriente-noroccidente.

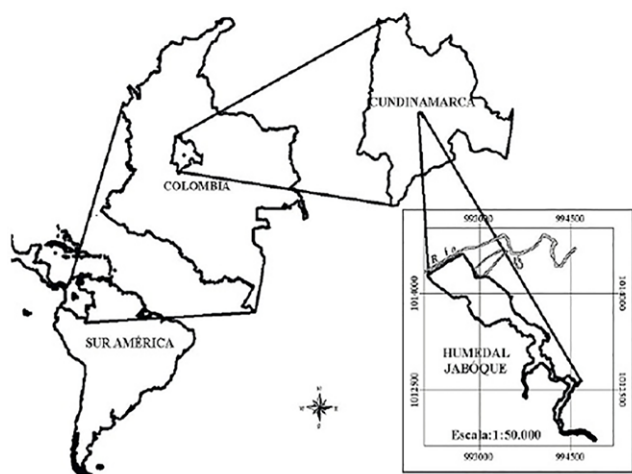


Figura 1. Localización geográfica del humedal Jaboque

Fuente: Sierra y Monsalve (2005).

En las últimas cuatro décadas, el humedal Jaboque ha visto reducida su extensión por la variación del drenaje, la colmatación por cargas orgánicas de las aguas y vertimientos, ocupación por construcción y su fraccionamiento. Esta situación ha incidido para que el humedal esté perdiendo, por una parte, su función ecosistémica, y por la otra, sus atributos como: *biodiversidad, estructura, procesos y funciones*.

Método de simulación

La modelación se realizó con el *software Stella 9.1*®, utilizado en modelaciones hidrológicas y ecológicas (Jorgensen y Bendoricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Jorgensen, 2008). Se trabajó el sistema de interfaz, para predecir el comportamiento de productividad primaria a partir de las concentraciones promedio de clorofila_a para cada sección; también para realizar los análisis de sensibilidad del modelo relacionando la precipitación con la productividad primaria fitoplanctónica y así poder determinar el estado trófico del humedal (tabla 2). El modelo conceptual se transformó mediante algoritmos. En cada variable se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo. La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones de la producción primaria fitoplanctónica (Ppf) y estado trófico del humedal en sus tres secciones. Con el fin de verificar el carácter determinístico del modelo y realizar su validación, se llevaron a cabo regresiones simples lineares (Legendre y Legendre, 1998; Rivera, 2006), entre los valores de clorofila_a y la Ppf que permitieron comparar los valores estimados según análisis de laboratorio con los resultados modelados. Para evaluar la fortaleza del modelo, se determinó el error relativo (Bryhn y Hakanson, 2007; Jorgensen y Bendoricchio, 2001; Zhang y Mitsch, 2005; Hakanson, 2004) y para evidenciar el carácter predictivo se analizó la sensibilidad del mismo modelo (Hakanson, 2004; Jorgensen, 2008).

Variables del modelo

Tabla 2. Variables utilizadas en el modelo

Variables e índices	Valores/Unidades	Fuente
Profundidad sección	m	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación Biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Precipitación	m.m/año	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Área sección	m ²	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación Biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Volumen	mm	Datos de campo U. Nacional/Simulación
Temperatura	Centígrados	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación Biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Concentración de clorofila_a	mg/m ³	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Tasa renovación fitoplancton	Kg wwC/m ³ /t ⁻¹	Hakanson y Boulion (2003)
Tasa de producción de fitoplancton	mgC/m ³ /t ⁻¹	Hakanson y Boulion (2003)
Concentración de fitoplancton	mgC/m ³ ,año	Simulado
Producción primaria inicial	kg ww C/m ³ ,año	Simulado
Producción primaria fitoplántonica biomasa	kg ww C/m ³ ,año	Simulado

Fuente: elaboración propia.

Supuestos del modelo

El modelo asume los siguientes supuestos, con el propósito de delimitar su alcance y posterior generalización o aplicación:

- La carga (Ci) de de clorofila_a se calcula a partir del punto de entrada de cada sección.
- Los datos de Chl_a (Clorofila a) disponibles corresponden a un año de muestreo, que representa periodos hídricos invierno-verano (Álvarez, 2005).
- En la modelación del estado trófico del humedal se tuvo en cuenta la concentración de Chl_a.
- La modelación consideró los promedios mensuales de Chl_a encontrados en las zonas de flujo de entrada a cada sección.
- De acuerdo con la zonificación del humedal Jaboque, se asumen tres secciones con características morfológicas, físicas y biológicas propias.
- El modelo hace referencia a la producción primaria fitoplanctónica.

El modelo de simulación

A partir de la relación entre la concentración de clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica (calculada como $mgC/m^3/año$), se calculó la producción primaria fitoplanctónica y de acuerdo con Boulion y Hakanson (2003) en la ecuación (1) se trabajaron los siguientes algoritmos:

$$Ppf = (2,13 * Chl_a^{0,25} + 0.25)^4 \quad (1)$$

Donde,

Ppf = producción primaria fitoplanctónica calculada como $mg/m^3/mes$

Chl_a = concentración de clorofila a en mg/m^3 .

Realizando la transformación logarítmica, según las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) (Boulion y Hakanson, A ; 2003)

$$\log(Ppf) = 0,97 \cdot \log(Chl_a + 2,49) \quad (2)$$

$$Ppf = 30,6 * Chl^{0,927} \approx 30 * Chl_a \quad (3)$$

$$Bm(t) = Bm_u(t - dt) + (IPR - El) * dt \quad (4)$$

Bm = biomasa de producción primaria por unidad en kg w

IPR = producción primaria inicial en kg ww * semana

El = tasa de renovación de organismos consumidores kg ww*semana (Boulion y Hakanson, 2003).

$$Ppf = (30,6 * Chl_a^{0,927}) * 0,45 * 30 * Área * Z * 0,01 * \left(\frac{RWT + 0,1}{17} \right) * \frac{BMp}{BMf} \quad (5)$$

Ppf = producción primaria inicial (kg ww/semana).

Chl = promedio mensual de concentración de clorofila_a (mg/m^3).

$Chl_a = 0,927 * 30,6$ = patrón de conversión de Chl en producción primaria fitoplanctónica en $Cmg/m^3/d$.

0,45 = factor de conversión estándar para transformar Cg semana a g dw/mes.

Área = área de la cubeta.

Z = profundidad promedio.

RWT = temperatura media de referencia.

BMp/BMf = relación entre la biomasa de las entradas de plancton y la biomasa calculada de fitoplancton. El rango de esta relación es aproximado a 0,25 (Boulion y Hakanson, 2003).

de clorofila_a tienden a disminuir, resultado que se debe al hecho de que la primera y segunda sección reciben con mayor fuerza la descarga de nutrientes de la cuenca aferente (Fraile, Orive y Pozo, 1995; Boulion y Hakanson, 2003) (figura 2 y tabla 3). Estos resultados sugieren que las condiciones climáticas y el hidroperiodo influyen en el comportamiento de la clorofila_a como lo sugieren Ryding y Rast (1989). En el mismo sentido, Jiménez (2006) encontró para el lago de Guatavita, (Cundinamarca, Colombia) variaciones de clorofila_a debidas a la radiación solar; sin embargo, estas no fueron ocasionadas por el hidroperiodo. Montoya y Aguirre (2010) en la ciénaga Escobillitas (Antioquia) hallaron una relación entre la variación los clorofila_a, la producción primaria y el pulso de inundación.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comportamiento de la clorofila_a en el humedal de Jaboque

Las variaciones de la concentración de la clorofila_a en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al comportamiento bimodal de la precipitación. En los meses secos las concentraciones aumentan, mientras que en los meses lluviosos tienden a descender. Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, y en la tercera sección las concentraciones

Producción primaria fitoplanctónica

Los resultados de la modelación de la producción primaria del fitoplancton en el humedal Jaboque ($mgCm^{-3}$), para todas las secciones, se presentan en la figura 3 y en la tabla 3. Se observa que la producción primaria aumenta en los periodos de menores precipitaciones (diciembre-febrero y julio-septiembre) y en los periodos de altas precipitaciones disminuye (abril, mayo, junio y octubre, noviembre). Es innegable una fuerte relación entre la actividad biológica y el ciclo hidrológico.

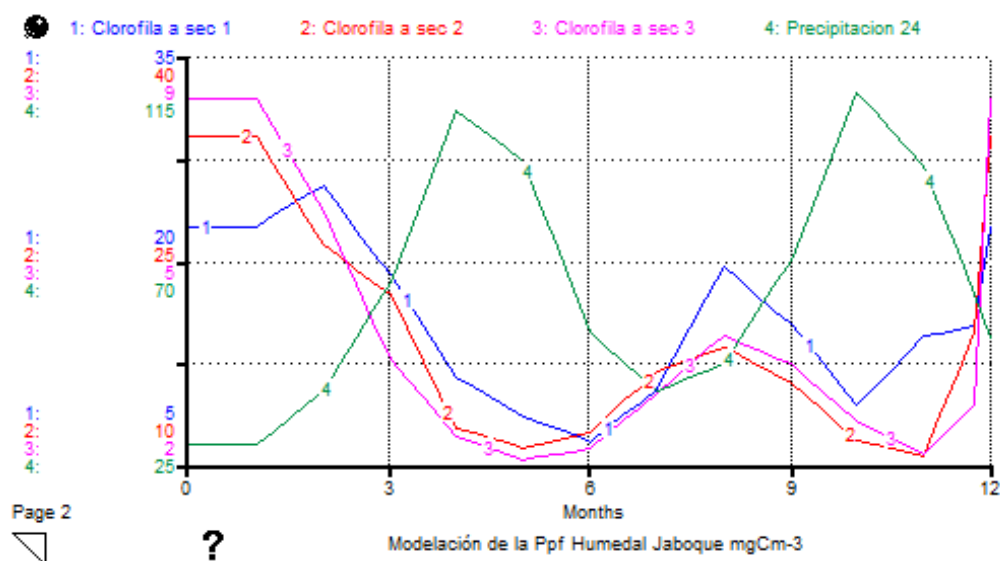


Figura 2. Resultado de la modelación de clorofila_a para el humedal de Jaboque, en las tres secciones

Fuente: elaboración propia.

1: Clorofila_a Sec 1 mg/m^3 .

2: Clorofila_a Sec 2 mg/m^3 .

3: Clorofila_a Ssec 3 mg/m^3 .

4: Precipitación mm año.

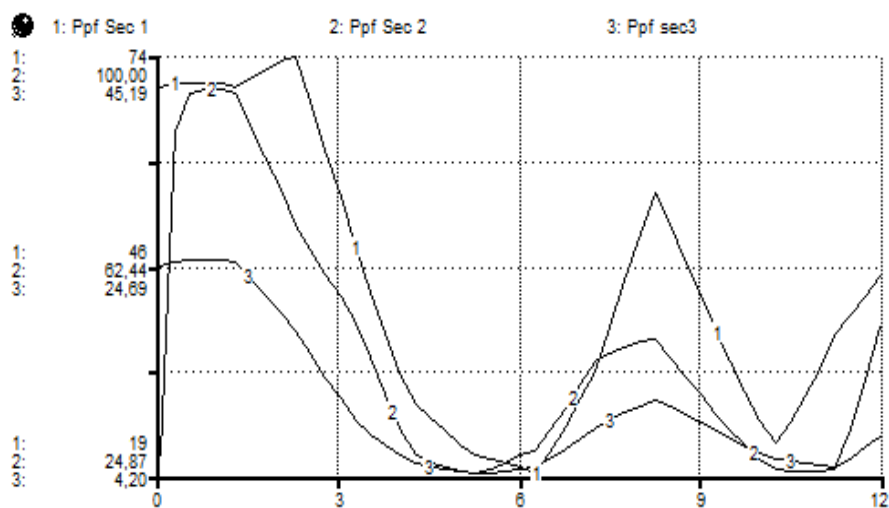


Figura 3. Modelación de la productividad primaria fitoplanctónica para todas la secciones

Fuente: elaboración propia.

1: Producción primaria fitoplanctónica Sec 1 $mgCm^{-3} \cdot año$.

2: Producción primaria fitoplanctónica Sec 1 $mgCm^{-3} \cdot año$.

3: Producción primaria fitoplanctónica Sec 1 $mgCm^{-3} \cdot año$.

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

En esta sección (figura 3 y tabla 3), durante los meses secos (enero, febrero, marzo) la producción primaria fluctuó entre 70,29 mgC/m^3 y 44,5 mgC/m^3 , en los de agosto y septiembre entre 21,9 mgC/m^3 y 39,21 mgC/m^3 ; en diciembre fue de 36,8 mgC/m^3 y en los meses de mayores precipitaciones (abril, mayo y junio) los valores fluctuaron entre 28,5 mgC/m^3 y 16,7 mgC/m^3 , y en octubre y noviembre, 23,3 mgC/m^3 y 29,53 mgC/m^3 . El promedio mensual para toda la sección fue de 35,10 mgC/m^3 y la desviación estándar fue de 15,77, lo cual indica que existe variación. La relación entre los valores de clorofila_a estimados con aquellos que se modelaron de la producción primaria fitoplanctónica (Hakanson y Boulion, 2003; Kuo, Hsieh, Lung y She, 2007) se realizó un análisis de regresión y sus resultados mostraron una buena correspondencia entre los dos grupos $r^2 = 0.85$; $y = 0,3458x + 2,6623$.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

En esta sección (figura 3 y tabla 3), en los meses secos (enero, febrero, marzo) la producción primaria fluctuó entre 77,8 mgC/m^3 y 50,02 mgC/m^3 ;

durante agosto y septiembre estuvo entre 41,6 mgC/m^3 y 35,4 mgC/m^3 ; en diciembre fue de 31,5 mgC/m^3 ; en los meses de mayores precipitaciones (abril, mayo y junio) los valores fluctuaron entre 32,2 mgC/m^3 y 24,8 mgC/m^3 , mientras que en octubre y noviembre fue de 27,1 mgC/m^3 y 25 mgC/m^3 . El promedio mensual para toda la sección fue de 39,17 mgC/m^3 y la desviación estándar fue de 16,73, mostrando que existe variación. La relación entre los valores estimados de clorofila con aquellos modelados de la producción primaria fitoplanctónica mostraron que entre los dos grupos hay una buena correspondencia $r^2 = 0,8631$; $y = 0,4043x + 0,8631$.

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

En esta sección (figura 3 y tabla 3), en los meses secos (enero, febrero, marzo), la producción primaria fluctuó entre 15,9 mgC/m^3 y 12,5 mgC/m^3 ; en agosto y septiembre estuvo entre 8,87 mgC/m^3 y 7,98 mgC/m^3 ; en diciembre fue de 7,5 mgC/m^3 ; en los meses de mayores precipitaciones (abril, mayo y junio) los valores fluctuaron entre 5,61 mgC/m^3 y 4,16 mgC/m^3 , y en octubre y noviembre fue de

Tabla 3. Resultados de la modelación de Chl_a y la Ppf

Meses	Precipitación	Chl_a Sección 1 mg/m^3	Ppf Sección 1 mgCm^{-3}	Chl_a Sección 2 mg/m^3	Ppf Sección 2 mgCm^{-3}	Chl_a Sección 3 mg/m^3	Ppf Sección 3 mgCm^{-3}
Enero	29	22,5	70,29	34,2	77,8	7,8	12,5
Febrero	41	25,5	55,67	26,1	63,51	5,85	15,96
Marzo	65	18,9	44,5	22,5	50,02	3,3	9,72
Abril	103	11,4	28,55	12,6	32,29	1,95	5,61
Mayo	92	8,4	20,28	11,1	24,85	1,56	4,15
Junio	54	6,6	16,02	12,3	25,73	1,74	4,16
Julio	41	10,5	21,99	16,8	35,15	2,7	6,36
Agosto	47	19,5	39,21	18,6	41,67	3,69	8,87
Septiembre	70	15,3	34,98	15,9	35,39	3,21	7,98
Octubre	107	9,3	23,35	11,7	27,12	2,22	5,92
Noviembre	91	14,4	29,53	10,5	25	1,65	4,76
Diciembre	53	15,3	36,85	22,8	31,5	2,8	7,5
Promedio	66,08	14,80	35,10	17,93	39,17	3,21	7,79
Desviación estándar	26,39	5,89	15,77	7,28	16,73	1,87	3,57

Fuente: elaboración propia.

5,92 mgC/m^3 y 4,76 mgC/m^3 . El promedio mensual para toda la sección fue de 7,79 mgC/m^3 y la desviación estándar fue de 15,77, mostrando que existe variación. La relación entre los valores de clorofila *a* estimados con aquellos modelados de la producción primaria fitoplanctónica (Hakanson y Boulion, 2003; Kuo, Hsieh, Lung y She, 2007) se realizó mediante análisis de regresión, y sus resultados mostraron que entre los dos grupos hay una buena correspondencia $r^2 = 0,792$; $y = 1,6947x + 2,358$.

Los resultados anteriores indican que la clorofila *a* y la producción primaria fitoplanctónica se relacionan con el hidropериodo y el transporte de nutrientes como lo sugieren Ryding y Rast (1989). Pinilla (2006) encontró un patrón de comportamiento similar en la laguna de Guatavita (Cundinamarca, Colombia) y un lago amazónico (Hernandez, Aguirre, Palacio y Ramírez, 2008) hallaron que en la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia), los nutrientes y la clorofila *a* se encuentran regulados por el hidropериodo y el pulso de la inundación.

Error relativo

Para verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn y Hakanson, 2007; Jorgensen y Bendoricchio, 2001), para cada una de las secciones, para lo cual se compararon los valores medidos, clorofila *a* con los valores resultante de la modelación de la Ppf. El valor promedio del error relativo para el tercio alto es de 1,36, para el segundo tercio de 1,21, y para el tercero, de 1,56; y las desviaciones estándar fueron de 0,30 para el primer tercio, 0,29 para el segundo y el tercero de 0,36, cifras que indican que el modelo no tiende a sobreestimar los valores es su predicción.

Estado trófico (IST) basado en la producción primaria

Los resultados de la modelación permitieron establecer las cantidades de clorofila *a*, debido a que esta es proporcional a la cantidad de fitoplancton

y esta es a su vez proporcional al estado trófico del cuerpo de agua de acuerdo con Hakanson y Boulion, (2003) y Ryding y Rast (1989), se utilizaron para determinar el estado trófico de cada una de las secciones del humedal (tablas 1 y 3). Los resultados anteriores permiten inferir que a mayores descargas de agua de la cuenca aferente es posible disminuir las condiciones de eutrofia en las dos primeras secciones, y en la tercera sección mejorar o disminuir la tendencia a la mesotrofia, como lo sugiere Jorgensen (2003) que al aumentar la descarga de agua se presenta un lavado de nutrientes, mejorando las condiciones tróficas, fenómeno similar al observado con el comportamiento del fósforo total en el humedal.

Análisis de sensibilidad del modelo

Para el análisis de sensibilidad del modelo se tuvo en cuenta el promedio anual de la clorofila *a* en mg/m^3 como variable independiente expresada en clases entre 4,0 mg/m^3 y 18 mg/m^3 y como variable dependiente la Ppf expresada en mgC/m^3 . En la figura 4 se aprecian los resultados de análisis de sensibilidad, para la tercera sección. Las curvas de la figura corresponden a los cambios en la Ppf según cada nivel de variación de los valores de clorofila *a* entre clases desde 4 mg/m^3 a 18 mg/m^3 ; las coordenadas señalan el tiempo en meses, y la abscisa a los valores de Ppf en mgC/m^3 . Los resultados permitieron corroborar la correspondencia entre los valores de clorofila *a* y la Ppf, a medida que aumentan las cantidades de clorofila *a* aumenta la Ppf, como lo sugieren Wetzel (2001); Gocke, Mancera, Vidal y Fonseca, (2003). Se percibe una fuerte influencia del ciclo hidrológico en el comportamiento de la marcha de las dos variables, en las épocas más lluviosas (abril, mayo, junio y octubre, noviembre) la Ppf disminuye y aumenta en los periodos secos, como ocurre en el humedal Jaboque (Álvarez, 2005). Esto se debe, en parte, a la oferta de nutrientes que se concentra en las épocas de verano cuando disminuye el volumen de agua y la concentración se diluye cuando aumenta el

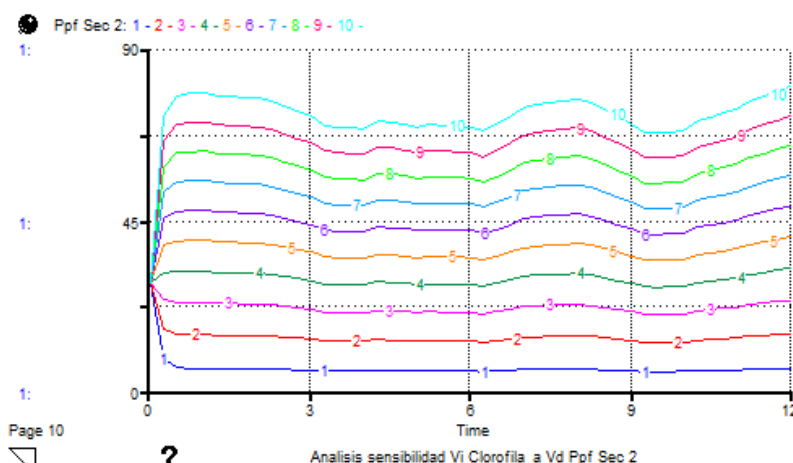


Figura 4. Análisis de sensibilidad. Tercio bajo. Variable independiente clorofila_a, variable dependiente Ppf

Fuente: elaboración propia.

Ppf sec1: productividad primaria fitoplántonica $\text{mgCm}^{-3}\cdot\text{año}$.

1, 2,3...: niveles de variación clorofila_a entre 4 mg/m^3 y 18 mg/m^3 .

volumen de agua. Los resultados anteriores sugieren que para mantener una condición mesotrófica en el humedal, el máximo permisible correspondería a 11,8 mg/m^3 de clorofila_a con una Ppf de 29,1 mgCm^{-3} .

CONCLUSIONES

Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, mientras que la tercera sección las concentraciones de clorofila_a tienden a disminuir, resultado que se debe al hecho de que la primera y segunda sección reciben con mayor fuerza la descarga de nutrientes de la cuenca aferente; sin embargo la segunda sección presenta los mayores valores de clorofila_a. En la tercera sección las concentraciones disminuyen de manera significativa, indicando mejor condición trófica, como lo señala Álvarez (2005). Los resultados de la modelación permitieron corroborar que las cantidades de clorofila_a son proporcionales a la Ppf y esta a su vez es proporcional al estado trófico del humedal. Se encontró dependencia entre el ciclo hidrológico y el comportamiento de la producción primaria fitoplanctónica; como lo indica

Álvarez (2005), este fenómeno es más acentuado en el tercio alto y disminuye gradualmente hacia al tercio bajo. Estos resultados corroboran la relación entre la clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica como lo sugieren Ryding y Rast (1989) y como los reportados para la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) por Hernández, Aguirre, Palacio y Ramírez (2008).

La bondad de predicción del modelo se verificó mediante la determinación del error relativo con los siguientes valores: 1,36 y 0,3 de desviación estándar en el primer tercio; 1,21 para el segundo tercio, y 0,29 de desviación estándar; y en la tercera 1,56 y 0,36 de desviación, valores cercanos a cero. La correspondencia entre las variables del modelo entre los valores de clorofila_a y aquellos simulados de Ppf calculados, mostraron una alta reciprocidad, para el tercio alto de $r^2 = 0,86$; el tercio medio $r^2 = 0,86$; el tercio bajo $r^2 = 0,78$, respectivamente. Si bien hay diferencias, es posible que se deban al complejo patrón de distribución de nutrientes y así mismo de los procesos biogeoquímicos en el humedal (Álvarez, 2005). El análisis de sensibilidad del modelo permitió comprobar la relación entre una variable física como

es la precipitación y la correspondencia entre una variable química la clorofila_a y una de tipo biótico la producción primaria, mostrando el carácter holístico e integrador del modelo (Carpenter y Cottingham, 1997; Boumans *et al.*, 2002). También se evidenció la correspondencia entre las variables de entrada y salida del modelo, y su carácter predictivo. Además se demostró que la estructura y las variables del modelo reproducen de manera general el comportamiento de la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque.

De acuerdo con los resultados de la modelación se puede concluir que en el humedal Jaboque la producción primaria es alta en las dos primeras secciones y especial en los meses de menores precipitaciones; en la tercera sección, la productividad primaria disminuye de manera significativa marcando una diferencia clara entre un estado mesotrófico y el estado eutrófico de las dos primeras secciones. La modelación permitió comprobar la bondad de utilizar indicadores de estado trófico, mostrando el potencial que tienen este tipo de indicadores en la vigilancia y control de la eutroficación.

FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Rectoría, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIIDC).

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación Biodiversidad y Conservación de la Universidad Nacional de Colombia – Instituto de Ciencias Naturales, y a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP), por el aporte de la información relacionada con el estudio de caso. A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Rectoría, la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales por el apoyo económico otorgado, al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIIDC) y el Grupo de Investigación INDESOS, quienes apoyaron la financiación

para la adquisición de los programas computacionales, el equipo de cómputo y la bibliografía especializada que se utilizó en la investigación.

REFERENCIAS

- Álvarez, J. (2005). Evaluación del estado trófico del humedal de Jaboque: análisis espacial y temporal de las características fisicoquímicas del agua y de la comunidad planctónica. En: *Informe final. Investigación aplicada en restauración ecología en el humedal de Jaboque* (pp. 215-235). Bogotá: Convenio Acueducto de Bogotá–Universidad Nacional de Colombia.
- Boulion, V. & Hakanson, A. (2003). A New General Dynamic Model to Predict Biomass and Production of Bacterioplankton in Lakes. *Ecological Modelling* 160(2), 91-114.
- Boumans, R.; Constanza, R.; Farley, J.; Wilson, M.; Portella, R.; Rotmans, J.; Villa, F. y Grasso, M. (2002). Modeling the Dynamics of the Integrated Earth System and the Value of Global Ecosystem Services Using the GUMBO Model. *Ecological Economics* 41(3), 529-560.
- Bryhn, A. & Hakanson, L. (2007). A Comparison of Predictive Phosphorus Load-Concentration Models for Lakes. *Ecosystems* 10(7), 1084-1099.
- Carpenter, S. & Cottingham, K. (1997). Resilience and Restoration of Lakes. *Conservation ecology* 1(1), 2-3.
- Contreras, F.; Castañeda, O. y Torres, R. (1997). Hidrología, nutrientes y productividad primaria en las lagunas costeras del estado de Oaxaca, México. *Hidrobiológica* 7(1), 9-17.
- Fraile, H.; Orive, E. y Pozo, J. (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (río Tera y Zamora). *Limnetica* 11(2), 29-37.
- Gocke, K.; Mancera, P.; Vidal, L. & Fonseca, D. (2003). Planktonic Primary Production and Community Respiration in Several Coastal Lagoons of the Outer Delta of the Rio Magdalena, Colombia. *Boletín de investigaciones marinas y costeras* 32(1), 125-144.
- Gómez, L.; Larduet, Y. y Abrahantes, N. (2001). Contaminación y biodiversidad en ecosistemas acuáticos.

- El fitoplancton en la bahía de Santiago de Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 22(3), 191-197.
- Grimshaw, H.; Wetzel, R.; Brandenburg, M.; Segerbom, K.; Wenkert, L.; March, G.; Charnetzky, W.; Haky, J. & Carraher, C. (1997). Shading of Peryphyton Communities by Wetland Emergent Macrophytes: Decoupling of Algal Photosynthesis from Microbial Nutrient Retention. *Archiv für Hydrobiologie* 139(1), 17-27.
- Hakanson, L. (2004). Break-Through in Predictive Modelling Opens new Possibilities for Aquatic Ecology and Management—A Review. *Hydrobiologia. Volume 518(1-3)*, 135-157.
- Hakanson, L. & Peters, R.H. (1995). *Predictive Limnology: Methods for predictive modelling*. Amsterdam: SPB Academic Publishing.
- Hakanson, L. & Boulion, V. (2002). Empirical and Dynamical Models to Predict the Cover, Biomass and Production of Macrophytes in Lakes. *Ecological Modelling* 151(2), 213-243.
- Hakanson, L. & Boulion, V. (2003). A General Dynamic Model to Predict Biomass and Production of Phytoplankton in Lakes. *Ecological Modelling* 165(2), 285-301.
- Hernandez, E.; Aguirre, J.; Palacio, J. y Ramírez, J. (2008). Variación espacio temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la ciénaga de Ayapel, Córdoba. *Colombia actualidades biológicas* 30(88), 67-81.
- Jiménez, H. (2006). *Las variaciones diarias de la producción primaria y la concentración de la clorofila en un lago tropical (Guatavita, Colombia)*. Tesis inédita de maestría. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Jorgensen, S.E. (2003). The Application of Models to Find the Relevance of Residence Time in Lake and Reservoir Management. *Journal of limnology* 62 (1), 16-20.
- Jorgensen, S. (2008). Overview of the Model Types Available for Development of Ecological Models. *Ecological Modelling* 215(1), 3-9.
- Jorgensen, S. & Bendoricchio, G. (2001). *Fundamentals of ecological modelling*. Amsterdam: Elsevier Science Ltda.
- Kuo, J.T.; Hsieh, M.H.; Lung, W.S. y She, N. (2007). Using Artificial Neural Network for Reservoir Eutrophication Prediction. *Ecological Modelling* 200(1), 171-177.
- Legendre, P. y Legendre, L. (1998). *Numerical ecology*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Montoya, Y. y Aguirre, N. (2010). *Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (ciénaga Escobilletas) a lo largo del pulso de inundación* (pp. 76-89). Medellín: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia,
- Pinilla, G. (2006). Evaluación de la eficiencia fotosintética del fitoplancton en un lago amazónico (lago Boa) y en un lago andino (lago Guatavita). *Acta Amazónica* 36(2), 221-228.
- Rivera, C. (2006). *Modelos correlativos de algunas variables físicas, químicas y biológicas del lago Guatavita*. Tesis de maestría. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Ryding, S.O. & Rast, W. (1989). *Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs. Manual the Biophere Series*. Vol. 1. Nashville: Parthenon Publishing Group.
- Sierra, O.R. & Monsalve, C.A. (2005). *Zonificación trófica del humedal Jaboque, con base en la familia Bacillariophyceae, Engativá. Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal de Jaboque*. Bogotá: Acueducto de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- Wetzel, R. (2001). Fundamental Processes Within Natural and Constructed Wetland Ecosystems: Short-Term Versus Long-Term Objectives. *Water Science & Technology* 44(11-12), 1-8.
- Zhang, L. & Mitsch, W. (2005). Modelling Hydrological Processes in Created Freshwater Wetlands: An Integrated System Approach. *Environmental Modelling & Software* 20(7), 935-946.



