



Julio Eduardo Beltrán Vargas



**Formulación de un modelo dinámico de simulación
ecológica del humedal Jaboque con fines de
restauración y conservación**



Formulación de un modelo dinámico de simulación
ecológica del humedal Jaboque con fines de
restauración y conservación

Julio Eduardo Beltrán Vargas

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ
GESTIÓN PÚBLICA
Secretaría General

Alcalde Mayor de Bogotá
Enrique Peñalosa Londoño

Secretario
Raúl Buitrago Arias

Subsecretaria Técnica
Cristina Aristizábal Caballero

Director Distrital de Archivo (e)
Julio Alberto Parra Acosta

Julio Eduardo Beltrán Vargas
Autor

Impresión

Secretaría General - Imprenta Distrital. 2017

ISBN 978-958-717-250-8

© Secretaría General Alcaldía Mayor de Bogotá D. C. Todos los derechos reservados. Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de su autor. Cualquier reproducción de esta publicación debe ser autorizada por la Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D. C. La Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. no se responsabiliza de los contenidos de esta publicación; la responsabilidad es directamente del autor.

Dirección Distrital de Archivo de Bogotá / Calle 6B No. 5-75 / PBX 3813000 ext. 4113

www.archivobogota.gov.co

Primera edición: Bogotá D. C., 2017. 100 ejemplares.

Impreso y hecho en Colombia

Contenido

Presentación	17
Agradecimientos	21
Resumen	23
Abstract	25
Capítulo 1. Presentación general del estudio y planteamiento del problema de investigación	27
Introducción	27
Problemática general	29
Modelación dinámica en sistemas acuáticos	30
Factores a tener en cuenta para el análisis del problema de investigación	31
Hidrología	31
Estado trófico	32
Sólidos suspendidos totales (SST)	32
Producción primaria fitoplanctónica	33
Macrófitas	33
Formulación del problema específico	34
Hipótesis que se procuraron verificar a través de la modelación dinámica	34
Método de modelación	35

Capítulo 2. Generalidades	37
Localización geográfica del área de estudio: el humedal Jaboque	37
La zonificación del humedal	38
Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)	40
Sección 2. Zona de transición (tercio medio)	41
Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)	42
Aspectos geológicos y geomorfológicos del humedal Jaboque	43
Microflora: vegetación del humedal Jaboque	46
Estado trófico del Humedal Jaboque	48
Diagnóstico participativo social	51
Capítulo 3. Caracterización climática de la zona de influencia del humedal Jaboque	57
Resumen	57
Metodología	58
Obtención de la información climática	58
Procesamiento de la información	58
Resultados y discusión	59
Precipitación	59
Temperatura	62
Humedad relativa	65
Balance hídrico	67
Diagrama ombrotérmico	68
Comparación años 2004 y 2005	71
Consideraciones finales	75
Precipitación	75
Temperatura	76
Humedad relativa	76
Balance hídrico	77
Brillo solar	77
Periodos serie histórica	78
Comparación año 2004 vs. año 2005	81
Capítulo 4. Modelación de los procesos hidrológicos del humedal Jaboque	85
Resumen	85
Introducción	86

Estructura del modelo de simulación dinámica	87
Entradas	88
Salidas	89
Supuestos del modelo	89
El modelo de simulación hidrológica	92
Método de simulación	93
Submodelo de descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque	94
Resultados	94
Descarga de la cuenca aferente	95
Variabilidad según valores extremos	96
El comportamiento hidrológico, años 2004-2005	99
Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)	103
Tiempo Hidráulico de Retención	106
Análisis de sensibilidad del modelo	111
Discusión	117
Resumen	133
Capítulo 5. Modelación del estado trófico del humedal Jaboque	133
Introducción	134
Eutrofización	135
Modelos dinámicos de fósforo total (Pt) en humedales	137
Método de simulación	141
Estructura del modelo de simulación dinámica	142
El modelo de balance de masas para la determinación de fósforo total	142
Variables del modelo	144
Supuestos del modelo	144
Resultados	145
Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)	147
Sección 2. Zona de transición (tercio medio)	147
Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)	149
Modelación del índice de estado trófico (IST)	149
Error relativo	153
Análisis de sensibilidad del modelo	153
Capítulo 6. Modelación dinámica de sólidos suspendidos totales (SST)	167
Resumen	167
Introducción	168

Procesos ecológicos de los sólidos suspendidos totales	169
Modelos dinámicos de sólidos suspendidos en humedales	171
Estructura del modelo de simulación dinámica	173
Método de simulación	175
Supuestos del modelo	175
Resultados	176
Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)	177
Sección 2. Zona de transición (tercio medio)	178
Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)	181
Error relativo	183
Análisis de sensibilidad del modelo	184
Discusión	188

Capítulo 7. Modelación de la producción primaria fitoplanctónica 193

Resumen	193
Introducción	194
Modelos dinámicos de producción primaria	198
Estructura del modelo de simulación dinámica	200
Método de simulación	200
Variables del modelo	201
Supuestos del modelo	202
El modelo de simulación	202
Resultados	204
Comportamiento de la clorofila _a	204
Producción primaria fitoplanctónica	207
Error relativo	211
Estado trófico (IST) basado en la producción primaria	212
Análisis de sensibilidad del modelo	213
Análisis de resultados	215

Capítulo 8. Aproximación a la modelación dinámica de la producción de biomasa de macrófitas flotantes 219

Resumen	219
Procesos ecológicos	220
Modelos dinámicos	221
Estructura del modelo de simulación dinámica	223
El modelo para la estimación de biomasa de macrófitas	223
Variables del modelo	224
Supuestos del modelo	225

Resultados	225
Análisis de sensibilidad del modelo	227
Discusión	230
Capítulo 9. Consideraciones finales	233
Recomendaciones	243
Referencias	247
Anexos	270

Tablas

- Tabla 3.1. Parámetros climatológicos de la estación meteorológica
- Tabla 3.2. Balance hídrico multianual, Aeropuerto El Dorado.
- Tabla 3.3. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Tabla 3.4. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos para los años 2004 y 2005 estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Tabla 4.1. Variables utilizadas en el modelo. Flujos de entrada y salida de agua del humedal Jaboque.
- Tabla 4.2. Variables del modelo, unidades y fuentes.
- Tabla 4.3. Precipitación mensual y anual. Descarga anual estimada, años 1979-2010.
- Tabla 4.4. Comparación del error relativo entre las secciones del humedal Jaboque.
- Tabla 4.5. Resultados de la modelación del THR, año 1992.
- Tabla 4.6. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 2010.
- Tabla 4.7. Variables del análisis de sensibilidad precipitación/flujo, salida río Bogotá.
- Tabla 4.8. Variables del análisis de sensibilidad. Precipitación sección 1, 2 y 3.
- Tabla 4.9. Valores estimados del volumen vs. valores simulados, años 2004-2005.
- Tabla 4.10. Cálculo del error relativo para la tres secciones, años 2004-2005.
- Tabla 4.11. Resultados de la modelación dinámica. Variables: flujo cuenca aferente; volumen sección 1, 2 y 3; salida al río Bogotá; THR para todas las secciones. Años 2004-2010.
- Tabla 4.12. Análisis de sensibilidad sección 1: precipitación (mm/año) como variable independiente y THR (días/año) como variable dependiente. Años 2004-2010.
- Tabla 4.13. Análisis de sensibilidad sección 2: precipitación (mm/año) como variable independiente y THR (días/año) como variable dependiente. Años 2004-2010.
- Tabla 4.14. Análisis de sensibilidad sección 3: precipitación (mm/año) como variable independiente y THR (días/año) como variable dependiente. Años 2004-2010.
- Tabla 5.1. Valores límite de clasificación trófica.
- Tabla 5.2. Variables del modelo, unidades y fuentes.
- Tabla 5.3. 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.
- Tabla 5.4. Resultado del cálculo del error relativo del modelo aplicado a todas las secciones.
- Tabla 5.5. Análisis de sensibilidad. La serie corresponde a los niveles de Pt como

variable independiente y los de IST a las respuestas.
Tabla 5.6. Resultado del análisis de sensibilidad, secciones 1, 2 y 3.
Tabla 6.1. Variables del modelo, unidades y fuentes
Tabla 6.2. Resultados de la modelación del balance de masas de SST
Tabla 6.3. Resultado de la estimación del error relativo del modelo en todas las secciones.
Tabla 6.4. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 1
Tabla 6.5. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 2.
Tabla 6.6. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 3.
Tabla 7.1. Estado trófico basado en la concentración de clorofila_a y la producción primaria.
Tabla 7.2. Resumen de los modelos dinámicos de fósforo en humedales
Tabla 7.3. Variables utilizadas en el modelo
Tabla 7.4. Resultados de la modelación de Chl-*a* y la PPF
Tabla 7.5. Error relativo en las tres secciones
Tabla 7.6. Resultados del análisis de sensibilidad
Tabla 8.1. Resumen de los modelos dinámicos de macrófitas en humedales
Tabla 8.2. Variables del modelo, unidades y fuentes
Tabla 8.3. Resultados de la modelación caudal promedio mensual, fósforo total, biomasa estimada de macrófitas en el humedal Jaboque.
Tabla 8.4. Resultados de análisis de sensibilidad concentración de Pt y biomasa de macrófitas
Tabla 9.1. Correspondencia entre las preguntas planteadas al comenzar la investigación y los resultados de la modelación
Tabla 9.2. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
Tabla 9.3. Resumen de los resultados de modelación por parámetros en humedal de Jaboque

Figuras

- Figura 2.1. Localización geográfica del humedal Jaboque
- Figura 2.2. Zonificación del humedal Jaboque.
- Figura 2.3. Mapa de la grilla de trabajo para el humedal Jaboque y puntos de muestreos limnológicos
- Figura 2.4. Sección 1. Zona intervenida (tercio alto).
- Figura 2.5. Sección 1. Zona intervenida (tercio alto).
- Figura 2.6. Sección 2. Zona de transición (tercio medio)
- Figura 2.7. Sección 2. Zona de transición (tercio medio)
- Figura 2.8. Sección 3. Zona conservada (tercio bajo).
- Figura 2.9. Sección 3. Zona conservada (tercio bajo).
- Figura 2.10. Tipos de cobertura vegetal en el humedal Jaboque.
- Figura 3.1. Marcha anual de la precipitación estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. Promedio multianual 1972-2010.
- Figura 3.2. Variación interanual de la precipitación estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Figura 3.3. Marcha anual de la precipitación en un año húmedo vs. año seco.
- Figura 3.4. Marcha anual de la temperatura estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. Promedio Multianual 1972 – 2010.
- Figura 3.5. Variación interanual de la temperatura media estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Figura 3.6. Marcha anual de la humedad relativa estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. Promedio Multianual 1972 – 2010.
- Figura 3.7. Variación interanual de la humedad relativa estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Figura 3.8. Balance hídrico estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Figura 3.9. Climadiograma estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Figura 3.10. Brillo solar estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Figura 3.11. Variación interanual del brillo solar estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
- Figura 3.12. Marcha anual de la precipitación para los años 2004 y 2005.
- Figura 3.13. Marcha anual de la temperatura para los años 2004 y 2005.
- Figura 3.14. Marcha anual de la humedad relativa para los años 2004 y 2005.
- Figura 3.15. Marcha anual del brillo solar para los años 2004 y 2005.
- Figura 4.1. Resultados de la estimación de la precipitación y la modelación de la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque. Promedio multianual, años 1990-2010.
- Figura 4.2. Modelación de la descarga de la cuenca aferente al humedal Jaboque, año 1992 (fenómeno de El Niño).
- Figura 4.3. Modelación de la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque, año 2010 (fenómeno de La Niña).

Figura 4.4. Descarga cuenca aferente humedal Jaboque vs. volumen sección 1, años 2004–2005.

Figura 4.5. Relación volumen calculado sección 1 vs. volumen simulado sección 1.

Figura 4.6. Relación volumen calculado vs. volumen simulado en sección 2.

Figura 4.7. Relación volumen calculado vs. volumen simulado en sección 3.

Figura 4.8. Descarga al río Bogotá vs. descarga cuenca aferente.

Figura 4.9. Modelación del comportamiento del THR, años 1990–2010.

Figura 4.10. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 1992.

Figura 4.11. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 2010 (fenómeno de La Niña).

Figura 4.12. Análisis sensibilidad precipitación vs. flujo, salida río Bogotá.

Figura 4.13. Análisis de sensibilidad precipitación vs. THR, sección 1.

Figura 4.14. Análisis de sensibilidad precipitación vs. THR, sección 2.

Figura 4.15. Análisis de sensibilidad precipitación vs. THR, sección 3.

Figura 5.1. Promedio de la carga mensual de fósforo que entra a cada sección.

Figura 5.2. Modelación de concentraciones de fósforo para cada sección

Figura 5.3. Modelación del índice de estado trófico (IST) y tiempo hidráulico de retención (THR).

Figura 5.4. Análisis de sensibilidad del comportamiento del IST, sección 1. Pt:

Figura 5.5. Análisis de sensibilidad del comportamiento del IST, sección 2.

Figura 5.6. Análisis de sensibilidad del comportamiento del IST, sección 3.

Figura 6.1. Resultado de la modelación del balance de masas de SST, sección 1.

Figura 6.2. Modelación de los SST, secciones 1, 2 y 3.

Figura 6.3. Resultados de la comparación entre los valores estimados de SST y valores modelados, sección 1 (mg/L).

Figura 6.4. Resultados de la comparación entre valores estimados de SST y los valores modelados, sección 2 (mg/L).

Figura 6.5. Resultados de la comparación entre valores estimados de SST y los valores modelados, sección 3 (mg/L).

Figura 6.6. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 1.

Figura 6.7. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 2.

Figura 6.8. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 3.

Figura 7.1. Resultado de la modelación de clorofila_a para el humedal de Jaboque, en las tres secciones.

Figura 7.2. Modelación de la productividad primaria fitoplanctónica para todas las secciones.

Figura 7.3. Regresión simple entre clorofila_a y PPF, sección 1.

Figura 7.4. Regresión simple entre clorofila_a y PPF, sección 2

Figura 7.5. Regresión simple entre clorofila_a y PPF, sección 3

Figura 7.6. Análisis de sensibilidad, tercio bajo

Figura 8.1. Modelación de la biomasa de macrófitas en el humedal Jaboque.

Figura 8.2. Análisis de sensibilidad concentración de Pt y biomasa de macrófitas

Presentación

Gloria Vargas-Tisnés

Directora Distrital de Archivo de Bogotá

La Dirección Archivo de Bogotá se complace hoy en presentar la serie *Tesis sobre Bogotá* como resultado de una iniciativa conjunta realizada en el año 2013 de la mano del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Los trabajos que presentamos bajo este sello han sido escogidos por un jurado compuesto de pares académicos de reconocida trayectoria, en el marco de una convocatoria pública que tuvo el propósito de reconocer y estimular las mejores tesis sobre Bogotá en el nivel de pregrado, maestría y doctorado realizadas entre el año 2000 y el 2012, bajo tres ejes temáticos: *Bogotá en las ciencias sociales y humanas, Arquitectura y urbanismo en Bogotá y Agua, ambiente y especies nativas de Bogotá.*

La serie, que este meritorio trabajo del doctor Julio Eduardo Beltrán enriquece, se propone como un ejercicio de investigación sobre nuestra ciudad, que aclara aspectos de su historia y de su presente que no han sido suficientemente estudiados, que justifican la atención de las instituciones, y que esperamos susciten el interés de la ciudadanía, además de convertirse en una contribución valiosa para los círculos académicos. En este sentido, creemos que con ello aportamos al objetivo de la actual Administración, que ve en el Archivo de Bogotá a la vez un producto y un gestor de cultura; es decir, un objeto y un sujeto institucional y cultural en el que se conservan, se producen y

se transmiten las múltiples representaciones de la ciudad, entendida como norma, territorio y prácticas –desde la norma institucional, los derechos civiles y del propio Estado, hasta la investigación histórica, literaria o científica, y las expresiones populares y espontáneas de la cultura–.

Desde esta perspectiva, la propuesta hecha por la actual dirección del Archivo de Bogotá se refiere de manera especial al papel de los archivos en un enfoque gubernativo de cultura política; nos preguntamos qué la caracteriza y la sostiene. ¿Y no es acaso esencial la continuidad histórica, tejida con constancia, imbricada en nuestra identidad colectiva? Con ella nos distinguimos y con su ayuda podemos extendernos hacia atrás en el espacio-tiempo, apropiándonos de las prácticas, el territorio y las instituciones que amarran el sentido de nuestro entorno social y político; y con ella nos proyectamos hacia adelante, vislumbrando nuevos caminos, llenos de sorpresa y posibilidades. Aspiramos a atrapar al lector en las redes de la narrativa histórica, enriqueciendo su sentido de identidad y su imaginación, con la pedagogía del encanto y del ejemplo, no de la lógica ni de la imposición, bajo la convicción de que la democracia y la Constitución, enriquecidos con el tesoro de nuestra memoria, apuntalan la cultura política, la identidad compartida y contribuyen a la construcción de una paz de la que todos podemos hacer parte. Nuestra propuesta quiere reconocer el acontecer social como un proceso en permanente construcción y deconstrucción, lejos de la imposición de un único destino social.

Solo nos queda invitar a la lectura recordando las palabras de un maestro de la historia y un padre de los archivos en Colombia:

Los archivistas tenemos la responsabilidad de conservar la memoria colectiva para la construcción del futuro. Tenemos el privilegio de encontrarnos con los testimonios del pasado, de las utopías e ilusiones, de las realizaciones y los sueños de entonces para integrarlos a los del presente. Con todos ellos se construirán las nuevas visiones del mundo y se trazarán el rostro de las promesas del mañana. Parodiando a Borges, enfrentamos el reto de poner la memoria al servicio de la imaginación pues hasta 'la esperanza es una forma del recuerdo y el propio olvido está lleno de memoria', al decir de Benedetti. Tal es la razón del dios bifronte, del dios tutelar de los archivos. Los invitamos a proseguir la Historia. (Jorge Palacios Preciado, 1997).

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Jesús Orlando Rangel Churrio, quien depositó toda su confianza y compromiso cuando me postulé al programa de doctorado y que como profesor me orientó y asesoró durante el desarrollo de la presente investigación. 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, 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 cómputo y la bibliografía especializada que se utilizó en la investigación.

A Elvira Alvarado y Jorge Cárdenas quienes me acompañaron a las salidas de campo y me retroalimentaron con sus ideas, a Néstor Bernal por sus aportes al procesamiento de la información, a Adriana Ríos, quien me acompañó en el proceso de revisión de bibliografía. A Tatiana González y Diego Beltrán por su apoyo fundamental en la edición del documento. Y a todas aquellas personas que de una u otra forma me dieron ánimo para lograr culminar este proyecto.

Este trabajo lo dedico a mi esposa Mónica y mis hijos Manuel y Valentina, quienes con su amor, comprensión y entusiasmo me dieron ánimos para hacer posible este trabajo.

Resumen

Se presentan los resultados de la investigación para la formulación de un modelo dinámico de simulación ecológica del humedal Jaboque, Bogotá D. C., Colombia, con fines de restauración y conservación. El modelo tiene por objetivo explicar y predecir el comportamiento de variables fisicoquímicas y biológicas que aportan al conocimiento del estado trófico del humedal. Se incluyen los siguientes modelos: hidrológico, fósforo total, sólidos suspendidos totales, producción primaria fitoplanctónica y producción de biomasa de macrófitas. Para cada modelo se incluyen los flujos de entrada y salida por sección del humedal. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales; se utilizó el método Euler de integración que se desarrolló utilizando el programa computacional Stella 9.1[®]. Los datos de campo hidrológicos y fisicoquímicos del agua fueron tomados por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia, de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

El modelo representa la relación existente entre el hidroperiodo y el tiempo hidráulico de retención del agua con la dinámica del fósforo total, los sólidos suspendidos totales y la producción primaria fitoplanctónica; también presenta una aproximación a la producción de

biomasa de macrófitas. Los resultados de la modelación mostraron que el hidropериодо y el tiempo hidráulico de retención del agua son variables físicas que afectan el comportamiento del fósforo total, los sólidos suspendidos, la producción fitoplanctónica y que podría estar influyendo en el comportamiento de la producción de biomasa de macrófitas en el humedal Jaboque. La modelación también mostró que el tercio bajo del humedal se encuentra en condiciones mesotróficas y que aún tiene capacidad para seguir desempeñando una condición purificadora en el sistema; a diferencia de los dos primeros tercios, que se encuentran en condiciones de eutrofia. Los análisis de sensibilidad y las pruebas estadísticas realizadas a los modelos revelaron que son estables, que tienen buena capacidad predictiva y muestran independencia entre las variables de control y las predictivas. En concordancia con los resultados de la modelación se hacen recomendaciones para la restauración y conservación del humedal y se formulan pautas para desarrollar programas de investigación basados en modelación dinámica.

Palabras clave: humedales, modelación dinámica, hidropериодо, estado trófico.

Abstract

This publication presents the results of research for the development of an ecological dynamic simulation model of the wetland Jaboque in Bogotá, Colombia, for the purposes of restoration and conservation. The model aims to explain and predict the behavior of physical chemical and biological variables that contribute to the knowledge of the trophic state of the wetland. The model includes the following models: hydrological, total phosphorus, total suspended solids, primary production and biomass production. Each model includes inflows and output components. The dynamic modeling was based on differential equations; the Euler integration method was developed using the computer program Stella[®] 9.1. Hydrological and physicochemical data field water was taken by researchers at the National University of Colombia, the Water and Sewerage Company of Bogotá (EAAB), and the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) of Colombia.

The model represents the relationship between hydroperiod, hydraulic retention time of water with the dynamics of total phosphorus, suspended total solids, phytoplanktonic primary production, and presents an approach to the production of biomass of macrophytes. The modeling results show that hydroperiod and hydraulic retention

time of water are physical variables that affect the behavior of total phosphorus, suspended solids, phytoplankton production and could influence the behavior of the macrophyte biomass production in the Jaboque wetland. The modeling also showed that the lower third of wetland is in mesotrophic conditions and is still capable purify the system, unlike the first two thirds that are in a state of eutrophication. Sensitivity analysis and statistical tests revealed that the models are stable, show good predictive capability and independence between the predictive and control variables. Consistent with the modeling results, recommendations are made for the restoration and conservation of wetland, as well as guidelines to develop research programs based on dynamic modeling.

Keywords: wetlands, dynamic modeling, hydroperiod, trophic status.

Presentación general del estudio y planteamiento del problema de investigación

Capítulo I

Introducción

Los humedales proveen variados hábitats a numerosas especies de flora y fauna, previenen la inundación, protegen las costas, recargan acuíferos subterráneos y tienen importancia económica en cuanto a producción de comida y energía. Son eslabones de los sistemas migratorios de aves, acogen una alta variedad de especies vegetales y animales, son hábitat de aves migratorias, preservan el capital genético, purifican el agua y absorben carbono. Actúan como reguladores del ciclo ecológico entre los cursos fluviales y los acuíferos; el humedal se comporta como una esponja que retiene el exceso de agua durante periodos lluviosos, amortiguando el efecto de la erosión (Chaparro-R., 2003; Rangel-Ch., 2003). Desafortunadamente, muchos humedales han sido convertidos en campos de cultivo, alterados por construcción de puertos, o rellenados para construir zonas residenciales, industriales o comerciales (Prescott & Tsanis, 1997). Como los ríos y los lagos, los humedales reciben agua y minerales de la lluvia, del agua subterránea y de la escorrentía superficial (Johnston, 1993; Mann & Wetzel, 2000).

Los humedales reciben flujos considerables desde el exterior y tienden a retener lo que entra, más que a exportar, debido a su

morfometría; por esto se dice que la función ecológica de los humedales es actuar como sumideros de materiales orgánicos e inorgánicos que llegan con las corrientes y que tienden a sedimentarse. De esta manera, la materia orgánica se acumula y se produce un incremento en la producción neta que genera un exceso de material vegetal que no es consumido por herbívoros y que, por lo tanto, se convierte en detritus en el fondo del humedal. Aunque la eutrofización es un proceso natural, los aportes de materia orgánica de las actividades humanas hacen que este proceso se acelere, convirtiéndola en uno de los problemas ambientales más generalizados (Reinhardt *et al.*, 2005; Gurkan *et al.*, 2006). 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. La eutrofización, que implica la acumulación de nutrientes, favorece preferentemente a las macrófitas, que poseen una reserva de nutrientes que les permite expandirse sobre el espejo de agua (Donato, 1998).

En este estudio se trata de comprender el funcionamiento ecológico del humedal Jaboque mediante la elaboración de un modelo dinámico de simulación, en el cual se relacionan las variables abióticas y bióticas. El análisis del comportamiento del clima (capítulo 3) en los últimos cuarenta años fue el soporte sobre el cual se ensamblaron las variables morfométricas que permitieron modelar el comportamiento del hidropereodo en diferentes situaciones de variabilidad climática, como son el fenómeno del El Niño y La Niña, pudiéndose predecir de esta manera el comportamiento de los tiempos hidráulicos de retención (capítulo 4) y su relación con el comportamiento de las variables fisicoquímicas como el fósforo (capítulo 5) y los sólidos suspendidos totales (capítulo 6).

La modelación de las variables funcionales del sistema como la producción primaria fitoplanctónica (capítulo 7) permitió entender la influencia de las variables físicas y químicas sobre un aspecto biológico en el humedal y establecer su relación con el estado trófico. Por otra parte, se elaboró una aproximación para comprender la dinámica entre las variables fisicoquímicas y la producción de biomasa de macrófitas flotantes en el humedal (capítulo 8). Para

finalizar el capítulo 9 sintetiza el estudio integrando los resultados de las modelaciones realizadas y sugiere recomendaciones para la restauración, conservación y manejo del humedal.

Los resultados de las modelaciones representaron las interrelaciones físicas, químicas y biológicas en el humedal. Los resultados obtenidos no solamente son de naturaleza explicativa, sino que tienen un carácter predictivo, lo cual le imprime un valor agregado a los modelos elaborados como instrumentos de gestión y manejo en humedales. La información de campo utilizada en esta investigación en su mayoría fue generada por el grupo de investigación Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, en el marco del proyecto de restauración ecológica del humedal Jaboque (Rangel-Ch., 2005).

Problemática general

La mayoría de los estudios limnológicos realizados en sistemas de humedales de la sabana de Bogotá se han orientado a realizar inventarios exhaustivos sobre los componentes abióticos y bióticos de estos sistemas, sin profundizar en los aspectos explicativos. Así mismo, no se dispone de instrumentos de carácter científico que apoyen a los planificadores y gestores ambientales en el desarrollo de acciones orientadas a la recuperación y preservación de los humedales. Las investigaciones de carácter funcional y el desarrollo de modelos explicativos, que permiten formular y predecir el comportamiento de los sistemas acuáticos frente a una intervención que los afecta, hasta ahora se empiezan a desarrollar.

Se justifica desarrollar modelos explicativos, que le permitan al tomador de decisiones al menos responder algunas de las siguientes preguntas: ¿cómo responderá un humedal frente a las transformaciones de su morfometría original? ¿Cuál es el rol del tiempo hidráulico de retención en el mantenimiento de la calidad ambiental del agua y del entorno? ¿El estado trófico aceptable del humedal se puede mantener después de una alteración morfométrica? ¿Si se cambia o controla la descarga de nutrientes, se alterará el estado trófico del humedal? ¿Cómo es el comportamiento de sólidos suspendidos totales cuando se

disminuye la carga hidráulica sobre el humedal? ¿Cuál es la dinámica del fitoplancton si aumenta la descarga de nutrientes? ¿Qué sucede con los sólidos suspendidos totales si cambia la descarga de agua al humedal y cuál será su incidencia en el estado trófico del humedal?

La importancia de las anteriores preguntas radica en que el humedal Jaboque es un sistema estratégico para la ciudad de Bogotá, porque es proveedor de bienes y servicios ambientales como son la conservación de la biodiversidad, la regulación de flujos del río Bogotá, el refugio de fauna y la recreación, entre otros. Los actuales estudios no son suficientes para explicar y predecir el comportamiento del humedal Jaboque, motivo por el cual se hace necesaria la elaboración de modelos explicativos y predictivos. Se trata de encontrar explicaciones racionales al estado de funcionamiento del humedal con el fin de hacer recomendaciones para su recuperación y restauración.

Modelación dinámica en sistemas acuáticos

Los modelos de simulación se fundamentan en ecuaciones que describen el cambio dinámico entre las variables relacionadas. La simulación nos ayuda a mostrar las predicciones. El modelo describe la realidad con una precisión determinada. El proceso de modelado se puede utilizar para mejorar nuestra comprensión de un problema (Yue *et al.*, 2011). La simulación dinámica permite observar el comportamiento de un sistema de modelado y su respuesta a las intervenciones en el tiempo (Gurkan *et al.*, 2006; Winz *et al.*, 2009). Las propuestas de modelación dinámica tienen limitaciones y han mostrado su eficiencia como herramienta para localizar problemas relacionados con flujos de materiales, especialmente de nutrientes, sedimentos y contaminantes en el agua y en la biota. Se puede demostrar que pese a la complejidad de los sistemas limnológicos es posible representar y reflejar a partir de pocas variables el comportamiento de un sistema acuático. Las variables de estado como pH, fósforo total y sólidos suspendidos totales, son variables clave y pueden ser utilizadas para hacer predicciones en diagnósticos y en simulaciones para investigación y manejo (Håkanson & Peters, 1995).

El Modelo Terrestre General (TEM) con cinco variables de estado fue usado en Suramérica (Raich *et al.*, 1991) para estimar la producción primaria en lagos de la región, incorporando procesos de retroalimentación entre la evapotranspiración y la dinámica del ecosistema en un modelo de balance hidrológico. Se han desarrollado modelos dinámicos de simulación para humedales artificiales en zonas de restauración como el Olentangy River Wetland Research Park (ORWRP), en Estados Unidos, que ha sido utilizado como laboratorio para el desarrollo de investigaciones limnológicas y de restauración en humedales (Mitsch & Day, 2006). Igualmente en Colombia se han surtido modelos dinámicos que explican el comportamiento en lagos simulando los efectos del pulso de inundación sobre variables químicas, como en el lago Boa, Caquetá (Pinilla, 2006), y en la ciénaga Grande de Santa Marta, Magdalena (Mancera *et al.*, 2003).

Factores a tener en cuenta para el análisis del problema de investigación

Hidrología

La modelación y simulación de los procesos hidrológicos ayuda en el conocimiento de los procesos bióticos, los ciclos geoquímicos y de nutrientes y en la dinámica de la vegetación y el comportamiento trófico (Bradley & Gilvear, 2000; Hupp, 2000; Quinn & Hanna, 2003; Spieles & Mitsch, 2003). El consenso de que la hidrología de un humedal, como variable independiente, influye y permite explicar el comportamiento de los ciclos geoquímicos y de nutrientes, es extendido. Sin embargo, en muchos proyectos de restauración y conservación de humedales no han sido aplicados estos conocimientos (Mitsch & Gosselink, 2000). El tiempo hidráulico de retención (THR) es considerado como uno de los factores críticos para explicar la retención de nutrientes en humedales (Werner & Kadlec, 1996; Knight, 2000). El tiempo hidráulico de retención permite explicar el comportamiento de los ciclos biogeoquímicos en sistemas acuáticos, al establecer una relación dependiente entre los procesos físicos de transporte y de mezcla (Werner & Kadlec, 1996).

Estado trófico

Los humedales funcionan como sumideros de grandes concentraciones de nutrientes (Mitsch *et al.*, 1995; Wang & Mitsch, 2000). La composición química de la roca madre de los humedales influye en la retención de fósforo. Recientemente se ha optado por crear humedales artificiales o restaurar los humedales naturales para mejorar la calidad del agua, controlando polución (Mitsch *et al.*, 1995, Zacharias *et al.*, 2005).

La eutrofización es el principal problema de los humedales y de los embalses. El fósforo es el nutriente clave para su control (Fraile *et al.*, 1995; Carpenter *et al.*, 1998). El fósforo es un nutriente limitante en los suelos, por esto se utiliza en muchos fertilizantes y cuando llega a los lagos causa un aumento en la productividad biológica, crecimiento de las plantas, algas y bacterias que consumen el oxígeno, causando eutrofización (Lassaletta, 2004). La eutrofización es un proceso natural en los humedales que pasan de un estado de bajo contenido en materia orgánica (oligotrófico) hacia un estado de alto contenido de materia orgánica (eutrófico), dándose una sobreproducción de algas y macrófitas en los cuerpos de agua.

Sólidos suspendidos totales (SST)

Los SST regulan dos de las mayores rutas de transporte, la ruta de materiales disueltos en la zona pelágica y sedimentación de partículas y la ruta en la zona bentónica (Håkanson *et al.*, 2000; Håkanson *et al.*, 2005); a su vez están considerados como reguladores de la calidad del agua (Lindstrom *et al.*, 1999; Malmaeus & Håkanson 2003). Son indicadores ambientales para determinar cambios geomorfológicos, contaminación y cambio climático. Los sedimentos en suspensión transportan cargas de nutrientes absorbidos, pesticidas, metales pesados y otras toxinas, disminuyen la cantidad de luz que penetra, afectan la fotosíntesis y la temperatura del agua, fenómenos que están altamente relacionados con el cambio climático (Salama & Monbaliu, 2004; Noe & Harvey, 2007). Los SST dominan la producción primaria tanto de fitoplancton como de bacterioplancton y, a su vez, la producción secundaria de zooplancton y peces; son importantes a niveles tróficos

bajos como fuente de energía para bacterias, fitoplancton y zooplancton. Los SST son considerados un componente fundamental, ya que tienen influencia sobre numerosas propiedades metabólicas.

Producción primaria fitoplanctónica

A la captación de energía por organismos autotróficos se denomina producción primaria. En los lagos la producción primaria se divide en dos clases, una que se produce dentro del mismo lago (producción primaria autóctona) y la que llega al sistema luego de haber sido sintetizada fuera de él (producción primaria alóctona). En una zona ecuatorial la producción fitoplanctónica depende de la disponibilidad de radiación dentro del lago y de la concentración de nutrientes, a diferencia de las latitudes altas, donde depende de la fluctuación de la radiación solar a lo largo del año (Ramírez & Alcaráz, 2002). La productividad y la absorción de nutrientes en las plantas en humedales están influenciadas por parámetros hidrológicos como el nivel, la frecuencia y la duración de las inundaciones. Las fluctuaciones en el nivel del agua pueden aumentar la productividad y la absorción de nutrientes. La entrada de agua al humedal por periodos trae consigo un aumento en la concentración de nutrientes que actúan como fertilizante para el crecimiento de las plantas (Anderson & Mitsch, 2005).

Macrófitas

Las plantas acuáticas de los humedales se caracterizan por tener altas tasas de producción primaria. La producción primaria neta anual en humedales de agua dulce a menudo excede los 2000 g/(m²·año) (Koch *et al.*, 1990). Las macrófitas producen materia orgánica, principalmente en los tejidos por encima del nivel de agua, y absorben carbono de la atmósfera o del agua, y simultáneamente toman nutrientes y otros elementos del agua o del agua intersticial en los sedimentos. Los productos de la fotosíntesis son distribuidos tanto en los tejidos por encima del suelo como en los que se encuentran por debajo para producir órganos o ser almacenados como recursos. La mayoría del material proveniente de plantas entra a la capa de detritos, donde los microorganismos, como bacterias y hongos, tienen un papel

importante en la descomposición y mineralización de residuos (Kuehn *et al.*, 2000). La concentración de los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno determinan de manera significativa la presencia o ausencia de determinadas especies vegetales en un sistema acuático (Kiersch *et al.*, 2004).

Formulación del problema específico

A modo de preguntas, se enuncia el problema de investigación que se desarrolló: ¿el hidroperiodo refleja el comportamiento de la precipitación? ¿El hidroperiodo y la morfometría de cada sección afectan el tiempo hidráulico de retención? ¿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? ¿La precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en el comportamiento de los sólidos suspendidos totales? ¿En el comportamiento de la clorofila_a y de la producción primaria inciden las condiciones climáticas? ¿Es posible relacionar la biomasa de macrófitas y la carga de fósforo total (Pt)? ¿Es posible, a través de la modelación dinámica, encontrar respuestas a las preguntas anteriores?

Hipótesis que se procuraron verificar a través de la modelación dinámica

- a) Los cambios en el volumen de agua del humedal Jaboque y el tiempo hidráulico de retención se encuentran en función del ciclo hidrológico y de las características morfométricas (profundidad, área, volumen de la cubeta). Si es así, entonces es posible estimar los aportes de la cuenca aferente y el volumen de cada sección (capítulo 4).
- b) El estado trófico del humedal se encuentra relacionado con la carga interna del fósforo total debida al tiempo hidráulico de retención. En consecuencia, es posible estimar el estado trófico del humedal relacionando las dos variables (capítulo 5).
- c) La descarga de la cuenca aferente (hidroperiodo) está ligada con la condición de eutrofización. Por tanto, el comportamiento de

los sólidos suspendidos totales en las secciones del humedal puede asociarse con la condición trófica (capítulo 6).

d) La producción primaria fitopláctónica se puede inferir con base en la concentración de clorofila_a. En consecuencia, es posible estimar el estado trófico del humedal a partir de este parámetro. (capítulo 7).

e) Las macrófitas flotantes toman los nutrientes a partir de la columna de agua, en especial el fósforo. Por tanto, se podría hacer una estimación aproximada (cualitativa) sobre la biomasa de macrófitas flotantes en diversas partes del humedal con base en la información sobre el fósforo total en el agua (capítulo 8).

f) Las modificaciones en la morfometría de la cubeta del humedal (rellenos y desecación) modifican el hidropериодо y los vertimientos de nutrientes afectan el estado trófico del humedal. Si esto es así, es de esperar que la afectación y deterioro hayan sido de mayor intensidad en las secciones intervenidas.

Método de modelación

Las modelaciones se realizaron con el software Stella 9.1[®], que ha sido utilizado para realizar investigaciones en sistemas hidrológicos y ecológicos (Duever *et al.*, 1988; Jogersen & Bendoricchio, 2001; Zhang & Mitsch, 2005; Jogersen, 2008). Se utilizó el sistema de interfaz de Stella para desarrollar la modelación y realizar los análisis de sensibilidad del modelo. Con el fin de verificar el carácter determinístico y ejecutar la validación del modelo se realizaron regresiones simples lineales (Legendre & Legendre, 1998), que permitieron comparar los datos estimados en campo con los resultados modelados. Se trató de evaluar la fortaleza del modelo, para lo cual se determinó el error relativo (Bryhn & Håkanson, 2007). Para comprobar el carácter predictivo se realizó el análisis de sensibilidad del modelo (Jørgensen & Bendoricchio, 2001; Håkanson, 2004).

Generalidades

Capítulo 2

Localización geográfica del área de estudio: el humedal Jaboque

El humedal Jaboque se localiza en la localidad de Engativá, al occidente de la ciudad, contiguo a la cuenca del río Juan Amarillo, entre el Aeropuerto Internacional El Dorado y la autopista Medellín (figura 2.1). Limita por el occidente con el río Bogotá, por el sur con los barrios Engativá, Las Mercedes, Puerto Amor, Bolivia, Villa del Mar y la carretera que une a Engativá con el parque La Florida. Por el oriente limita con los barrios Álamos Norte, Álamos Sur y Bosques de Mariana, entre otros. Por el norte con los barrios Villas de Granada, Los Ángeles y con áreas destinadas al pastoreo y cultivo. Presenta una forma alargada en dirección Sur-Oriente-Noroccidente. Las vías de acceso son: la entrada a Engativá, la calle 80, la carrera 96 y la carrera 112. Esta última atraviesa el humedal en el sentido Norte-Sur. La cuenca del humedal Jaboque es una de las más pequeñas del Distrito (1688 y 232 hectáreas respectivamente), con una salida de sus aguas al río Bogotá, muy cerca al parque La Florida.

La zonificación del humedal

El impacto generado por los canales perimetrales fomentó una nueva división del humedal Jaboque (figura 2.2), la cual se tomó como base

para el desarrollo de proyectos de investigación (Muñoz, 2004). La primera división se denominó Sección 1, zona intervenida o tercio alto; empieza en la unión de los canales Carmelo y Jaboque y termina en donde finalizó la construcción de los canales perimetrales, frente al brazo de Villa Gladys. La segunda se denominó Sección 2, zona de transición o tercio medio, la cual comienza en la terminación de los canales perimetrales y termina al frente de la cancha de tejo que se encuentra dentro de la zona de ronda del humedal, en el barrio La Faena. La tercera se denominó Sección 3, zona conservada o tercio bajo, la cual comienza en la cancha de tejo mencionada y termina en el punto donde el humedal entrega las aguas al río Bogotá (Muñoz, 2004).

Para la caracterización del humedal y de sus zonas circunvecinas se diseñó una grilla de trabajo que permitió unir y georreferenciar 60 puntos de muestreo numerados de 1 a 60 respectivamente, de los cuales se seleccionaron 15 para la toma de datos morfométricos, fisicoquímicos e hidrobiológicos (figura 2.3) (Muñoz & Jaramillo, 2005).

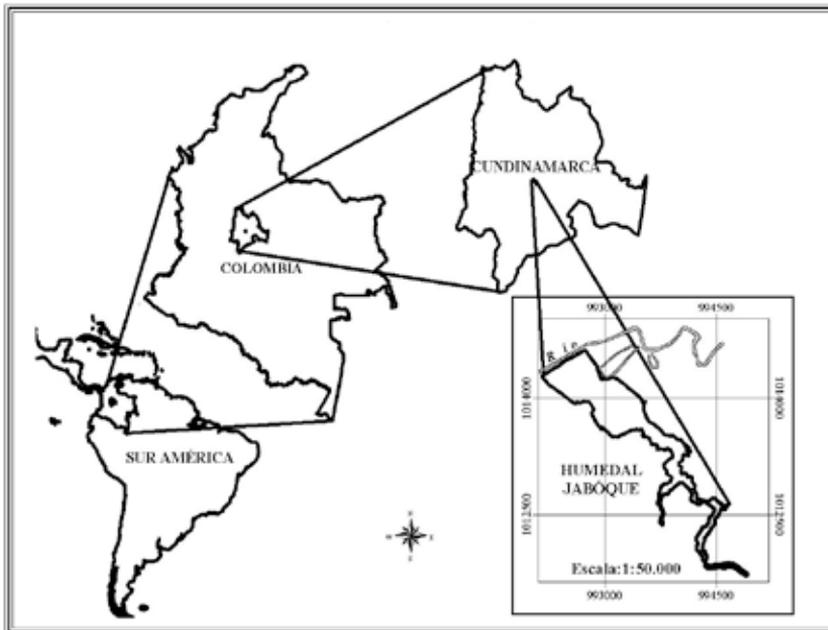


Figura 2.1. Localización geográfica del humedal Jaboque

Fuente: Sierra & Monsalve, 2005.

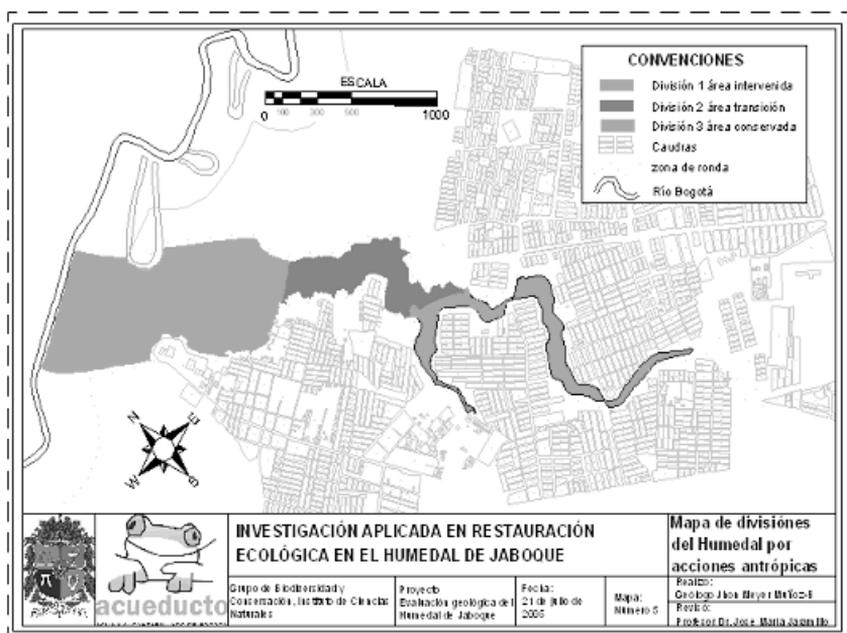


Figura 2.2. Zonificación del humedal Jaboque.

Fuente: Muñoz & Jaramillo, 2005.

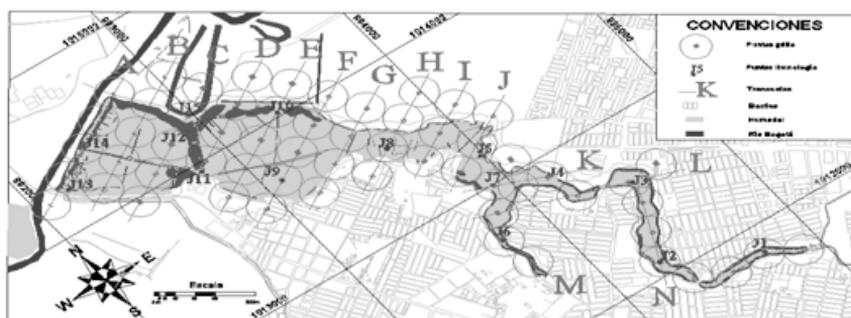


Figura 2.3. Mapa de la grilla de trabajo para el humedal Jaboque y puntos de muestreo limnológicos

Fuente: Muñoz & Jaramillo, 2005.

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

Comprendida por los transectos de la grilla de trabajo H, J, K, L, M y N. Se caracteriza por estar altamente intervenida con obras civiles de canalización del cauce del humedal. En esta zona, el nivel de deterioro ambiental es grande, con altos niveles de contaminación de las aguas (figuras 2.4 y 2.5).



Figura 2.4. Sección 1. Zona intervenida (tercio alto).

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.5. Sección 1. Zona intervenida (tercio alto).

Fuente: Elaboración propia.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

Comprendida por los transectos D, E, F y G. Se observan fuertes procesos de eutrofización en combinación con algunos espejos de agua relativamente conservados y además se presentan obras hidráulicas (figuras 2.6 y 2.7).



Figura 2.6. Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.7. Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

Fuente: Elaboración propia.

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

Comprendida por los transectos A, B y C. Se caracteriza por ser la que tiene menos intervención del hombre y presenta los menores índices de contaminación, a excepción del sector que se comunica con el río Bogotá (Figuras 2.8 y 2.9).



Figura 2.8. Sección 3. Zona conservada (tercio bajo).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.9. Sección 3. Zona conservada (tercio bajo).
Fuente: Elaboración propia.

Aspectos geológicos y geomorfológicos del humedal Jaboque

Durante gran parte del Cuaternario (últimos 2,5 millones de años), una porción considerable de la zona plana de Bogotá fue un lago, cuyo nivel de agua variaba con respecto a los cambios del clima y a la recurrente deposición de sedimentos (Hooghiemstra, 1984). La desecación de este gran lago se inicia en el Pleniglacial Superior, producto del desagüe natural generado por el Salto de Tequendama (Van der Hammen, 2003).

Otro factor que ha modelado topográficamente la sabana de Bogotá, desde el Cuaternario hasta la actualidad, es la acción de las fuentes hídricas. El río Bogotá es el actor más importante en esta labor. Sus dinámicas formaron los humedales de la sabana y en otros casos ha influenciado con su nivel de inundación.

La evolución del humedal Jaboque ha sido marcada tanto por la influencia hídrica como por el desarrollo cultural de las poblaciones humanas, convirtiéndolo en uno de los puntos claves para el estudio de la expansión urbana de la capital y su influencia sobre la sabana. Muñoz & Jaramillo (2005), basados en la interpretación de fotografías aéreas de los años 1949 y 2000 y en la información recolectada en campo en el año 2005, generaron análisis multitemporales en aspectos como el límite físico, las diferentes terrazas que lo componen, los lineamientos dentro y fuera del cuerpo de agua, los drenajes que lo conectan al sistema de humedales de la sabana y las estructuras antrópicas que han influenciado su modelamiento.

La evaluación del registro estratigráfico depositado en los últimos miles años evidencia los cambios naturales y antrópicos del humedal (Muñoz & Jaramillo, 2005). Las estratigrafías realizadas en dicho estudio fueron someras (50cm), profunda (contacto con la formación Sabana) y arqueológica (evidencias prehispánicas). La primera reconoce el impacto de la intervención humana, la segunda evidencia la evolución del humedal y la última expone cuándo y cómo fue impactado por culturas prehispánicas (Muñoz, 2004).

La interpretación de las fotografías aéreas permitió reconocer las diferentes geoformas y relacionarlas con las características actuales. El humedal Jaboque se desarrolla dentro de una planicie Cuaternaria,

con pendientes entre uno y cinco grados. Presenta una forma alargada, similar a la morfología de una quebrada recta en un valle erosional. En su trayecto se observan varios cambios de dirección alrededor de los 70° hacia el NE, los cuales vuelven a su dirección original luego de varios metros de recorrido; estos cambios de dirección le dan al humedal un aspecto de escalera.

Entre los cambios significativos detectados en el análisis multitemporal, se evidenció el paso de cuatro niveles en 1949, a solo dos en el 2000, generados por el cambio de dirección en su trayectoria. Al humedal llegaban varias quebradas, de las cuales en la actualidad solo existe la más grande, conocida como brazo de Villa Gladys. Hay una división geomorfológica bien marcada, por la cual se separa mediante una terraza la dinámica del río Bogotá en sus últimos años de un valle erosional que cubre homogéneamente el resto del área. También fueron identificadas diferentes obras de manejo a través del tiempo del humedal Jaboque; en su geomorfología se diferencian patrones de abanico, ajedrezado, longitudinal, espina de pescado y paralelo (Muñoz, 2004).

Al diferenciar el análisis para el vuelo de cada año se obtuvo que para 1949 se tenía solamente una carretera que atravesaba el humedal, que existe actualmente y se conoce como la carrera 111 C; dicha vía era el único acceso para las fincas que rodeaban el humedal; estas fincas eran de uso agrícola o vacacional. La influencia de la expansión de la ciudad de Bogotá era nula, el aeropuerto El Dorado no existía.

El agua que llegaba al humedal provenía de la escorrentía depositada en la planicie circunvecina y de las fincas aledañas. El control del humedal se daba por una serie de lineamientos que se basaban en su forma escalonada. El río Bogotá se encontraba dentro de un ambiente de ríos meándricos. En el vuelo del año 2000, realizado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se observó el crecimiento de la ciudad de Bogotá sobre la antigua terraza alta, la cual separaba la cárcava del humedal de las antiguas zonas de cultivo, y en algunas zonas dentro del límite físico, siendo las más afectadas las quebradas afluentes y algunos lugares del cauce principal. Para este tiempo el humedal se divide en un sector intervenido y un sector conservado.

Los principales afluentes son las aguas residuales de los barrios circunvecinos, las aguas lluvias y de escorrentías. El río Bogotá presenta meandros abandonados, que obstaculizan el recorrido del cauce, debido a intervenciones antrópicas. Los datos recolectados en el 2005 presentan un cambio drástico del área física del humedal, debido a los canales perimetrales, aún no terminados, que recogen el agua que le llega y la trasladan a la zona conservada, para evitar posibles inundaciones en las zonas circunvecinas. Dicha obra, por deficiencias en su diseño, ha deteriorado la salud de este cuerpo de agua en algunos sitios de manera irreversible. Debido a estos canales se observa una nueva división del humedal, que ha originado una zona intervenida, una zona de transición y una zona conservada.

Los resultados de la estratigrafía somera muestran que existen dos tipos de sedimentos característicos; los primeros, arcillas sedimentadas de color negro con alto contenido en materia orgánica, un espesor mayor a 50 cm, en un avanzado proceso de putrefacción. Dando como resultado altos contenidos de metano, estos sedimentos se generaron por la acumulación permanente de aguas residuales, la falta de flujo del agua y el grado de anoxia en el agua del humedal. Los segundos sedimentos son arcillas mezcladas irregularmente con las arcillas negras, debido a los procesos de relleno y remoción del fondo del cuerpo de agua.

En la desembocadura de los canales perimetrales los sedimentos son de color negro, similares a los de la zona intervenida. La parte transicional presenta depósitos orgánicos distribuidos uniformemente, con un espesor de 15cm. La zona conservada presenta un perfil muy homogéneo; su parte superior está compuesta por sedimentos dejados por la dinámica actual, seguidos por una transición de sedimentos de color gris claro, con gran cantidad de intraclastos de color negro y una base de depósitos color gris oscuro de textura plástica. El material en esta fase pertenece a las formaciones Sabana y Chía. La formación Sabana no presenta afloramientos en ninguna de las márgenes del humedal; el material es arcilla lodosa de color gris claro, con presencia de óxidos color rosa y tiene una textura muy plástica. La formación Chía se encuentra en contacto con la formación Sabana, a una profundidad que aumenta de SE a NW, siendo su mayor espesor

de aproximadamente 3m, junto al río Bogotá; en algunos lugares esta formación se encuentra cubierta por escombros o rellenos de tierra, realizados en los últimos 50 años.

Al analizar la interpretación multitemporal de los últimos años se concluye que el humedal Jaboque y el río Bogotá no tuvieron ningún cambio por dinámica natural; por el contrario, dichos cambios se generaron por acción antrópica. Se pudo establecer que estas intervenciones se originaron desde la época prehispánica, a través de obras como camellones y terraplenes, para el manejo de los cultivos (Muñoz, 2004; González *et al.*, 2005). También se definió que el mayor impacto que ha sufrido el humedal es debido a la expansión urbana, iniciada por la construcción del aeropuerto El Dorado; esto ha llevado a que se desequen sus afluentes y parte del cauce principal (Muñoz & Jaramillo, 2005)

El humedal Jaboque se originó gracias al taponamiento de la desembocadura de la quebrada Rudas, que posteriormente formó un drenaje impedido. El nuevo cuerpo de agua fue aprovechado por los muiscas para implementar sus distritos de riego. Por último, una nueva intervención llega en los años cincuenta con la construcción del aeropuerto El Dorado y la instalación de viviendas dentro y fuera del humedal, las cuales generan gran cantidad de aguas residuales que ingresan directamente (González *et al.*, 2005; Izquierdo, 2005).

En la actualidad el humedal Jaboque se encuentra en una llanura cuaternaria con sedimentos fluviales y depósitos lacustres, causados por la secuencia de eventos glaciales e interglaciares que dieron paso a periodos de bajos o altos niveles del lago de la sabana. En los depósitos de sedimentos se presenta un estrato compuesto por material fino granular con alto contenido orgánico proveniente de la descomposición de los elementos vegetales (Muñoz & Jaramillo, 2005).

Microflora: vegetación del humedal Jaboque

Según el trabajo de Valencia *et al.* (2005) sobre la evaluación de la microflora en el humedal Jaboque, los morfotipos microbianos de mayor presencia son los del género *Pseudomonas* (*Pseudomonas sp.*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas fluorescens*) y los de menor presencia pertenecen a la especie *Micrococcus roseus*. Otros microorganismos mencionados para el humedal Jaboque

son: *Stenotrophomonas maltophilia*, *Chryseobacterium indologenes*, *Klebsiella sp.*, *Enterobacter gergoviae*, *Burkholderia cepacia*, *Serratia sp.*, *Micrococcus sp.* y *Bacillus sp.*

La vegetación que se establece en el humedal Jaboque según Rangel-Ch. & Aguirre (1983) y Hernández & Rangel-Ch. (2009) incluye 14 comunidades vegetales distribuidas en los diferentes ambientes del humedal (figura 2.10). En la vegetación de ribera predominan los juncuales de *Schoenoplectus californicus*, de *Juncus effusus* y el totoral de *Typha latifolia*. En los pantanos en las orillas o zonas de terrazas al interior de las cubetas predominan los herbazales de *Polypogon elongatum*, de *Rumex conglomeratus* y el cortaderal de *Carex luriformis*. En las áreas de transición entre los ambientes acuáticos y terrestres se localizan los camalotales compuestos por vegetación semiarraigada compuesta por *Bidens laevis* asociada con *Ludwigia peploides*, *Hidrocotyle ranunculoides* y *Polygonum punctatum* y donde se reduce el espejo de agua dominan especies flotantes de comunidades de *Eichhornia crassipes*, *Limnobium laevigatum* y *Lema gibba*. Formaciones que ofrecen diversidad de hábitats, ricos y propicios para el establecimiento de nichos de aves endémicas y migratorias, hábitat ideal para mamíferos, anfibios, artropofauna y microorganismos acuáticos.

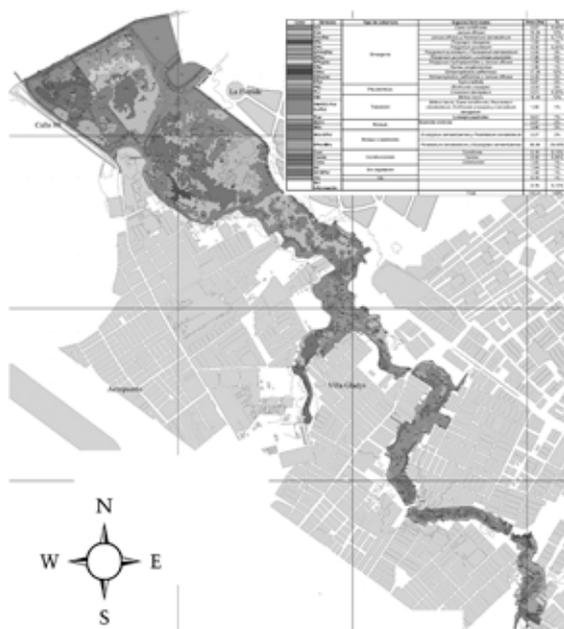


Figura 2.10. Tipos de cobertura vegetal en el humedal Jaboque.

Fuente: Hernández & Rangel, 2009.

Estado trófico del humedal Jaboque

El humedal Jaboque realiza funciones específicas como trampa de nutrientes y de sedimentos provenientes de su cuenca de captación. Fenómenos como la colmatación y eutrofización se han acelerado debido a la presión ejercida por el crecimiento urbano, que modifica la calidad del recurso hídrico y la estructura de las comunidades acuáticas asociadas; así se afectan las principales vías de procesamiento de materia y energía que se presentan al interior del humedal (Álvarez, 2005).

El oxígeno disuelto (Álvarez, 2005) muestra el predominio de una condición de déficit o hipoxia en sus aguas (1,73 mg/L). En zonas donde el espejo de agua es permanente las concentraciones de oxígeno son más altas (14,9 mg/L), con respecto a las áreas de mayor intervención, donde las concentraciones son más bajas (<0,6 mg/L). La temperatura es la responsable de las reacciones químicas y bioquímicas que se dan en el agua como la solubilidad de los gases y la velocidad de descomposición en los ecosistemas acuáticos (Wetzel, 1981). Según Álvarez (2005) en el humedal Jaboque la temperatura del agua varía entre 13,3°C y 22,7°C, con una media de 16°C; esta variable depende del grado de cobertura de macrófitas, que permite una mayor exposición a la radiación solar. El pH, como medida de la acidez o alcalinidad de una solución, define el agua del humedal como ligeramente ácida, siendo la media 6,54. Las zonas donde se identifica una alta producción de algas se relaciona con un aumento del pH (>7), debido a la utilización del CO₂ para procesos fotosintéticos.

Respecto a la alcalinidad total del agua, siendo la capacidad para neutralizar ácidos, reaccionar con iones de hidrógeno y la medida del contenido total de sustancias alcalinas, presenta un promedio de 2,02 mg/L; este valor se considera alto y sugiere una buena capacidad amortiguadora de las aguas del humedal y variación baja del pH (Álvarez, 2005). Por otra parte, la dureza total del agua, producida principalmente por la presencia de iones de calcio y magnesio (Wetzel, 1981), muestra un valor promedio de 93 mg/L de CaCO₃, clasificando las aguas como moderadamente duras; esta dureza se relaciona químicamente con los bicarbonatos, dándole el nombre de dureza carbonácea.

La conductividad del agua, como una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, depende de la concentración de sustancias ionizadas disueltas en el agua, que se relaciona con el grado de mineralización de las aguas y su productividad. En el humedal Jaboque se registra un valor promedio de $268\mu\text{S}/\text{cm}$ (intervalos entre $38\mu\text{S}/\text{cm}$ y $482\mu\text{S}/\text{cm}$). Los valores altos están asociados a la entrada de agua gracias a los canales perimetrales en la parte intermedia del humedal, y los valores bajos se asocian a la reducción de alcalinidad y dureza en algunas zonas del cuerpo de agua.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) determina de forma indirecta la concentración de materia orgánica en el agua y es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la oxidación o estabilización de la materia orgánica biodegradable (Romero, 1996). En el humedal Jaboque este valor oscila entre $2\text{mg}/\text{L}$ y $43\text{mg}/\text{L}$ de O_2 (Álvarez, 2005). Respecto a la demanda química de oxígeno (DQO), que representa el contenido orgánico total de una muestra oxidable gracias a un agente oxidante fuerte, exhibe un valor medio de $64\text{mg}/\text{L}$ de O_2 ; los valores máximos para esta variable se relacionan con la presencia de sustancias húmicas originadas por la descomposición de biomasa vegetal. Al evaluar la relación DQO/DBO en el humedal, se observa que el valor de la DQO es mayor al de la DBO, manifestando un predominio de material biológicamente resistente (Romero, 1996; Sawyer *et al.*, 2001) y con tasas de degradación lentas, como son la celulosa y la lignina, y cantidades significativas de plantas acuáticas flotantes.

La determinación de nitrógeno y fósforo, en sus diferentes estados de oxidación, muestra que los nitratos son la forma de nitrógeno inorgánico menos abundante en el humedal (intervalo entre $0,1\text{mg}/\text{L}$ y $0,3\text{mg}/\text{L}$ de N-NO_3), debido al predominio de condiciones reductoras y un bajo nivel de oxígeno disuelto en el agua (Álvarez, 2005). Esto conlleva la utilización del nitrato por parte de los microorganismos como aceptor de electrones durante la respiración. La variación del nitrógeno total es de $0,56\text{mg}/\text{L}$ a $24,4\text{mg}/\text{L}$ de N; los altos niveles se deben a la entrada de los canales perimetrales y a la parte intermedia estrecha del humedal (Álvarez, 2005).

La concentración de amonio es elevada, con un valor medio de 1,99 mg/L de NH_4 ; los valores máximos se asocian a la gran actividad de las zonas de cultivos, donde se dan procesos dominantes de descomposición de material orgánico (mineralización del nitrógeno orgánico) por parte de bacterias de tipo amonificante. También se incrementan los niveles de nitrógeno amoniacal por entradas alóctonas, en periodos donde aumenta la precipitación a través de los canales perimetrales en la parte estrecha del humedal (Álvarez, 2005).

Según los registros del fósforo soluble se tiene una variación entre 0,05 mg/L y 4,35 mg/L de P-PO_4 , se consideran estos valores como altos y evidencian nuevamente el aporte de nutrientes que se realiza a través de los canales perimetrales. Cuando desciende el nivel del agua se registran concentraciones altas, siendo el promedio 1,6 mg/L. Los valores de fósforo total presentan fluctuaciones entre 0,14 mg/L y 4,68 mg/L de P, estando altamente disponible para el crecimiento de organismos autotróficos y regulado por las tasas de mineralización de los microorganismos solubilizadores de fosfato (Valencia *et al.*, 2005).

La relación de N/P total promedio es de 7, que hace que el humedal esté potencialmente limitado en nitrógeno, favoreciendo la dominancia de cianobacterias, al ser mejores competidoras por nitrógeno que muchos otros taxones fitoplanctónicos (Vitousek *et al.*, 2002). Estas características llevan a clasificar el estado trófico del humedal como hipertrófico.

En el humedal los sólidos suspendidos totales se encuentran entre 2 mg/L y 184 mg/L, siendo el promedio 47 mg/L; los sólidos totales presentan una concentración entre 92 mg/L y 452 mg/L, con un valor medio de 247 mg/L (Álvarez, 2005).

En el análisis de las características hidrobiológicas del humedal se incluyen las comunidades de algas y de zooplancton. Respecto a la comunidad algal se tiene conocimiento de 93 taxones de microalgas, entre especies y morfoespecies identificadas, donde la mayoría de los organismos son típicos del perifiton y de ambientes bénticos. Las clases Bacillariophyceae y Euglenophyceae fueron los grupos con mayor riqueza dentro de esta comunidad, mientras que los grupos con menor riqueza

registrada son las clases Crysophyceae, Cryptophyceae y Dinophyceae. Los taxones de algas más frecuentes son *Nitzschia palea*, *Gomphonema parvulum*, *Navicula* cf. *cryptocephala*, *Cryptomonas erosa*, *Phacus curvicauda* y *Trachelomonas volvocinopsis* (Álvarez, 2005).

En el zooplancton se registraron 93 taxones, de los cuales los microcrustáceos y rotíferos se identificaron casi en su totalidad. Esta comunidad muestra componentes típicos de la zona litoral de cuerpos de agua someros y los organismos que la constituyen tienen hábitos bénticos y perifíticos (Dole *et al.*, 2000; Ricci & Balsamo, 2000; Duggan, 2001; Pereira *et al.*, 2002). El mayor número de especies se localiza en el sector intermedio y amplio del humedal; esta diversidad se da por la variabilidad del sustrato, presencia de macrófitas y una baja profundidad de la columna de agua (Ortega *et al.*, 2000). Donde se da un flujo mayor del agua se produce un efecto de lavado, dificultando el establecimiento de la comunidad. La baja riqueza se atribuye a fluctuaciones drásticas del nivel del agua, a una baja disponibilidad de este líquido y a los lixiviados provenientes de las prácticas de agricultura, en especial los pesticidas (Dodson & Lillie, 2001).

Diagnóstico participativo social

El diagnóstico participativo social realizado (Peñuela, 2005) para la zona del humedal Jaboque muestra las expectativas de la comunidad que se encuentran dentro de la zona de influencia, enmarcándolas en temáticas de conservación, transformación, sentido de pertenencia, cuidado, propuestas y alternativas frente a las problemáticas actuales (caza, ganadería, inseguridad, construcción de ciclorutas y canales, viabilidad de un encerramiento, necesidades de la población); se trata de alcanzar un equilibrio entre las condiciones ecológicas del humedal y el factor humano.

Según la Alcaldía de Bogotá (2009) los aspectos sociales generales de la localidad de Engativá donde se ubica el humedal Jaboque son:

- Población de 836 124 habitantes.
- El 14,76 % de la población de la localidad se ubica en la

Unidad de Planeamiento Zonal (UPZ) Boyacá Real, seguida de Las Ferias y Minuto de Dios con el 13,14%, Garcés Navas (18%), Bolivia (15%), Santa Cecilia (10%), Engativá (15,81%), Álamos (1%) y Jardín Botánico (0,36%).

- En cuanto a la estratificación socioeconómica de la población, es notable que el 98.7% se encuentra en estrato bajo, 0,7% sin clasificar, 0,6% en estrato medio.

La zona de la ronda del humedal, clasificada como estrato dos (2), empezó a ser urbanizada aproximadamente desde el año 2002, produciendo la desecación de tierras, como es el caso del barrio Los Ángeles. Estas acciones de urbanización, tanto legales como ilegales e incentivadas por el Estado y la ciudadanía, han generado la pérdida de dos tercios de tierra del humedal, pasando de 450ha en los años sesenta a 147ha en la actualidad (basándose en fotografías aéreas del IGAC).

En las zonas de los canales perimetrales se ha trabajado con proyectos de capacitación ambiental que la Alcaldía Local ha promovido en articulación con la EAAB, el DAMA, la Universidad Nacional, el Jardín Botánico y algunas ONG. A continuación, se enumeran las acciones comunitarias más relevantes, implementadas por estas entidades.

El grupo de Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales de La Universidad Nacional realizó el proyecto "Capacitación en recursos ambientales utilizando como herramientas los humedales de la localidad de Engativá", enmarcado dentro de la "Elaboración de la línea base de investigación del humedal Jaboque como instrumento para la generación e implementación de un plan de manejo del ecosistema" durante el periodo 2002-2003. Se realizaron talleres de sensibilización, socialización y salidas de campo; además se impartió conocimiento, tanto a la comunidad como a los estudiantes, sobre el medio biótico y físico del humedal y su problemática. El DAMA ejecutó en el 2004 el proyecto "Campañas pedagógicas para el manejo racional del medio ambiente de la localidad de Engativá, especialmente lo relacionado con la conservación y apropiación del humedal Jaboque", desarrollando actividades como talleres, reuniones, encuentros, salidas pedagógicas al humedal y socializaciones. También realizó talleres de video divulgativo en el proyecto "Lenguaje y producción visual como herramienta para la construcción social de conocimiento alrededor

del humedal Jaboque". La empresa Cafam, que tiene a cargo la administración del humedal, desarrolló en el 2005 un proyecto de educación ambiental a lo largo de toda la zona de ronda.

Entre las fundaciones ambientales se tienen en cuenta la Fundación ADESSA (Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental), que ha trabajado en la protección y recuperación del humedal a través de la educación ambiental y la sensibilización comunitaria; la Fundación Nuevo Mundo, que ha generado proyectos de educación ambiental en colegios de la localidad; la Fundación Lagarto Azul, que asesora a los grupos ambientales de la localidad y acerca a niños y adultos, por medio de presentaciones lúdicas al conocimiento y funcionamiento del humedal; la Fundación Ciudad Humana, que colabora en la sensibilización del uso adecuado de la ciclorruta, a través de ciclopaseos con la gente de la localidad; y la Fundación Interpretemos, que ejecutó en el 2005 un proyecto de educación ambiental para la apropiación del espacio y el apoyo a los grupos ambientales del sector.

Gracias a la labor llevada a cabo por estas entidades se consolidaron grupos de trabajo para la recuperación del lugar, siendo los más importantes la organización Amigos del Humedal, que nació por iniciativa de miembros del barrio Villa Constanza y ha trabajado en la recuperación de sus zonas de ronda, en jornadas de arborización, limpieza de los canales perimetrales y salidas ecológicas, con miras a la conservación del humedal; y el grupo del barrio Villa Amalia, que han realizado labores ecológicas en el humedal.

La acción comunitaria de estas entidades y grupos locales va orientada a disminuir la problemática alrededor del humedal Jaboque, pero de sus propias instituciones y más específicamente de sus actividades se generan unas nuevas dificultades. Por ejemplo, los problemas de la educación ambiental van desde la continuidad del trabajo realizado con la comunidad, para que esta sea partícipe de la solución, hasta lograr que las personas se vinculen y apropien del entorno biofísico donde conviven (Peñuela, 2005).

Si se generan estas nuevas necesidades entre la población se puede dar la conformación de comités, vigilantes y grupos con apoyo institucional, tanto económico como pedagógico; además, al crear una

cultura organizacional a partir de las Juntas de Acción Comunal (JAC) y la formación de líderes locales se aumenta el sentido de pertenencia entre los habitantes de la ronda del humedal y se apoya la recuperación integral y el desarrollo adecuado de un plan de manejo de este ambiente natural.

Para solucionar los problemas de la localidad de Engativá se deben tener en cuenta las altas tasas de inseguridad, la falta de alumbrado, el uso del espacio público, la adjudicación de baldíos y la baja calidad de vida de sus habitantes. Una de las soluciones presentadas por las JAC frente a estas problemáticas fue que en los sitios baldíos se planificaran proyectos para el desarrollo de la comunidad, ambientes de esparcimiento y de recreación.

En los barrios Marandú y El Porvenir los líderes de las JAC han propuesto la construcción de un colegio, un salón comunal y un parque. La JAC del barrio La Faena propuso a la Alcaldía Local la construcción de una biblioteca y un jardín infantil, además de una urbanización y un parque ecológico de bosque nativo en la ronda del humedal (conservando sus características naturales). En el barrio Centauros del Danubio la JAC buscó recursos para la construcción de un salón comunal.

El 19 de febrero del año 2005, la Alcaldía Menor con apoyo de los vecinos de la ronda lograron el desalojo de las carboneras, fábricas ilegales que durante cinco años quemaron material vegetal afectando la salud de los habitantes.

En las áreas donde hay un contacto permanente con el humedal los habitantes sienten el deseo de conservar y recuperar la zona, a través de la arborización, la descontaminación y de un fácil acceso al lugar. Se espera aumentar la motivación y las jornadas de sensibilización, la no continuidad de las ciclorutas (debido al aumento de la inseguridad) y los canales perimetrales (debido al alto grado de contaminación) y el aislamiento del humedal por medio de barreras naturales o de un enmallado.

En las zonas intervenidas la perspectiva de los habitantes varía en lo que respecta a la ciclorruta; en general los habitantes de la ronda y de la localidad comparten su preocupación por lograr un ambiente físico

agradable, por el cuidado y mantenimiento de las obras actuales y por procurar la gestión de nuevas obras con menor intervención dentro del plan de restauración.

A través de los colegios se realizan programas de investigación, haciendo que niños y jóvenes interactúen con los espacios naturales. Las juntas administradoras fortalecen los diferentes frentes de trabajo en temas de conservación y seguridad, especialmente con la gente que habita las rondas del humedal. La comunidad realiza el manejo de basuras y desechos además de programas de revegetalización y de proyectos productivos, como caminatas, ciclopaseos y educación ambiental, por los cuales reciben algún ingreso para sus hogares (Peñuela, 2005).

En conclusión, las acciones deben estar organizadas en proyectos y programas en los que la comunidad participe y obtenga un beneficio económico o pedagógico; de esta forma se fomentaría la creación de grupos ambientales comprometidos. Se deben fortalecer las JAC ya existentes, lo cual permitirá que la población local se vincule a la solución y el trabajo comunitario tenga continuidad, profundizando la apropiación del entorno biofísico por parte de los autores y promoviendo una visión experimental e investigativa dentro del plan de restauración del humedal.

Caracterización climática de la zona de influencia del humedal Jaboque

Capítulo 3

Resumen

Con base en la información proveniente de la estación meteorológica Aeropuerto El Dorado, operada por el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se caracterizó la variación de la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, el balance hídrico y el brillo solar en el humedal Jaboque, para el periodo 1972-2010. El régimen de distribución de lluvias es de tipo bimodal-tetraestacional, el monto anual es de 829,6 mm, los periodos lluviosos se presentan en abril-mayo y octubre-noviembre, y los periodos secos en diciembre-marzo y junio-septiembre.

La temperatura media anual registrada fue 13,6°C; el valor extremo de temperatura máxima (24,9°C) se presentó en enero (año 1995) y en marzo (año 1992), y el valor más bajo de temperatura mínima (-6.4°C) se registró en febrero (año 1995). La amplitud diurna de temperatura es de aproximadamente 1°C. La humedad relativa presenta un valor promedio anual de 80%. Los valores de brillo solar presentan un promedio de 133,26 horas/mes, elevándose considerablemente en el mes de enero con 184,9 horas/mes. El tipo de clima, según la clasificación de Thornthwaite, es ligeramente húmedo; el balance hídrico muestra exceso de agua en octubre (44,8 mm) y en ningún mes se muestra deficiencia de agua en el ambiente.

Metodología

Obtención de la información climática

Se tomaron como base los registros del IDEAM (Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) de la estación Aeropuerto El Dorado, desde 1972 hasta el 2010 (Anexo A). Esta estación meteorológica se ubica en la ciudad de Bogotá D.C., en las coordenadas 0442 N – 7409 W, a una altitud de 2.547 m.s.n.m.

Procesamiento de la información

Se analizaron los registros de precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar (Tabla 3.1), con base en los planteamientos de Van der Hamen *et al.*, (1995). El balance hídrico se realizó según las formulas de Thornthwaite (Eslava *et al.*, 1986), utilizando los valores medios de temperatura y precipitación registrados por la estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. El enfoque del capítulo sigue los lineamientos metodológicos de Rangel & Arellano (2008) y Rangel-Ch & Carvajal-Cogollo (2009).

Tabla 3.1. Parámetros climatológicos de la estación meteorológica

ESTACIÓN AEROPUERTO EL DORADO	MESES												MONTO ANUAL	PROM
	PARÁMETROS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		
P Media (mm)	28,7	44,1	71,3	107	100,7	59	44,9	45,9	66,4	111,3	93,1	57,1	829,6	69,1
T°C Máxima	21,9	22,5	22,2	21,9	21,5	20,8	20,4	21,1	21,4	21,5	21,4	21,4	-	21,5
T°C Media	13,1	13,6	13,8	14	14	13,8	13,4	13,4	13,4	13,4	13,5	13,3	-	13,6
T°C Mínima	0,2	0,7	2,2	3,9	4,3	4,1	3,7	2,7	2,1	2,6	2,7	1,1	-	2,5
Oscil. Temp. (°C)	21,7	21,8	20	17,9	17,2	16,7	16,7	18,3	19,3	18,8	18,6	20,3	-	-
Brillo solar (horas/mes)	184,9	151,7	137,9	106,4	107,1	113,2	134	135	123,1	118,9	128	158	1598,2	133,2
Humedad relativa (%)	79	79	81	82	82	79	77	77	79	82	83	81	-	80

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Precipitación

El régimen de distribución de lluvias es del tipo bimodal-tetraestacional, con un monto anual de 829,6 mm y un promedio mensual multianual de 69,1 mm, con variaciones entre 28,7 mm, para enero, y 111,3 mm, para octubre.

Los periodos de mayor pluviosidad se presentan desde marzo hasta mayo, con un valor de 279 mm, que representa el 33,6% del total de lluvia, y de octubre a noviembre, con un valor de 204,4 mm, que corresponde al 24,6% de la pluviosidad total. Los valores máximos son 107 mm y 111,3 mm para abril y octubre. Los periodos de menor concentración van desde diciembre hasta febrero y desde junio hasta septiembre. Los meses que presentan mínimos valores son enero y julio con 28,7 mm y 44,9 mm respectivamente (figura 3.1).

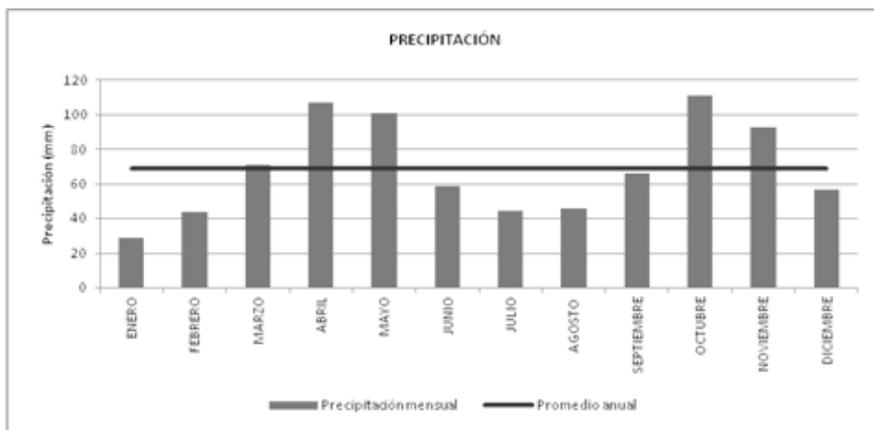


Figura 3.1. Marcha anual de la precipitación, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. Promedio multianual 1972-2010.

Fuente: Elaboración propia.

Variación interanual

En la serie de 39 años el promedio multianual es 829,6 mm. No se diferencia un patrón en la serie de años secos y húmedos (figura 3.2). Los años 1992 y 1997, calificados como años con expresión del fenómeno de El Niño, presentan valores de precipitación muy bajos.

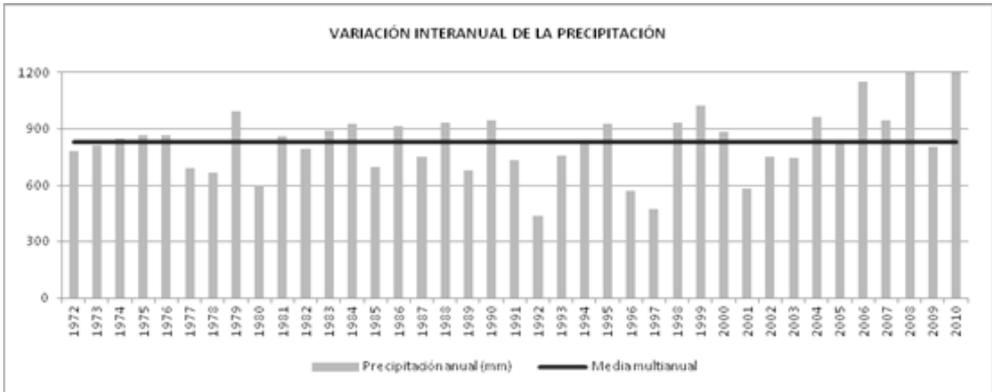


Figura 3.2. Variación interanual de la precipitación, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Fuente: Elaboración propia

Años secos

En la serie de datos los periodos secos corresponden a 1972-1980 y 1991-2000 (figura 3.2). En el primer periodo los años 1972, 1973, 1977, 1978 y 1980 se encuentran por debajo de la media (829,6 mm) con una disminución de la precipitación del 5,8%, 2,1%, 17%, 19,8% y 27,9% respectivamente. Estos últimos tres años corresponden a años típicos del fenómeno de El Niño. Los años 1974, 1975, 1976 y 1979 se encuentran por encima de la media, con un aumento de la precipitación del 2,2%, 4,2%, 4,3% y 19,5% respectivamente. La intensificación de las lluvias en este último año se debió al fenómeno de La Niña.

Para el periodo 1991-2000 se presentaron años secos en 1991, 1992, 1993, 1994, 1996 y 1997, con una disminución de la precipitación del 11,6%, 47,6%, 8,3%, 0,5%, 31,5% y 42,7% respectivamente. El

año 1996 es un año típico del fenómeno de El Niño, y en los años 1992 y 1997 se agudiza este fenómeno. Los años que superaron la media fueron 1995, 1998, 1999 y 2000, con un aumento de las precipitaciones de 11,8%, 12,4%, 23,8% y 6,7% respectivamente. El incremento de las lluvias en el año de 1999 se debe al fenómeno de La Niña.

Según la variación interanual, el año más seco fue 1992. Este fue el año con el fenómeno de El Niño más extremo, con un monto anual de 434,7 mm, que representa el 52,4% del monto promedio multianual, dejándose de recibir 394,9 mm. Los únicos meses por encima de la media multianual fueron septiembre, noviembre y diciembre, con 49,7, 108,3 y 59 mm respectivamente (figura 3.3).

Años húmedos

Los periodos húmedos que se observan en la serie de datos corresponden a 1981-1990 y 2001-2010 (figura 3.2). Para el primer periodo los años 1981, 1983, 1984, 1986, 1988 y 1990 presentan un aumento de las precipitaciones por encima de la media de 3,4%, 7,2%, 12,1%, 10,3%, 12,6% y 14,3% respectivamente, considerándose años húmedos. En el año de 1990 el aumento de lluvias se debió al efecto del fenómeno de La Niña. Los años de 1982, 1985, 1987 y 1989 presentaron una disminución de la precipitación por debajo de la media de 4,5%, 15,9%, 9,5% y 18,2% respectivamente. En los años 1985 y 1989 dicha disminución se debió al efecto del fenómeno de El Niño.

En el periodo 2001-2010 el aumento de las precipitaciones es significativo, considerándose años húmedos el 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 y 2010, con un aumento de las precipitaciones del 16%, 1,9%, 38,6%, 13,9%, 45,5% y 50,7% respectivamente. Las altas precipitaciones en los años 2006, 2008 y 2010 se deben a la agudización del fenómeno de La Niña. En los años 2001, 2002, 2003 y 2009 se observa una disminución de las lluvias de 30,1%, 9,3%, 9,8% y 2,8% respectivamente. En el año 2001 se observa claramente el efecto del fenómeno de El Niño en la disminución de las precipitaciones por debajo de la media.

En estos dos periodos el año más húmedo fue el 2010, que corresponde al año con el fenómeno de La Niña más extremo, con precipitaciones anuales que alcanzaron los 1250,5 mm, es decir se recibieron 420,9 mm más del promedio multianual (50,7%); cinco meses están por debajo de la media (enero, febrero, marzo, agosto y septiembre) (figura 3.3).

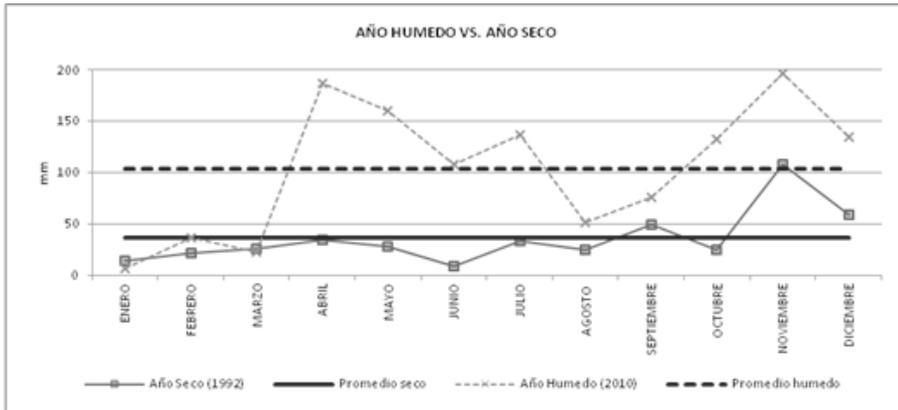


Figura 3.3. Marcha anual de la precipitación en un año húmedo vs. año seco.

Fuente: Elaboración propia

Temperatura

Temperatura máxima

El valor promedio fue 21,5°C; el mayor valor, 22,5°C, se obtuvo en el mes de febrero y el menor, 20,4°C, en julio (Figura 3.4). La amplitud entre los valores extremos es de 2,1°C. El año con el registro más alto fue 1997, con una temperatura promedio de 22,9°C; el año con el menor valor registrado fue 1974, con una temperatura promedio de 20,2°C.

Temperatura mínima

El valor promedio fue de 2,5°C; el mayor valor, 4,3°C, se alcanzó en mayo y el menor, 0,2°C, en enero (Figura 3.4). La oscilación mayor de los meses (mínima máxima y mínima mínima) fue 4,1°C. El año

más frío fue 1995, con una temperatura mínima promedio de 0,6°C; el año con el valor más alto fue el 2006, en el cual se registró una temperatura promedio de 5°C. La variación interanual fue de 4,4°C.

Temperatura media

La marcha de la temperatura media es del tipo isotérmico con un valor promedio de 13,6°C; la amplitud térmica (diferencia entre el mes más frío y el más cálido) es de aproximadamente 1°C. El valor mínimo se presentó en enero con 13,1°C, y el mayor entre abril y mayo con 14°C (figura 3.4). La variación interanual muestra que el año con mayor valor fue 1998, con un valor promedio de 14,5°C. Los años con temperaturas más bajas fueron 1974 y 1975, los cuales registraron una temperatura de 12,7°C. La diferencia entre el año más cálido (1998) y los años más fríos (1974 y 1975) fue de 1,8°C.

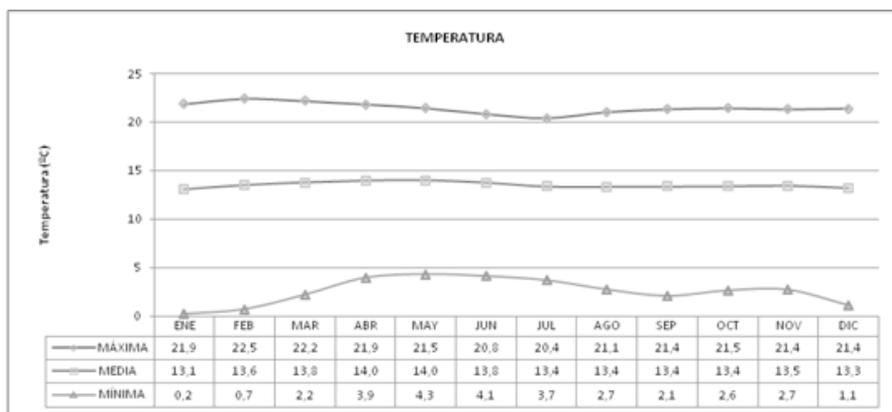


Figura 3.4. Marcha anual de la temperatura, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. Promedio Multianual 1972-2010.

Fuente:Elaboración propia.

Variación interanual

En la serie histórica de 39 años (figura 3.5), en el periodo de 1972-1980 se presentaron montos inferiores a la media multianual, considerándose años fríos. Los años 1974, 1975 y 1976 son los que presentan menores valores (12,7, 12,7 y 12,9°C respectivamente), el

mayor valor se registró en el año de 1980, siendo igual a la temperatura media (13,6 °C). En el periodo 1981-1990 los datos se acercan más a la media, siendo inferiores los años de 1981, 1984, 1985, 1986, 1988 y 1989, mayores los años de 1983, 1987 y 1990, e igual a la media el año 1982. Se consideran como años fríos los años 1984 y 1985 con temperatura de 13 °C. Los años más cálidos fueron 1983 y 1987 con una temperatura de 13,9 °C. Las altas temperaturas de los dos periodos se asocian con el fenómeno de El Niño, registrando temperaturas por encima de la media anual en 1980, 1982, 1983 y 1987.

Los periodos 1991-2000 y 2001-2010 son considerados como periodos cálidos, debido a que la mayoría de años están por encima de la media multianual (figura 3.5). Para el primer periodo solo tres años están por debajo de la media, siendo estos 1995, 1996 y 2000. El valor más bajo se registró en 1996 (13 °C). Las temperaturas más altas se registraron en los años de 1991, 1992, 1993 y 1998, con valores iguales a 14,1, 14,3, 14,2 y 14,5 °C respectivamente. En el segundo periodo, 2001-2010, los años por debajo de la media fueron 2004, 2007 y 2008, siendo este último el más bajo, con una temperatura de 13,2 °C. Los años más cálidos fueron 2002, 2009 y 2010 con temperaturas iguales a 14,3, 14,0 y 14,4 °C respectivamente. Las altas temperaturas de los dos periodos se asocian con el fenómeno de El Niño, registrando temperaturas por encima de los 14 °C en 1991, 1992, 1993, 1998 y 2002. Las bajas temperaturas registradas para el año 2008 se asocian a la agudización del Fenómeno de La Niña.

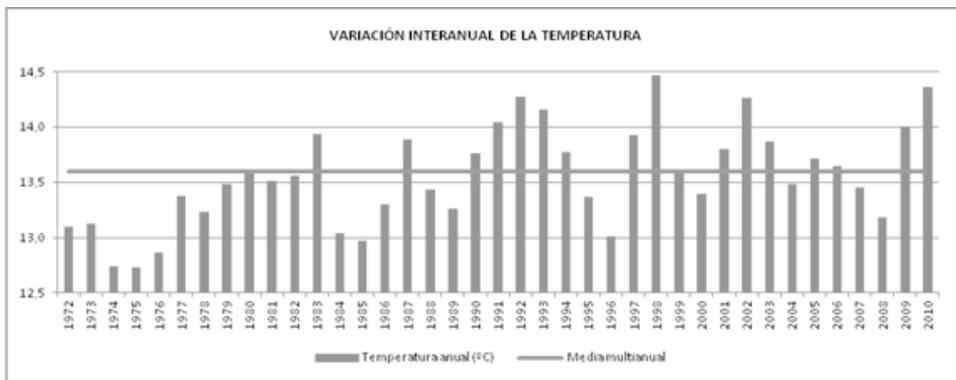


Figura 3.5. Variación interanual de la temperatura media, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Fuente: Elaboración propia

Humedad relativa

El valor promedio es de 80%. El máximo valor registrado fue de 83%, en el mes de noviembre, y el mínimo de 77%, en julio y agosto (figura 3.6). La marcha mensual del meteoro guarda relación con la oscilación de las temperaturas y con los meses de mayor y menor valor de precipitación. Según la variación interanual, el año con mayor humedad relativa fue el 2008, con una humedad promedio de 85,8%; el año con menor valor de humedad relativa fue 1992, con una humedad promedio del 75,8%. La diferencia fue del 10% de humedad relativa.

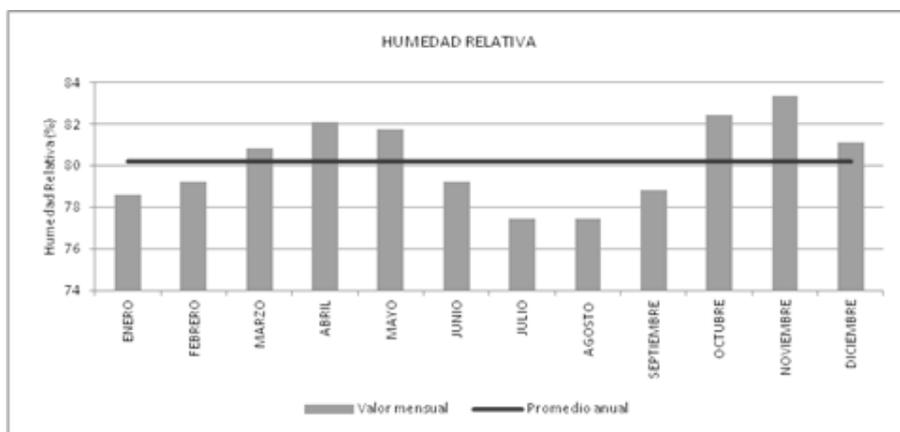


Figura 3.6. Marcha anual de la humedad relativa, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. Promedio multianual 1972-2010.

Fuente: Elaboración propia

Variación interanual

La variación interanual de la humedad relativa muestra para el periodo 1972-1980 tres años por debajo de la media, 1972, 1979 y 1980; este último presentó la humedad más baja, con un valor de 79,4%. Los años que se encontraron por encima de la humedad relativa media (80,2%) fueron 1973, 1974 y 1975, siendo este último el mayor registro para el periodo, con una humedad de 82,3%. El valor registrado para el año 1980 se debe al fenómeno de El Niño, en el que las altas temperaturas y la disminución de las precipitaciones hacen que la humedad que retiene el aire descienda.

El periodo de 1981-1990 es considerado un periodo húmedo, debido a que solo tres años, 1987, 1989 y 1990, están por debajo de la media, con valores de 79.7 %, 79.3 % y 78.0 % respectivamente. Los años con mayor humedad relativa fueron 1981, 1982, 1984, 1986 y 1988, con montos de 81,1 %, 81,5 %, 82,6 %, 81,5 % y 81,0 % respectivamente. En el año 1990, aunque es considerado un año típico del fenómeno de La Niña, la baja humedad en el aire se debe a las altas temperaturas registradas. En cambio, en el año 1984 sucede el efecto contrario, ya que se tienen altas precipitaciones y una baja en la temperatura, haciendo que el aire se sature de vapor de agua.

Para el periodo de 1991-2000 se tienen registros de años secos; 1991, 1992, 1993, 1997, 1998, 1999 y 2000 están por debajo del valor medio multianual, siendo los más bajos el año 1992 con 75,8 % (el más bajo en la serie de datos) y el año 1998 con 77,3 % de humedad relativa. El registro más alto se obtuvo en el año de 1996 (81,7 %). La baja humedad relativa de los años 1992 y 1998 se asocia a la agudización del fenómeno de El Niño.

El último periodo, 2001-2010, está altamente influenciado por el fenómeno de La Niña. Los años 2001, 2002, 2003 y 2009 se encuentran por debajo de la media, con valores registrados de 79,8 %, 78,4 %, 78,3 % y 79,3 % respectivamente. El incremento en la humedad es considerable en los años 2005, 2006, 2007 y 2008, debido a que en este subperiodo se genera un descenso de la temperatura y un aumento significativo de las precipitaciones. El año 2008, donde se agudiza el fenómeno de La Niña, presenta el valor más alto en la serie de datos de humedad relativa, 85,8 % (figura 3.7).

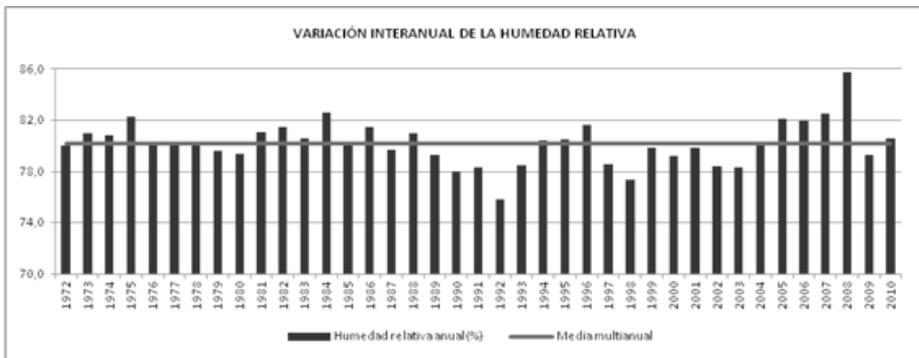


Figura 3.7. Variación interanual de la humedad relativa estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Fuente: Elaboración propia

Balance hídrico

Los valores de evapotranspiración potencial (ETP) de todos los meses están por encima de los 50 mm. Según la clasificación climática de Thornthwaite, es un clima ligeramente húmedo (tabla 3.2).

La ETP presenta un monto anual de 670,9 mm; en la síntesis anual los mayores valores se presentaron entre marzo y junio; no hay déficit de agua. El valor total de exceso de agua es 158,6 mm; el mes con el mayor exceso es octubre, con 44,8 mm. La clasificación climática para esta estación es $B_1RB'_1$, clima ligeramente húmedo, sin deficiencia de agua en el ambiente, mesotermal, con baja concentración de calor en el periodo seco.

Los valores de ETP de los periodos secos, exceptuando enero-febrero y julio-agosto, se encuentran por encima de los valores de precipitación, lo cual indica un déficit de agua en estos meses del año. En octubre se alcanza la mayor acumulación de agua y es el mes con mayor precipitación del segundo periodo de alta pluviosidad; en mayo se presenta el máximo valor de ETP (60,6 mm) y el valor mínimo (51,1 mm) se registra en febrero (figura 3.8).

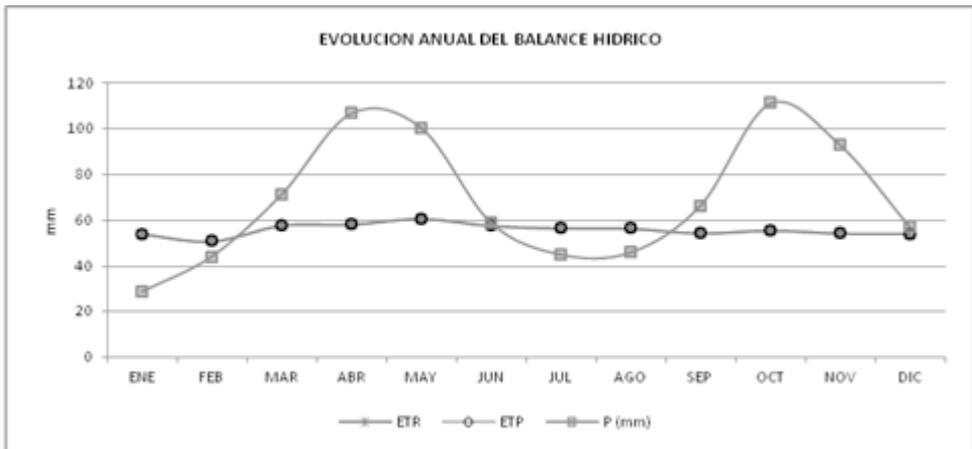


Figura 3.8. Balance hídrico, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2. Balance hídrico multianual, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Municipio: Bogotá D.C.		Grados Minutos Cardinal (N, S, E, W)												
Departamento: Bogotá D.C.		Lat.	4	42	N									
Estación: Apto. El Dorado		Long.	74	9	W									
	DIC*	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL
T°C	13,3	13,1	13,6	13,8	14,0	14,0	13,8	13,4	13,4	13,4	13,4	13,5	13,3	13,6
P mm	57,1	28,7	44,1	71,3	107	100,7	59	44,9	45,9	66,4	111,3	93,1	57,1	829,5
F	1,02	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02	
i	4,4	4,3	4,5	4,7	4,8	4,8	4,7	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,4	54,3
ETP	54,4	53,3	51,1	57,8	58,3	60,6	57,8	57,1	56,6	54,4	55,5	53,9	54,4	670,9
P - ETP	2,7	-24,6	-7,0	13,5	48,7	40,1	1,2	-12,2	-10,7	12,0	55,8	39,2	2,7	
difer. P - ETP	2,7	24,6	7,0	13,5	48,7	40,1	1,2	12,2	10,7	12,0	55,8	39,2	2,7	55,8
Al calc.	102,7	75,4	68,3	81,9	130,6	140,1	101,2	87,8	77,1	89,0	144,8	139,2	102,7	
A	100,0	75,4	68,3	81,9	100,0	100,0	100,0	87,8	77,1	89,0	100,0	100,0	100,0	
delta A	0,0	-24,6	-7,0	13,5	18,1	0,0	0,0	-12,2	-10,7	12,0	11,0	0,0	0,0	
E	2,7	0,0	0,0	0,0	30,6	40,1	1,2	0,0	0,0	0,0	44,8	39,2	2,7	158,6
D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ETR	54,4	53,3	51,1	57,8	58,3	60,6	57,8	57,1	56,6	54,4	55,5	53,9	54,4	670,9
RH	0,05	-0,46	-0,14	0,23	0,83	0,66	0,02	-0,21	-0,19	0,22	1,00	0,73	0,05	

a	1,35
Ih	23,64 índice de humedad
Ia	0,00 índice de aridez
Fh	23,64 factor de humedad

F= factor de correc. según latitud	E= Exceso de agua
I= índice calórico mensual	D= deficiencia de agua
ETP = Evapotranspiración potencial	ETR= evapotranspiración real
A= Almacenaje	RH= relación de humedad

Fuente: Elaboración propia

Diagrama ombrotérmico

Mediante la representación de la distribución de los promedios de precipitación multianual y temperatura media mensual, se establece que no se originan periodos ecosecos (Gausson, 1955), sino que por el contrario se presenta un nivel alto de humedad; por lo tanto, existe un excedente de agua a lo largo de todo el año.

La precipitación nunca alcanza valores por debajo del valor de la temperatura; además la temperatura tiende a ser constante, presentándose un clima húmedo, con dos periodos perhúmedos, el primero en abril-mayo y el segundo en octubre-noviembre, al superar

los 100mm de precipitación en estos meses (figura 3.9). El mes con mayor pluviosidad fue octubre, con 111,3 mm, coincidiendo con ser uno de los meses de menor temperatura, con 13,4 °C.

Con base en los resultados obtenidos anteriormente se puede decir que esta zona es húmeda, con periodos fríos de larga duración y con un clima axérico, al no poseer periodos secos, en los que la media de las temperaturas esté por encima de la precipitación. Se observan dos periodos escasamente secos de baja precipitación en enero-febrero y julio-agosto.

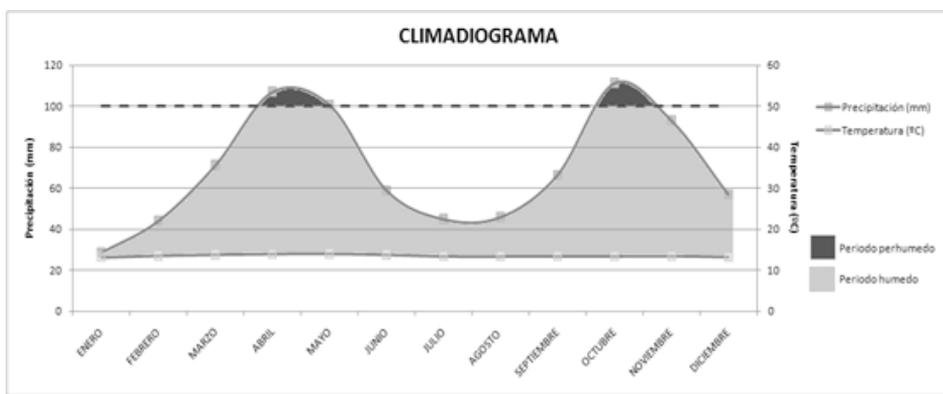


Figura 3.9. Climadiagrama, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Fuente: Elaboración propia a partir de Gausson (1995).

Brillo solar

El valor promedio anual del brillo solar es 133,2 horas/mes. La marcha anual es del tipo bimodal-tetraestacional. Se diferenciaron dos periodos de mayor concentración, uno de diciembre a marzo, donde enero presenta el mayor valor con 184,9 horas/mes, y otro entre julio y agosto, donde agosto presenta el mayor valor con 135 horas/mes. Los periodos de menor insolación comprenden los meses restantes, los cuales están por debajo de la media (133,26 horas/mes) (figura 3.10). El año que presentó el mayor número de horas de brillo solar fue 1980, con 1912 horas anuales; el año con el menor número de horas de brillo solar fue 1975, con 1348 horas anuales. La variación interanual registrada fue de 564 h/año.

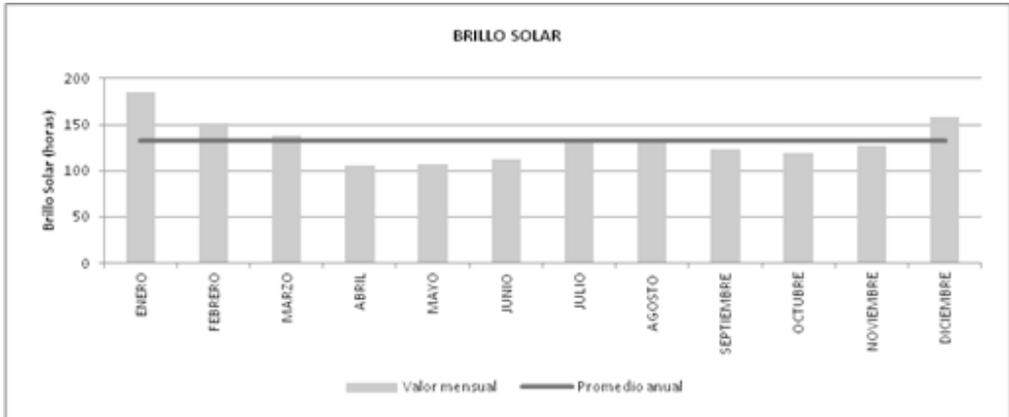


Figura 3.10. Brillo solar, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.
Fuente: Elaboración propia

Variación interanual

En la serie histórica de 39 años (1972-2010) se tiene que el primer periodo, 1972-1980, es considerado un periodo cálido, debido a que la mayoría de años presentaron mayor número de horas/año con respecto a la media multianual. Los años 1973, 1975 y 1976 son los únicos que se encuentran por debajo de la media, con valores de 1486,8, 1348,3 y 1433,4 horas/año respectivamente. El año 1975 presentó el menor dato del periodo, y corresponde al año con menores temperaturas y mayor humedad relativa. El máximo valor lo obtuvo el año 1980 con 1911,9 horas/año, el cual presenta la mayor temperatura y la menor humedad relativa del periodo especificado, considerándolo un año típico del fenómeno de El Niño.

El periodo de 1981-1990 se consideró cálido. Ningún año se encuentra bajo la media multianual. El mayor valor se registró en el año 1985 (1811,5 horas/año). Este último año registró la temperatura más baja del periodo, pero su humedad relativa se mantuvo en la media multianual, lo que asocia este meteoro al fenómeno de El Niño (figura 3.11).

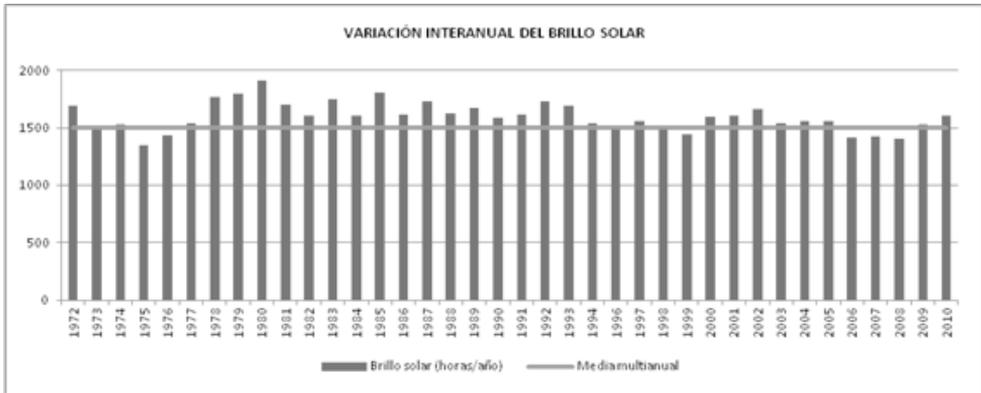


Figura 3.11. Variación interanual del brillo solar estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Fuente: Elaboración propia

En el periodo 1991-2000 se presentaron dos años por debajo de la media multianual, 1996 con 1497,4 horas/año y 1999 con 1444,7 horas/año. El mayor valor se presentó en 1992 (1735,2 horas/año); este año presentó el fenómeno de El Niño más extremo de la serie histórica de datos (la menor humedad relativa y la más baja precipitación de toda la serie, y temperatura mayor a 14°C).

Para el periodo 2001-2010, los años 2006, 2007 y 2008 registraron los menores valores de brillo solar, siendo 1418,2, 1424,7 y 1403,3 horas/año respectivamente; este subperiodo se asocia con la agudización del fenómeno de La Niña. El año 2002 presenta el mayor valor de brillo solar (1662,9 horas/año), relacionándolo con baja humedad relativa, altas temperaturas y precipitaciones por debajo del promedio multianual (figura 3.11).

Comparación años 2004 y 2005

Precipitación

El monto anual de la precipitación para el año 2004 fue mayor (962mm) en comparación al año 2005 (845 mm). El mes más húmedo para el año 2004 fue abril (197,7 mm), seguido de octubre (170 mm); el mes más seco fue enero, con 22mm de precipitación. En el año

2005 el mes más húmedo fue mayo (161,3mm) seguido de octubre (131,3mm), mientras que el mes más seco fue enero, con 11,1mm de precipitación (figura 3.12).

En los meses húmedos la mayor variación se dio en abril, con una diferencia de 104mm, siendo mayor en el 2004. En los meses considerados secos la mayor amplitud se dio en diciembre, observándose una diferencia de 79mm, siendo mayor en el año 2005. La menor diferencia se dio en el mes de marzo, variando en tan solo 7mm de un año al otro (figura 3.12).

En los registros de variación interanual el año 2004 presentó una precipitación mayor a la media multianual en un 16%. El año 2005 tan solo excedió la media multianual en un 1,9% (figura 3.12).

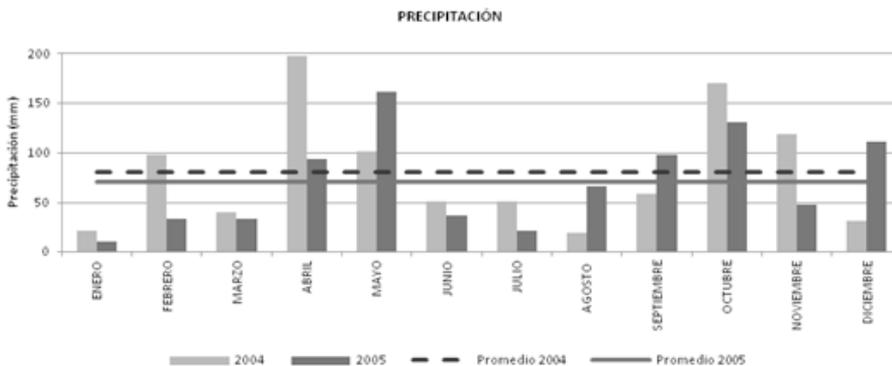


Figura 3.12. Marcha anual de la precipitación para los años 2004 y 2005.

Fuente: Elaboración propia

Temperatura

La temperatura media fue mayor para el año 2005 (13,7°C) en comparación al año 2004 (13,5°C). Para el año 2004 los meses más fríos fueron enero, julio, septiembre, octubre y diciembre, con valores de 13°C, 13,1°C, 13°C, 13,3°C y 13,4°C respectivamente. El mes más cálido fue marzo, con 14,1°C, seguido de mayo, con 14°C. En el año 2005 los meses más cálidos fueron febrero, marzo, abril, mayo, junio

y julio, excediendo los $13,9^{\circ}\text{C}$. abril registró la mayor temperatura ($14,4^{\circ}\text{C}$). Los meses más fríos fueron octubre y diciembre con una temperatura registrada igual a $13,1^{\circ}\text{C}$. La mayor variación de un año a otro se dio en abril, con una diferencia de $0,9^{\circ}\text{C}$, seguido por julio, con una diferencia de $0,8^{\circ}\text{C}$ (figura 3.13).

Con respecto a la variación interanual, el año 2005 ($13,7^{\circ}\text{C}$) fue más cálido que el año 2004 ($13,5^{\circ}\text{C}$), aunque los datos de los dos años solo se alejaron en $0,1^{\circ}\text{C}$ de la media multianual (figura 3.5).

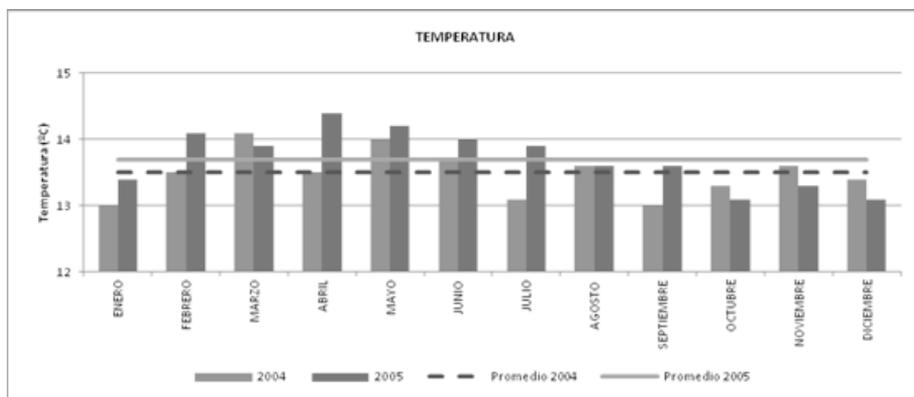


Figura 3.13. Marcha anual de la temperatura para los años 2004 y 2005.

Fuente: Elaboración propia

Humedad relativa

El porcentaje de humedad relativa fue mayor para el año 2005 (81,6%) en comparación al año 2004 (80,3%). Los meses más húmedos para el año 2004 fueron abril, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, siendo el más extremo el mes de octubre con 86 % de humedad relativa, seguido de los meses abril y noviembre con 85 %. Los meses más secos fueron junio y agosto (75 %). Para el año 2005 los meses más húmedos fueron febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre, siendo octubre y noviembre los de mayor valor registrado (86 %). El mes más seco fue julio con 77 % de humedad relativa. La mayor variación de un año a otro se dio en los meses de febrero y marzo con una diferencia de siete puntos porcentuales (figura 3.14).

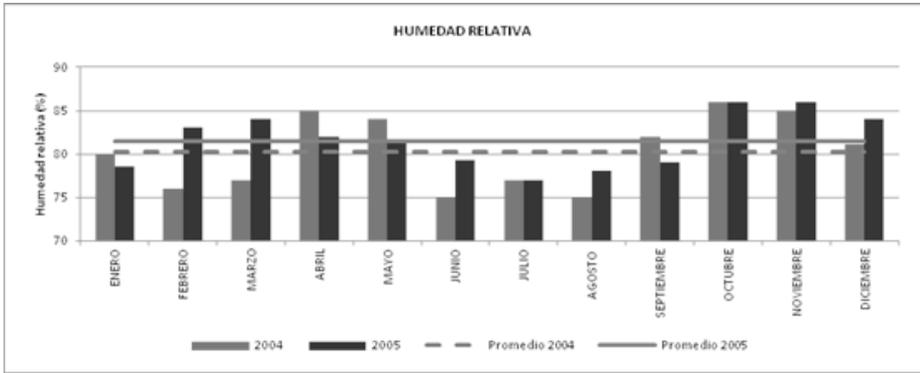


Figura 3.14. Marcha anual de la humedad relativa para los años 2004 y 2005.

Fuente: Elaboración propia

Según los datos de la serie histórica el año 2004 se encontró sobre el rango de la media multianual y el año 2005 lo excedió en 1,9 puntos porcentuales (figura 3.7).

Brillo solar

La diferencia en horas anuales de brillo solar entre el año 2004 y el año 2005 no es significativa. En el año 2004 los meses con mayores valores fueron enero, febrero, marzo y diciembre con 182,7, 185, 157,6 y 137,2 horas/mes. El menor valor se registro en mayo (75,8 horas/mes). Para el año 2005 los meses con mayor número de horas de brillo solar fueron enero, febrero, marzo, julio y diciembre, siendo el mayor enero con 184.9 horas/mes. abril fue el mes con menor número de horas de brillo solar para este año. La mayor variación se dio en julio (35,1 horas/mes), siendo mayor en el 2005, seguido de febrero (34,1 horas/mes), donde el mayor se dio en el 2004 (figura 3.15).

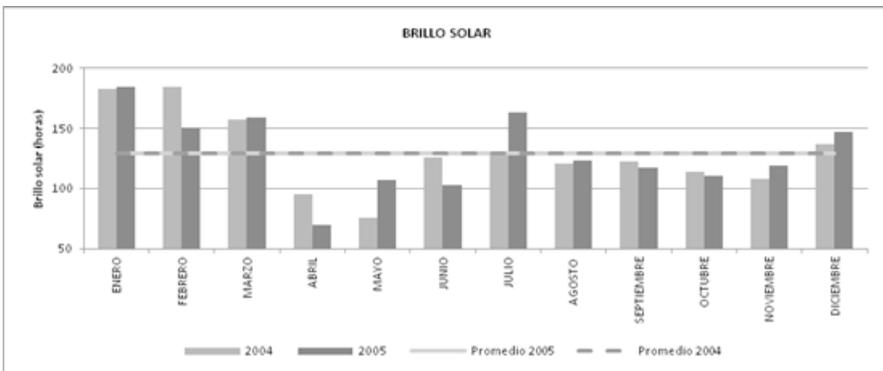


Figura 3.15. Marcha anual del brillo solar para los años 2004 y 2005.

Fuente: Elaboración propia

En los registros de la variación interanual las horas totales de brillo solar al año son mayores que la media multianual tanto para el año 2004 como para el año 2005, considerándose años cálidos. Excedieron la media multianual en aproximadamente 58 horas/año (figura 3.11).

Consideraciones finales

Precipitación

Los valores de precipitación más altos se presentan en los meses de abril-mayo, con 107 mm y 100,7 mm respectivamente, y en octubre-noviembre, con 111,3 mm y 93,1 mm respectivamente. Se presentó un tipo de distribución bimodal-tetraestacional, con épocas secas en diciembre-febrero y en junio-agosto. Los meses más húmedos son abril y octubre y el mes más seco es enero.

Cuando se analizó la variación interanual en series largas (40 años aproximadamente) se detectó cierto patrón asociado a los fenómenos de El Niño y de La Niña. En los años 1991, 1992, 1996 y 1997, el fenómeno de El Niño se acentuó. En los dos primeros se registraron temperaturas medias superiores a los 14 °C y en los dos últimos se dieron variaciones de aproximadamente 1 °C de un año al otro. El fenómeno de La Niña aparece levemente en los años 1984, 1986, 1988, 1990 y 1995. Los años 1999, 2006, 2008 y 2010 fueron excepcionalmente húmedos, calificándose como años típicos del fenómeno de La Niña, los dos últimos pasando los 1200 mm de lluvia anual.

El periodo 1972-1980 se considera como seco. Los años 1977, 1978 y 1980 son años típicos del fenómeno de El Niño. En el año 1979 se intensifican las lluvias debido al fenómeno de La Niña. El periodo 1981-1990 se considera húmedo. En los años 1985 y 1989 se da una disminución de las lluvias debido al fenómeno de El Niño. En el año 1990 se aumentan las lluvias por un nuevo fenómeno de La Niña. Para el periodo 1991-2000 los años tienden hacer secos. En 1992 y 1997 se agudiza el fenómeno de El Niño. En 1999 se da un nuevo fenómeno de La Niña. Finalmente, en el periodo 2001-2010 el efecto del fenómeno

de El Niño se observa claramente en el año 2001, además se presenta un subperiodo muy húmedo del 2006 al 2010 debido a la agudización del fenómeno de La Niña.

Temperatura

En la serie histórica de 1972 al 2010 la temperatura registró valores promedios de temperatura máxima igual a 21,5°C, de temperatura media de 13,6°C y temperatura mínima de 2,5°C.

Las altas temperaturas se asocian con el fenómeno de El Niño en los periodos de 1982-1993, 1996-1997 y 2001-2003, superando los 14°C en los años de 1991, 1992, 1993, 1998 y 2002. En los años 2009 y 2010 se presenta una anomalía de los datos debido a que en un periodo típico del fenómeno de La Niña se registraron temperaturas superiores a los 14°C.

Se consideran periodos fríos de 1972-1980 y de 1981-1990. Las altas temperaturas, por encima de la media multianual, se asocian con el fenómeno de El Niño (1980, 1982, 1983 y 1987). Los periodos de 1991-2000 y 2001-2010 se asocian con periodos cálidos. El efecto del fenómeno de El Niño en estos periodos se ve claramente en los años de 1991, 1992, 1993, 1998 y 2002. Las bajas temperaturas registradas para el año 2008 se asocian a la agudización del fenómeno de La Niña.

Humedad relativa

La humedad relativa registró un valor de 80%, siendo 83% el más alto en el mes de noviembre y 77% el más bajo en los meses de julio y agosto. Según la variación interanual el año con mayor humedad relativa fue el 2008, con una humedad promedio de 85,8%, asociado con un fenómeno de La Niña intenso. El año con menor valor de humedad relativa fue 1992, con una humedad promedio del 75,8%, y relacionado con un año típico del fenómeno de El Niño.

La variación interanual mostró que en el periodo 1972-1980, el año 1980 es típico del fenómeno de El Niño, en el que las altas temperaturas

y la disminución de las precipitaciones hacen que la humedad que retiene el aire descienda. El periodo 1981-1990 se consideró húmedo. El año 1990, aunque es un año típico del fenómeno de La Niña, la baja humedad en el aire se debe a las altas temperaturas registradas para este año. Se presenta como periodo seco de 1991-2000. La baja humedad relativa de los años 1992 y 1998 se asocia a la agudización del fenómeno de El Niño. El periodo 2001-2010 está altamente influenciado por el fenómeno de La Niña. El incremento en la humedad es considerable en los años 2005, 2006, 2007 y 2008, debido a que en este subperiodo se genera un descenso de la temperatura y un aumento significativo de las precipitaciones.

Balance hídrico

La clasificación climática según Thornthwaite para esta estación es $B_1RB'_1$, clima ligeramente húmedo, sin deficiencia de agua en el ambiente, mesotermal, con baja concentración de calor en el periodo seco.

Brillo solar

El brillo solar obtuvo un monto anual de 133,2 horas/mes, con su mayor expresión en el mes de enero (184,9 horas/mes). El año que presenta el mayor número de horas de brillo solar fue 1980, con 1912 horas anuales; el año con el menor número de horas de brillo solar fue 1975, con 1348 horas anuales.

En la serie histórica de 39 años (1972-2010) se tiene que el primer periodo, 1972-1980, es considerado un periodo cálido. El año 1975 presentó el menor dato del periodo, y corresponde al año con menores temperaturas y mayor humedad relativa. El máximo valor lo obtuvo el año 1980, el cual presenta la mayor temperatura y la menor humedad relativa del periodo especificado, considerándolo un año típico del fenómeno de El Niño. El periodo de 1981-1990 también se consideró cálido. El meteoro del año 1985 es asociado al fenómeno de El Niño. En el periodo 1991-2000 se presentó el fenómeno de El Niño más extremo de la serie histórica de datos. El año 1992 obtuvo la menor

humedad relativa, la más baja precipitación y temperaturas mayores a los 14 °C. En el periodo 2001-2010 se presentó la agudización del fenómeno de La Niña.

Periodos serie histórica

Periodo 1972-1980

En este periodo la precipitación anual fue de 790,5 mm, la temperatura media promedio fue de 13,1 °C, la humedad relativa tuvo un valor de 80,4% y el brillo solar fue 134,5 horas/mes. Los meses más lluviosos fueron marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre, siendo el de mayores precipitaciones octubre (111,9 mm). Los meses más cálidos fueron marzo, abril y mayo, con una temperatura de 13,6 °C. La mayor humedad relativa se concentró en los meses de abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Los meses con mayor número de horas de exposición al brillo solar fueron enero, febrero, marzo, julio y diciembre (Tabla 3.3). El año típico del fenómeno de La Niña fue 1975, debido a su alta precipitación (864,3 mm), baja temperatura (12,7 °C), alta humedad relativa (82,3%) y pocas horas de brillo solar (1348,3 horas/año). El año típico del fenómeno de El Niño fue 1980, con una precipitación anual de 598,1 mm, temperatura media de 13,6 °C, humedad relativa de 79,4% y brillo solar de 1911,9 horas/año.

Periodo 1981-1990

La precipitación anual fue de 842,9 mm, la temperatura media fue de 13,5 °C, la humedad relativa fue de 80,6% y el brillo solar promedio fue de 139,3 horas/mes. Las épocas de mayor expresión de los parámetros climatológicos fueron: para la precipitación, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre, estando la mayor concentración de lluvias en abril, con 129,6 mm; para la temperatura, mayo fue el mes más cálido, con una temperatura de 14 °C; para la humedad relativa los meses de marzo a mayo y de octubre a diciembre; y para el brillo solar los subperiodos de diciembre-marzo y julio-agosto (tabla 3.3). El año 1984 fue un año típico del fenómeno de La Niña, con precipitaciones de 929,8 mm anuales, temperatura media anual de 13 °C, humedad relativa anual de 82,6% y brillo solar de 1612 horas/año. El año

1987 fue un año típico del fenómeno de El Niño, debido a su baja precipitación (750,5 mm), alta temperatura (13,9°C), baja humedad relativa (79,7%) y alta exposición al brillo solar (1733,3 horas/año). El año 1990 es un año atípico debido a que alcanzó una precipitación anual igual a 948,2 mm, pero su temperatura fue alta, alcanzando los 13,8°C, su humedad relativa descendió hasta 78% y las horas de brillo solar fueron de tan solo 1587,9 horas/año.

Periodo 1991-2000

Este periodo presentó la precipitación más baja con 757,1 mm al año, al igual que la más baja humedad relativa con 79%, el brillo solar disminuyó, a diferencia de los dos periodos anteriores, hasta 131,4 horas/mes, pero su temperatura media anual aumentó hasta los 13,8°C. Los meses de mayor precipitación fueron de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, siendo el mayor el mes de mayo con 95,4 mm. Los meses más cálidos fueron abril y junio con una temperatura que alcanzó los 14,3°C. La humedad relativa se concentró en los meses de marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. El brillo solar alcanzó su mayor expresión en el subperiodo de diciembre-marzo y en el mes de agosto (tabla 3.3). En el año de 1992 se tuvieron los registros más intensos de un fenómeno de El Niño, con una precipitación que disminuyó hasta los 434,7 mm anuales, al igual que la disminución de la humedad relativa hasta el 75,8%, una temperatura promedio que ascendió a los 14,3°C, lo que hizo ascender las horas de brillo solar hasta 1735,2 horas/año. El año 1999 es un año típico del fenómeno de La Niña, con una precipitación igual a 1027,1 mm, temperatura media de 13,6°C, humedad relativa de 79,8% y brillo solar de 1444,7 horas/año.

Periodo 2001-2010

Este periodo presentó el mayor monto anual de precipitaciones de los cuatro periodos evaluados, siendo igual a 924,6 mm, la temperatura media ascendió hasta 13,8°C, la humedad relativa también registró el valor más alto de los cuatro periodos, con 80,9%; el brillo solar promedio fue el más bajo de todos los periodos, con tan solo 127,5 horas/mes. Las mayores precipitaciones se concentraron en los meses de marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, siendo la más alta octubre

(125,4mm). La máxima temperatura se registró en el mes de mayo (14,2°C). La humedad relativa se concentró en los meses de marzo a mayo y de octubre a diciembre. Para el brillo solar se diferencian dos épocas de mayor expresión del parámetro, a saber, diciembre-marzo y julio-septiembre (tabla 3.3).

Un año típico del fenómeno de El Niño fue el 2001, debido a su baja precipitación (579,8mm), alta temperatura (13,8°C), baja humedad relativa (79,8%) y alta exposición al brillo solar (1605,8 horas/año).

Los últimos años de este periodo están fuertemente influenciados por el fenómeno de La Niña, alcanzando valores extremos en el año 2008, con precipitación igual a 1206,8mm anuales, temperatura promedio igual a 13,2°C, humedad relativa anual de 85,8% y horas

Tabla 3.3. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Periodo	Meses												Promedio
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1972 -1980 P Media (mm) T°C Media H.R. (%) Brillo Solar (h/m)	☒	☒	MMM	MMM	MMM				MMM	☒	MMM		790,5 13,1 80,4 134,5
1981-1990 P Media (mm) T°C Media H.R. (%) Brillo Solar (h/m)	☒	☒		☒	MMM				MMM	MMM	MMM		842,9 13,5 80,6 139,3
1991 -2000 P Media (mm) T°C Media H.R. (%) Brillo Solar (h/m)	☒	☒	MMM	MMM	☒				MMM	MMM	MMM		757,1 13,8 79,0 131,4
2001 -2010 P Media (mm) T°C Media H.R. (%) Brillo Solar (h/m)	☒	☒	MMM	MMM	MMM					☒	MMM		924,6 13,8 80,9 127,5

Convenciones

MMM: meses de mayor precipitación.
¥ : mes con la más alta precipitación.
Σ : mes con temperatura máxima.
= : meses de mayor humedad relativa.
⊗ : meses de mayor exposición al brillo solar.

Fuente: Elaboración propia

de brillo solar igual a 1403,3 horas/año. En el año 2010 se alcanzó el monto más alto de precipitación de la serie histórica, alcanzando los 1250,5 mm anuales, se registró el segundo valor más alto de la temperatura multianual, igual a 14,4 °C, la humedad relativa fue de 80,6 % y el brillo solar de 1606,7 horas/año.

Comparación año 2004 vs. año 2005

Año 2004

Este año presentó un monto anual de precipitación igual a 962,1 mm. Las mayores precipitaciones fueron en los meses de febrero, abril, mayo, octubre y noviembre, siendo el más extremo abril con 197,7 mm. La temperatura media anual fue de 13,5 °C. El mes que registró la máxima temperatura fue marzo, alcanzando los 14,1 °C. La humedad relativa fue igual a 80,3 %. Las épocas de mayor concentración fueron abril-mayo y septiembre-diciembre. El brillo solar promedio fue de 129,7 horas/mes. La mayor exposición se dio de enero a marzo y en el mes de diciembre (tabla 3.4).

Año 2005

La precipitación promedio anual fue de 845 mm. Los meses de mayor concentración de lluvias fueron abril, mayo, septiembre, octubre y diciembre, registrándose el máximo valor en mayo con 161,3 mm. La temperatura media fue de 13,7 °C. El registro más extremo se obtuvo en abril (14,4 °C). La humedad relativa anual fue igual a 81,6 %. Se definieron dos épocas de mayor humedad relativa, entre febrero-mayo

y entre octubre-diciembre. El brillo solar fue de 129,7 horas/mes. Los meses de mayor expresión de este parámetro fueron enero, febrero, marzo, julio y diciembre (tabla 3.4).

Tabla 3.4. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos para los años 2004 y 2005, estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

Periodo	Meses												Promedio
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2004													
P Media (mm)		MMM		¥	MMM					MMM	MMM		962,1
T°C Media			☒										13,5
H.R. (%)				=	=				=	=	=	=	80,3
Brillo Solar (h/m)	☒	☒	☒									☒	129,7
2005													
P Media (mm)				MMM	¥				MMM	MMM		MMM	845
T°C Media				☒									13,7
H.R. (%)		=	=	=	=				=	=	=	=	81,6
Brillo Solar (h/m)	☒	☒	☒				☒					☒	129,7

Fuente: Elaboración propia

Modelación de los procesos hidrológicos del humedal Jaboque

Capítulo 4

Resumen

Se propone un modelo de simulación dinámico para explicar los procesos hidrológicos del humedal Jaboque (Bogotá, Colombia), en tres secciones con características físicas y químicas particulares. El modelo incluye los flujos de entrada y salida de agua para cada una de las secciones del humedal. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales. Se utilizó el método Euler de integración con el programa computacional Stella 9.1®.

El comportamiento hidrológico del humedal tiene una alta dependencia de los aportes de la cuenca aferente, que a su vez obedecen fundamentalmente a las condiciones climáticas de la cuenca. En el año 1992 la precipitación fue 432,7 mm/año, con una descarga de agua estimada de la cuenca aferente de 905 225 m³/año, siendo el valor más bajo en los últimos 39 años, y en el 2010 la precipitación anual fue de 1250,5 mm, con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m³/año, valores más altos para el mismo periodo. La comparación entre los flujos de entrada y salida del humedal Jaboque muestran una diferencia bruta de 82 165 m³/mes para un total anual de 985 980 m³/año.

La modelación hidrológica se realizó en las tres secciones, el tiempo hidráulico de retención hidráulico modelado (THR) se estimó en

15 días/año para la primera sección, 36 días/año y 42 días/año para la segunda y tercera sección. El tiempo hidráulico de retención del agua promedio en el humedal fue de 93 días/año. En las condiciones actuales el humedal recambia su volumen cuatro veces al año, reconfirmando el papel amortiguador que tienen todas las secciones y en especial la segunda y la tercera sección, al recibir y atenuar el impacto de las crecientes de la cuenca aferente sobre todo el conjunto del humedal.

El análisis de sensibilidad del modelo corroboró la relación entre la precipitación y los factores morfométricos del humedal. La modelación entre las entradas y salidas de agua al humedal reproduce de manera parcial la descarga al río Bogotá, pero también reconfirma el papel amortiguador que tienen todas las secciones del humedal.

Introducción

La hidrología es un referente muy importante en los estudios sobre humedales naturales o artificiales. Las condiciones hidrológicas pueden modificar o cambiar directamente las propiedades físicas y químicas del agua como la temperatura, el pH, la disponibilidad de nutrientes y los tiempos hidráulicos de retención (Wetzel, 2001; Håkanson, 2005; Jørgensen, 2008). El estudio de los procesos hidrológicos en humedales naturales y en artificiales ha permitido desarrollar propuestas exitosas para la creación y restauración de este tipo de sistemas (Mitsch & Day, 2004; Zhang & Mitsch, 2005). La modelación y simulación de los procesos hidrológicos ayuda en la comprensión de los procesos bióticos, de los ciclos geoquímicos, de los ciclos de nutrientes, de la dinámica de la vegetación y del comportamiento trófico (Bradley & Gilvear, 2000; Hupp, 2000; Quinn & Hanna, 2003; Spieles & Mitsch, 2003).

El hidroperiodo afecta el nivel de agua en un humedal y es considerado el factor dominante en el control de la composición florística de la comunidades de plantas acuáticas (Duever *et al.*, 1988) Cuando las condiciones hidrológicas en un humedal cambian ligeramente, la biota puede responder con cambios en la riqueza de especies y en la productividad del ecosistema (Mitsch *et al.*, 2009) Se han planteado varios métodos que buscan determinar la influencia del agua sobre un

humedal. Las más reconocidas consideran al hidroperiodo como un descriptor de inundabilidad, teniendo en cuenta la cantidad de agua que ingresa al sistema y la forma en la cual se inunda (Nutter & Brinson, 1994; Brinson, 2004). Fundamentalmente, el hidroperiodo está conformado por la intensidad de la inundación (altura del nivel del agua en el humedal), el tiempo de duración (tiempo que permanece cubierto de agua), la frecuencia (número de veces que el sistema se inunda) y la estacionalidad (en qué momento del año se produce la inundación). Muchas veces es importante considerar también la variación interanual del hidroperiodo. El hidroperiodo, entonces, define el patrón estacional del nivel del agua en un humedal.

El consenso de que la hidrología de un humedal, entendida como una variable independiente que influye y permite explicar el comportamiento de los ciclos geoquímicos y de nutrientes, es extendido; sin embargo, en muchos proyectos de restauración y conservación de humedales no se aplican estos conocimientos (Mitsch & Gosselink, 2000). En varios casos, se utilizan técnicas de drenaje inadecuadas para la restauración de humedales que alteran el hidroperiodo y como consecuencia se presentan inundaciones cortas e inesperadas, que dificultan el anclaje o fijación de macrófitas o la emigración de macroinvertebrados y vertebrados. También disminuye la biodiversidad y hay pérdida de las funciones del humedal. En todos los casos las alteraciones ambientales y sociales son significativas, como es el caso de las intervenciones en humedales urbanos (Zhang & Mitsch, 2005).

Estructura del modelo de simulación dinámica

A partir del análisis de balance de masas se estimaron los flujos de entrada y salida del humedal (tablas 4.1 y 4.2) y se determinó la estructura de un modelo dinámico de simulación para estimar el comportamiento hidrológico mensual del humedal (Mitsch & Gosselink, 2000; Zhang & Mitsch, 2005; Acreman *et al.*, 2007) Las ecuaciones se ajustaron de la siguiente manera:

$$dv/dt = \int_{ent}(t) - \int_{sal}(t) \quad (1)$$

$$\int_{ent} (t) = P (t) + Si (t) \quad (2)$$

$$\int_{sal} = So (t) + Et (t) \quad (3)$$

Donde:

dv/dt:	Tasa de cambio del volumen agua, si dv/dt =0
$\int_{ent} (t)$:	Entradas
$\int_{sal} (t)$:	Salidas
Si (t):	Flujo mensual promedio
P (t):	Precipitación media mensual
So (t):	Flujo promedio salida

Tabla 4.1. Variables utilizadas en el modelo. Flujos de entrada y salida de agua del humedal Jaboque.

NOMBRE	ORIGEN DE ENTRADAS	UNIDADES	DIRECCIÓN SALIDAS	UNIDADES
Sección 1	Cuenca aferente. Área. Precipitación efectiva Sección 1	km ² mm/mes/m ²	Entrega a la sección 2 Evapotranspiración, área Sección 1	m ³ /mes mm/mes/m ²
Sección 2	Flujo sección 1 a sección 2 Precipitación efectiva Sección 2	m ³ /mes mm/mes/m ²	Flujo de sección 2 a sección 3 Evapotranspiración, área sección 2	m ³ /mes mm/mes/m ²
Sección 3	Flujo sección 2 a sección 3 Precipitación efectiva sección 3	m ³ /mes mm/mes/m ²	Flujo salida río Bogotá Evapotranspiración, área sección 3	m ³ /mes mm/mes/m ²

Fuente: Elaboración propia

Entradas

El flujo de entrada al humedal se calculó a partir de los aportes de la cuenca aferente (m³/mes) que se recogen por medio de los canales de los Ángeles y Carmelo, que transportan el flujo de agua hacia el interior del humedal. Para los flujos de entrada de cada una de las secciones se tuvo en cuenta el promedio mensual de precipitación efectiva (p.e.-mm) sobre cada sección, más el flujo proveniente de cada sección.

Los datos de precipitación media mensual (P) fueron tomados de la estación hidrometeorológica El Dorado (IDEAM) entre el período de enero 1972 a diciembre 2010, que fueron utilizados para elaborar la caracterización climática de la zona del humedal y para alimentar el modelo de simulación.

Salidas

Para la predicción de las pérdidas de agua por evapotranspiración para cada sección del humedal se utilizó la relación planteada por Kadlec (1990, 1994) y Werner & Kadlec (1996), la cual se basa en la determinación de las tendencias de evapotranspiración para sistemas de tratamiento en humedales, entendiéndose que la evapotranspiración real (ET) es el volumen de agua que realmente sale del sistema en una unidad de tiempo dependiendo de que exista suficiente agua disponible para evaporar.

$$ET = K_e \cdot ETF \cdot SA \quad (4)$$

Donde:

K_e :	Constante de evapotranspiración (mm/mes)
ETF:	Factor de corrección
SA:	Superficie de la sección (m ²)

Supuestos del modelo

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

- En cada una de las secciones del humedal, se asume su profundidad media.
- El flujo de agua al humedal proviene básicamente de la descarga de la cuenca aferente y de la precipitación efectiva en cada una de las secciones.
- La descarga de la cuenca aferente se calculó con base en la relación existente entre precipitación y área en km² de la cuenca

aferente (Håkanson & Petres, 1995).

- No se tienen en cuenta los planos de desborde del humedal, debido a la construcción de canales perimetrales en los dos primeros tercios y las obras de infraestructura de terraplenes, en el tercio bajo –calle 64, costado sur– y el terraplén con ciclo vía del jarillón del río Bogotá; ambas barreras artificiales que impiden la inundación, generando un sistema hidrológico de volumen controlado.
- Todas las simulaciones se realizaron teniendo en cuenta los promedios mensuales y anuales de datos climatológicos entre los años 1972-2010.
- Dadas las condiciones arcillosas en el sustrato de la zona (Van der Hamen, 1995; Muñoz & Jaramillo, 2005), se asume que la infiltración es mínima y que no existen flujos de aguas subterráneas hacia el cuerpo de agua del humedal.

El modelo de simulación hidrológica

El modelo se elaboró para determinar el comportamiento hidrológico (Wu & Marceau, 2002) del humedal en condiciones climáticas normales. Sin embargo, es posible manipular cada una de las variables a criterio del investigador para determinar qué podría suceder en épocas de sequía o con grandes precipitaciones, o si se disminuye el área del vaso de cada sección con relación al tiempo hidráulico de retención (THR). Estas operaciones permiten verificar la sensibilidad del modelo. Se trata de obtener respuestas de las variables considerando los cambios inducidos en factores clave o variables (Wetzel, 2001; Fisher & Acreman, 2004; Scheffer & Nes, 2007).

El tiempo hidráulico de retención (THR) es considerado como uno de los factores críticos para explicar la retención de nutrientes en humedales (Knight, 2000; Werner & Kadlec, 2000). Es importante porque aumenta la cantidad de tiempo para la transformación, adsorción y absorción de nutrientes al interior del humedal. El tiempo de residencia hidráulica se define como la medida del tiempo de retención, de un volumen de agua en un humedal antes de salir del sistema (Werner & Kadlec, 2000). El THR se encuentra determinado por dos factores fundamentales, la hidrología –la distribución temporal de las entradas y salidas– y el sistema hidráulico –es decir, los patrones de flujo que se desarrollan en la cuenca durante un evento– (Tuttle *et al.*, 2008).

Tabla 4.2. Variables del modelo, unidades y fuentes.

NOMBRE	VARIABLES E ÍNDICES	VALORES/ UNIDADES	FUENTE
Sección 1	Aporte cuenca aferente (Canales los Ángeles + Carmelo) = Flujo de entrada	m ³ /mes	Cálculo a partir de datos de IDEAM Estimación
	Precipitación efectiva(área de sección)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Evapotranspiración(ET-Sec 1)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Profundidad	m /mes	Datos de campo U. Nacional – Adesa/simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	días/año	Simulación
	Área	m ² /mes	Datos de campo U. Nacional / Simulación
	Volumen	m ³ /mes	Simulación
	Salida a Sección 2	m ³ /mes	Simulación
Sección 2	Flujo entrada Sección 1	promedio m ³ /año	Simulación
	Precipitación efectiva	mm/mes	Fuente IDEAM
	Evapotranspiración (ET- Sec 2)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Profundidad - Sección 2	m /mes	Datos de campo U. Nacional – Adesa/simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	días/año	Simulación
	Área	m ² /mes	Datos de campo U. Nacional / Simulación
	Volumen	m ³ /mes	Simulación
Salida a Sección 3	m ³ /mes	Simulación	
Sección 3	Flujo entrada Sección 2	m ³ /mes	Simulación
	Precipitación efectiva	mm/mes	Fuente IDEAM
	Evapotranspiración (ET- Sec 3)	mm/mes	Fuente IDEAM
	Profundidad	m /mes	Datos de campo U. Nacional – Adesa /simulación
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	días/año	Simulación
	Área	m ² /mes	Datos de campo U. Nacional / Simulación
	Volumen	m ³ /mes	Simulación
Salida a río Bogotá	m ³ /mes	Simulación	

Fuente: Elaboración propia

El THR permite explicar el comportamiento de los ciclos biogeoquímicos en sistemas acuáticos al establecer una relación dependiente entre los procesos físicos de transporte y de mezcla. Estos procesos permiten determinar la ubicación espacial de las sustancias disueltas y suspendidas en un determinado instante de tiempo (Werner & Kadlec, 2000). El aumento del THR promueve el asentamiento de sedimentos, que constituyen un importante vector para el fósforo y otros elementos. En la construcción de humedales para tratamiento de aguas residuales el THR es una de las variables principales utilizadas para determinar el diseño de un humedal artificial. El THR puede calcularse de acuerdo con los lineamientos de Almendinger (1999), Håkanson (1999) y Werner & Kadlec (1996).

$$\text{THR} = V = (L \cdot W \cdot D) / (Q \cdot T^{-1}) \quad (5)$$

Donde:

- V: Volumen de la sección
- T: Duración del flujo
- L: Longitud del humedal
- W: Ancho promedio
- D: Profundidad promedio
- Q: Caudal que ingresa a la sección

A partir de esta ecuación se simplifica el procedimiento y de acuerdo con Håkanson & Boulion (2002), Håkanson (2004) y Zhang & Mitsch (2005), el TRH se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{THR} = V/Q \quad (6)$$

Donde:

- THR: Tiempo hidráulico de retención (días/año)
- V: Volumen de agua (m^3)
- Q: Caudal promedio anual ($\text{m}^3/\text{año}$), en términos de entradas y salidas del sistema.

Método de simulación

Las simulaciones se realizaron usando Stella 9.1®, software que ha sido utilizado para realizar modelos hidrológicos y ecológicos (Duever *et al.*, 1988; Mancera *et al.*, 2003; Zhang & Mitsch, 2005; Håkanson, 2005) entre otros. Se utilizó el sistema de interfaz de Stella para simular cambios mensuales y condiciones extremas de mayor inundación y menor precipitación. De igual manera, para realizar los análisis de sensibilidad del modelo se relacionó la precipitación con las variables dependientes, como volumen, THR y profundidad.

Con el fin de verificar el carácter determinístico y realizar la validación del modelo se realizaron regresiones simples lineares (Legendre & Legendre, 1998), para comparar los datos calculados con los resultados modelados. Con el fin de evaluar la fortaleza del modelo, se determinó el error relativo (Bryhn & Håkanson, 2007) y para comprobar el carácter predictivo se realizó el análisis de sensibilidad del modelo (Jørgensen & Bendoricchio 2001; Håkanson, 2004)

91

Submodelo de descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque

Para la predicción de los aportes de agua provenientes de la cuenca aferente del humedal se ajustó el submodelo de descarga (Håkanson & Peters, 1995). Se calculó la descarga media mensual (Q), que llega al humedal Jaboque a través de los canales Carmelo y Los Ángeles, para lo cual se tuvieron en cuenta las siguientes variables: área de la cuenca aferente (5,8 km²), escorrentía (0,01 m³/km²) –calculados en el marco de la elaboración de los estudios técnicos para la restauración hidrodinámica y ecológica del humedal Jaboque (Universidad Javeriana, 2007)– y precipitación media anual (P), a partir de los datos de precipitación de la estación meteorológica El Dorado del IDEAM (1979-2010).

$$Q = ADA \cdot (P/817,7) \cdot 0,01 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \quad (7)$$

$$Q = 5,8 \text{ km}^2 (P/817.7) \cdot 0,01 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \quad (8)$$

Donde:

- Q: Caudal de la cuenca aferente (m^3/mes) (tabla 4.3)
- ADA: Área de la cuenca aferente
- P: Precipitación media anual

Resultados

El modelo permite simular las fluctuaciones de volumen del humedal con relación a los flujos de entrada y flujos de salida, provenientes de la cuenca aferente y la precipitación efectiva para cada una de las secciones. Muestra que el hidropereodo tiene una alta dependencia de los aportes de la cuenca aferente, que a su vez dependen fundamentalmente de las condiciones climáticas de la zona. Se presentan dos incrementos fuertes, uno en abril-mayo y otro en octubre-noviembre. Los descensos se presentan en diciembre-enero y julio-agosto, comportamiento típico de la zona altoandina en Colombia. De igual manera, se determinó y simuló el tiempo hidráulico de retención para cada sección. El análisis de sensibilidad del modelo demostró una fuerte relación entre la precipitación y los THR y así mismo entre el volumen de cada sección y el THR.

Descarga de la cuenca aferente

El comportamiento de la descarga de la cuenca aferente del humedal (Q : m^3/mes) se asimila al patrón pluviométrico de la zona (figura 4.1 y tabla 4.3), demostrándose la relación existente entre la magnitud de las descargas en m^3 y la precipitación en mm entre los años 1990 y 2010. Se evidencia que las variaciones de la descarga de la cuenca aferente responden al comportamiento de la precipitación; valores extremos de precipitación corresponden también a montos extremos en los caudales.

En los últimos treinta nueve años se han presentado variaciones significativas en el comportamiento de la precipitación que obviamente afectan la descarga de la cuenca aferente al humedal. Los años con

mayores precipitaciones fueron 1979, 1984, 1990, 1995, 1999, 2004, 2006, 2008 y 2010, en los que la precipitación promedio anual fue superior a 920 mm y llegó hasta 1250 mm, con descargas superiores a 1 933 408 m³/año y de hasta 2 471 654 m³/año.

Los años con menores precipitaciones fueron 1977, 1978, 1980, 1985, 1989, 1996 y 2001, en los que la precipitación promedio anual osciló entre 598,1 mm y 683,3 mm, con descargas que fluctuaron desde 1 206 273 m³/año hasta 1 432 008 m³/año.

El promedio anual de la precipitación para este periodo fue de 828 86 mm y el promedio de la descarga estimada de la cuenca aferente fue 1 718 646 m³/año, lo cual evidencia un alta variabilidad entre los valores extremos de la precipitación y la descarga de agua al humedal Jaboque.

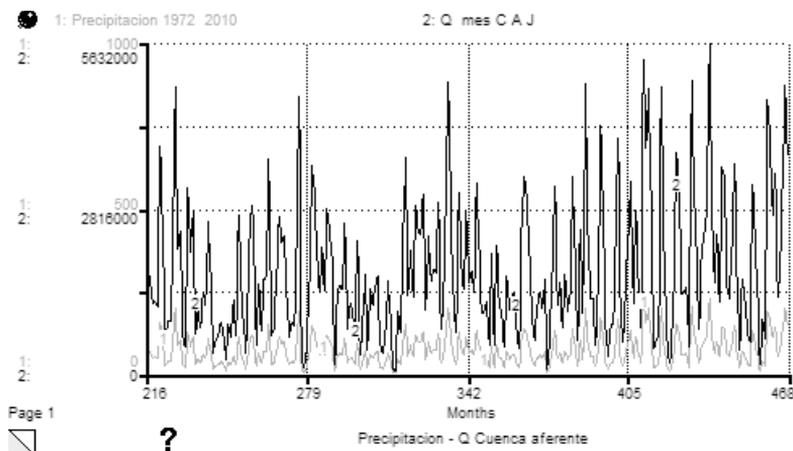


Figura 4.1. Resultados de la estimación de la precipitación y la modelación de la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque. Promedio multianual, años 1990-2010.

1: Precipitación (mm). 2: Q - Descarga de la cuenca aferente (m³/mes)

Fuente: Elaboración propia

Variabilidad según valores extremos

Se puede inferir una alta influencia de los valores extremos; el menor valor de precipitación anual se presentó en 1992 y fue 432,7 mm/año, correspondiendo con una descarga calculada de la cuenca aferente de

905225 m³/año, que es el valor más bajo en los últimos 39 años. Por su parte, 1250,5 mm fue el valor más alto, registrado en 2010, con una descarga de la cuenca aferente de 2471634 m³/año. Estos valores afectan de manera significativa la dinámica hidrológica del humedal, modificando el tiempo hidráulico de retención (Carpenter *et al.*, 2008), que incide en los procesos geoquímicos y biológicos del humedal. Una situación parecida se presenta actualmente en algunos lagos europeos y se asocia con fenómenos de cambio climático (Håkanson *et al.*, 2003).

En la figura 4.2 y la tabla 4.3 se muestran los resultados de la modelación de la precipitación y la descarga de la cuenca aferente para el periodo de 1992 correspondiente al año de máxima sequía, típico representante del fenómeno de El Niño. Se puede apreciar que la curva de la marcha de la precipitación coincide con la descarga a la cuenca aferente.

Predomina un largo periodo seco desde enero hasta la mitad del mes de octubre, mes a partir del cual se incrementa súbitamente la precipitación hasta noviembre, lo cual obviamente se refleja en el comportamiento de la descarga de la cuenca aferente.

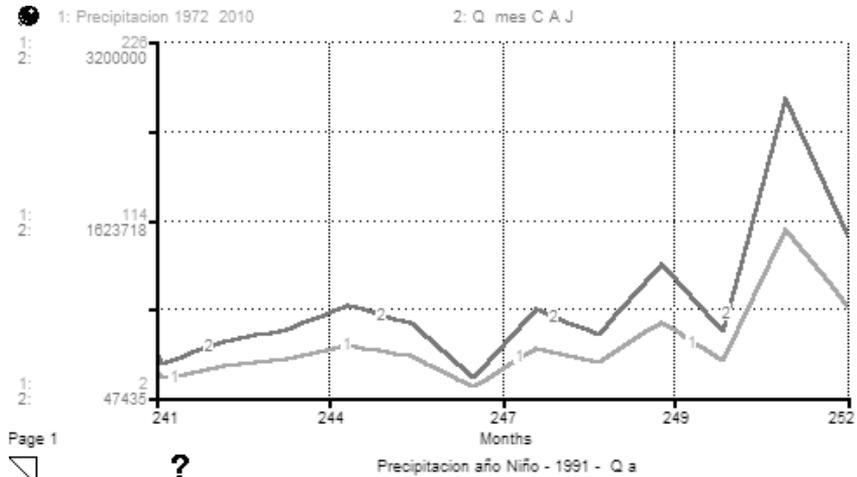
En la figura 4.3 y la tabla 4.11 se muestran los resultados de la modelación de precipitación en mm y la descarga de la cuenca aferente para el año 2010, correspondiente al año 'Niña' de máxima precipitación. Se puede apreciar que la curva de la marcha de la precipitación coincide con la descarga a la cuenca aferente durante los meses de diciembre-enero, febrero-marzo y agosto-septiembre, y las mayores descargas en los meses de abril, mayo, junio, octubre y noviembre.

Comparando las curvas de descarga al humedal en ambas situaciones, se puede apreciar que durante un fenómeno de La Niña extremo la descarga se aumenta aproximadamente en un 25% con relación al promedio histórico y de 150% con relación a un fenómeno de El Niño. Es decir que el hidropериodo se caracteriza por una alta variabilidad, dependiendo de las condiciones climatológicas globales. Esta situación confirma que los fenómenos climáticos globales afectan fenómenos físicos locales de suma importancia, como es el comportamiento del hidropериodo en el humedal, afectando los procesos biogeoquímicos y biológicos (Håkanson *et al.*, 2003)

Tabla 4.3. Precipitación mensual y anual. Descarga anual estimada, años 1979-2010.

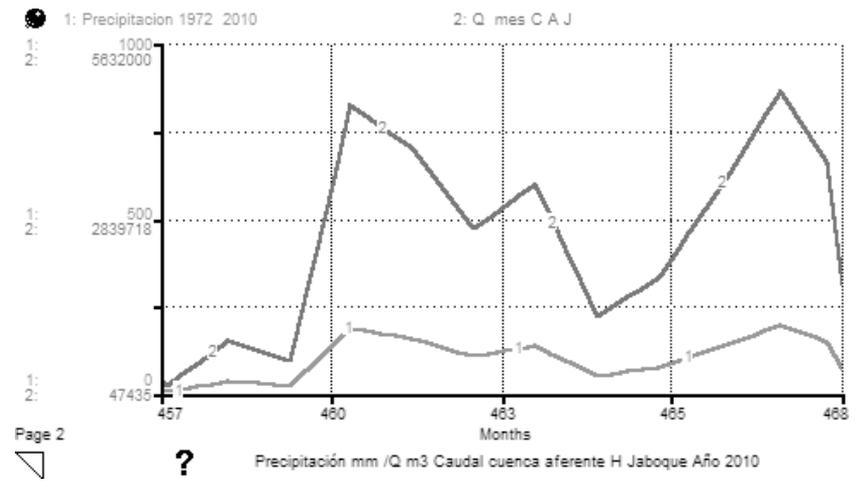
Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prec anual/mm	Descarga anual estimada m ³ /año
1972	72,1	21,9	57,2	159,4	118,1	58,1	36,7	39,6	17,4	71,6	101,1	28,5	781,7	1626.326,92
1973	2,9	3,8	50,1	39,3	75	59,5	55,1	57,4	130,3	115,4	105,8	117,3	811,9	1.689.158,00
1974	79,6	100	28,5	83,8	61,3	65,5	15,8	46,8	91,8	100,3	150,6	24	848	1.763.223,92
1975	5,5	32,2	130	57,9	105,3	56,4	60,3	52,2	55,1	160,8	70,7	77,9	864,3	1.798.176,08
1976	31,2	59,9	118,3	122,1	104,4	58,9	17,4	34,7	47,3	140	81,6	49,5	865,3	1.800.256,58
1977	9,1	20,4	72,2	86,4	34,1	15,9	52	52,9	115,7	120,4	82,3	26,9	688,3	1.432.008,00
1978	5,6	25	55,7	121,4	73,5	71,2	52,9	12,9	66,4	102,9	47,4	30,2	665,1	1.383.740,33
1979	27,5	44,8	55	137	84,5	77,5	64,8	114	86,3	133	142	25,4	991,7	2.063.231,83
1980	28,2	63,4	28,9	46	39,5	76,9	10,6	40,3	49,3	62,1	50,7	102	598,1	1.245.387,25
1981	2,5	27,3	13,7	174,6	202,1	78,1	23,7	34,4	51,1	113,4	111,8	25,5	858,2	1.785.485,17
1982	78,5	43,3	86,2	218,1	81,1	15,9	12,8	21,4	14,2	112,7	63,6	44,6	792,4	1.648.588,25
1983	6	18,4	124,4	207,3	120,4	50,3	45,7	34,9	29,3	77	43	132,6	889,3	1.850.188,58
1984	99,6	55,2	65,7	140,1	118	90,5	35,5	73,4	74,9	50,4	86,3	40,2	929,8	1.933.408,58
1985	2,8	5,1	28,3	31,4	118,4	25,3	44,6	95,9	157,9	79,8	73,8	34,7	698	1.452.189,00
1986		112,2	61,2	96,5	74	95,6	36,2	38,3	56,9	217,5	122,3	4	914,7	1.903.033,33
1987	42,8	32,2	25,7	95	113,2	13,8	91,2	25	69,5	148,7	64,2	29,2	750,5	1.467.808,69
1988	13,8	50,5	12,2	143,9	58,7	68,5	46,9	73,2	119,1	117,9	151	78,8	934,5	1.944.227,17
1989	11,7	41	154	32,9	53,8	48,2	39,1	34,9	84,8	82,1	30,7	66,2	679	1.412.659,50
1990	48,3	48,9	45,6	155,7	102,5	21,9	35,9	35,8	75,7	195,5	85	97,4	948,2	1.972.730,00
1991	25,5	18,3	126,3	82,6	110	27,1	43,4	31	54,2	47,1	103,9	64,1	733,5	1.526.046,83
1992	14	22,1	26,2	35	28,4	8,8	33,3	24,5	49,7	25,4	108	59	434,7	905.225,50
1993	34,7	13,8	78,6	114,2	106,3	19,7	60,6	29,2	63,8	67,5	146,9	25,5	760,8	1.582.844,42
1994	30,6	65,6	107,1	89,4	94,2	55	24,4	34,5	32,6	93,9	189,1	9,3	825,7	1.715.996,50
1995	3,4	20,7	68,1	142,3	126,2	81,1	55,1	86,7	56,6	112	97,3	78,4	927,9	1.930.496,00
1996	6,5	53,3	60	57,5	102,5	30,6	47,7	43,6	28,7	90,6	12,6	34,7	568,3	1.182.348,25
1997	67,3	16,1	58	46,4	59,7	66	18,8	14	25,1	63	38,1	2,7	475,2	988.653,67
1998	19	41,8	27,8	96,2	147,5	52,7	84,1	51,6	115,2	96,3	94,7	122,7	932,5	1.940.066,25
1999	43,4	93,8	62,7	71,2	68,6	116,9	29,8	51,3	140,3	199,3	101,9	47,9	1027,1	2.136.881,50
2000	28,3	123,4	73,9	57,5	110,9	61,6	70,1	55,9	130,6	90,7	41,5	41,1	885,5	1.842.282,75
2001	49,3	19,3	81,9	19,4	87	47,2	40,5	17,7	66,4	43,1	54,2	53,8	579,8	1.206.273,83
2002	26,8	16,8	111,5	134,8	116,3	74,8	39,7	22,5	45,5	55,7	44	64,1	752,5	1.565.576,33
2003	3	24,1	75,4	128	46,4	61,5	31,1	67,6	42,6	54,9	134,8	78,8	748,2	1.556.630,17
2004	22	98,7	40,8	197,7	101,4	51,1	51,2	19,7	59	170	118,6	31,9	962,1	2.001.649,00
2005	11,1	33,2	33,7	93,6	161,3	36,6	21,4	66	97,8	131,3	47,8	111,2	845	1.758.022,58
2006	58,1	31,7	215	154	195	115	16,5	22,7	25,1	196	91,1	30,2	1149,9	2.391.264,25
2007	7,6	10,9	62	150,6	125,4	54,2	56,1	58,9	18	200,6	117,4	82,9	944,6	1.965.240,25
2008	30,5	84,6	93,8	113	226	120	61,5	94,7	48,8	141	134	60	1206,8	2.510.747,42
2009	51,4	91,4	142,8	55,2	15,7	64,1	53,2	28,4	21,5	129,1	95,1	58,4	806,3	1.677.507,08
2010	6,3	36,6	23,2	187	160	108	137	51,8	76,4	133	197	135	1250,5	2.471.634,08
Promedio	28,668	44,15	71,31	107	100,7	58,97	44,93	45,89	66,43	111,3	93,12	57,09	828,692	1.718.646,51

Fuente: Elaboración propia



Page 1
▾

Figura 4.2. Modelación de la descarga de la cuenca aferente al humedal Jaboque, año 1992 (fenómeno de El Niño).
1: Precipitación (mm). 2: Q - Descarga cuenca aferente (m3/mes)
Fuente: Elaboración propia



Page 2
▾

Figura 4.3. Modelación de la descarga de la cuenca aferente del humedal Jaboque, año 2010 (fenómeno de La Niña).
1: Precipitación (mm). 2: Q - Descarga cuenca aferente (m³/mes)
Fuente: Elaboración propia

El comportamiento hidrológico, años 2004-2005

El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables. Para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y las de estado del modelo, se desarrollaron las respectivas ecuaciones (anexo B1). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones del volumen (m^3) de agua del humedal en sus tres secciones, con relación a los flujos de entrada, y en especial al flujo proveniente de los canales Ángeles y Carmelo, que recogen las aguas provenientes de sus respectivas cuencas aferentes en la sección 1 (figura 4.4), así como los flujos derivados de la precipitación efectiva (mm), para cada una de sus secciones, durante el periodo comprendido entre el año 2004 y 2005, para un total de 24 meses. Se determinó el THR para cada una de las secciones y de igual manera se estableció para la totalidad del humedal Jaboque.

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

El volumen del tercio alto depende fundamentalmente de la descarga de la cuenca aferente; esto en parte porque las estructuras que recogen el flujo proveniente de los canales Carmelo y Los Ángeles se encuentran encauzadas por estructuras perimetrales que dirigen los excesos de flujo hacia la parte media del humedal.

En la figura 4.4 y las tablas 4.9 y 4.11 se muestran los resultados de la simulación de la descarga de la cuenca aferente y el comportamiento del volumen de la sección 1, realizada para los años 2004 y 2005. En el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril ($66\,137\,m^3$), mayo ($70\,643\,m^3$), octubre ($72\,447\,m^3$) y noviembre ($67\,643\,m^3$), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero ($50\,300\,m^3$), febrero ($53\,976\,m^3$) y diciembre ($61\,500\,m^3$), meses con menores valores en precipitación. En el año 2005 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril ($66\,400\,m^3$), mayo ($74\,643\,m^3$), octubre ($71\,888\,m^3$) y noviembre $70\,500\,m^3$, correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron

enero (58300m^3), febrero (62551m^3) y agosto (59200m^3), meses con menores valores en precipitación.

Se puede observar que aunque las dos curvas representan el hidroperiodo en la sección 1, se distinguen desfases tanto en los picos como en los valles; esto se debe en principio a la influencia que tiene el tiempo hidráulico de retención (THR) en el comportamiento del volumen de la sección.

Se realizó una comparación entre el conjunto de datos estimados y simulados, mediante un análisis de regresión entre los dos grupos. Se encontró una buena correspondencia:

$$r^2=0,704; y=0,8692(x)+23\,033 \text{ (figura 4.5, tablas 4.9 y 4.11).}$$

Existe una diferencia entre los valores estimados y observados, que podría deberse en parte a las alteraciones morfométricas que ha sufrido esta sección y en especial a la construcción de los canales perimetrales y de las materas centrales, que originaron una morfometría compleja la sección 1. Se logra que las variaciones de volumen sean poco apreciables, de acuerdo con el propósito de eliminar el riesgo por inundación sobre las áreas aledañas. Las diferencias entre el comportamiento del caudal y el volumen de esta sección se deben en parte al tiempo de THR de 15 días promedio, que por otra parte es suficiente para el tratamiento de aguas residuales según Zhang & Mitsch (2005).

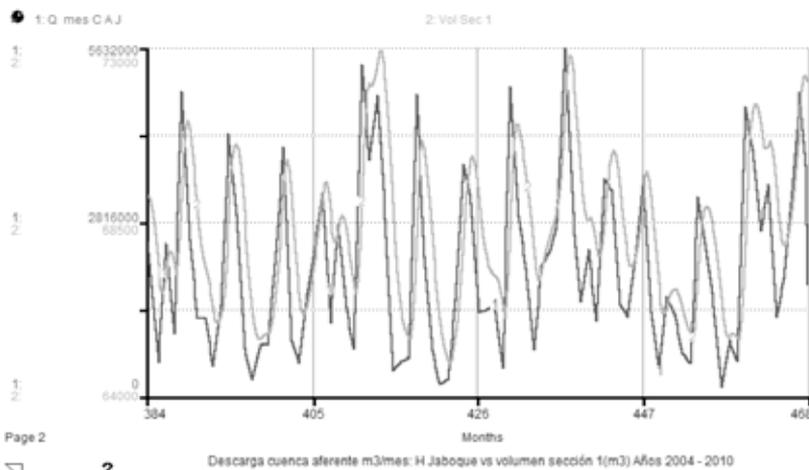


Figura 4.4. Descarga cuenca aferente humedal Jaboque vs. volumen en sección 1, años 2004-2005.

1: Q - Descarga de la cuenca aferente (m^3/mes). 2: Variación mensual del volumen (m^3/mes)

Fuente: Elaboración propia

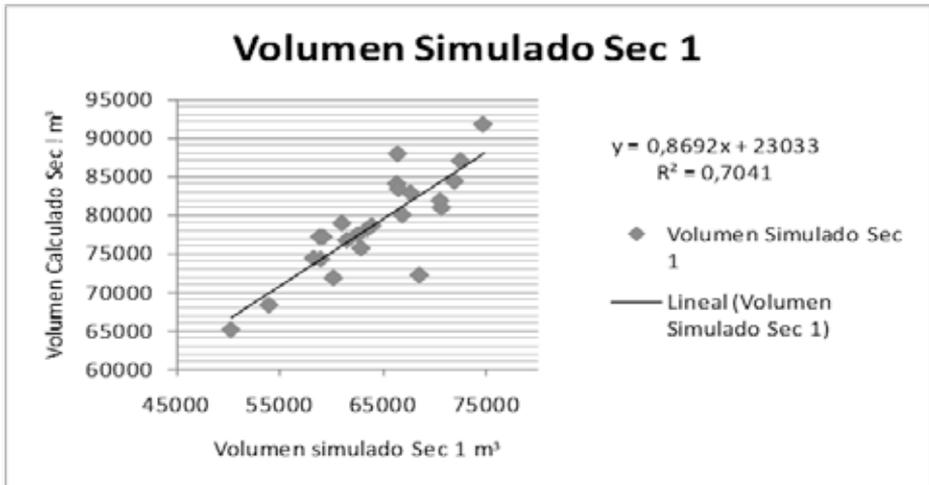


Figura 4.5. Relación volumen calculado vs. volumen simulado en sección 1.
Fuente: Elaboración propia

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

Esta sección, en comparación con el tercio alto, se diferencia porque se encuentra medianamente intervenida por obras civiles y recibe agua por escurrimiento y a través de pequeñas aberturas localizadas en los camellones que delimitan la sección.

En el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (204 071 m³), mayo (197 066 m³), octubre (210 747 m³) y noviembre (201 478 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (161 556 m³), febrero (198 801 m³), agosto (176 705 m³) y diciembre (187 598 m³), meses con menores valores en precipitación. En el año 2005 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (212 779 m³), mayo (223 328 m³), septiembre (191 882 m³), octubre (204 788 m³) y noviembre (203 130 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (182 411 m³), febrero (189 295 m³), agosto (188 581 m³) y diciembre (190 496 m³), meses con menores valores en precipitación.

En la descarga proveniente del tercio alto, las variaciones del volumen son perceptibles, presentándose algunas inundaciones en los barrios de invasión (ADESA, 2004); sin embargo, su intensidad se ha visto reducida en el flanco sur debido a la construcción de un canal interceptor que recoge las aguas de escorrentía provenientes del costado sur del humedal. Comparados los grupos de datos referentes al volumen estimado y al volumen simulado se encontró una correlación aceptable, con un nivel de correspondencia de:

$$r^2 = 0,7181; y = 0,3857(x) + 84833 \text{ (figura 4.6 y tablas 4.9 y 4.11)}$$

Las variaciones entre el volumen calculado y el volumen simulado en esta sección, se pueden deber en parte a las discontinuidades batimétricas debidas a la construcción de jarillones posiblemente de origen precolombino (Van der Hammen, 2003; Muñoz, 2004) patrón que se replicó en el tercio bajo, ocasionando múltiples puntos de acumulación y transporte de sedimentos (Håkanson & Peters, 1995), lo cual dificulta establecer una relación 1:1 entre profundidad y volumen. Al igual, que el tercio alto, el volumen de agua de la sección depende en gran medida de los aportes de cuenca aferente que son transportados desde el tercio alto y de la precipitación.

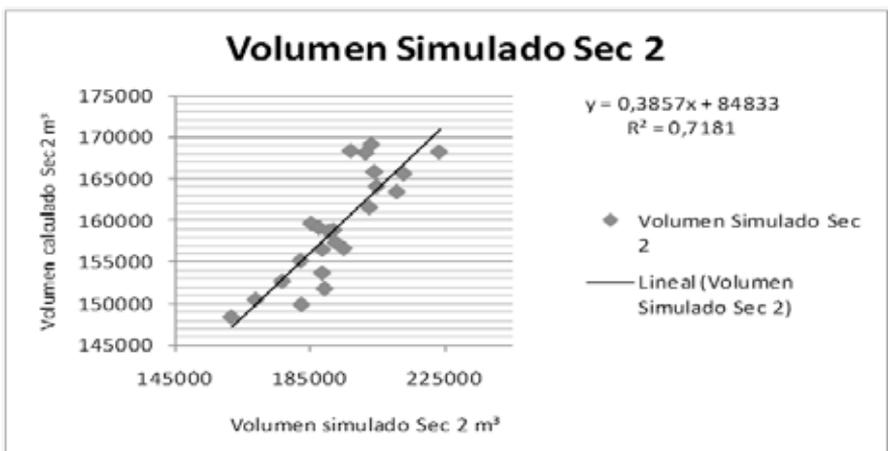


Figura 4.4. Descarga cuenca aferente humedal Jaboque vs. volumen en sección 1, años 2004-2005.
 1: Q - Descarga de la cuenca aferente (m3/mes). 2: Variación mensual del volumen (m3/mes)
Fuente: Elaboración propia

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

Esta sección, a diferencia de las dos primeras, es la de mayor extensión del sistema, con 315308,4 m² y un volumen de agua de 230175 m³ (Izquierdo, 2005); muestra capacidad para almacenar agua y amortiguar crecientes en épocas de altas descargas.

En el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (245155 m³), mayo (236697 m³), junio (222476 m³), octubre (253216 m³), (210747 m³), noviembre (242024 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (193820 m³), febrero (202537 m³) y agosto (212111 m³), meses con menores valores en precipitación. En el año 2005 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (255669 m³), mayo (265992 m³), octubre (246020 m³) y noviembre (239621 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (219001 m³), febrero (227314 m³), agosto (226451 m³) y diciembre (223067 m³), meses con menores valores en precipitación. Al igual que en las secciones anteriores, se encontró una buena correspondencia entre los valores calculados y simulados, con una correspondencia de:

$$r^2=0,7125; y=0,4627(x)+84609 \text{ (figura 4.7 y tablas 4.9 y 4.11)}$$

Persiste una diferencia del 29% entre los valores calculados y simulados; estos obedecen a las complejas condiciones morfométricas, que a su vez dependen de una batimetría irregular coadyuvada por la construcción de diques –jarillones especialmente–.

Error relativo

Para verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn & Håkanson, 2007) para cada una de las secciones, para lo cual se compararon los promedios de los valores de los volúmenes calculados para cada sección con los valores

de volumen simulados. Los resultados anteriores permiten reafirmar la bondad del carácter predictivo del modelo; sin embargo, es importante señalar que si bien el valor promedio de la desviación estándar del error relativo sin ser cercanos a cero (tablas 4.4 y 4.10), en la primera sección puede existir una tendencia a la sobrestimación de las predicciones y en la segunda y tercera secciones a una subestimación, debido probablemente a las complejas condiciones morfométricas de las secciones.

Descarga al río Bogotá

La descarga del volumen total de agua del humedal hacia el río Bogotá tiene lugar a través de tres salidas o desfuegos, dos localizadas en la parte occidental del tercio alto, en el jarillón que separa al humedal del río Bogotá, y otra construida en el margen norte de esta misma sección y que hace parte del jarillón y ciclo vía, que aísla el humedal de su antigua área natural de desborde. Por estos tres rebosaderos el humedal entrega aguas al río Bogotá. En épocas de altas precipitaciones la descarga se aumenta, controlándose así las posibles inundaciones en este tercio. Una comparación entre los flujos de entrada y salida del humedal Jaboque (figura 4.8 y tabla 4.11) muestran una diferencia bruta de 82165 m³/mes para un total anual de 985980 m³/año, con lo cual el promedio del THR es de 93 días/año, es decir que el humedal, en las condiciones actuales, recambia su volumen cuatro veces al año. Las diferencias entre el patrón de comportamiento del volumen con relación a los flujos de entrada se explican por el THR de la sección.

Tabla 4.4. Comparación del error relativo entre las secciones del humedal Jaboque.

HUMEDAL JABOQUE	Vol Sección 1	Vol Sección 2	Vol Sección 3
Error relativo	0,23	- 0,17	- 0,17
Desviación estándar	0,06	0,04	0,03
r ²	0,704	0,718	0,713

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.8 y en la tabla 4.11 se muestran los resultados de la modelación del comportamiento de la descarga de la cuenca aferente, la descarga al río Bogotá y del volumen de la tercera sección. Nótese que existe coincidencia entre el patrón de picos y valles de cada curva tanto para los meses de mayores precipitaciones como los más secos. También se puede apreciar que no existe coincidencia temporal entre la curva de descarga de la cuenca aferente y el comportamiento del volumen de la tercera sección, con la descarga al río Bogotá, influida especialmente por el THR.

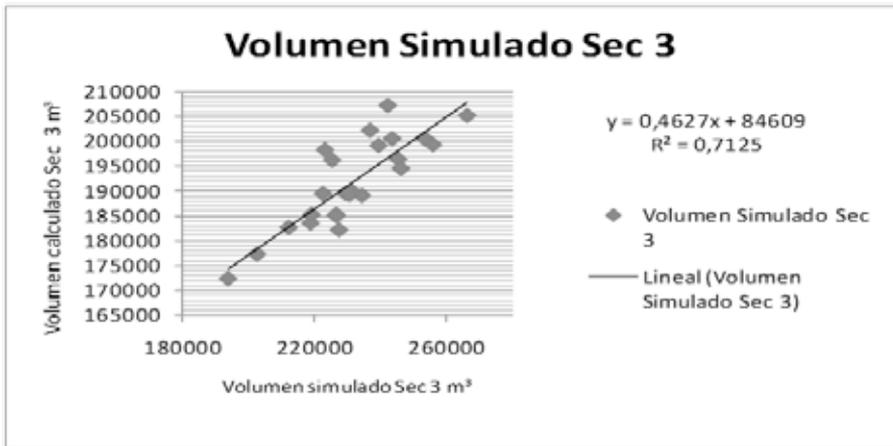


Figura 4.7. Relación volumen calculado vs. volumen simulado en sección 3.

Fuente: Elaboración propia

Tiempo Hidráulico de Retención

Cada sección tiene un comportamiento de tiempo hidráulico de retención (THR) diferente, debido principalmente a las características morfométricas: volumen, área, profundidad de la cubeta, patrón irregular del fondo, los diques artificiales de origen precolombino y de la colonia. El THR mensual promedio del primer tercio corresponde a 15 días, tiempo sugerido óptimo para tratamiento de aguas residuales municipales. Para la sección intermedia el promedio es de 36 días/año y tercer tercio de 42 días (figura 4.9 y tabla 4.11) respectivamente, cifras que superan los valores mínimos recomendados para épocas de verano según Zhang & Mitsch (2005) en lagunas facultativas

de tratamiento de aguas residuales. En principio, este resultado demuestra la capacidad depuradora de cada una de las secciones, desde la perspectiva del THR. Debido a la influencia que tiene el hidropериодо en el comportamiento del THR, se modelaron dos periodos extremos de precipitación, uno seco correspondiente al fenómeno de El Niño (año 1992) y uno de máximas precipitaciones, propio del fenómeno de La Niña (año 2010).

Modelación del THR en condiciones del fenómeno de El Niño

En la figura 4.10 y en la tabla 4.5 se muestran los resultados de la modelación del comportamiento de la precipitación y del THR en las tres secciones para el año 1992. El THR correspondiente a una precipitación mínima de 8,8 mm fue de 108 días/año para la primera sección y de 265 días/año y 314 días/año para la segunda y tercera sección.

Estos datos indican que a menores precipitaciones el THR aumenta, mientras que con precipitaciones de 108,8 mm en el mes de diciembre el THR en la primera sección fue de 9 días, de 22 en la segunda y 27 días/año en la tercera sección, mostrando que el THR disminuye a mayores precipitaciones. Es muy notorio que las dos últimas secciones logran mantener la función depuradora. Los resultados de la desviación estándar reflejan una tendencia hacia una alta variabilidad, por lo que es importante señalar que este comportamiento corresponde a un año atípico, como el fenómeno de El Niño del año 1992.

Modelación del THR en condiciones del fenómeno de La Niña

En la figura 4.11 y la tabla 4.6 se muestran los resultados de la modelación del comportamiento de la precipitación y del THR en las tres secciones para el año 2010, año de fenómeno de La Niña.

En los meses de enero y marzo cuando las precipitaciones fluctuaron entre 6,3 mm y 23,2 mm los tiempos hidráulicos de retención para la primera sección se estimaron entre 152 y 41 días/año, para la segunda

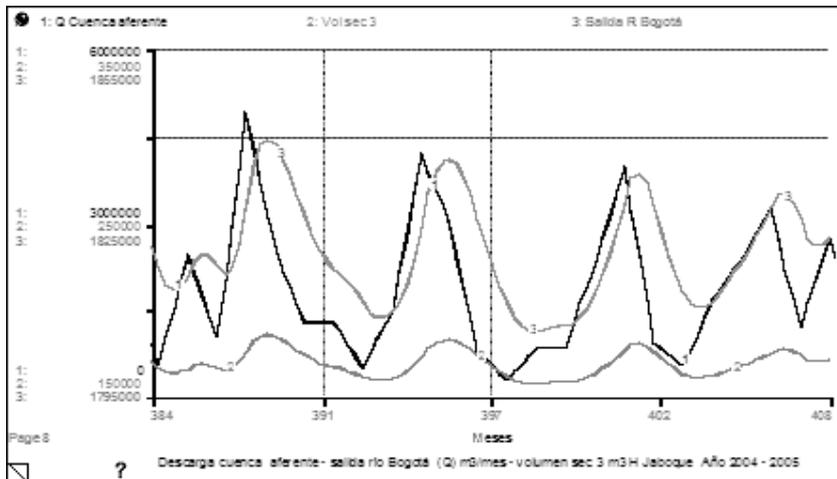


Figura 4.8. Descarga al río Bogotá vs. descarga cuenca aferente.
 1: Q Descarga de la cuenca aferente (m³/mes). 2: Salida al río Bogotá (m³/mes). 3: Volumen sección 3 (m³).
Fuente: Elaboración propia

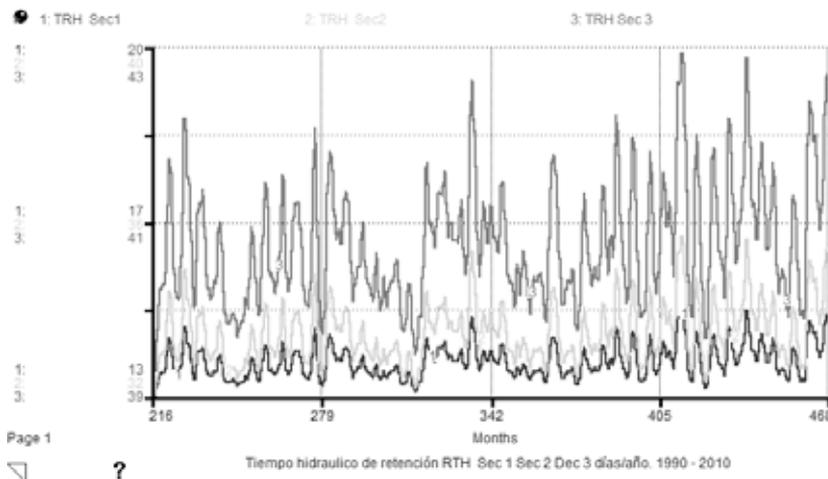


Figura 4.9. Modelación del comportamiento del THR, años 1990-2010.
 1: Tiempo hidráulico de retención sección 1 (días/año). 2: Tiempo hidráulico de retención sección 2 (días/año). 3: Tiempo hidráulico de retención sección 3 (días/año).
Fuente: Elaboración propia

sección 365 y 102 días/año y para la tercera 420 y 121 días/ año. Entre los meses de agosto y septiembre, cuando la precipitación se encontró entre 51,8mm y 76,4 mm, el THR en la sección 1 fluctuó entre 20, 13 y 5 días/año, en la segunda 48 y 32 y en la tercera 38 y 22 días/año, presentándose los valores más altos.

En los meses de mayores precipitaciones, abril, mayo, junio y julio, cuando las precipitaciones fluctuaron entre 187,3 mm y 136,7 días/año, los tiempos hidráulicos de retención para la primera sección se estimaron entre 5 y 8 días/año, para la segunda sección 13 y 24 días/año y para la tercera 16 y 22 días/año; entre los meses de octubre y noviembre, cuando la precipitación se encontró entre 132,9 mm y 136,6 mm, el THR en la sección 1 fluctuó entre 8 y 5 días/año, en la segunda 19 y 13, y en la tercera 22 y 16 días/año, presentándose los valores más bajos. Se hace así evidente la disminución del THR, indicando un mayor transporte de agua en las cubetas del humedal, como lo sugiere Jørgensen (2003), haciendo posible el lavado de nutrientes.

Se puede concluir entonces que en condiciones extremas de variabilidad climática, el tercio medio y el tercio bajo del humedal pueden desempeñar una función depuradora importante.

Tabla 4.5. Resultados de la modelación del THR, año 1992.

AÑO 1992				
MESES	PRECIPITACIÓN Promedio mensual en mm	Sección 1 THR DÍAS/AÑO	Sección 2 THR DÍAS/AÑO	Sección 2 THR DÍAS/AÑO
Enero	14	69	169	199
Febrero	22,1	43	107	127
Marzo	26,2	36	90	108
Abril	35	27	68	81
Mayo	28,4	34	83	99
Junio	8,8	108	265	314
Julio	33,3	29	71	85
Agosto	24,5	39	96	115
Septiembre	49,7	19	48	57
Octubre	25,4	38	93	111
Noviembre	108,3	9	22	27
Diciembre	59,4	17	41	49
Promedio multianual	36	39	96	114
Desviación estándar	26,60	26,56	64,94	76,52

Fuente: Elaboración propia

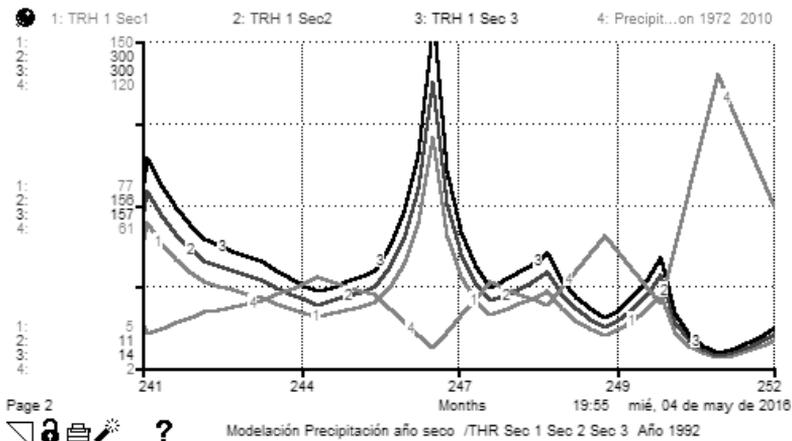


Figura 4.10. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 1992.
 1: Tiempo hidráulico de retención sección 1 (días/año). 2: Tiempo hidráulico de retención sección 2 (días/año). 3: Tiempo hidráulico de retención sección 3 (días/año). 4: Precipitación mensual (mm).
Fuente: Elaboración propia

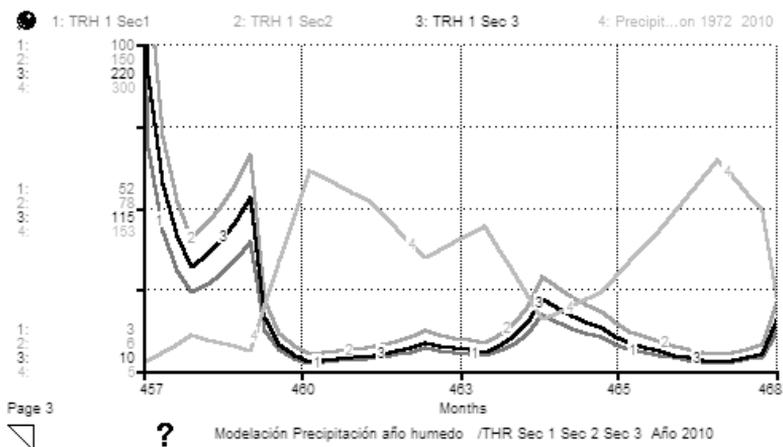


Figura 4.11. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 2010 (fenómeno de La Niña).
 1: Tiempo hidráulico de retención sección 1 (días/año). 2: Tiempo hidráulico de retención sección 2 (días/año). 3: Tiempo hidráulico de retención sección 3 (días/año). 4: Precipitación mensual (mm).
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6. Resultado de la modelación del comportamiento del THR, año 2010.

AÑO 1992				
MESES	PRECIPITACIÓN	Sección 1 THR DÍAS/AÑO	Sección 2 THR DÍAS/AÑO	Sección 3 THR DÍAS/AÑO
Enero	6,3	152	365	420
Febrero	36,6	26	65	77
Marzo	23,2	41	102	121
Abril	187,3	5	13	16
Mayo	160,3	7	16	19
Junio	107,8	10	24	28
Julio	136,7	8	19	22
Agosto	51,8	20	48	57
Septiembre	76,4	13	32	38
Octubre	132,9	8	19	22
Noviembre	196,6	5	13	16
Diciembre	72,1	15	36	42
Promedio	99	26	62	73
Desviación estándar	64,26	41,28	98,68	113,55

Fuente: Elaboración propia

Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad involucra la modelación y la simulación y muestra la manera en la cual el cambio de una variable independiente como la precipitación afecta el comportamiento de una variable dependiente como el THR. Se valida así el carácter predictivo de la modelación, mientras que las otras variables del modelo se mantienen constantes. Este tipo de análisis juega un papel determinante en todos los tipos de modelación que han sido utilizados para predecir el comportamiento de sistemas lóticos y lenticos (Jørgensen & Bendoricchio, 2001; Håkanson, 2004) .

Para el análisis de sensibilidad del modelo se tuvo en cuenta el promedio anual de precipitación en la zona (P) de la cuenca aferente, como variable independiente, y la descarga al río Bogotá (tabla

4.7) y el THR para las tres secciones como variables dependientes. Para ambos casos, las variaciones de valores de la precipitación se establecieron según clases entre 400 mm/año y 1300 mm/año, a partir del comportamiento de los valores extremos de la precipitación en la cuenca aferente, entre los años de 1990 y 2010 (tabla 4.3).

Se puede observar (figura 4.12 y tabla 4.8) que en la medida en que aumenta la precipitación aumenta de igual manera la descarga hacia el río Bogotá, indicando que el tercio bajo recibe el mayor impacto de la descarga de la cuenca aferente. Se corrobora así el supuesto de que en condiciones extremas de precipitación el humedal se convierte en el canal de paso de aguas lluvias, toda vez que el THR disminuye a medida que aumenta la velocidad de transporte de agua en la sección.

Otro aspecto que se tuvo en cuenta para verificar la sensibilidad del modelo fue relacionar la precipitación con el comportamiento del THR para cada sección. Se encontró una disminución del THR en la medida en que aumenta el caudal de descarga. Esto significa, que a medida que aumenta la descarga de la cuenca aferente los tiempos de retención disminuyen en cada sección (figuras 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15; tabla 4.8), ya que se aumenta el volumen de agua que se transporta entre cada sección del humedal, con lo cual el sistema se asemeja a un sistema de tratamiento de aguas residuales de volumen controlado. Sin embargo, y de continuar el proceso de desecación y colmatación, se reduciría de manera significativa la capacidad de almacenaje de agua, especialmente de las dos primeras secciones, por lo cual se podría inferir que el THR disminuiría significativamente para las secciones 1 y 2 y probablemente se encontraría por debajo del valor mínimo recomendado por Zhang & Mitsch (2005) para el tratamiento de aguas residuales. Si el proceso persiste, el tercio bajo recibirá el impacto de la descarga, degradando la zona más conservada del humedal.

Tabla 4.7. Variables del análisis de sensibilidad precipitación/flujo, salida río Bogotá.

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Clases : Prec/mm	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Salida río Bogotá m ³ /mes	928614	1148444	1368274	1588105	1807935	2027765	2247595	2467426	2687256	2907086

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.13 se muestra el resultado del análisis de sensibilidad para el tercio alto. Se aprecia que en la medida en que aumenta la precipitación, el THR disminuye, variando entre 30 días/año, con una precipitación anual promedio de 400 mm, a 9 días/año, con una precipitación anual promedio de 1300 mm (tablas 4.8 y 4.12), indicando que a condiciones extremas de precipitación esta sección no cumpliría con su función depuradora de aguas residuales, debido a que estaría transportando un mayor caudal de agua en menor tiempo y por lo tanto el THR sería menor.

En la figura 4.14 y en las tablas 4.8 y 4.13 se muestra el resultado del análisis de sensibilidad para el tercio medio. El THR varía entre 72 días/año a una precipitación anual promedio de 400 mm a 22 días/año a una precipitación anual promedio de 1300 mm. El resultado indica que variables morfométricas como profundidad, área de la cubeta, relación profundidad área, inciden de manera notable en el comportamiento del THR.

Tabla 4.8. Variables del análisis de sensibilidad. Precipitación sección 1, 2 y 3.

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Clases en : Precipitación/ mm	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
THR Sección 1: Días /año	30	24	20	17	15	13	12	11	10	9
THR Sección 2: Días /año	72	58	48	41	36	32	29	27	24	22
THR Sección 3: Días /año	84	68	57	49	43	38	35	32	29	27

Fuente: Elaboración propia

Para el tercio bajo o zona conservada, el análisis mostró, que se mantiene el patrón de comportamiento del THR con relación a la precipitación; varía entre 84 días/año, con una precipitación anual promedio de 400 mm, y 27 días/año, con una precipitación anual promedio de 1300 mm (figura 4.15; tablas 4.8 y 4.14). Eso se debe a las condiciones morfométricas de estas secciones, como son mayor área y profundidad promedio, que permiten a esta sección recibir mayor volumen de agua y así mismo retenerla por mayor tiempo, favoreciendo la función depuradora de la sección.

El análisis de sensibilidad reveló que la variabilidad entre valores mínimos de precipitación, por ejemplo los relacionados con el fenómeno de El Niño, implican que a promedios de precipitación entre 400 mm/año y 600 mm/año, el THR oscila entre 30 y 20 días/año para la sección 1; 72 y 48 días/año para la sección 2 y para la Sección 3 entre 84 y 57 días/año (tabla 4.8). A condiciones de alta precipitación, correspondientes al fenómeno de La Niña, entre 1200 mm/año y 1300 mm/año, el THR se reduce de manera significativa. Para la primera sección se determinaron valores de THR de 10 y 9 días/año, para la segunda de 24 y 22 días/año y para la tercera sección entre 29 y 27 días/año. Estos resultados concuerdan con las modelaciones del THR realizadas para un año Niño (1992) y un año Niña (2010), comprobando el carácter predictivo del modelo.

La comparación entre los valores extremos, se fijó entre límites de 800 mm/año y 900 mm/año, valores entre los cuales oscila el promedio multianual de la precipitación; el comportamiento del THR es de 15 y 13 días/año en la primera sección, en la segunda de 36 y 32 días/año y en la tercera entre 43 y 38 días. Se muestra que, en condiciones cercanas al monto promedio de la precipitación, la función depuradora la estarían asumiendo las secciones dos y tres del humedal, pudiéndose considerar que esta situación sería la más apropiada para el humedal. Sin embargo, la variación entre los valores extremos no genera las mejores condiciones para la preservación de la función depuradora del humedal y en especial cuando aumenta de manera drástica la precipitación, que es cuando mayor cantidad de agua se transporta a través humedal y obviamente la tercera sección recibiría el mayor impacto de la descarga.

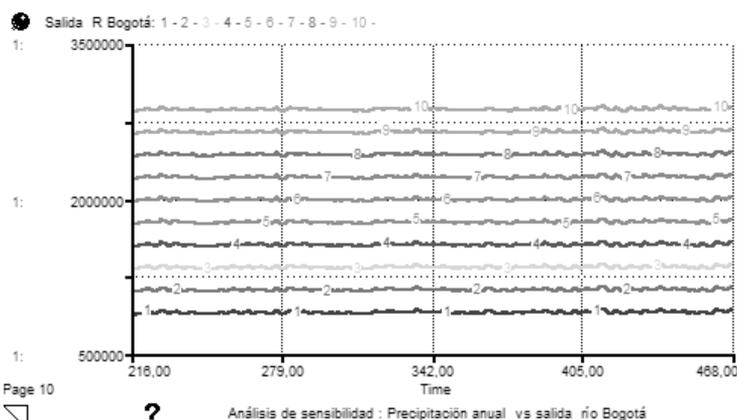


Figura 4.12. Análisis sensibilidad precipitación vs. flujo, salida río Bogotá.

Fuente: Elaboración propia

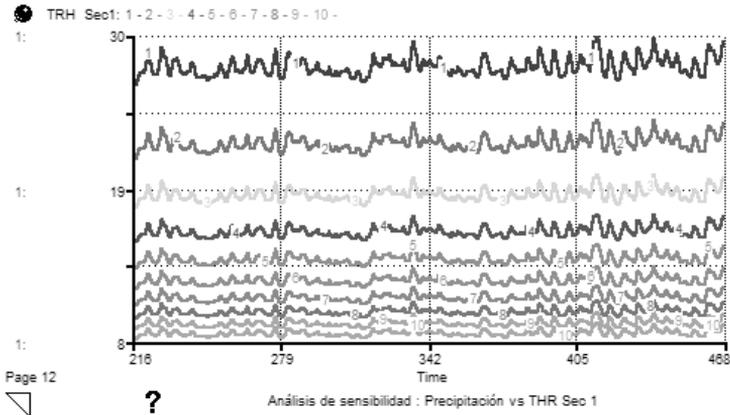


Figura 4.13. Análisis de sensibilidad precipitación vs. THR, sección 1.
Fuente: Elaboración propia

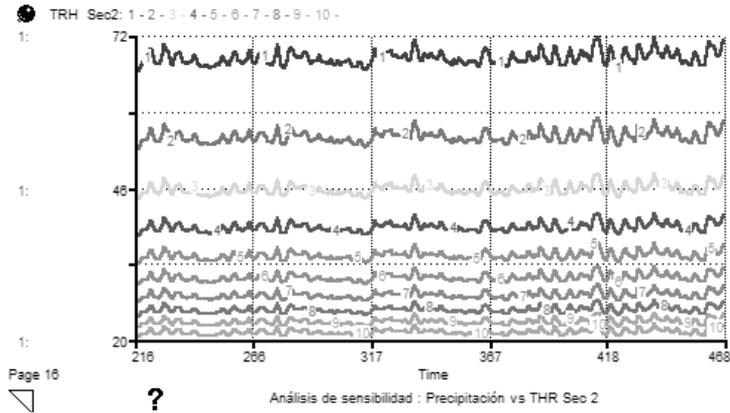


Figura 4.14. Análisis de sensibilidad precipitación vs. THR, sección 2.
Fuente: Elaboración propia

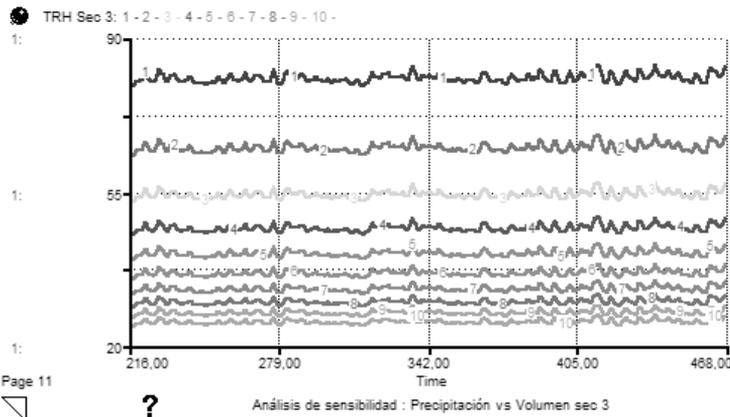


Figura 4.15. Análisis de sensibilidad precipitación vs. THR, sección 3.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Valores estimados del volumen vs. valores simulados, años 2004-2005.

MESES	Sección 1	Sección 2	Sección 3
1	0,29	-0,08	-0,11
2	0,27	-0,11	-0,13
3	0,31	-0,17	-0,18
4	0,27	-0,19	-0,2
5	0,15	-0,15	-0,15
6	0,2	-0,14	-0,15
7	0,26	-0,15	-0,16
8	0,19	-0,14	-0,14
9	0,23	-0,17	-0,17
10	0,2	-0,22	-0,21
11	0,22	-0,17	-0,14
12	0,25	-0,15	-0,13
13	0,28	-0,18	-0,15
14	0,24	-0,2	-0,2
15	0,2	-0,2	-0,19
16	0,32	-0,22	-0,22
17	0,23	-0,25	-0,23
18	0,25	-0,2	-0,18
19	0,29	-0,18	-0,18
20	0,3	-0,18	-0,18
21	0,23	-0,17	-0,18
22	0,17	-0,2	-0,21
23	0,16	-0,17	-0,17
24	0,05	-0,17	-0,11
Error relativo	0,23	-0,17	-0,17
Desviación Estándar	0,06	0,04	0,03
r²	0,704	0,718	0,713

Fuente: Elaboración propia

Discusión

Los resultados de la modelación hidrológica del humedal permiten inferir una fuerte relación entre las condiciones de precipitación de la cuenca aferente y los procesos hidrológicos del humedal, manifestándose esta circunstancia en las tres secciones del humedal de manera distinta. La modelación permitió establecer una mayor comprensión sobre el comportamiento del hidropериodo en el humedal y las relaciones existentes entre la descarga de la cuenca aferente, el volumen de cada sección y la descarga al río Bogotá, permitiendo definir un patrón estacional del nivel del agua para cada sección.

En los últimos 39 años el menor valor de la precipitación anual se presentó en el año de 1992 (año Niño) y fue de 432,7 mm/año, con una descarga calculada de la cuenca aferente de 905 225 m³/mes, el valor más bajo en este periodo. 1250,5 mm de precipitación anual es el valor más alto correspondiente a 2010 (año Niña), con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m³/mes. El promedio anual de la precipitación para este periodo fue de 828,86 mm y el promedio de la descarga estimada de la cuenca aferente fue 1 718 646 m³, lo cual evidencia una alta variabilidad entre los valores extremos de la precipitación y la descarga de agua al humedal Jaboque. Estos valores afectan de manera significativa la dinámica hidrológica del humedal, pues modifica el tiempo hidráulico de retención (Carpenter *et al.*, 2008), que incide en los procesos geoquímicos y biológicos del humedal. Este fenómeno podría asociarse a situaciones relacionadas con el cambio climático. (Håkanson *et al.*, 2003).

La comparación entre los flujos de entrada y salida del humedal Jaboque muestran una diferencia bruta de 82 165 m³/mes, para un total anual de 985 980 m³/año, con lo cual el promedio del THR es de 93 días/año. El humedal, en las condiciones actuales, recambia su volumen cuatro veces al año. La modelación entre las entradas y salidas de agua al humedal reproduce de manera parcial el aporte de aguas del humedal al río Bogotá, pero también reconfirma el papel amortiguador que tienen todas las secciones del humedal y en especial la segunda y tercera sección, al recibir y atenuar el impacto de las crecientes de la cuenca aferente sobre todo el conjunto del humedal.

El volumen de agua en la primera sección depende fundamentalmente de la descarga de la cuenca aferente; esto en parte porque las estructuras que recogen el flujo proveniente de los canales Carmelo y Los Ángeles. En el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (66317 m³), mayo (70643 m³), octubre (72477 m³) y noviembre (67643 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (50300 m³), febrero (53976 m³) y julio (58976 m³). En el año 2005 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (66400 m³), mayo (74643 m³), octubre (71888 m³) y noviembre (70500 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (58300 m³) y febrero (62551 m³), meses con menores valores en precipitación. La comparación entre el conjunto de datos estimados y simulados, permitió establecer una buena correspondencia:

$$r^2=0,704; y=0,8692(x)+23033$$

En la sección 2 en el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (204071 m³), mayo (197066 m³), octubre (210747 m³) y noviembre (201478 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (161556 m³), febrero (198801 m³), agosto (176705 m³) y diciembre (187598 m³), meses con menores valores en precipitación. En el año 2005 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (212779 m³), mayo (223328 m³), octubre (204788 m³) y noviembre (203130 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (182411 m³), febrero (189295 m³), agosto (188581 m³) y diciembre (190496 m³), meses con menores valores en precipitación. Comparados los grupos de datos referentes al volumen estimado y al volumen simulado se encontró una correlación aceptable, con un nivel de correspondencia de:

$$r^2=0,7181; y=0,3857(x)+84833$$

En la sección o tercio bajo del humedal en el año 2004 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (245155 m³), mayo

(236 697 m³), junio (222 476 m³), octubre (253 216 m³), (210 747 m³) y noviembre (242 024 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (193 820 m³), febrero (202 537 m³) y agosto (212 111 m³), meses con menores valores en precipitación. En el año 2005 los meses con mayor almacenamiento de agua fueron abril (255 669 m³), mayo (265 992 m³), octubre (246 020 m³) y noviembre (239 621 m³), correspondiendo a los meses con mayores precipitaciones. Los meses con menor almacenamiento de agua fueron enero (219 001 m³), febrero (227 314 m³), agosto (226 451 m³) y diciembre (223 067 m³), meses con menores valores en precipitación. Se encontró una buena correspondencia entre los valores calculados y simulados:

$$r^2=0,7125; y=0,4627(x)+84609$$

Persiste una diferencia del 29% entre los valores calculados y simulados, que obedece a las complejas condiciones morfométricas propias de una batimetría irregular, coadyuvada por la construcción de diques, –jarillones especialmente–.

De acuerdo con los resultados anteriores se concluye que en la primera sección o tercio alto del humedal el volumen de agua depende fundamentalmente de la precipitación y la descarga de la cuenca aferente, en el tercio medio de los aportes de la descarga de cuenca aferente y la precipitación, y en el tercio bajo de la descarga del tercio medio, amortiguando así las crecientes fuertes en las dos primeras secciones. Las condiciones climáticas de la zona se reflejan en el comportamiento del hidroperiodo; el mayor volumen de agua de cada sección se presentó en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre, con descensos en los meses diciembre-enero y julio-agosto.

La comparación de los volúmenes de agua estimados y calculados para todas las secciones indica que es necesario disponer de datos de los parámetros morfométricos con mayor detalle, en especial los que hacen referencia a la batimetría del humedal, que es compleja y dinámica, debido a los procesos de colmatación. La fortaleza predictiva del modelo se verificó mediante la determinación del error relativo cercano a cero, de 0,23 para la primera sección y de –0,17 para la segunda y tercera; este resultado sugiere la posibilidad de utilizar

el modelo en estudios de caso similares, como los demás humedales localizados en la jurisdicción de Bogotá.

En cuanto al comportamiento promedio del THR en el año 1992 (año Niño), vale decir que la precipitación mensual promedio fue de 36 mm y el THR modelado fue de 39 días/año para la primera sección, de 64,9 días/año para la segunda sección y 76,5 días/año para tercera sección.

El comportamiento promedio del THR modelado en el año 2010 (año Niño), correspondiente a la precipitación mensual promedio de 99 mm, fue de 26 días/año para la primera sección, de 62 para la segunda sección y 73 días/año para tercera sección.

La modelación del THR permitió establecer una aproximación al rol hidrológico y ecológico que juega cada sección en el contexto del humedal, lográndose inferir que la tercera sección cumple una función reguladora y quizá de estabilización fisicoquímica y biológica. En las dos primeras secciones el THR estimado corresponde 15 y 36 días/año, siendo equivalente al mínimo recomendado para tratamientos primarios de aguas residuales de acuerdo con Zhang & Mitsch (2005). Esto confirma que el comportamiento del THR permite amortiguar el impacto de la contaminación difusa ocasionada por múltiples vertimientos ilegales en la cuenca aferente.

El análisis de sensibilidad muestra que a promedios de precipitación entre 400 mm/año y 600 mm/año el THR oscila entre 30 y 20 días/año para la sección 1; 72 y 48 días/año para la sección 2 y para la sección 3 entre 84 y 57 días/año. A condiciones de altas precipitaciones, entre 1200 mm/año y 1300 mm/año, el THR se reduce de manera significativa. Para la primera sección se determinaron valores de THR de 10 y 9 días/año, para la segunda de 24 y 22 días/año y para la tercera sección entre 29 y 27 días/año. Estos resultados permitieron comparar, situaciones de variabilidad climática extrema y su relación entre un año seco fenómeno de El Niño y un año húmedo fenómeno de La Niña, estableciendo que el tercio medio y el tercio bajo del humedal desempeñan un rol importante como depuradores en el humedal, en condiciones de variabilidad climática extrema. Esto debido en parte a que estas secciones tienen mayor extensión y por supuesto tienen una mayor capacidad de retención. Entre límites de 800 mm/año y 900 mm/

año, valores entre los cuales oscila el promedio multianual de la precipitación, el comportamiento del THR es de 15 y 13 días/año en la primera sección, en la segunda de 36 y 32 días/año y la tercera entre 43 y 38 días. Se muestra que, en condiciones cercanas al monto promedio de la precipitación, la función depuradora la estarían asumiendo las secciones 2 y 3 del humedal, pudiéndose considerar que esta situación sería la más apropiada para el humedal.

Los resultados de la modelación indican que las variables de precipitación y caudal de la descarga de la cuenca aferente y al río Bogotá, de una parte, y de otra las morfométricas –profundidad, área de la cubeta y volumen– permiten una aproximación a la comprensión del comportamiento del THR, motivo por el cual estas variables se deberían tener en cuenta para futuras investigaciones relacionadas con medidas de restauración y conservación del humedal.

Tabla 4.10. Cálculo del error relativo para las tres secciones, años 2004-2005.

Años 2004-2005	Sección 1	Sección 1	Sección 2	Sección 2	Sección 3	Sección 3
	Volumen estimado	Volumen simulado	Volumen estimado	Volumen simulado	Volumen estimado	Volumen simulado
Meses	m ³					
Enero	50300	65059	161556	148454	193820	172315
Febrero	53976	68288	168801	150546	202567	177200
Marzo	58891	77117	188610	156550	226486	184933
Abril	66317	84009	204071	165846	245155	196308
Mayo	70643	80887	197066	168350	236697	202105
Junio	62867	75637	185289	159670	222476	189400
Julio	58976	74240	182155	155201	218693	183500
Agosto	60200	71811	176705	152736	212111	182600
Septiembre	63500	78176	190985	158585	229354	189446
Octubre	72477	86985	210747	163460	253216	200456
Noviembre	67643	82853	201478	168102	242024	207105
Diciembre	61500	76666	187598	159169	225264	196115
Enero	58300	74354	182411	149956	219001	185200
Febrero	62551	77423	189295	151858	227314	182102
Marzo	66863	79966	195000	156670	234202	189038
Abril	66400	87890	212779	165618	255669	199237
Mayo	74643	91701	223328	168230	265992	205060
Junio	66500	83344	202580	161592	243355	200446
Julio	61024	78900	192609	157373	231315	189829
Agosto	59200	77104	188581	153730	226451	185200
Septiembre	63918	78576	191882	158878	230437	189200
Octubre	71888	84328	204788	164102	246020	194456
Noviembre	70500	81833	203190	169120	239261	199072
Diciembre	68500	72164	190496	158736	223067	198200
Promedio	64065,71	78721,29	193000,00	159272,17	231247,79	191605,13
Desviación estándar	5974,42	6188,93	13828,11	6294,06	16425,67	9003,47

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11. Resultados de la modelación dinámica. Variables: flujo cuenca aferente; volumen sección 1, 2 y 3; salida al río Bogotá; THR para todas las secciones. Años 2004-2010.

Año 2004 - 2010	Promedio mensual precipitación	Flujo cuenca aferente (m ³ /año)	Vol Sección 1 m ³	Vol Sección 2 m ³	Vol Sección 3 m ³	Salida río Bogotá (m ³ /año)	THR	THR	THR
							Sección 1	Sección 2	Sección 3
Meses							Días/año	Días/año	Días/año
1	99	1267337	67106	166148	199364	1284765	10	25	29
2	41	1922070	67499	167031	200430	1943077	24	59	70
3	198	2487550	69071	170557	204688	2508418	5	13	15
4	101	4034194	70952	174777	209783	4072020	10	25	30
5	51	2060631	68933	170247	204314	2097683	20	48	57
6	51	1276699	67354	166705	200037	1301602	19	47	56
7	20	983348	66348	164449	197313	1001275	49	120	142
8	59	859767	66074	163834	196570	871835	16	40	48
9	170	2512204	68514	169307	203179	2528206	6	15	17
10	119	3763000	70534	173841	208653	3796699	9	21	25
11	32	2149261	68813	169979	203990	2185618	31	76	90
12	11	601681	66310	164363	197209	623881	87	211	248
13	33	484028	65485	162512	194974	494809	29	71	85
14	34	833552	65646	162873	195410	842714	28	70	84
15	94	1402153	66672	165176	198190	1413073	10	26	31
16	161	2970642	69210	170870	205066	2991629	6	15	18
17	37	2859543	69269	171002	205225	2893937	28	67	79
18	21	771449	66708	165257	198288	796057	45	111	132
19	66	951829	66333	164415	197271	965620	15	36	43
20	98	1945476	67562	167172	200601	1961794	10	25	30
21	131	2755310	69087	170592	204731	2779713	8	19	23
22	48	2496288	68849	170060	204087	2529031	21	51	61
23	111	1786941	68234	168679	202420	1812313	9	22	26
24	58	2279084	68369	168983	202787	2305966	17	42	50
25	31	1198399	66984	165874	199034	1221200	31	77	91
26	215	2498316	69005	170409	204509	2516639	5	12	14
27	154	4792224	72097	177345	212884	4832057	7	17	20
28	195	4222999	72594	178461	214231	4271357	5	13	16
29	115	4121575	72240	177667	213273	4173766	9	22	27
30	17	1955150	69044	170498	204616	1997923	60	145	169
31	23	469985	66282	164300	197133	492128	43	104	124
32	25	589198	65563	162686	195184	600628	38	94	112
33	196	2222910	68130	168447	202140	2234633	5	13	15
34	91	3904994	70449	173648	208420	3938646	11	28	33
35	30	1704242	68244	168701	202447	1738069	33	80	95
36	8	542386	66041	163761	196481	562075	126	304	355
37	11	220637	64975	161368	193592	229655	87	214	254
38	62	750540	65523	162598	195078	756385	15	38	46
39	151	2377387	68083	168340	202011	2391037	7	16	19
40	125	3523951	70145	172966	207597	3554499	8	20	24
41	54	2464144	69177	170795	204975	2499844	19	46	54

Año 2004 - 2010 Meses	Promedio mensual precipitación	Flujo cuenta aferente (m ³ /año)	Vol Sección 1 m ³	Vol Sección 2 m ³	Vol Sección 3 m ³	Salida río Bogotá (m ³ /año)	THR	THR	THR
							Sección 1 Días/año	Sección 2 Días/año	Sección 3 Días/año
42	56	1370945	67568	167186	200618	1397170	18	43	52
43	59	1426807	67140	166225	199458	1446686	17	41	49
44	18	1087581	66397	164559	197445	1105210	54	131	155
45	201	2158935	68342	168922	202714	2173587	5	12	15
46	117	4229240	71034	174960	210005	4264613	9	22	26
47	83	2608011	69771	172128	206585	2647212	12	30	36
48	31	1579100	67881	167887	201464	1609534	32	79	94
49	85	1267961	67174	166302	199550	1287565	12	29	34
50	94	2198256	68112	168406	202090	2219382	11	26	31
51	113	2520630	68889	170149	204195	2546630	9	22	26
52	226	3873787	71310	175581	210754	3906447	5	11	14
53	120	4638995	72475	178193	213908	4688438	9	22	26
54	62	2440427	69921	172465	206992	2485275	17	40	48
55	95	1846236	68563	169418	203313	1876748	11	26	31
56	49	1934553	68015	168187	201826	1961320	20	50	59
57	141	2078732	68464	169196	203044	2101309	7	18	21
58	134	3451862	70222	173139	207806	3483343	8	19	22
59	60	2655758	69460	171429	205741	2692564	17	41	49
60	51	1417445	67691	167460	200949	1445190	19	47	56
61	91	1657742	67615	167291	200744	1678329	11	27	32
62	143	2763112	69169	170777	204954	2787434	7	17	21
63	55	2745012	69210	170869	205065	2778121	18	45	53
64	16	1008314	66946	165790	198931	1034034	62	151	177
65	64	845099	66271	164275	197103	859377	15	37	45
66	53	1498272	66787	165434	198502	1513396	18	45	54
67	28	1096007	66347	164446	197308	1111939	34	84	100
68	22	644435	65632	162842	195372	656511	44	110	131
69	129	1544147	67012	165938	199111	1554687	8	19	22
70	95	2904794	68915	170206	204265	2928764	11	26	31
71	58	2030672	68288	168801	202567	2059071	17	42	50
72	6	970241	66562	164929	197893	992293	152	364	419
73	37	440962	65530	162613	195096	452455	26	65	77
74	23	788301	65554	162668	195162	797725	41	102	121
75	187	2115556	67958	168061	201674	2126949	5	13	16
76	160	4423351	71355	175682	210876	4456884	6	16	19
77	108	3510532	71078	175059	210124	3554841	10	24	28
78	137	2961904	70473	173703	208487	3001490	8	18	22
79	52	2617997	69454	171416	205725	2655876	20	48	57
80	76	1523550	67938	168016	201620	1551075	13	32	38
81	133	2436370	68831	170019	204038	2460658	8	19	22
82	197	3914357	71199	175330	210452	3947830	5	13	16
83	72	4327856	72140	177443	213002	4374844	15	35	42
84	22	1330064	65719	163038	195609	1336090	44	108	128

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.12. Análisis de sensibilidad sección I: precipitación (mm/año) como variable independiente y THR (días/año) como variable dependiente. Años 2004-2010.

Clases	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR									
Años 2004 -2010	Días/año									
1	26,97	21,26	17,72	15,18	13,29	11,81	10,63	9,66	8,86	8,18
2	27,73	22,2	18,51	15,87	13,89	12,35	11,17	10,11	9,26	8,55
3	27,55	22,05	18,38	15,76	13,8	12,26	11,04	10,04	9,2	8,49
4	28,43	22,77	18,99	16,29	14,26	12,68	11,41	10,38	9,51	8,78
5	29,64	23,75	19,82	17	14,89	13,24	11,92	10,84	9,94	9,18
6	29,84	23,92	19,96	17,12	14,99	13,33	12	10,92	10,01	9,24
7	29,71	23,81	19,87	17,04	14,92	13,27	11,95	10,87	9,96	9,2
8	28,5	22,82	19,03	16,32	14,29	12,71	11,44	10,4	9,54	8,8
9	27,44	21,97	18,31	15,7	13,74	12,21	10,99	10	9,16	8,46
10	27,17	21,74	18,12	15,54	13,6	12,09	10,88	9,89	9,07	8,37
11	28,15	22,54	18,8	16,12	14,11	12,54	11,29	10,27	9,41	8,69
12	29,03	23,26	19,4	16,64	14,57	12,96	11,66	10,61	9,72	8,98
13	28,19	22,58	18,83	16,14	14,13	12,56	11,31	10,28	9,43	8,7
14	27,35	21,89	18,25	15,64	13,69	12,17	10,96	9,96	9,13	8,43
15	26,94	21,56	17,97	15,4	13,48	11,98	10,78	9,8	8,99	8,3
16	27,15	21,73	18,11	15,53	13,59	12,08	10,87	9,88	9,06	8,36
17	28,13	22,53	18,78	16,11	14,1	12,53	11,28	10,26	9,41	8,68
18	28,92	23,16	19,32	16,57	14,51	12,9	11,61	10,56	9,68	8,94
19	28,55	22,87	19,07	16,35	14,32	12,73	11,46	10,42	9,55	8,82
20	27,94	22,37	18,65	15,99	14	12,44	11,2	10,18	9,34	8,62
21	27,77	22,23	18,54	15,89	13,91	12,37	11,13	10,12	9,28	8,57
22	27,49	22	18,34	15,73	13,76	12,24	11,01	10,01	9,18	8,47
23	28,23	22,61	18,85	16,17	14,15	12,58	11,33	10,3	9,44	8,72
24	29,25	23,44	19,55	16,77	14,68	13,06	11,76	10,69	9,8	9,05
25	28,77	23,05	19,22	16,49	14,43	12,83	11,55	10,51	9,63	8,89
26	28,05	22,46	18,73	16,06	14,06	12,5	11,25	10,23	9,38	8,66
27	27,78	22,24	18,55	15,9	13,92	12,37	11,14	10,13	9,28	8,57
28	28,14	22,53	18,79	16,11	14,1	12,54	11,29	10,26	9,41	8,69
33	28,31	22,67	18,91	16,22	14,19	12,62	11,36	10,33	9,47	8,74
34	28,11	22,5	18,77	16,09	14,08	12,52	11,27	10,25	9,4	8,68
35	28,28	22,64	18,88	16,19	14,17	12,6	11,35	10,32	9,46	8,73
36	28,95	23,19	19,34	16,59	14,52	12,91	11,63	10,57	9,69	8,95
37	28,66	22,95	19,14	16,42	14,37	12,78	11,5	10,46	9,59	8,85
38	27,98	22,4	18,68	16,02	14,02	12,47	11,22	10,2	9,35	8,63
39	27,95	22,38	18,66	16	14,01	12,45	11,21	10,19	9,34	8,63
40	28,55	22,86	19,07	16,35	14,31	12,73	11,46	10,42	9,55	8,82
41	28,56	22,88	19,08	16,36	14,32	12,74	11,46	10,42	9,56	8,82

Clases	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR									
Años 2004 -2010	Días/año									
42	27,7	22,17	18,49	15,85	13,87	12,33	11,1	10,09	9,25	8,54
43	27,44	21,96	18,31	15,7	13,74	12,21	10,99	9,99	9,16	8,46
44	27,64	22,12	18,44	15,81	13,84	12,3	11,08	10,07	9,23	8,52
45	27,47	21,99	18,33	15,71	13,75	12,23	11	10,01	9,17	8,47
46	27,19	21,76	18,14	15,55	13,61	12,1	10,89	9,9	9,08	8,38
47	27,72	22,19	18,5	15,86	13,88	12,34	11,11	10,1	9,26	8,55
48	28,45	22,78	19	16,29	14,26	12,68	11,42	10,38	9,52	8,79
49	28,21	22,59	18,84	16,15	14,14	12,57	11,32	10,29	9,43	8,71
50	27,55	22,05	18,38	15,76	13,8	12,26	11,04	10,04	9,2	8,49
51	27,16	21,73	18,11	15,53	13,59	12,08	10,87	9,89	9,06	8,37
52	27,16	21,74	18,12	15,53	13,59	12,08	10,88	9,89	9,07	8,37
53	28,08	22,49	18,75	16,08	14,07	12,51	11,26	10,24	9,39	8,67
54	29,37	23,54	19,64	16,85	14,75	13,12	11,81	10,74	9,85	9,09
55	29,27	23,45	19,57	16,78	14,69	13,07	11,76	10,7	9,81	9,06
56	29,04	23,27	19,41	16,65	14,57	12,96	11,67	10,61	9,73	8,98
57	28,65	22,95	19,14	16,42	14,37	12,78	11,5	10,46	9,59	8,85
58	28,08	22,48	18,75	16,07	14,07	12,51	11,26	10,24	9,39	8,67
59	28,42	22,76	18,98	16,28	14,25	12,67	11,4	10,37	9,51	8,78
60	29,32	23,49	19,60	16,81	14,72	13,09	11,78	10,72	9,82	9,07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.13. Análisis de sensibilidad sección 2: precipitación (mm/año) como variable independiente y THR (días/año) como variable dependiente. Años 2004-2010.

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR Días/año									
Años 2004 -2010										
1	66,09	52,87	44,06	37,77	33,05	29,37	26,44	24,03	22,03	20,34
2	68,14	54,64	45,6	39,12	34,26	30,47	27,44	24,95	22,88	21,13
3	67,83	54,36	45,36	38,91	34,07	30,3	27,28	24,81	22,75	21
4	69,37	55,69	46,52	39,94	34,99	31,14	28,04	25,51	23,4	21,61
5	71,46	57,5	48,1	41,34	36,25	32,28	29,09	26,47	24,29	22,43
6	71,8	57,79	48,36	41,57	36,46	32,46	29,26	26,63	24,43	22,57
7	71,58	57,6	48,19	41,42	36,32	32,34	29,15	26,52	24,34	22,48
8	69,48	55,79	46,61	40,02	35,06	31,2	28,1	25,56	23,45	21,65
9	67,64	54,2	45,22	38,79	33,96	30,2	27,19	24,73	22,67	20,93
10	67,15	53,78	44,85	38,46	33,67	29,94	26,95	24,51	22,47	20,74
11	68,88	55,27	46,15	39,61	34,7	30,87	27,8	25,29	23,19	21,41
12	70,41	56,59	47,31	40,64	35,62	31,7	28,56	25,99	23,84	22,02
13	68,95	55,33	46,21	39,66	34,74	30,91	27,84	25,32	23,22	21,44
14	67,47	54,06	45,09	38,68	33,86	30,11	27,11	24,65	22,6	20,87
15	66,75	53,44	44,55	38,2	33,43	29,72	26,76	24,33	22,3	20,59
16	67,12	53,76	44,83	38,45	33,65	29,92	26,94	24,49	22,46	20,73
17	68,85	55,24	46,12	39,59	34,68	30,85	27,78	25,27	23,18	21,4
18	70,21	56,42	47,16	40,5	35,5	31,59	28,46	25,9	23,75	21,94
19	69,57	55,87	46,67	40,08	35,11	31,25	28,14	25,6	23,48	21,69
20	68,5	54,94	45,87	39,36	34,47	30,67	27,62	25,12	23,03	21,27
21	68,21	54,7	45,65	39,17	34,3	30,51	27,47	24,99	22,91	21,16
22	67,71	54,27	45,27	38,84	34,01	30,24	27,23	24,76	22,7	20,96
23	69,02	55,39	46,25	39,71	34,78	30,95	27,87	25,35	23,25	21,47
24	70,79	56,92	47,6	40,9	35,85	31,91	28,75	26,16	24	22,17
25	69,97	56,21	46,97	40,34	35,35	31,46	28,34	25,78	23,65	21,84
26	68,71	55,12	46,02	39,5	34,6	30,78	27,72	25,21	23,12	21,35
27	68,24	54,72	45,67	39,19	34,32	30,52	27,49	25	22,92	21,17
28	68,87	55,26	46,14	39,6	34,69	30,86	27,79	25,28	23,19	21,41
29	69,38	55,7	46,53	39,95	35	31,14	28,05	25,52	23,4	21,61
30	70,97	57,08	47,73	41,02	35,96	32,01	28,84	26,25	24,08	22,24
31	71,73	57,73	48,31	41,53	36,42	32,43	29,22	26,6	24,4	22,54
32	70,06	56,29	47,04	40,41	35,41	31,51	28,39	25,83	23,69	21,88
33	69,17	55,52	46,37	39,8	34,87	31,02	27,94	25,42	23,31	21,53
34	68,8	55,2	46,09	39,56	34,65	30,83	27,76	25,25	23,16	21,38
35	69,1	55,46	46,32	39,76	34,83	30,99	27,91	25,39	23,28	21,5
36	70,26	56,46	47,19	40,54	35,53	31,62	28,49	25,92	23,78	21,96
37	69,76	56,03	46,81	40,2	35,23	31,35	28,24	25,69	23,56	21,76
38	68,58	55,01	45,93	39,42	34,52	30,71	27,66	25,15	23,07	21,3
39	68,53	54,97	45,89	39,38	34,49	30,68	27,63	25,13	23,05	21,28
40	69,57	55,86	46,67	40,07	35,11	31,24	28,14	25,6	23,48	21,69

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR Días/año									
Años 2004 -2010										
41	69,6	55,89	46,69	40,09	35,13	31,26	28,16	25,61	23,49	21,7
42	68,08	54,58	45,55	39,08	34,23	30,44	27,41	24,93	22,86	21,11
43	67,63	54,19	45,21	38,78	33,95	30,2	27,19	24,72	22,67	20,93
44	67,98	54,49	45,47	39,01	34,16	30,38	27,36	24,88	22,81	21,06
45	67,68	54,24	45,25	38,82	33,99	30,22	27,21	24,75	22,69	20,95
46	67,2	53,82	44,89	38,5	33,7	29,96	26,97	24,53	22,49	20,76
47	68,13	54,62	45,59	39,11	34,25	30,46	27,43	24,95	22,88	21,12
48	69,4	55,72	46,54	39,96	35,01	31,15	28,06	25,52	23,41	21,62
49	68,98	55,36	46,23	39,68	34,76	30,93	27,85	25,33	23,23	21,46
50	67,83	54,36	45,36	38,91	34,07	30,3	27,28	24,81	22,75	21
51	67,13	53,76	44,83	38,45	33,66	29,93	26,94	24,5	22,46	20,73
52	67,14	53,78	44,85	38,46	33,67	29,94	26,95	24,5	22,47	20,74
53	68,76	55,17	46,06	39,54	34,63	30,81	27,74	25,23	23,14	21,37
54	71	57,1	47,76	41,04	35,98	32,03	28,86	26,26	24,09	22,25
55	70,82	56,95	47,62	40,92	35,87	31,93	28,77	26,18	24,01	22,18
56	70,43	56,61	47,32	40,65	35,63	31,71	28,57	25,99	23,85	22,02
57	69,76	56,03	46,81	40,2	35,22	31,35	28,24	25,69	23,56	21,76
58	68,75	55,16	46,05	39,53	34,62	30,8	27,74	25,23	23,14	21,36
59	69,34	55,67	46,5	39,92	34,98	31,12	28,03	25,5	23,39	21,6
60	70,9	57,02	47,68	40,97	35,91	31,97	28,81	26,21	24,05	22,21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.14. Análisis de sensibilidad sección 3: precipitación (mm/año) como variable independiente y THR (días/año) como variable dependiente. Años 2004-2010.

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR Días/año									
Años 2004 -2010										
1	79,28	63,43	52,86	45,3	39,64	35,24	31,71	28,83	26,43	24,39
2	81,02	65,00	54,30	46,7	40,92	36,41	32,0	29,04	27,37	25,28
3	80,75	64,02	54,14	46,48	40,72	36,23	32,63	29,68	27,23	25,14
4	82,05	66,06	55,28	47,53	41,69	37,12	33,46	30,45	27,94	25,81
5	83,76	67,71	56,82	48,95	42,99	38,33	34,58	31,49	28,92	26,73
6	84,04	67,98	57,07	49,18	43,2	38,52	34,76	31,66	29,08	26,88
7	83,86	67,8	56,91	49,03	43,06	38,4	34,64	31,55	28,97	26,78
8	82,14	66,15	55,37	47,61	41,76	37,19	33,52	30,51	27,99	25,86
9	80,59	64,67	54	46,35	40,6	36,12	32,53	29,59	27,14	25,06
10	80,18	64,28	53,64	46,02	40,3	35,84	32,27	29,35	26,91	24,85
11	81,64	65,66	54,92	47,2	41,38	36,84	33,19	30,21	27,71	25,6
12	82,91	66,88	56,05	48,24	42,34	37,72	34,01	30,97	28,43	26,27
13	81,7	65,72	54,98	47,25	41,43	36,88	33,23	30,24	27,75	25,63
14	80,46	64,54	53,88	46,24	40,5	36,03	32,45	29,51	27,06	24,99
15	79,84	63,96	53,34	45,75	40,05	35,61	32,06	29,15	26,73	24,68
16	80,16	64,26	53,62	46	40,28	35,83	32,26	29,34	26,9	24,84
17	81,61	65,64	54,9	47,18	41,36	36,82	33,18	30,19	27,7	25,59
18	82,74	66,72	55,9	48,1	42,21	37,61	33,91	30,87	28,33	26,18
19	82,21	66,22	55,43	47,67	41,81	37,24	33,57	30,55	28,04	25,9
20	81,32	65,36	54,64	46,94	41,14	36,62	32,99	30,02	27,54	25,44
21	81,08	65,13	54,43	46,75	40,96	36,46	32,84	29,88	27,41	25,31
22	80,66	64,73	54,06	46,41	40,65	36,17	32,57	29,63	27,17	25,09
23	81,75	65,78	55,02	47,29	41,47	36,92	33,27	30,28	27,78	25,66
24	83,22	67,19	56,33	48,5	42,58	37,94	34,22	31,16	28,61	26,44
25	82,54	66,53	55,72	47,94	42,06	37,46	33,78	30,75	28,22	26,07
26	81,5	65,53	54,8	47,08	41,27	36,74	33,11	30,12	27,64	25,53
27	81,1	65,15	54,45	46,76	40,90	36,47	32,85	29,89	27,42	25,32
28	81,63	65,65	54,91	47,19	41,37	36,83	33,19	30,2	27,71	25,59
29	82,06	66,07	55,29	47,54	41,69	37,13	33,46	30,46	27,95	25,82
30	83,37	67,33	56,46	48,62	42,69	38,05	34,32	31,25	28,69	26,52
31	83,99	67,92	57,02	49,13	43,16	38,48	34,72	31,63	29,04	26,85
32	82,62	66,61	55,8	48	42,12	37,52	33,83	30,8	28,26	26,12

Precipitación mm/año	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Variable	THR Días/año									
Años 2004 -2010										
33	81,88	65,89	55,13	47,39	41,56	37	33,35	30,35	27,85	25,72
34	81,57	65,6	54,86	47,14	41,33	36,79	33,15	30,17	27,68	25,57
35	81,82	65,84	55,08	47,35	41,52	36,97	33,31	30,32	27,82	25,7
36	82,78	66,77	55,94	48,14	42,24	37,64	33,93	30,9	28,36	26,2
37	82,37	66,37	55,57	47,8	41,93	37,35	33,67	30,65	28,12	25,98
38	81,39	65,43	54,7	47	41,2	36,67	33,04	30,06	27,58	25,47
39	81,35	65,39	54,67	46,96	41,16	36,64	33,01	30,04	27,55	25,45
40	82,21	66,21	55,43	47,67	41,81	37,23	33,56	30,55	28,03	25,9
41	82,23	66,24	55,45	47,68	41,83	37,25	33,58	30,56	28,05	25,91
42	80,97	65,03	54,33	46,66	40,88	36,38	32,77	29,81	27,35	25,25
43	80,59	64,67	54	46,35	40,6	36,12	32,53	29,59	27,13	25,06
44	80,88	64,94	54,25	46,59	40,82	36,32	32,71	29,76	27,3	25,21
45	80,63	64,71	54,03	46,38	40,63	36,15	32,56	29,61	27,16	25,00
46	80,22	64,32	53,68	46,05	40,33	35,87	32,3	29,37	26,94	24,87
47	81,01	65,07	54,37	46,69	40,91	36,41	32,79	29,84	27,37	25,27
48	82,07	66,08	55,3	47,55	41,7	37,14	33,47	30,47	27,95	25,83
49	81,72	65,75	55	47,27	41,44	36,9	33,25	30,26	27,76	25,64
50	80,75	64,82	54,14	46,48	40,72	36,23	32,63	29,69	27,23	25,14
51	80,16	64,26	53,62	46,01	40,29	35,83	32,26	29,34	26,9	24,84
52	80,18	64,27	53,64	46,02	40,3	35,84	32,27	29,35	26,91	24,85
53	81,54	65,57	54,83	47,12	41,31	36,77	33,13	30,15	27,66	25,55
54	83,39	67,35	56,49	48,64	42,71	38,06	34,33	31,27	28,7	26,53
55	83,24	67,21	56,35	48,52	42,59	37,96	34,23	31,18	28,62	26,45
56	82,92	66,9	56,06	48,25	42,35	37,73	34,02	30,98	28,43	26,28
57	82,37	66,36	55,57	47,79	41,93	37,34	33,66	30,64	28,12	25,98
58	81,53	65,56	54,83	47,11	41,3	36,76	33,13	30,14	27,65	25,54
59	82,02	66,04	55,26	47,51	41,67	37,11	33,44	30,44	27,93	25,8
60	83,31	67,27	56,41	48,57	42,64	38,01	34,28	31,22	28,66	26,48

Fuente: Elaboración propia

Modelación del estado trófico del humedal Jaboque

Capítulo 5

Resumen

En este capítulo se expone un modelo de simulación dinámica para explicar el comportamiento del fósforo total y su relación con el estado trófico del humedal Jaboque en tres secciones con características físicas y químicas particulares. El modelo incluye los flujos de entrada y salida de agua en cada sección y los aportes de fósforo total de la cuenca aferente. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales; se utilizó el método Euler de integración que se desarrolló utilizando el programa computacional Stella 9.1[®]. El modelo representa la relación existente entre el ciclo hidrológico, el tiempo hidráulico de retención del agua, la dinámica del fósforo y el estado trófico del humedal. En los meses de mayores caudales la carga de fósforo disminuye en todas las secciones del humedal, mientras que en los meses con menores caudales la concentración aumenta.

El promedio anual del índice de estado trófico (IST) del tercio alto se estimó en 45,09 mg/m³ y el tiempo hidráulico de retención (THR) de 14 días/año; para el segundo tercio el IST se estimó en 35,89 mg/m³ y el THR de 34 días/año. Lo anterior implica que las dos primeras secciones se encuentran en condiciones de eutrofia. En la tercera, el IST de 19,5 mg/m³ y el THR de 40 días/año indican condiciones 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.

Se encontró una buena correspondencia entre los valores observados y modelados de la carga de fósforo en cada sección del humedal, indicando que el modelo es robusto y tiene buena capacidad predictiva:

Sección 1: $r^2=0,72$; error relativo de 0,09

Sección 2: $r^2=0,81$; error relativo de -0,03

Sección 3: $r^2=0,85$; error relativo de 0,03

Introducción

El fósforo (P) es un elemento cuya disponibilidad normalmente es reducida en el medio natural, pero juega un papel fundamental en los procesos metabólicos de los seres vivos. Es un limitante para la vida y lo es para el desarrollo de la agricultura, por lo cual se utilizan fertilizantes con fósforo. Se acumula en los campos de cultivo mientras otra fracción del fósforo aplicado va a los ecosistemas adyacentes como lagos, ríos y humedales, influyendo en la eutrofización de estos ecosistemas (Lassaletta, 2004).

Proceso ecológico

En los humedales se recibe el agua y los materiales de la escorrentía (Bayley *et al.*, 1985; Johnston, 1993; Mann & Wetzel, 2001). Los mecanismos que influyen en la concentración de materiales en las áreas superficiales de los humedales no están uniformemente distribuidos; el resultado es un alto grado de variabilidad tanto espacial como temporal (Johnston, 1993). Los humedales funcionan como sumideros de nutrientes en grandes concentraciones (Mitsch *et al.*, 1995; Wang & Mitsch, 2000). La composición físico química del sustrato de los humedales hace que su retención de fósforo sea considerable; por esto, recientemente se ha optado por crear humedales artificiales o restaurar los humedales naturales para mejorar la calidad del agua, controlando la polución (Mitsch *et al.*, 1995; Zacharías *et al.*, 2005).

Un aporte importante de fósforo a los humedales proviene del drenaje superficial, el cual depende de la concentración de fósforo en los suelos, la topografía, la cobertura vegetal, y la intensidad y duración del flujo de agua el uso de la tierra (Schenone *et al.*, 2008). El fósforo demora semanas para moverse en el sustrato y tornarse realmente disponible para ser tomado por las plantas acuáticas enraizadas (Wang & Mitsch, 2000). El fósforo interactúa fuertemente con el suelo y la biota de los humedales que pueden almacenarlo a corto y a largo plazo (Kadlec, 1997). El sedimento orgánico juega un papel muy importante en la dinámica del fósforo; en efecto, el principal mecanismo de eliminación de este elemento, junto con la asimilación por los seres vivos, es su adsorción a las arcillas, la precipitación y la formación de complejos con el aluminio, el hierro y calcio presentes en los sedimentos (Lassaletta, 2004).

Eutrofización

La eutrofización es el principal problema de las aguas represadas y el fósforo es el nutriente clave para su control (Fraile *et al.*, 1995; Carpenter *et al.*, 1998). El fósforo disponible es muy limitado en los suelos y en los sedimentos de los lagos. Por esta razón se utilizan en la agricultura muchos fertilizantes que, cuando llegan a los lagos, causan un aumento en la productividad biológica, crecimiento de las plantas, algas y bacterias que consumen el oxígeno en la columna de agua y causan eutrofización (Lassaletta 2004). La eutrofización es un proceso natural en los humedales que pasan de un estado de bajo contenido de materia orgánica (oligotrófico) hacia un estado de alto contenido de materia orgánica (eutrófico), dándose igualmente una sobreproducción de algas y macrófitas en los cuerpos de agua y alterando los ciclos naturales de los elementos naturales como el fósforo (Salas & Martino, 2001).

Aunque la eutrofización es un proceso natural, los aportes de materia orgánica, provenientes de las actividades humanas hacen que el proceso se acelere y lo conviertan en uno de los problemas ambientales más generalizados (Reinhardt *et al.*, 2005; Gurkan *et al.*, 2006; Ministerio de Agricultura de Chile, 2006). El concepto de limitación de nutrientes debe ser considerado como un hecho clave para el estudio

de la eutrofización, por tres razones: 1) un nutriente clave debe ser el factor limitante para el crecimiento de las plantas en un ecosistema dado; 2) el crecimiento de las plantas en un ecosistema dado debe ser proporcional a la tasa de suministro de dicho nutriente; 3) el control de la eutrofización puede lograrse si se restringe el suministro del nutriente clave al ecosistema (Smith *et al.*, 1999).

La Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCDE, 1982) define la eutrofización como "el enriquecimiento en nutrientes de las aguas, que provoca la estimulación de una serie de cambios sintomáticos, entre los que está el incremento en la producción de algas y macrófitas, el deterioro de la calidad del agua y otros cambios sintomáticos que resultan indeseables e interfieren con la utilización del agua".

En Colombia la mayoría de los humedales se encuentran en proceso de colmatación y eutrofización por la influencia de sustancias extrañas a los humedales, como el fósforo que proviene de las cuencas. La eutrofización, que implica la acumulación de nutrientes, favorece preferentemente a las macrófitas flotantes, que se expanden sobre el espejo de agua e influyen de este modo en el proceso de desecación en los humedales (Donato, 1998). Ramírez *et al.* (2005) realizaron un experimento para determinar la respuesta de la comunidad fitoplanctónica de un embalse tropical (embalse La Fe) frente al enriquecimiento artificial con nitrógeno y fósforo en diferentes concentraciones. Aunque los resultados no fueron concluyentes, observaron que fue el nitrógeno y no el fósforo el nutriente limitante para los puntos muestreados en el embalse La Fe. Vásquez *et al.* (2006) realizaron una descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano cundiboyacense (Sochagota, La Copa, La Herrera, Gualí, Gatillo 1, Suesca, Sisga, Meridor, El Hato y La Muralla); los resultados mostraron bajos porcentajes de saturación de oxígeno y niveles altos en ortofosfatos, acompañados de gran cantidad de materia orgánica; todos estos factores indican una clara tendencia a la eutrofia.

Modelos dinámicos de fósforo total (Pt) en humedales

El enfoque propuesto por Vollenweider (1970) para calcular la carga crítica de fósforo ha sido y probablemente seguirá siendo el más utilizado por centros de investigación y autoridades mundiales. El

diagrama de carga propuesto relaciona la cantidad de fósforo con una masa de agua en un escenario que considera la profundidad media del cuerpo de agua y el tiempo de residencia hidráulico. A mediados de la década de 1960, la OCDE inició el trabajo sobre los efectos de la eutrofización y su control. Posteriormente, el Grupo de Administración del Agua del Sector de esta organización inició un estudio cooperativo dirigido hacia el desarrollo de relaciones cuantitativas de nutrientes en respuesta a la eutrofización por carga en los lagos y embalses. Se propuso la siguiente clasificación de estados tróficos, basada en variables fácilmente medibles: fósforo total; clorofila_a y transparencia según disco Secchi; estas variables se utilizan para determinar los diferentes estados tróficos (tabla 5.1).

La simulación dinámica permite observar el comportamiento de los sistemas según modelos, así como sus respuestas a las intervenciones a través del tiempo. Los modelos dinámicos consisten en ecuaciones que describen el cambio a través del tiempo. La simulación incrementa la capacidad de hacer predicciones sobre futuros estados de un sistema determinado.

Tabla 5.1. Valores límite de clasificación trófica

Variables / Categoría trófica	Pt (OCED) mg/m ³	Pt Vollenwei. mg/ m ³	chl _a (OCED) mg/ m ³	chl _a Vollenwei. mg/ m ³	(OCED) 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	oct-35	8.0- 25	8.25	16.1	4.2	6-mar
Eutrófico	35-100	25-80	25-75	42.6	2.45	3-1.5
Hipertrófico	>100	>80	>75		0.4-0.5	<1.5

Convenciones

Pt: Fósforo total/media anual de la concentración de fósforo total en el agua (mg/m³)
 Chl 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 & Vollenweider (1981).

El modelo describe la realidad con una cierta precisión; el proceso de modelación y sus resultados pueden ser usados para comprender mejor los problemas como un paso necesario para lograr un cambio sostenible y eficaz (Winz *et al.*, 2009). La modelación en humedales es relativamente reciente en comparación con otras áreas y modelos para agua dulce (Van der Peijl & Verhoeven, 1999).

Kadlec & Hammer (1988) desarrollaron un modelo matemático simple para simular la dinámica hidrológica y la interacción de nutrientes entre aguas residuales y humedales describiendo la variación espacial del flujo de agua de la superficie y haciendo cálculos de balances de materia para fósforo, nitrógeno y cloruro. Encontraron que el modelo predijo con exactitud la concentración de solutos en el agua superficial, los patrones de crecimiento de la biomasa, los cambios en la fuente de desperdicios y la tasa de acumulación de suelo.

Mitsch *et al.* (1995) implementaron un modelo para predecir la retención de nutrientes y otras características funcionales en humedales construidos para tratar fuentes de contaminación no puntuales. Para crear el modelo se basaron en los datos experimentales de dos humedales del río Des Plaines (Illinois, EE.UU.) y en el modelo de Vollenweider (1970) para lagos, que es un modelo simple de retención de fósforo en lagos con una estructura consistente en una sola variable de estado, a saber, la concentración total de fósforo, representando las entradas, las pérdidas y la sedimentación de fósforo. Cuando calibraron el modelo encontraron que la inclusión de la variación estacional de la temperatura dentro del modelo de los dos humedales no era fundamental, mientras que el factor hidrológico sí mostró ser fundamental. Además, encontraron que los dos humedales retienen aproximadamente la misma cantidad de fósforo por unidad de área que otros humedales naturales y artificiales. Van der Peijl & Verhoeven (1999) realizaron un modelo para describir la dinámica del carbono, el nitrógeno y el fósforo en humedales de Devon, Inglaterra. Para el submodelo de fósforo tomaron en cuenta diferentes variables de estado como el fósforo en organismos vivos sobre el suelo, organismos vivos debajo del suelo, biomasa de las plantas (reservas de P), organismos muertos sobre el suelo, organismos muertos debajo del suelo, material vegetal (P en la materia orgánica del suelo), P disponible para las plantas en el suelo, P no disponible para las plantas en el suelo y P

contenido en herbívoros. La verificación del modelo mostró que se comporta de tal forma que varios procesos y sus interacciones resultan ser dinámicas temporales de las variables de estado, que están de acuerdo con las dinámicas descritas para los humedales. El modelo mostró un ajuste razonable con los datos obtenidos en campo.

Wang & Mitsch (2000) desarrollaron un modelo de la dinámica del fósforo para los cuatro humedales artificiales del río Des Plaines con el fin de observar la relación de diferentes componentes en la retención de fósforo. Para tener una mejor comprensión de los humedales construidos y predecir la retención de fósforo en sedimentos en diferentes condiciones hidráulicas, mostraron que los cuatro humedales retuvieron el 85% del fósforo, lo cual muestra su condición de sumideros de nutrientes.

Dahl *et al.* (2006) formularon el modelo LEEDS (Lake Ecosystem Effect Dose Sensitivity), una combinación de un modelo de fósforo para medir los efectos de la zoocría de peces en la eutrofización y otro de partículas suspendidas en el agua del lago Vänern (Suecia). Para la aplicación del modelo utilizaron dos escenarios, uno considerando el efecto del aumento de emisiones en una fábrica de pulpa y papel, y el segundo, cuantificando la importancia de la reducción en la escorrentía de fósforo desde los campos agrícolas al lago. Estos dos escenarios demostraron la utilidad de recurrir a un modelo dinámico de calidad, ya que la predicción del modelo fue comparable con los datos obtenidos en campo.

Håkanson & Eklund (2007) desarrollaron un modelo dinámico de balance de masa de fósforo total para áreas costeras de tres archipiélagos diferentes en el mar Báltico. El modelo está basado en ecuaciones diferenciales ordinarias y permite calcular las entradas, salidas y los flujos internos de fósforo mensualmente. El modelo se dividió en cuatro secciones: agua superficial, agua profunda, áreas de transporte de sedimento finos y áreas de acumulación de sedimentos finos. Los resultados mostraron que el modelo predijo de manera satisfactoria la concentración de fósforo en aguas costeras. El modelo es fácil de utilizar porque todas las variables pueden ser tomadas de mapas o programas de monitoreo, y se puede usar para otras áreas similares, costas abiertas o estuarios, así como para otras sustancias diferentes al fósforo.

Håkanson & Eklund (2007) aplicaron el modelo anterior en el fiordo Ringkøbing (Jutland, Dinamarca) que presenta condiciones diferentes a las zonas anteriormente elegidas. Encontraron que el modelo, con nuevos cálculos agregados para macrófitas y almejas, también describe de manera satisfactoria las condiciones en el fiordo Ringkøbing, con lo cual demostraron que el modelo es una herramienta útil para interpretar cambios en diferentes ecosistemas costeros.

Kroeger (2008) desarrolló un modelo de primera generación para simular el ciclo del fósforo dentro de un humedal construido (humedal Walbridge, Canadá) y determinar su capacidad de retención de P. El modelo se evaluó como una herramienta para predecir la concentración de partículas de P y ortofosfato en efluentes. Sin embargo, el modelo no tuvo un buen desempeño debido a diferentes factores, incluyendo suposiciones incorrectas, parámetros de calibración pobres y falta de solidez en los métodos de cálculo.

Håkanson (2009) describió un modelo general de balance de masas de fósforo para áreas costeras (CoastMab) que puede ser usado para simular valores más confiables de bioindicadores, midiendo para esto la claridad del agua (discos Secchi), concentración de clorofila_a, biomasa de fitoplancton y concentración de cianobacterias en aguas costeras, en condiciones naturales o preindustriales en el golfo de Riga (mar Báltico). Este modelo permite hacer una aproximación a las condiciones previas a la industrialización en aguas costeras con eutrofización, además de prever posibles variaciones del ecosistema a cambios en el tiempo, siendo posible aplicarlo a otras zonas costeras.

Niño (2003) analizó la variación espaciotemporal del nitrógeno y del fósforo, las tasas de sedimentación y su relación con la distribución de *Egeria densa* en el embalse del Neusa (Cundinamarca, Colombia). Se observó que las diferencias espaciales y temporales en los contenidos de nitrógeno y fósforo se debían a las fluctuaciones estacionales de las afluencias de los caudales, a los cambios en el nivel del agua y a la distribución espacial de *Egeria densa*.

Pinilla (2006) realizó una modelación del pulso de inundación en el lago Boa (Caquetá, Colombia). Al comparar los valores de fósforo simulados con los encontrados en campo se observó que, aunque no tienen

una relación estadística significativa entre ellos, el comportamiento temporal sí tiende a ser el mismo: aumento durante el pulso de inundación (julio) por mayor descarga del río Meta, e incremento en las épocas de aguas bajas (enero) debido a una resuspensión más intensa del sedimento.

Restrepo *et al.* (2006) realizaron una aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y el fósforo en la ciénaga de Ayapel (Colombia). Para la simulación se utilizaron los modelos ELCOM y CAEDYM; el primero simula las condiciones hidrodinámicas del lugar y el segundo utiliza la información del ELCOM para simular la cadena trófica de la ciénaga. Los resultados obtenidos a partir del modelo son bastante similares a los obtenidos en campo, lo cual muestra que el modelo se ajusta a la realidad.

Método de simulación

Las simulaciones se realizaron utilizando Stella 9.1[®], software que ha sido utilizado para realizar modelos hidrológicos y ecológicos. (Jogersen & Bendoricchio, 2001; Zhang & Mitsch, 2005; Jorgensen, 2008). Se utilizó el sistema de interfaz de Stella para simular cambios mensuales y condiciones extremas de mayor inundación y menor 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 5.2) se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y las de estado del modelo (anexo B2). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones del fósforo total y el estado trófico del humedal en sus tres secciones, con relación a la carga de entrada, y en especial a la proveniente de los canales Ángeles y Carmelo, que recogen las aguas provenientes de sus respectivas cuencas aferentes en la sección 1 (figura 5.1).

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 (Fraile *et al.*, 1995; Håkanson & Peters, 1992; Håkanson, 2009). El modelo tiene en cuenta la dinámica del almacenamiento del fósforo total para cada sección del humedal, de acuerdo con el patrón de carga de ingreso ($C_{in} \cdot Q$) de fósforo total para todo el humedal. El modelo también sirve para simular el comportamiento de dos indicadores de estado trófico de cada sección del humedal, de acuerdo con la concentración de ingreso de fósforo total a 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 puede simular la concentración máxima estimada de fósforo total, que se ha definido 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.

El modelo de balance de masas para la determinación de fósforo total

Los modelos de eutrofización 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 la siguiente ecuación diferencial (Håkanson & Boulion, 2002):

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

Donde:

- V: Volumen del humedal (m^3)
- dc/dt: El cambio de la concentración (dC) de una substancia en el cuerpo de agua, para el caso fósforo total (Pt), por unidad de tiempo ($mg/m^3/año$)

- 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 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 como un valor mensual. El tiempo de retención de una partícula en suspensión o de una sustancia es definido de la siguiente manera:

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

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 con la siguiente fórmula (Håkanson & Boulion, 2002):

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

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:

$$C = C_{in} \cdot [1 / (1 + \sqrt{T_w})]^{0,82} \quad (4)$$

VARIABLES DEL MODELO

Tabla 5.2. Variables del modelo, unidades y fuentes.

	Variables e índices	Valores/unid.	Fuente
HUMEDAL JABOQUE	Área cuenca aferente humedal Jaboque	km ²	Universidad Javeriana (2007)
	Aporte cuenca aferente (Canal los Angeles + Carmelo) Flujo de entrada	m ³ /mes	Estimación a partir de datos de IDEAM
	Precipitación anual	mm	Fuente IDEAM
	Concentración Pt /Sec – Zona de ingreso a la Sec1	mg/m ³	Datos de campo – Instituto de Ciencias Naturales – Universidad Nacional
	Concentración Pt /Sec – Zona de ingreso a la Sec2	mg/m ³	Datos de campo – Instituto de Ciencias Naturales – Universidad Nacional
	Concentración Pt /Sec – Zona de ingreso a la Sec3	mg/m ³	Datos de campo – Instituto de Ciencias Naturales – Universidad Nacional
	Cantidad de Pt estimado	mg/m ³	Modelado
	Pt Vollenweider/Humedal	mg/m ³	Modelación /Modelo Vollenweider
	Pt OCED/ Humedal	mg/m ³	Modelación/ Modelo OCED
	Tiempo hidráulico de retención (THR)	días/año	Modelación sub modelo hidrológico
	Volumen de sección	m ³ /mes	Modelación sub modelo hidrológico
	Profundidad sección	m	Instituto de Ciencias Naturales- Universidad Nacional
	Área sección	m ²	Datos de campo Universidad Nacional
	Tasa de sedimentación	mg/m ² /t	Håkanson & Peters (1992) Håkanson & Boulion (2002)

Fuente: Elaboración propia

SUPUESTOS DEL MODELO

- 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.

- Los datos de fósforo total disponibles corresponden a un año de muestreo, realizado por el grupo de investigación Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad

Nacional de Colombia (Álvarez, 2005), representando periodos húmedos y secos (tabla 5.3).

- El modelo no incluye las cargas internas de fósforo generado por la descomposición de macrófitas y los derivados de las excreciones del zooplancton y macroinvertebrados.

- El modelo supone una condición estable de mezcla, toda vez que por la profundidad promedio del humedal de 60cm es poco probable la existencia de una condición estratificada de la masa de agua.

- 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).

- Con el fin de facilitar la modelación se tuvieron en cuenta los promedios mensuales de fósforo total encontrados en las zonas de flujo de entrada a cada sección.

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

Resultados

141

Las variaciones de la concentración del fósforo total en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación y de la descarga de la cuenca aferente. El resultado está indicando que en el humedal este proceso biogeoquímico tiene una gran dependencia del ciclo hidrológico (Wetzel, 2001; Håkanson & Boulion, 2002; Mitsch *et al.*, 1995). Se puede observar que en los periodos de altas precipitaciones, en los meses de mayo-junio y octubre-noviembre, las concentraciones de fósforo total disminuyen. La carga de fósforo se diluye en un mayor volumen de agua.

En los meses secos las concentraciones de fósforo aumentan en cada una de las secciones. De igual manera, es evidente que las variaciones de concentración de fósforo en la sección 1 son más altas que en sección 2. En el tercio bajo las concentraciones tienden a disminuir (figura 5.1 y tabla 5.3). El resultado se debe a que esta sección tiene mayor capacidad de almacenamiento de agua y parcialmente se diluye la carga de fósforo.

En la figura 5.1 y en la tabla 5.3 se muestran las estimaciones de la marcha mensual de la carga de fósforo (C_{in}) para cada sección. Nótese que en los meses de diciembre-marzo y julio-septiembre, los de menores precipitaciones, se presentan las concentraciones más altas de fósforo, y en los meses de mayores precipitaciones, abril-junio y octubre-noviembre disminuye la concentración de fósforo en todas las secciones. La tercera sección es la que muestra un comportamiento más homogéneo, con variaciones menos drásticas que en las secciones 1 y 2.

El tercio alto del humedal presenta tiempos hidráulicos de retención del agua bajos que inciden en el ciclo geoquímico del fósforo (Fraile *et al.*, 1995; Håkanson & Boulion, 2002). Por definición, se considera que el tiempo hidráulico de retención del agua (THR) es igual al tiempo de retención de una sustancia (T_r) no reactiva; cuando $T_r < THR$ para sustancias y partículas de carácter alóctono, estas son transportadas desde la cuenca aferente y distribuidas en un patrón de bolsas con diferente concentración de fósforo, que disminuye en la medida en que aumenta la distancia a la fuente del vertimiento (Håkanson & Boulion, 2002). Esta situación es ayudada por los efectos de la resuspensión, que se incrementa por el aumento leve de temperatura y los vientos en los meses secos. A diferencia de lo que sucede en el primero y segundo tercio, y en el tercio bajo las concentraciones de fósforo tienden a disminuir y a equilibrarse. Este resultado se debe a que esta sección todavía mantiene una condición hidráulica en la que la tasa de retención del fósforo es menor a la tasa de retención del agua ($T_r < THR$), lo con lo cual se mantiene la acción depuradora de esta parte del humedal.

En la figura 5.2 y en la tabla 5.3 se muestran los resultados de la modelación de la carga de fósforo para cada sección. Se nota al comparar las dos figuras que el modelo reproduce el comportamiento de la carga mensual promedio estimada en campo (C_{in}) para cada sección. Las mayores variaciones se dan en el tercio alto entre los meses con menores precipitaciones, esto es, entre junio y septiembre. Sin embargo, este comportamiento no se refleja en el tercio medio, donde las mayores variaciones se presentaron entre enero y febrero, y en el último tercio, donde se presentaron en febrero. De acuerdo a

este comportamiento, pareciera que el patrón de variación obedece a factores relacionados con la dinámica interna de cada sección, que podría estar influenciada por características morfométricas de sus cubetas.

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

Al comparar los datos estimados con los datos modelados mediante un análisis de regresión, se encontró una buena correspondencia:

$$r^2=0,72; y=0,6906(x)+0,2368 \text{ (figura 5.2 y tabla 5.3).}$$

Existe una diferencia entre los valores estimados y los meses modelados. Estas se presentaron entre los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y noviembre, sugiriendo que las diferencias entre lo observado y lo estimado no se deben al hidropериodo, sino que probablemente podrían deberse a las características morfométricas de esta zona, toda vez que la canalización y construcción de 'materas interiores' afecta directamente al tiempo hidráulico de retención.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

Cuando se compararon los datos estimados con los datos modelados de fósforo total se encontró una correlación aceptable, con un nivel de correspondencia de:

$$r^2=0,81; y=0,4778(x)+0,3331 \text{ (Figura 5.2 y Tabla 5.3).}$$

Las diferencias entre las concentraciones encontradas de fósforo total y las modeladas se presentaron en los meses de enero, febrero y marzo, que corresponden a periodos de verano, lo que podría deberse a un aumento del tiempo hidráulico de retención, que es usual en estos meses.

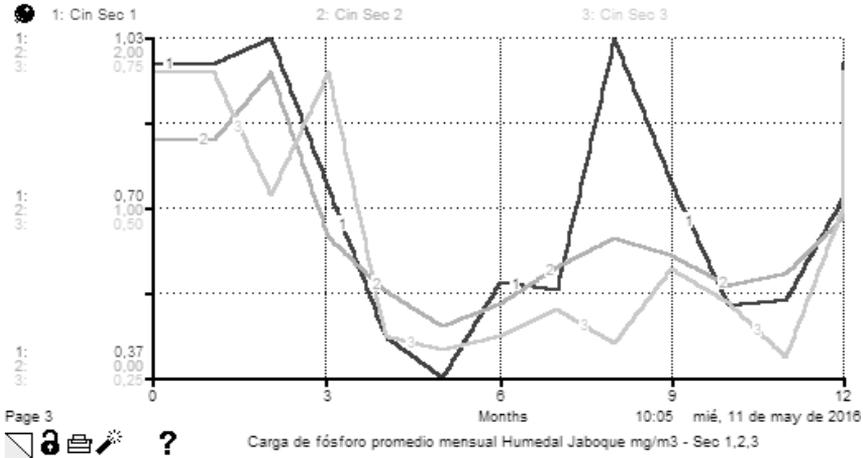


Figura 5.1. Promedio de la carga mensual de fósforo que entra a cada sección.

1: C_{in_sec1} - Concentración de carga de fósforo en la entrada al humedal, sección 1 (mg/m^3). 2: C_{in_sec2} - Concentración de carga de fósforo entrada al humedal, sección 2 (mg/m^3). 3: C_{in_sec3} - Concentración de carga de fósforo entrada al humedal, sección 3 (mg/m^3).

Fuente: Elaboración propia

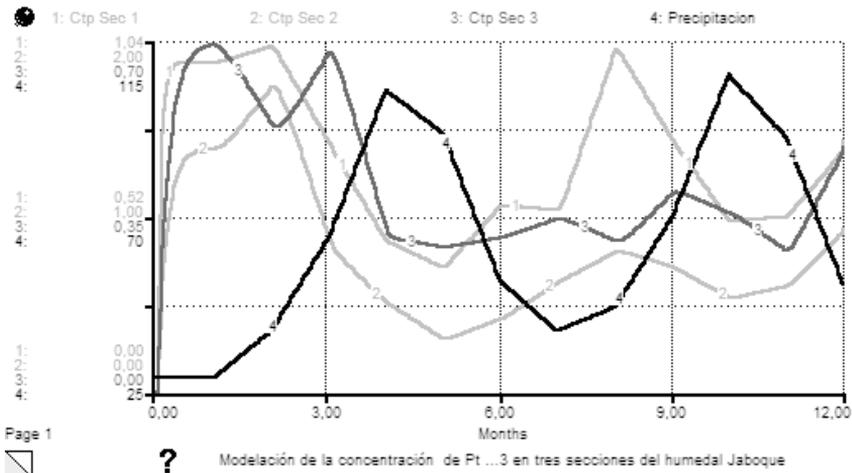


Figura 5.2. Modelación de concentraciones de fósforo para cada sección

1: C_{ip_sec1} - Concentración de fósforo, sección 1 (mg/m^3). 2: C_{ip_sec2} - Concentración de fósforo, sección 2 (mg/m^3). 3: C_{ip_sec3} - Concentración de fósforo, sección 3 (mg/m^3).

Fuente: Elaboración propia

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

Esta sección, a diferencia de las dos primeras, es la de mayor extensión del sistema (aproximadamente 315308,4 m²). Al igual que en las secciones anteriores, se encontró una buena reciprocidad entre los valores estimados y modelados, con una correspondencia de:

$$r^2=0,85; y=0,8597(x)+0,0751 \text{ (figura 5.2 y tabla 5.3).}$$

Las diferencias entre los valores encontrados en estimados y los simulados se presentan principalmente en los meses diciembre y marzo, cuando aumenta el tiempo hidráulico de retención.

Modelación del índice de estado trófico (IST)

Los resultados de las modelaciones en la sección 1 realizadas para determinar el índice de estado trófico describen que esta sección del humedal se encuentra en condiciones de eutrofia con valores que oscilan entre 27,6 mg/m³ y 60,13 mg/m³ de fósforo total. En el segundo tercio los valores fluctúan entre 14,52 mg/m³ y 53,8 mg/m³ de fósforo total, que corresponden a estados de eutrofia. En los meses con mayores precipitaciones 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 los nutrientes (Jørgensen, 2003). No obstante, también es de resaltar que en este sector predominan otros factores que explican la eutrofia, como son la abundancia de macrófitas, altas concentraciones de clorofila_a (Chl_a) y condiciones de hipoxia seguramente debidas a la construcción de vasos y jarillones (Álvarez, 2005).

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

En el tercio alto del humedal los valores fluctúan entre 27,65 mg/m³ y 60,3 mg/m³, que corresponden a condiciones eutróficas (tabla 5.3 y figura 5.3). Durante todo el año predominan las condiciones eutróficas,

que indican deterioro de esta sección. Así, mismo los tiempos de retención aumentan, permitiendo el restablecimiento de los ciclos biogeoquímicos de la sección (tabla 5.3 y figura 5.3).

En la figura 5.3 y tabla 5.3 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 las secciones del humedal.

En la primera sección, en los meses de menores precipitaciones – diciembre, enero y febrero– el índice de estado trófico se estimó en $58,41 \text{ mg/m}^3$, $59,84 \text{ mg/m}^3$ y $60,13 \text{ mg/m}^3$, con un THR de 14,24 y 17 días/año. En agosto y septiembre el resultado fue $52,19 \text{ mg/m}^3$ y $36,58 \text{ mg/m}^3$, con 15 días/año y 11 días/año de THR, respectivamente. En los meses de mayores precipitaciones –abril y mayo– el índice de estado trófico se estimó en $27,65 \text{ mg/m}^3$ y $28,47 \text{ mg/m}^3$, con un THR de 8 y 9 días/año. Por último, en octubre y noviembre el IST se estimó en $32,14 \text{ mg/m}^3$ y $31,97 \text{ mg/m}^3$, con 8 y 9 días/año. El promedio del IST fue de 45,9 y del THR de 14 días/año.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

En la segunda sección en los meses de menores precipitaciones – diciembre, enero y febrero– el índice de estado trófico se estimó en $53,84 \text{ mg/m}^3$, $55,26 \text{ mg/m}^3$ y $67,01 \text{ mg/m}^3$, con un THR de 34, 59 y 43 días/año. En agosto y septiembre el IST fue de $52,19 \text{ mg/m}^3$ y $36,58 \text{ mg/m}^3$, con 38 y 28 días/año. En los meses de mayores precipitaciones –abril y mayo– el índice de estado trófico se estimó en $22,18 \text{ mg/m}^3$ y $14,52 \text{ mg/m}^3$, con un THR de 20 y 22 días/año. Para octubre y noviembre el IST fue de $32,14 \text{ mg/m}^3$ y $41,97 \text{ mg/m}^3$, con 20 días/año y 23 días/año de THR. El promedio del IST fue de 35,89 y del THR de 34 días/año.

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

En la tercera sección, en los meses de menores precipitaciones – diciembre, enero y febrero– el índice de estado trófico se estimó en $28,71 \text{ mg/m}^3$, $29,7 \text{ mg/m}^3$ y $22,95 \text{ mg/m}^3$, con un THR de 40, 68

y 50 días/año. En agosto y septiembre el IST fue de 14,52 mg/m³ y 18,17 mg/m³, con un THR de 44 y 22 días/año. En los meses de mayores precipitaciones –abril y mayo– el índice de estado trófico se estimó en 13,94 mg/m³ y 13,35 mg/m³, con un THR de 24 y 26 días/año. Para octubre y noviembre el IST se estimó en 15,67 mg/m³ y 12,97 mg/m³, con 23 días/año y 26 días/año de THR. El promedio del IST fue de 19,9 y del THR de 40 días/año.

Se aprecia en todas las secciones del humedal que tanto el tiempo hidráulico de retención como el índice de estado trófico tienden a ser mayores durante los meses de diciembre, enero, febrero, agosto y julio, meses de menores precipitaciones. A menor tiempo de retención se observa un menor valor del índice de estado trófico, mostrando que el comportamiento del IST se encuentra en función del THR. Los valores bajos del índice de estado trófico ocurren en los meses de abril y mayo, que coinciden con los valores bajos de THR; esta correspondencia se manifiesta en todas las secciones.

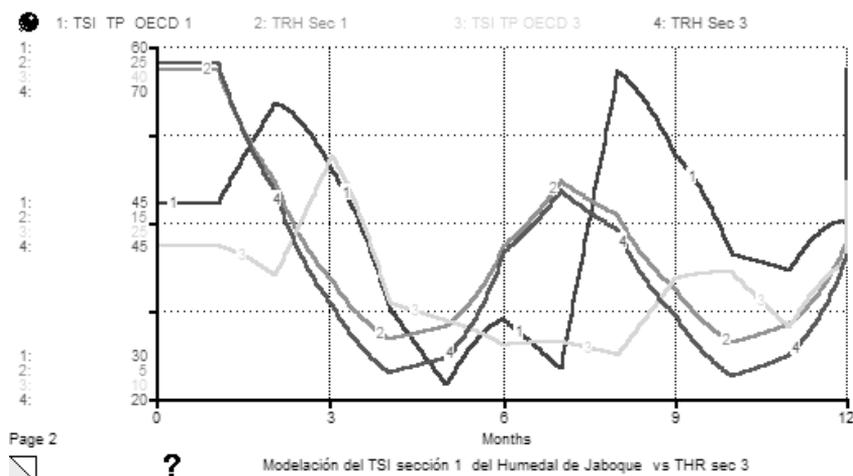


Figura 5.3. Modelación del índice de estado trófico (IST) y tiempo hidráulico de retención (THR).

1: IST - Índice de estado trófico OCDE, sección 1 (mg/m³). 2: THR - Tiempo hidráulico de retención, sección 1 (días/año). 3: IST - Índice de estado trófico OCDE, sección 3 (mg/m³). 4: THR - Tiempo hidráulico de retención, sección 3 (días/año).

Fuente: Elaboración propia y OCDE (1982).

De igual manera, se hace evidente que el tercio bajo del humedal se encuentra en condiciones mesotrofia y que en los dos primeros tercios las condiciones son de eutrofia. Las variaciones del índice de estado

tráfico son fuertes, notándose una pérdida del papel amortiguador de la contaminación en estas secciones (tabla 5.3). Los resultados anteriores muestran que en las temporadas invernales se reducen las concentraciones de fósforo, al igual que los tiempos hidráulicos de retención, indicando que podría existir un fenómeno de lavado de nutrientes por aumento de la descarga de agua y, como lo señala Jørgensen (2003), un mejoramiento del estado trófico del humedal.

Sin embargo, Zhang & Mitsch (2005) sugieren tiempos hidráulicos de retención superiores a 15 días para que se ejerza una función depuradora en humedales. En síntesis, se podría afirmar que en la tercera sección del humedal se combinan condiciones de carácter físico y biológico que determinan su función depuradora en el sistema del humedal 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; estos indican que el modelo no sobreestima los valores y que su variación es relativamente baja. En la segunda sección el error relativo promedio fue de $-0,03$ y la desviación estándar de 0,16. Cuando el valor del error relativo es negativo se puede 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 se estimó 0,03 y la desviación estándar en 0,16, indicando poca variación. En conclusión, se puede afirmar que los resultados de la modelación para todas las secciones del humedal indican que el modelo tiene una buena capacidad descriptiva, debido a que reproduce el comportamiento general de la dinámica de acuerdo con los datos estimados en campo (tabla 5.4).

Análisis de sensibilidad del modelo

Para el análisis de sensibilidad del modelo (Håkanson, 2004; Jørgensen & Bendoricchio, 2001) se tuvo en cuenta el promedio anual de la carga de fósforo que ingresa a cada sección del humedal como variable independiente y el índice de estado trófico (IST) para las tres

Tabla 5.3. 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 Tráfico (IST) y Tiempo hidráulico de retención.

HUMEDAL JABOQUE	Pt Sec 1 estimado mg/m ³	Pt Sec 1 Modelado mg/m ³	Pt Sec 2 Estimado mg/m ³	Pt Sec2 Modelado mg/m ³	Pt Sec 3 estimado mg/m ³	Pt Sec 3 Modelado mg/m ³
Enero	0,98	0,99	1,4	0,92	0,95	0,97
Febrero	1,03	1,02	1,8	1,1	0,8	0,58
Marzo	0,74	0,7	0,83	0,87	0,7	0,69
Abril	0,45	0,43	0,51	0,55	0,31	0,36
Mayo	0,37	0,43	0,3	0,33	0,35	0,3
Junio	0,36	0,56	0,43	0,45	0,31	0,32
Julio	0,546	0,8	0,65	0,65	0,35	0,36
Agosto	1,03	0,87	0,82	0,82	0,75	0,72
Septiembre	0,75	0,59	0,72	0,74	0,41	0,46
Octubre	0,51	0,52	0,54	0,57	0,36	0,37
Noviembre	0,52	0,7	0,61	0,62	0,28	0,3
Diciembre	0,72	0,76	0,94	0,94	0,5	0,69
Promedio anual	0,67	0,7	0,8	0,71	0,51	0,51
Desviación estándar	0,25	0,2	0,42	0,22	0,23	0,22
	IST OCED Sec 1	IST OCED Sec 2	IST OCED Sec 3	THR Sec 1 Dias /año	THR Sec 2 Dias /año	THR Sec 3 Dias /año
Enero	59,84	55,26	29,7	24	59	68
Febrero	60,13	67,01	22,95	17	43	50
Marzo	42,87	34,64	28,52	12	29	33
Abril	27,65	22,18	13,94	8	20	24
Mayo	28,47	14,52	13,36	9	22	26
Junio	36,11	20,32	14,53	14	34	41
Julio	50,3	29,07	16,59	17	43	50
Agosto	52,19	34,94	14,52	15	38	44
Septiembre	36,58	30,46	18,17	11	28	32
Octubre	32,14	23,12	15,67	8	20	23
Noviembre	41,97	25,98	12,97	9	23	26
Diciembre	58,14	53,84	28,71	14	34	40
Promedio anual	45,09	35,89	19,95	14	34	40
Desviación estándar	12,3	16,5	6,89	5,43	13,34	15,361

Fuente: OCDE (1981) y Volenweider (1982).

secciones como variables dependientes, para verificar si la relación entre la descarga de la cuenca aferente, el volumen de cada sección y la carga de fósforo total se explica con base en la concentración del tributario corregida por la renovación hidráulica. Se verificó la influencia de la concentración de fósforo en la marcha del indicador de índice de estado trófico. Y se prueba la solidez del modelo por la relación proporcional entre las cargas de fósforo que ingresan a cada sección (figuras 5.4, 5.5, 5.6 y tabla 5.5). El análisis de sensibilidad permite hacer inferencias y predicciones relacionadas con la carga máxima de fósforo para mantener un estado de trófico mesotrófico –en el mejor de los casos– en las secciones del humedal.

En las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad aplicado a las tres secciones del humedal y se representa el comportamiento del índice de estado trófico de acuerdo a las variaciones de la carga de fósforo, desde concentraciones de 0,2 hasta 2,2 mg/m³. En la medida en que aumenta la concentración de la carga aumenta el índice de estado trófico, permitiendo predecir el estado trófico de cada sección (tabla 5.5).

En la figura 5.4 y en la tabla 5.6 se muestra el resultado del análisis de sensibilidad para la primera sección del humedal; las curvas simuladas del índice de estado trófico muestran una tendencia a comportarse de acuerdo al patrón estacional del THR, con incrementos en los meses de diciembre-enero-febrero y julio-agosto-septiembre. En las épocas de menores precipitaciones el índice varía entre 15,79 mg/m³ a 112,84 mg/m³.

En la figura 5.5 y tabla 5.6 se muestra el resultado del análisis de sensibilidad para la sección dos; las curvas simuladas del índice de estado trófico muestran una tendencia a comportarse de acuerdo al patrón estacional del THR, con incrementos en los meses de diciembre-enero-febrero y julio-agosto-septiembre. En las épocas de menores precipitaciones el índice varía entre 10,79 mg/m³ y 77,99 mg/m³.

En la figura 5.6 y tabla 5.6 se muestra el resultado del análisis de sensibilidad para la sección tres; las curvas simuladas del índice de estado trófico muestran una tendencia a comportarse de acuerdo al

Tabla 5.4. Resultado del cálculo del error relativo del modelo aplicado a todas las secciones.

Meses	Error relativo Sec 1	Error relativo Sec 2	Error relativo Sec 3
Enero	0,01	-0,34	0,02
Febrero	-0,01	-0,39	-0,28
Marzo	-0,05	0,05	-0,01
Abril	-0,04	0,08	0,16
Mayo	0,16	0,1	-0,14
Junio	0,56	0,05	0,03
Julio	0,47	0	0,03
Agosto	-0,16	0	-0,04
Septiembre	-0,21	0,03	0,12
Octubre	0,02	0,06	0,03
Noviembre	0,35	0,02	0,07
Diciembre	0,06	0	0,38
Promedio	0,09	-0,03	0,03
Desviación estándar	0,24	0,16	0,16

Fuente: Elaboración propia

patrón estacional del THR, con incrementos en los meses de diciembre-enero-febrero y julio-agosto-septiembre. En las épocas de menores precipitaciones, el índice varía entre 10,28 mg/m³ y 73,42 mg/m³.

En la tabla 5.5 se muestran los resultados de la modelación del análisis de sensibilidad, en donde se aprecia que en la sección 1 los límites de la carga de fósforo oscilan entre 0,2 mg/m³ y 0,35 mg/m³, y para el tercio medio del humedal entre 0,62 mg/m³ y 0,77 mg/m³. Para lograr un estado mesotrófico, la carga de entrada para el tercio bajo debe mantenerse como máximo en 0,77 mg/m³. El tercio alto llegaría a un estado de hipertrofia si se superaran concentraciones de 2,06 mg/m³. De mantenerse las actuales condiciones de gestión del manejo del

humedal, es posible que las descargas aumenten o sean mayores y se llegue a un estado de eutrofia generalizado. 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 comprensión de la dinámica de la eutrofización.

En términos de gestión y manejo de 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 $0,2 \text{ mg/m}^3$ de fósforo se estaría llegando a niveles de mesotrofia, condición aceptable para la recreación y riego; obviamente, si la oferta hídrica del humedal lo permite. Pero dadas las actuales condiciones y los resultados de la modelación, se hace pertinente mejorar las condiciones tróficas de la sección 3 (tercio conservado) e iniciar investigaciones para disminuir la incertidumbre sobre la recuperación de los dos primeras secciones.

Tabla 5.5. Análisis de sensibilidad. La serie corresponde a los niveles de Pt como variable independiente y los de IST a las respuestas.

Serie	Fósforo total variación mg/m ³	Índice de estado trófico mg/m ³ OCED Sección 1	Índice de estado trófico mg/m ³ OCED Sección 2	Índice de estado trófico mg/m ³ OCED Sección 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

Fuente: Elaboración propia

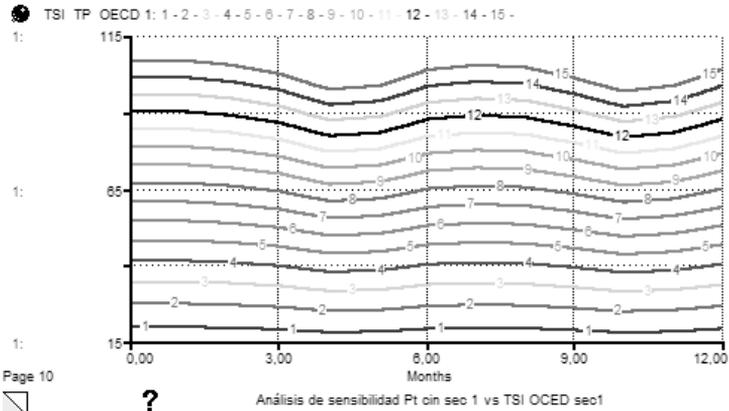


Figura 5.4. Análisis de sensibilidad del comportamiento del IST, sección 1.
 Pt: Variable independiente. IST: Variable dependiente.
Fuente: Elaboración propia

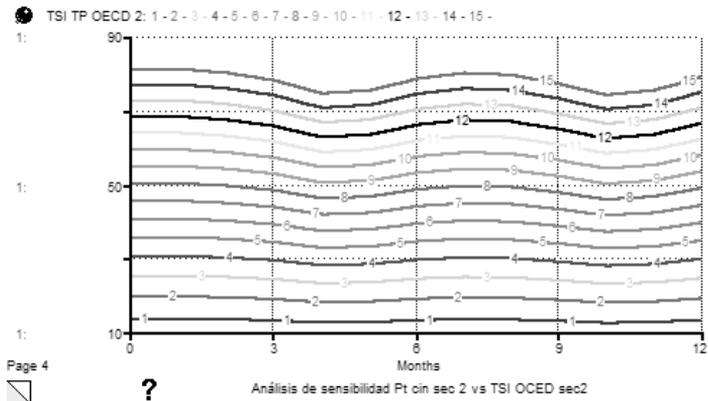


Figura 5.5. Análisis de sensibilidad del comportamiento del IST, sección 2.
 Pt: Variable independiente. IST: Variable dependiente.
Fuente: Elaboración propia

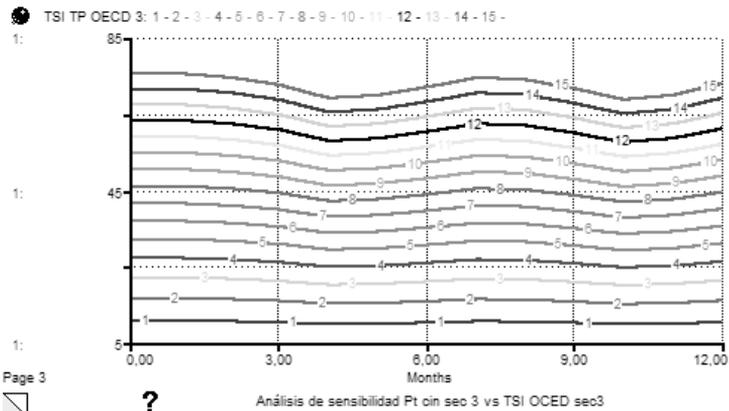


Figura 5.6. Análisis de sensibilidad del comportamiento del IST, sección 3.
 Pt: Variable independiente. IST: Variable dependiente.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.6. Resultado del análisis de sensibilidad, secciones 1, 2 y 3.

HUMEDAL JABOQUE – SECCIÓN 1 -TERCIO ALTO								
Niveles C ₀ Pt mg/m ³	0,2	0,34	0,48	0,62	0,77	0,91	1	1,2
Meses								
1	16,26	25,29	33,65	41,57	49,18	56,53	63,67	70,65
2	16,02	24,92	33,16	40,97	48,46	55,71	62,75	69,62
3	15,58	24,24	32,25	39,85	47,13	54,18	61,03	67,71
4	14,81	23,05	30,66	37,88	44,81	51,51	58,02	64,37
5	14,99	23,32	31,04	38,34	45,35	52,13	58,72	65,16
6	15,79	24,57	32,7	40,39	47,78	54,92	61,87	68,64
7	16,02	24,92	33,16	40,97	48,46	55,71	62,75	69,62
8	15,91	24,75	32,93	40,68	48,12	55,31	62,3	69,13
9	15,38	23,92	31,83	39,32	46,51	53,47	60,22	66,82
10	14,73	22,91	30,48	37,66	44,55	51,21	57,68	64
11	14,99	23,32	31,04	38,34	45,35	52,13	58,72	65,16
12	15,79	24,57	32,7	40,39	47,78	54,92	61,87	68,64
Niveles C ₀ Pt mg/m ³	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2	2,2	
Meses								
1	77,47	84,17	90,75	97,23	103,61	109,91	116,13	
2	76,35	82,95	89,43	95,81	102,11	108,31	114,44	
3	74,25	80,67	86,98	93,19	99,31	105,34	111,31	
4	70,59	76,7	82,69	88,6	94,41	100,15	105,82	
5	71,45	77,63	83,7	89,67	95,56	101,37	107,11	
6	75,28	81,78	88,18	94,47	100,67	106,79	112,84	
7	76,35	82,95	89,43	95,81	102,11	108,31	114,44	
8	75,8	82,36	88,8	95,13	101,38	107,54	113,63	
9	73,28	79,61	85,84	91,96	98	103,96	109,84	
10	70,18	76,25	82,21	88,07	93,86	99,56	105,2	
11	71,45	77,63	83,7	89,67	95,56	101,37	107,11	
12	75,28	81,78	88,18	94,47	100,67	106,79	112,84	

HUMEDAL JABOQUE – SECCIÓN 2 - TERCIO MEDIO								
Niveles C _o Pt mg/m ³	0,2	0,34	0,48	0,62	0,77	0,91	1	1,2
Meses								
1	11,21	17,43	23,2	28,66	33,9	38,97	43,89	48,7
2	11,06	17,2	22,89	28,28	33,45	38,45	43,31	48,06
3	10,78	16,78	22,32	27,58	32,62	37,49	42,23	46,86
4	10,3	16,02	21,31	26,33	31,14	35,8	40,33	44,74
5	10,41	16,2	21,55	26,62	31,49	36,2	40,78	45,24
6	10,85	16,88	22,46	27,75	32,82	37,73	42,5	47,15
7	11,06	17,2	22,89	28,28	33,45	38,45	43,31	48,06
8	10,99	17,09	22,74	28,1	33,24	38,21	43,04	47,75
9	10,65	16,57	22,05	27,25	32,23	37,05	41,73	46,3
10	10,24	15,93	21,2	26,19	30,98	35,61	40,11	44,5
11	10,41	16,2	21,55	26,62	31,49	36,2	40,78	45,24
12	10,92	16,99	22,6	27,92	33,03	37,96	42,76	47,45
Niveles C _o Pt mg/m ³	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2	2,2	
Meses								
1	53,4	58,02	62,56	67,02	71,42	75,76	80,05	
2	52,7	57,26	61,73	66,14	70,48	74,77	79	
3	51,39	55,83	60,2	64,49	68,73	72,91	77,03	
4	49,07	53,31	57,48	61,58	65,62	69,61	73,55	
5	49,61	53,9	58,12	62,26	66,35	70,39	74,37	
6	51,71	56,18	60,57	64,89	69,15	73,36	77,51	
7	52,7	57,26	61,73	66,14	70,48	74,77	79	
8	52,36	56,89	61,34	65,72	70,03	74,29	78,49	
9	50,77	55,16	59,47	63,72	67,9	72,03	76,11	
10	48,8	53,02	57,16	61,24	65,27	69,23	73,15	
11	49,61	53,9	58,12	62,26	66,35	70,39	74,37	
12	52,03	56,53	60,95	65,3	69,59	73,82	77,99	

HUMEDAL JABOQUE –SECCIÓN 3- ZONA CONSERVADA								
Niveles C _s Pt mg/m ³	0,2	0,34	0,48	0,62	0,77	0,91	1	1,2
Meses								
1	10,63	16,54	22,01	27,19	32,16	36,97	41,64	46,21
2	10,49	16,31	21,71	26,82	31,72	36,46	41,07	45,57
3	10,21	15,89	21,14	26,11	30,89	35,51	40	44,38
4	9,73	15,14	20,14	24,88	29,43	33,83	38,11	42,29
5	9,84	15,31	20,38	25,17	29,78	34,23	38,55	42,78
6	10,15	15,79	21	25,95	30,69	35,28	39,74	44,1
7	10,49	16,31	21,71	26,82	31,72	36,46	41,07	45,57
8	10,41	16,2	21,56	26,63	31,5	36,21	40,79	45,26
9	10,08	15,69	20,87	25,79	30,5	35,06	39,5	43,82
10	9,68	15,05	20,03	24,74	29,27	33,64	37,9	42,05
11	9,84	15,31	20,38	25,17	29,78	34,23	38,55	42,78
12	10,28	15,99	21,28	26,28	31,09	35,74	40,26	44,67
Niveles C _s Pt mg/m ³	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2	2,2	
Meses								
1	50,67	55,05	59,35	63,59	67,77	71,89	75,95	
2	49,97	54,29	58,53	62,71	66,83	70,89	74,91	
3	48,67	52,87	57,01	61,08	65,09	69,04	72,95	
4	46,37	50,38	54,32	58,2	62,02	65,79	69,51	
5	46,91	50,96	54,95	58,87	62,74	66,55	70,32	
6	48,36	52,54	56,64	60,69	64,67	68,6	72,49	
7	49,97	54,29	58,53	62,71	66,83	70,89	74,91	
8	49,63	53,92	58,14	62,29	66,38	70,41	74,4	
9	48,06	52,21	56,29	60,31	64,27	68,18	72,04	
10	46,11	50,1	54,01	57,87	61,67	65,42	69,12	
11	46,91	50,96	54,95	58,87	62,74	66,55	70,32	
12	48,98	53,21	57,38	61,47	65,51	69,49	73,42	

Fuente: Elaboración propia

Discusión

El modelo desarrollado constituye una aproximación a la comprensión proceso de eutrofización relacionado con el ciclo del fósforo en humedal Jaboque. Obviamente la aplicación de predicción admite discusión; esencialmente es un instrumento que facilita la comprensión de las relaciones entre el ciclo hidrológico y el comportamiento del fósforo total en el sistema.

Los resultados de la modelación mostraron que las variaciones de la concentración del fósforo total en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al bimodal de la precipitación y de la descarga de la cuenca aferente. El resultado indica que en el humedal este proceso biogeoquímico tiene una gran dependencia del ciclo hidrológico (Wetzel, 2001; Håkanson & Boulion, 2002; Mitsch et al., 1995). Se puede observar que en los periodos de altas precipitaciones, en los meses de mayo-junio y octubre-noviembre, las concentraciones disminuyen. La carga de fósforo se diluye en un mayor volumen de agua.

Se encontró una buena correspondencia entre los valores promedio estimados de fósforo y los valores modelados; la determinación del error relativo del modelo muestra que los resultados no están sobrestimados ni subestimados y los análisis de sensibilidad muestran la capacidad predictiva del modelo, sugiriendo que el modelo es robusto y para el caso de humedales con condiciones geomorfológicas e hidrológicas similares a Jaboque, es posible aplicarlo en proyectos de investigación y de manejo.

El índice de estado trófico el primera sección fue de 45,9 mg/m³, con un THR de 14 días/año; para la segunda sección el IST fue de 35,89 mg/m³, con un THR de 34 días/año; para la tercera sección el IST fue de 19,9 mg/m³, con un THR de 40 días/año. Estos valores muestran que el tercio bajo del humedal se encuentra en mejores condiciones, de mesotrofia, y que en los dos primeros tercios predominan las condiciones de eutrofia, notándose una pérdida del papel amortiguador de la contaminación en estas secciones. Los resultados anteriores muestran que en las temporadas invernales se reducen las concentraciones de fósforo, al igual que los tiempos hidráulicos de retención, indicando que

podría existir un fenómeno de lavado de nutrientes por aumento de la descarga de agua y, como lo señala Jørgensen (2003), un mejoramiento del estado trófico del humedal. Sin embargo, Zhang & Mitsch (2005) sugieren tiempos hidráulicos de retención superiores a 15 días para que se ejerza la función depuradora de los humedales. En síntesis, se podría afirmar que en la tercera sección de humedal se combinan condiciones de carácter físico y biológico que determinan su función depuradora en el sistema del humedal Jaboque, mostrando que en existe una alta dependencia entre el ciclo hidrológico y el estado trófico.

El análisis de sensibilidad mostró que podría existir cierta independencia de ciclo hidrológico en el último tercio del humedal, debido a que esta zona es la que amortigua la descarga proveniente de las dos primeras secciones, con lo cual probablemente en Jaboque el ciclo del fósforo estaría también en función de variables físicas como la resuspensión y la actividad biológica.

Los resultados de la modelación del análisis de sensibilidad indican que en la sección 1 el límite de la carga de fósforo total para lograr un estado mesotrófico oscila entre $0,2 \text{ mg/m}^3$ y $0,35 \text{ mg/m}^3$; en la sección dos entre $0,62 \text{ mg/m}^3$ y $0,77 \text{ mg/m}^3$; y la carga de entrada para la sección tres debe mantenerse como máximo en $0,77 \text{ mg/m}^3$. El tercio alto llegaría a un estado de hipertrofia si superara concentraciones de $2,06 \text{ mg/m}^3$. De mantenerse las actuales condiciones de gestión del manejo del humedal, es posible que las descargas aumenten o sean mayores y se llegue a un estado de eutrofia generalizado. Como se ha mencionado, el análisis de sensibilidad muestra, que lograr la meta de un estado oligotrófico es casi imposible. Con una carga de $0,2 \text{ mg/m}^3$ de fósforo el humedal estaría llegando a niveles de mesotrofia, condición aceptable para la recreación y riego, si la oferta hídrica lo permite.

Las predicciones realizadas en torno a los mínimos de concentración de carga de entrada a cada sección son preliminares; constituyen un resultado que en principio debería tenerse en cuenta para profundizar en futuras modelaciones, ya que ofrecen una oportunidad para establecer metas viables en torno a los propósitos de restauración de un sistema léntico, en el marco de la sustentabilidad ambiental (Harte, 1996).

La modelación se aplicó para estudiar el comportamiento de la concentración de fósforo total en el humedal y su relación con el índice de estado trófico y permitió ajustar las generalizaciones relacionadas con el fenómeno de eutrofización del humedal. El modelamiento del índice de estado trófico permitió clasificar de manera más apropiada la condición de salud de cada sección, además de corroborar una alta dependencia entre el tiempo de retención, la carga de fósforo y el estado trófico del humedal, variables que deben ser tenidas en cuenta en los programas de restauración y conservación.

Se concluye que en las tres secciones evaluadas la modelación fue un instrumento útil para determinar el rol y la influencia de las variables físicas como la precipitación y el hidropериodo en el comportamiento del fósforo total, con el fin de determinar estrategias de restauración y manejo ambiental.

Modelación dinámica de sólidos suspendidos totales (SST)

Capítulo 6

Resumen

Se propone un modelo de simulación dinámico para explicar de manera general el comportamiento de los sólidos suspendidos totales (SST) en el humedal Jaboque, en tres secciones con características físicas y químicas particulares. El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables y la simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones de los SST con relación a la carga de entrada proveniente de la cuenca aferente. Se verificó el carácter determinístico y el error relativo del modelo, así como su carácter predictivo, mediante el análisis de sensibilidad.

Los resultados de la modelación permitieron establecer el comportamiento general de los SST en cada tercio del humedal y comprobar la relación de dependencia de este factor con el ciclo hidrológico. El modelo predijo altas concentraciones de SST en los meses de abril, mayo, junio, octubre y noviembre. Los valores modelados fluctuaron, de acuerdo a las secciones, entre 85 mg/L y 101 mg/L, con un promedio de 65,12 mg/L y un tiempo hidráulico de retención de entre 8 y 9 días/año para la primera; en la segunda entre 57 mg/L y 69 mg/L, con un promedio de 50 mg/L y un TRH de entre 20 y 23 días/

año; y en la tercera sección entre 56 mg/L y 67 mg/L, en promedio 48,8 mg/L y un tiempo hidráulico de retención entre 24 y 26 días/año.

En contraste, los meses de diciembre, enero, febrero, agosto y septiembre presentaron una tendencia a la disminución de los valores modelados. En la primera sección estos fluctuaron entre 34 mg/L y 59 mg/L, con un promedio de 65,12 mg/L y un tiempo hidráulico de retención de entre 24 y 15 días/año; en la segunda sección entre 18 mg/L y 48 mg/L, con un promedio de 50 mg/L y un TRH de entre 58 y 38 días/año; en la tercera sección entre 14 mg/L y 46 mg/L, en promedio 48,8 mg/L y un tiempo hidráulico de retención de entre 68 y 44 días/año.

Se compararon los valores estimados de SST con los modelados, evidenciándose una correspondencia aceptable:

Sección 1: $r^2=0,95$; error relativo de 0,10

Sección 2: $r^2=0,71$; error relativo de 0,20

Sección 3: $r^2=0,67$; error relativo de 0,26

La comparación muestra que el modelo no tiende a la sobreestimación de los resultados. El análisis de sensibilidad ratificó que el modelo tiene una buena capacidad descriptiva y predictiva, y permitió corroborar la relación del ciclo hidrológico con la concentración de SST. Los resultados de la modelación permiten inferir la existencia del fenómeno de *trampa de sedimentos* en el primer tercio y último tercio del humedal, indicando una fuerte tendencia a la sedimentación del área más conservada.

Introducción

La función natural de los humedales se asemeja al papel de una esponja que recircula el agua en su interior y la libera lentamente, por lo cual estos cumplen funciones esenciales como la regulación de inundaciones y sequías, manteniendo la calidad del agua a través de la retención de sedimentos y nutrientes y la remoción de tóxicos. Así mismo, los humedales tienen la capacidad de estabilizar microclimas y retener carbono, contribuyendo

a mitigar el calentamiento global y sus efectos. Por otro lado, estos ecosistemas prestan servicios culturales, educativos, recreacionales y turísticos (Roldán, 1992; Pinilla, 1996, Wetzel, 2001).

A pesar de su importancia ecosistémica y social, los humedales han sufrido un proceso de deterioro debido al desarrollo urbano y al mal manejo de las basuras. Como resultado de estas acciones se ha producido un alto grado de contaminación o en el peor de los casos la pérdida total de estos ecosistemas. La acumulación de sólidos suspendidos es uno de los principales problemas de contaminación que presentan los humedales (Prescott & Tsanis, 1997). Este fenómeno se presenta en el humedal Jaboque, debido a que recibe el impacto de la urbanización y las actividades agrícolas, se han conducido a concentraciones de SST de entre 110 y 30 mg/L (Álvarez, 2005), que incrementan sus condiciones de eutrofización. Por estas razones se justifica la modelación dinámica de los SST, con miras a determinar y explicar su relación con el ciclo hidrológico y predecir de manera general el comportamiento de este material en el humedal.

Procesos ecológicos de los sólidos suspendidos totales

163

Los sólidos suspendidos totales (SST) incluyen al plancton, minerales de arcilla, arena, limo, coloides agregados, materia orgánica e inorgánica finamente dividida y otros microorganismos en el agua. Pueden provenir de varias fuentes y se dividen de acuerdo con la composición, ya sea orgánica o inorgánica, originándose en fuentes alóctonas o autóctonas de levantamiento de tierra o resuspensión (Håkanson, 2004). Los SST regulan dos de las mayores rutas de transporte, la de materiales disueltos en la zona pelágica y la sedimentación de partículas, por un lado, y la ruta en la zona bentónica, por otro (Håkanson *et al.*, 2005; Håkanson *et al.*, 2000). Estos son indicadores ambientales para determinar cambios geomorfológicos, contaminación y acciones del cambio climático. Los sedimentos en suspensión transportan cargas de nutrientes, restos de pesticidas, metales pesados y otros elementos. En la cubeta de agua disminuyen la cantidad de luz que penetra, afectando la fotosíntesis y la temperatura del agua, anomalías que están altamente relacionadas con el cambio climático (Salama & Monbaliu, 2004; Noe & Harvey, 2007).

Entre los factores que más inciden en la producción de sólidos suspendidos totales (SST) en sistemas acuáticos, se encuentran (Vollenweider, 1965, 1970; Carlson, 1977; Wetzel, 2001) la producción autóctona del humedal, el plancton y sus desechos metabólicos (heces) – lo cual se relaciona directamente con la cantidad de SST–, los materiales externos y en especial aquellas sustancias que cambian el color del agua, y la cantidad de material resuspendido. Los factores señalados no se comportan de manera independiente: tasas de sedimentación altas corresponden a cantidades altas de material en resuspensión. Las tasas altas de resuspensión generan una alta carga interna de nutrientes y el aumento de la producción; y una gran cantidad de sustancias de color significan una zona fótica reducida. A su vez, una alta producción está asociada con una alta sedimentación. La producción de SST también se debe a la erosión de los terrenos, ya sea por la actividad constructiva o por el arado de las tierras de cultivo, entre otros. La concentración de los SST está relacionada con las estaciones climáticas, con los regímenes del caudal y de las precipitaciones. Los cuerpos de agua con altos contenido de SST pueden ser estéticamente desagradables para las actividades recreativas. Los análisis de sólidos son importantes para el control de procesos biológicos y físicos de tratamiento de aguas residuales (Mora & Mata, 2007).

Los SST influyen en el transporte de la mayoría de contaminantes (Bradley & Gilvear, 2000). Los SST incluyen todos los tipos de material alóctono y autóctono y se reflejan en la concentración de detritus en la columna de agua. La variabilidad es alta y muchos factores afectan su comportamiento, como la intensidad de la descarga de agua de los tributarios, la intensidad de la precipitación, la temperatura y los vertimientos (Håkanson & Boulion, 2002; Håkanson *et al.*, 2005).

Modelos dinámicos de sólidos suspendidos en humedales

La ventaja de los modelos dinámicos es que son sencillos de usar y proveen relaciones generales; estos modelos han sido usados para estudiar la calidad del agua y analizar la concentración y carga de nutrientes (Mooij *et al.*, 2010). Weyhenmeyer *et al.* (1997) desarrollaron un modelo dinámico a partir de datos obtenidos de nueve

lagos en Suecia. Tomaron las muestras de sedimentos de diferentes profundidades y determinaron el flujo, distribución y origen de los sólidos suspendidos en la zona pelágica. El modelo incluyó los mecanismos que controlan el flujo de partículas alóctonas, autóctonas y resuspendidas en lagos durante la rotación y la estratificación. En periodos de rotación, la resuspensión de sedimentos está relacionada con el viento y con las olas y las partículas resuspendidas están distribuidas de manera uniforme en la columna de agua. Durante periodos de estratificación en lagos más profundos las partículas se enriquecen en el hipolimnion. El modelo describe en qué cantidad y a qué profundidad la materia es resuspendida y cómo se distribuye en la columna de agua. Además, muestra el tiempo del flujo y distribución de las partículas con relación a la velocidad del viento. Las variables utilizadas en el modelo fueron viento, la estratificación y morfometría del lago. Como resultado, el modelo puede explicar las diferencias en el tiempo, en el flujo, el origen y la distribución de los sólidos suspendidos en diferentes lagos. También, puede predecir las consecuencias de un cambio en la entrada de material alóctono o planctónico sobre el flujo y la distribución de sólidos suspendidos en lagos. Esta información es útil para entender la dispersión y bioasimilación de contaminantes y nutrientes en lagos, ya que los sólidos suspendidos actúan como transportadores de contaminantes y nutrientes.

Prescott & Tzanis (1997) desarrollaron un modelo de balance de masas que se basa en la teoría de conservación de masas, proveyendo información sobre ecosistemas con respecto a la entrada de fuentes y la importancia de cada carga. Se examinó el fósforo y las cargas de sólidos suspendidos en un puerto en Canadá. Las concentraciones de fósforo y sólidos suspendidos fueron determinadas para la columna de agua mediante los sedimentos de las ciénagas. Luego del reflujo, la escorrentía es el siguiente factor que contribuye a la concentración de sedimentos. Estos parámetros pueden ser utilizados para minimizar el impacto de los sedimentos en la calidad del agua.

Lindstrom *et al.* (1999) realizaron un modelo empírico para predecir concentraciones medias anuales para sólidos suspendidos. El parámetro más importante del modelo es la concentración de fósforo total. La producción autóctona es el proceso más importante en la concentración

de sólidos suspendidos en lagos. Así mismo, el pH y la resuspensión son explicados por el modelo en un 74%.

Håkanson *et al.* (2000) desarrollaron un modelo matemático dinámico de un ciclo mensual de sólidos suspendidos en lagos con diferentes niveles de profundidad. Concluyeron por medio de un análisis de sensibilidad que la sedimentación y la erosión están relacionadas con un descenso en la base de la onda, mientras que la salida y entrada de nutrientes, la mineralización y la mezcla están menos relacionadas.

Malmaeus & Håkanson (2003) desarrollaron un modelo para predecir la concentración de sólidos suspendidos en lagos. El modelo fue probado con datos empíricos de lagos europeos. Predijo los valores medios mensuales de concentración de sólidos suspendidos en dichos lagos. Según los análisis de incertidumbre y sensibilidad se demostró que la variable más importante es la producción autóctona y que los procesos internos influyen, pero en menor medida.

Dahl *et al.* (2006) realizaron un modelo dinámico para describir el flujo de los sólidos suspendidos y el fósforo en un lago en Suecia. Este modelo fue una adaptación del modelo LEEDS (Lake Ecosystem Effect Dose Sensitivity), el cual se aplica a dos situaciones: aumento de las emisiones de una planta de celulosa y papel a orillas del lago, y la disminución de las emisiones de fósforo alcanzado por una combinación de efectos en las tierras agrícolas, bosques y la construcción urbana.

Mooij *et al.* (2010) creen que la aplicación de múltiples modelos al mismo tiempo utilizando los modelos ya existentes puede ayudar al desarrollo de una visión científica más integrada sobre el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y así, proporcionar información esencial para la gestión de la calidad del agua.

Estructura del modelo de simulación dinámica

El modelo utilizado para describir la dinámica y el comportamiento de los SST se basa en los principios de balance de masas (Håkanson & Boulion, 2002; Håkanson, 2004) y permite definir al humedal como un tanque reactor, de tal manera que se asume la mezcla del humedal

como completa durante un intervalo de tiempo (dt). Así, el flujo de materia particulada (SST) o de ingreso de partículas al sistema se puede describir a partir de la siguiente ecuación diferencial:

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

Donde:

- V: Volumen de la cubeta del humedal (m³)
- dC/dt: Cambio de la concentración de una substancia (dC) por unidad de tiempo (dt) en el tributario o en el ingreso Q del caudal del tributario (m³/año)
- Q: Caudal del tributario (m³/mes).
- C_{in}: Concentración de SST en el tributario (mg/m³)
- C: Concentración de SST en el cuerpo de agua (mg/L)
- M_w: C·V. Masa de SST en la columna de agua (mg/L)
- R_{sed}: Tasa de sedimentación (x/x)
- M_s: M_w · R_{res}. Masa de SST en los sedimentos (mg/L)
- R_{res}: Tasa de resuspensión (x/x)

El modelo tiene en cuenta la descarga de agua del tributario y el flujo de salida en cada cubeta (m³/mes), la concentración de SST (mg/L) en cada sección, el área (m²), la profundidad (m), el volumen de las secciones (m³), la tasa de sedimentación, resuspensión y mineralización (tabla 6.1) (Håkanson & Petres, 1995; Håkanson, 2004).

Método de simulación

El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables. Se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo (anexo B3). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones de los SST en sus tres secciones con relación a la carga de entrada y, en especial, al proveniente de los canales Ángeles y Carmelo, que recogen las aguas de cuencas aferentes y las vierten en la sección 1. Con el fin de verificar el carácter determinístico y realizar la validación se realizaron regresiones simples lineales (Legrende & Legrende,

Tabla 6.1. Variables del modelo, unidades y fuentes

VARIABLES E ÍNDICES	VALORES/UNIDADES	FUENTE
Aporte cuenca aferente (Canales Ángeles + Carmelo) Flujo de entrada	m ³ /mes	Cálculo a partir de datos del IDEAM Cálculo
Profundidad promedio sección	m /mes	Datos de campo U. Nacional - Grupo I. Biodiversidad y Conservación
Tiempo hidráulico de retención (THR)	días/año	Simulación
Área sección	m ² /mes	Datos de campo U. Nacional- Grupo I. Biodiversidad y Conservación Simulación
Volumen sección	m ³ /mes	Simulación
Carga de entrada de SST	mg/l	Datos de campo U Nacional
Tasa de sedimentaciónm	es ⁻¹	(Hakanson & Boulion, 2002) (Hakanson & Petres, 1995)
Tasa de resuspensiónm	es ⁻¹	(Hakanson & Boulion, 2002) (Hakanson & Petres, 1995)
Tasa mineralización m	es ⁻¹	(Hakanson & Boulion, 2002) (Hakanson & Petres, 1995)
Masa Total SST Sección	grs/m ³	Simulación
Concentración de SST	grs/m ³	Simulación
Masa de carga interna de SST	grs/m ³	Simulación
Tiempo hidráulico de retenciónD	ías /año	Simulación
Flujo salida sección	m ³ /año	Simulación

Fuente: Elaboración propia

1998), que permitieron comparar los datos estimados en campo con los resultados modelados. Para evaluar la fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn & Håkanson, 2007) y se comprobó su carácter predictivo mediante el análisis de sensibilidad (Håkanson, 2004; Jogersen & Bendoricchio, 2001).

Supuestos del modelo

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

- En cada una de las secciones del humedal se asume la profundidad media.
- El caudal de entrada al humedal proviene básicamente de la descarga de cuenca aferente.
- La modelación de la dinámica de los SST se asume para cada una de las secciones, toda vez que existen barreras morfométricas que hacen que cada sección se comporte de manera independiente, pero dependientes de la descarga de la cuenca aferente.
- El modelo no tiene en cuenta la fracción de SST que se produce por la actividad biológica en el humedal que, si bien es importante, es difícil de calcular con certidumbre.
- Debido a que en el humedal Jaboque las diferencias entre temperatura del fondo y superficie son mínimas, con tendencia a ser iguales, se asume que no está estratificado.
- La descarga de la cuenca aferente se calculó con base en la relación existente entre precipitación y área (km²) de la cuenca aferente (Håkanson & Peters, 1995; Håkanson, 2005).
- Los datos que alimentan al modelo corresponden a un año hidrológico.

Resultados

El modelo conceptual de SST se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables. Se desarrollaron las ecuaciones para establecer la relación entre el ciclo hidrológico (precipitación) y la carga de sólidos suspendidos (anexo B3). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones de los SST en cada sección y determinar su relación con el comportamiento hidrológico del humedal.

En la figura 6.1 y en la tabla 6.2 se muestra el resultado de la modelación de balance de masas para la sección 1 del humedal. Se observa que el comportamiento de las curvas de precipitación, descarga de la cuenca aferente y la concentración de los SST son coincidentes con el comportamiento del hidroperiodo; en los meses de enero-febrero-marzo y julio-agosto, que son meses secos en los cuales disminuye la concentración de SST, estos fluctuaron entre 34,9 mg/L y 64,8 34.9 mg/L y el THR fluctuó entre 11 días/año y 24 días/año. En los meses de abril-mayo-junio y octubre-noviembre, con mayores precipitaciones y descargas de la cuenca aferente, aumenta la concentración de SST, con valores que fluctuaron entre 69,2 34.9 mg/L y 101,7 34.9 mg/L; el THR varió entre 8 días/año y 14 días/año.

En la tabla 6.2 se muestran los resultados de la modelación de la precipitación, la descarga de la cuenca aferente, la carga de entrada de SST y el tiempo hidráulico de retención modelados, encontrándose que estas variables son coincidentes con el comportamiento del hidroperiodo.

En la sección 2, en los meses de enero-febrero-marzo y julio-agosto, que son meses secos en los cuales disminuye la concentración de SST, estos fluctuaron entre 18,5 mg/L y 56,6 mg/L; el THR fluctuó entre 28 días/año y 59 días/año. En los meses de abril-mayo-junio y octubre-noviembre, meses con mayores precipitaciones y descargas de la cuenca aferente y en los cuales aumenta la concentración de SST, los valores fluctuaron entre 69,21 mg/L y 57,1 mg/L; el THR varió entre 20 días/año y 34 días/año.

Para la sección 3 del humedal, en los meses de enero-febrero-marzo y julio- agosto, meses secos en los cuales disminuye la concentración de SST, estos fluctuaron entre 14,45 mg/L y 58,15 mg/L; el THR fluctuó entre 32 días/año y 68 días/año. En los meses de abril-mayo-junio y octubre-noviembre, meses con mayores precipitaciones y descargas de la cuenca aferente, donde aumenta la concentración de SST, los valores fluctuaron entre 60,9 mg/L y 47,8 mg/L, mientras que el THR varió entre 20 días/año y 24 días/año.

La curva cuatro del THR muestra que en la medida que disminuye el THR aumenta la concentración de SST; esto ocurre en los meses de mayores precipitaciones y mayores descargas de la cuenca aferente. Por el contrario, cuando aumenta el THR, en los meses de menores precipitaciones y menor descarga de la cuenca aferente, disminuye

la concentración de SST. En estas condiciones el tercio alto recibe la mayor cantidad de SST que se transportan desde la cuenca aferente. Lo anterior indica que en épocas de invierno hay mayor transporte de SST pero que su permanencia en las secciones es corta, debido a que los sólidos son lavados por los mayores flujos de agua (Jorgensen, 2003).

Los resultados de la modelación de los SST se muestran en la figura 6.2 y en la tabla 6.2 para todas las secciones del humedal. Las curvas muestran que los SST se comportan de manera homogénea en las tres secciones e indican la existencia del transporte de sedimentos desde el tercio alto hacia el segundo y tercero. Sin embargo, se hace notorio que los valores de la curva de la sección 1 muestran una menor concentración de SST a lo largo del periodo, evento que puede asociar una menor capacidad de almacenamiento de esta parte del humedal, que por ello tiende a funcionar como un canal de paso en condiciones de altas precipitaciones.

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

Esta zona se caracteriza porque recibe directamente la descarga de SST de origen externo al humedal, que corresponde al material particulado que es transportado por el alcantarillado pluvial de la cuenca aferente. En esta cubeta se presentan altas concentraciones de SST, con valores que oscilan entre 38 y 91 mg/L. Los menores valores corresponden a épocas de verano y los más altos a estaciones lluviosas (figura 6.2 y tabla 6.2). La comparación entre los valores estimados de SST en campo y los valores modelados, arrojó como resultado una buena correspondencia:

$$r^2=0,95; y=1,1982(x)+10,862$$

Los meses con mayores diferencias fueron enero, marzo, abril, mayo, junio y octubre, que presentaron diferencias entre los valores estimados y los modelados (figura 6.3).

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

Esta sección, al igual que la primera, se encuentra fuertemente intervenida por la acción antrópica; la descarga de agua que recibe

proviene del tercio alto del humedal; parte importante de la misma ha sido desviada hacia los canales perimetrales.

En los meses de mayor precipitación se aumentan los SST y en invierno disminuyen; los valores registrados varían desde 34 mg/L hasta 94 mg/L (figura 6.2 y tabla 6.2) respectivamente, lo que indica una fuerte relación con el ciclo hidrológico. La concentración promedio anual fue de 64,2 mg/L, valor que corresponde a condiciones de eutrofia.

La comparación entre los valores observados y los modelados arrojó una buena correspondencia:

$$r^2=0,7115; y=0,6375(x)+9,449 \quad (\text{Figura 6.4})$$

En este tercio se presentan las mayores concentraciones de SST; sin ser las diferencias marcadas, es probable que estas sean explicadas en parte por la escorrentía proveniente de actividades agrícolas (Alvarez, 2005), la remoción de macrófitas por parte de lugareños y por las complejas condiciones morfométricas.

Tabla 6.2. Resultados de la modelación del balance de masas de SST

Variables Meses	Precip. Prom. mm	Descarg. mensual m3/mes	Estimado Sec1 mg/l	Modelado Sec1 mg/l	Estimado Sec2 mg/l	Modelado Sec2 mg/l
Enero	29	81964	40	34,98	36	18,58
Febrero	41	115880	50	45,3	68	38,78
Marzo	65	183712	70	64,85	83	56,68
Abril	103	291113	91	101,76	94	69,91
Mayo	92	260023	83	89,57	74	61,95
Junio	54	152622	69	69,23	65	57,68
Julio	41	115880	52	53,27	50	48,12
Agosto	47	132838	38	38,88	34	35,06
Septiembre	70	197844	63	59,03	66	48,86
Octubre	107	302418	74	85,55	75	57,71
Noviembre	91	257197	85	89,99	81	64,73
Diciembre	53	149796	46	49,08	47	48,09
Promedio	66,08	186773	63,42	65,12	64,42	50,51

Variables	Estimado Sec3 mg/l	Modelado Sec3 mg/l	THR Sec1 días/año	THR Sec2 días/año	THR Sec3 días/año
Meses					
Enero	30	14,4	24	59	68
Febrero	70	36,44	17	43	50
Marzo	91	58,15	12	29	33
Abril	83	60,97	8	20	24
Mayo	69	56,14	9	22	26
Junio	52	47,48	14	34	41
Julio	38	39,19	17	43	50
Agosto	63	46,48	15	38	44
Septiembre	74	53,45	11	28	32
Octubre	85	62,96	8	20	23
Noviembre	86	67,5	9	23	26
Diciembre	38	44,49	14	34	40
Promedio	64,92	48,97	13,3	32,87	38,05

Fuente: Elaboración propia

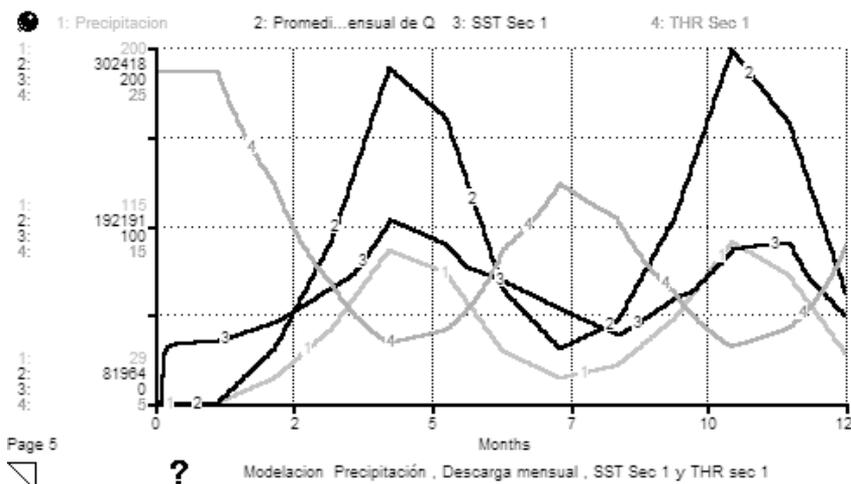
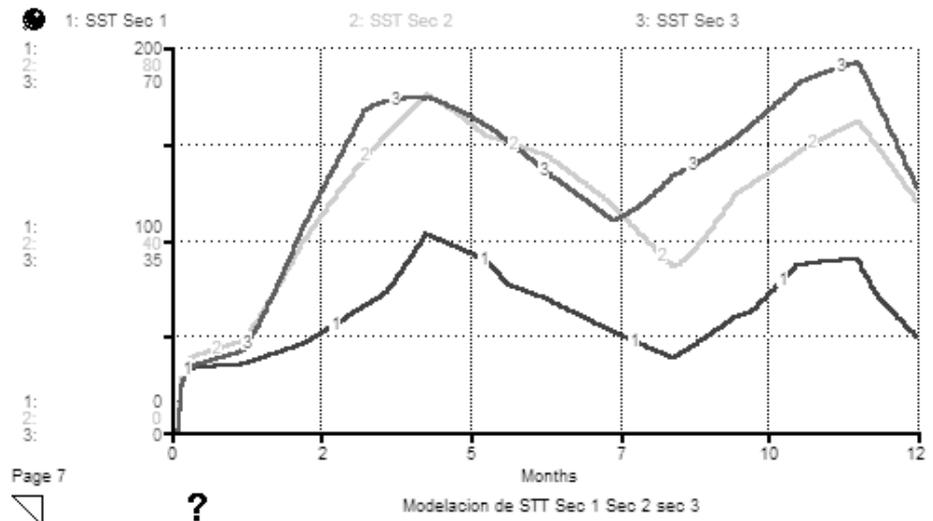


Figura 6.1. Resultado de la modelación del balance de masas de SST, sección 1.

1: Precipitación (mm). 2: Descarga de la cuenca aferente (m^3/mes). 3: Concentración de SST, sección 1 (mg/L). 4: Tiempo hidráulico de retención - THR (días año).

Fuente: Elaboración propia



Page 7

Figura 6.2. Modelación de los SST, secciones 1, 2 y 3.
 1: SST, sección 1 (mg/L). 2: SST, sección 2 (mg/L). 3: SST, sección 3 (mg/L).
Fuente: Elaboración propia

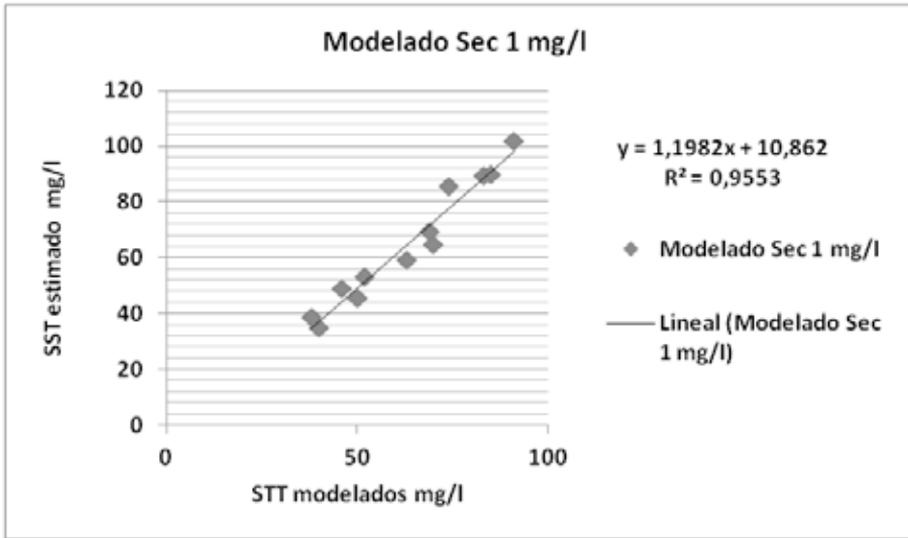


Figura 6.3. Resultados de la comparación entre los valores estimados de SST y valores modelados, sección 1 (mg/L).
Fuente: Elaboración propia

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

La principal fuente de SST proviene de la descarga del tercio medio. Se presentan concentraciones entre 30 mg/L y 91 mg/L y un promedio anual de 64,92 mg/L. Como en la primera y segunda secciones, el comportamiento de SST está supeditado al ciclo hidrológico. La correspondencia entre los datos observados y modelados fue aceptable:

$$r^2=0,6775; y=0,5705(x)+11,935 \text{ (Figura 6.5 y tabla 6.2)}$$

Las diferencias, al igual que en las anteriores secciones, obedecen a factores morfológicos de la cubeta y biológicos, principalmente. En efecto, no se han tenido en cuenta los aportes de SST provenientes de actividad biológica del humedal y la descomposición de biomasa en su interior, procesos que aportan una cantidad importante de SST según Vorosmarty *et al.* (2003).

Error relativo

Para verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn & Håkanson, 2007), para cada una de las secciones, para lo cual se compararon los promedios de los valores de campo con los valores modelados.

En la tabla 6.3 se muestran los resultados de la estimación del error relativo de la modelación para todas las secciones del humedal. Para la primera sección es de 0,01 y la desviación estándar de 0,09, indicando que los resultados no encuentran sobreestimados; para la segunda sección y la tercera es de -0,2 y -0,23 y con una desviación estándar de 0,16 y 0,20 respectivamente. Para estas dos secciones los resultados son muy cercanos a cero, indicando la fortaleza del modelo.

Análisis de sensibilidad del modelo

Para realizar el análisis de sensibilidad del modelo se tuvo en cuenta el promedio anual de precipitación en la zona (p) en la cuenca

aferente como variable independiente y la concentración SST en cada sección como variable dependiente. Los valores de la precipitación se establecieron según clases entre 400mm/año y 1300mm/año, a partir del comportamiento histórico en la cuenca aferente en los últimos 39 años (véase capítulo 3). El análisis de sensibilidad permitió verificar la influencia del ciclo hidrológico en el comportamiento de las concentraciones de SST en las secciones del humedal; también permitió confirmar la solidez del modelo en tanto que este refleja la relación existente entre la precipitación, el ciclo hidrológico, la descarga de agua al humedal y la concentración de SST, evidenciándose que al aumentar la descarga de la cuenca afrente aumenta la concentración de SST, aunque con una intensidad diferente en cada sección del humedal.

Tabla 6.3. Resultado de la estimación del error relativo del modelo en todas las secciones.

Meses	Error Relativo Sec 1	Error Relativo Sec 2	Error Relativo Sec 3
Enero	-0,13	-0,48	-0,52
Febrero	-0,09	-0,43	-0,48
Marzo	-0,07	-0,32	-0,36
Abril	0,12	-0,26	-0,27
Mayo	0,08	-0,16	-0,19
Junio	0	-0,11	-0,09
Julio	0,02	-0,04	0,03
Agosto	0,02	0,03	-0,26
Septiembre	-0,06	-0,26	-0,28
Octubre	0,16	-0,23	-0,26
Noviembre	0,06	-0,2	-0,22
Diciembre	0,07	0,02	0,17
Promedio	0,01	-0,2	-0,23
Desviación estándar	0,09	0,16	0,2

Fuente: Elaboración propia

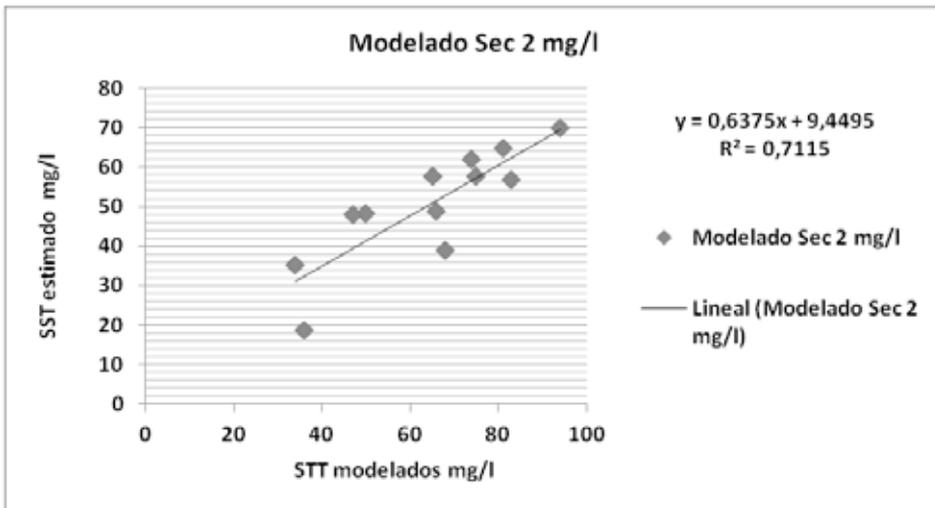


Figura 6.4. Resultados de la comparación entre valores estimados de SST y los valores modelados, sección 2 (mg/L).
Fuente: Elaboración propia

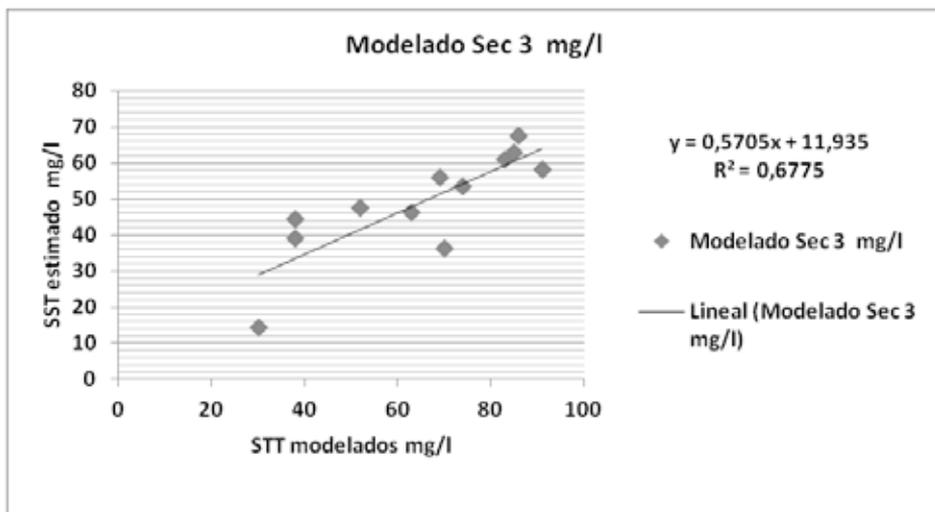


Figura 6.5. Resultados de la comparación entre valores estimados de SST y los valores modelados, sección 3 (mg/L).
Fuente: Elaboración propia

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

En la figura 6.6 y en la tabla 6.4 se aprecia la marcha de sensibilidad de los SST; el menor valor de concentración se encuentra en la clase de 400 mm de precipitación y oscila entre 42,2 y 53,4 mg/L, que corresponde al comportamiento promedio de un año seco. Entre las clases de 800 y 900 mm de precipitación la concentración oscila entre 48,7 y 56,2 mg/L y en condiciones de altas precipitaciones, entre 1100 y 1300 mm, la concentración de SST varía entre 58,3 y 59 mg/L. Las curvas de concentración muestran un patrón de comportamiento coincidente con el ciclo hidrológico.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

En la figura 6.7 y en la tabla 6.5 se aprecia la marcha de sensibilidad de los SST; el menor valor de concentración se encuentra en el nivel 400 mm de precipitación y oscila entre 31,7 y 44 mg/L, que corresponde al comportamiento promedio de un año seco. Entre las clases de 800 y 900 mm de precipitación la concentración oscila entre 39,7 y 56,2 mg/L, mientras que en condiciones de altas precipitaciones, entre las clases 1100 y 1300 mm, esta varía entre 56,4 y 46,1 mg/L. Al igual que en la anterior sección, la concentración de los SST mantiene un patrón de comportamiento coincidente con el ciclo hidrológico.

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

En la figura 6.8 y la tabla 6.6 se aprecia la marcha de sensibilidad de los SST; el menor valor de concentración se encuentra en la case de 400 mm de precipitación y oscila entre 29,6 y 42,2 mg/L, que corresponde al comportamiento promedio de un año seco. Entre las clases 800 y 900 mm de precipitación la concentración oscila entre 37,5 y 50,4 mg/L, mientras que en condiciones de altas precipitaciones, entre las clases 1100 y 1300 mm, varía entre 45 y 55,3 mg/L. Al igual que la anterior sección, la concentración de los SST mantiene un patrón de comportamiento coincidente con el ciclo hidrológico.

Se infiere que para todas las secciones y aún en condiciones de bajas precipitaciones, las concentraciones de STT se encontrarían entre 44 y 53 mg/L, indicando la permanencia de las condiciones de eutrofia, que tiende a incrementarse en la medida que aumenta la descarga de la cuenca aferente. El análisis de sensibilidad del modelo reproduce en parte la relación entre las condiciones hidrológicas y la dinámica de los SST para cada una de las secciones; de allí su importancia en términos predictivos.

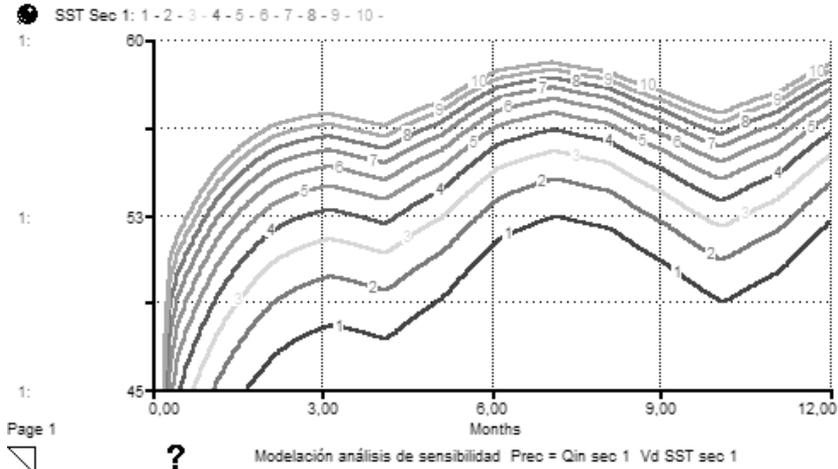


Figura 6.6. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 1.
 Variable independiente: Precipitación. Variable dependiente: Concentración de SST.
 Fuente: Elaboración propia

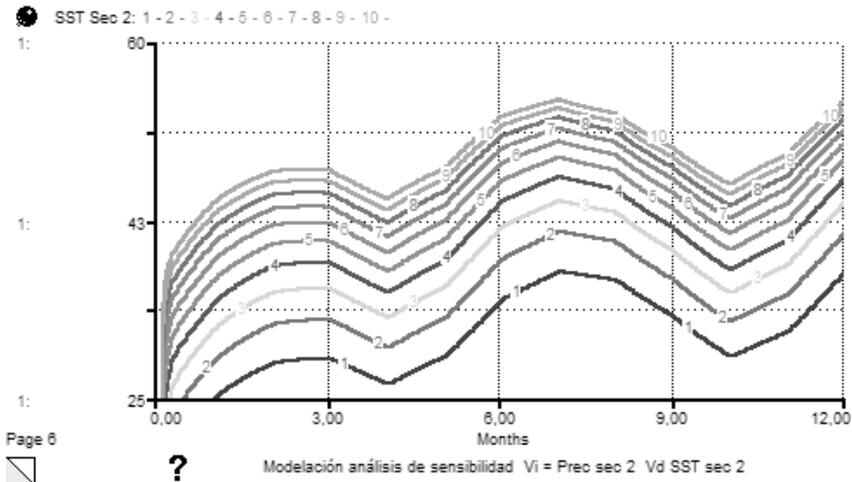


Figura 6.7. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 2.
 Variable independiente: Precipitación. Variable dependiente: Concentración de SST.
 Fuente: Elaboración propia

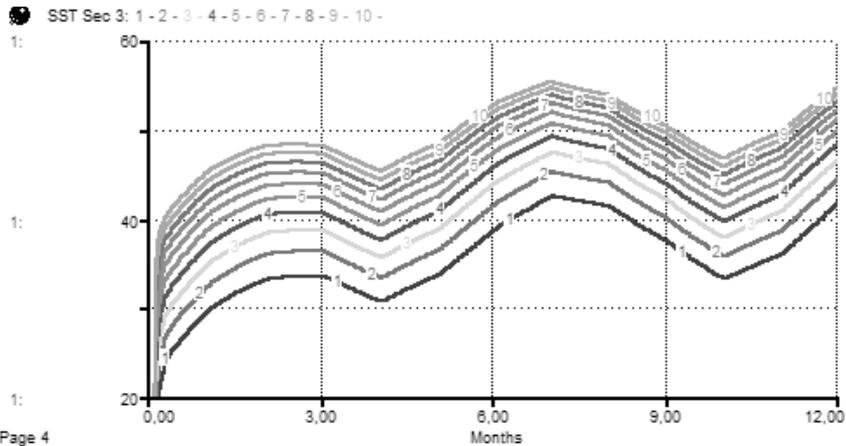


Figura 6.8. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 3.
Variable independiente: Precipitación. Variable dependiente: Concentración de SST.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.4. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 1.

SERIE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm - niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Meses	mg/l									
Enero	42,35	44,98	47,05	48,7	50,06	51,19	52,14	52,96	53,67	54,28
Febrero	46,22	48,54	50,31	51,72	52,85	53,78	54,56	55,22	55,79	56,29
Marzo	47,67	49,8	51,43	52,7	53,73	54,58	55,29	55,89	56,41	56,86
Abril	47,18	49,28	50,89	52,16	53,2	54,05	54,77	55,39	55,92	56,38
Mayo	48,77	50,77	52,29	53,48	54,44	55,23	55,88	56,44	56,92	57,34
Junio	51,23	53,04	54,38	55,42	56,24	56,91	57,46	57,93	58,33	58,67
Julio	52,37	54,01	55,23	56,16	56,9	57,5	58	58,42	58,78	59,08
Agosto	51,96	53,57	54,78	55,71	56,46	57,07	57,58	58,01	58,38	58,7
Septiembre	50,5	52,19	53,48	54,5	55,32	55,99	56,56	57,05	57,47	57,83
Octubre	48,83	50,65	52,06	53,17	54,09	54,84	55,48	56,03	56,51	56,92
Noviembre	49,93	51,73	53,11	54,19	55,06	55,79	56,39	56,9	57,35	57,73
Diciembre	52,21	53,86	55,09	56,04	56,8	57,41	57,92	58,35	58,71	59,03
Promedio	49,1	51,04	52,51	53,66	54,6	55,36	56	56,55	57,02	57,43

Variable independiente: Precipitación. Variable dependiente: Concentración de SST.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.5. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 2.

SERIE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm-niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Meses	mg/l									
Enero	31,75	34,78	37,32	39,47	41,31	42,91	44,31	45,54	46,63	47,61
Febrero	35,21	38,2	40,66	42,71	44,44	45,93	47,21	48,33	49,32	50,19
Marzo	35,59	38,52	40,91	42,9	44,59	46,03	47,28	48,37	49,33	50,18
Abril	32,78	35,62	37,98	39,97	41,68	43,16	44,45	45,59	46,61	47,52
Mayo	35,76	38,69	41,09	43,08	44,78	46,22	47,48	48,57	49,54	50,4
Junio	41,67	44,59	46,9	48,78	50,32	51,61	52,69	53,62	54,43	55,13
Julio	44,3	47,04	49,18	50,88	52,26	53,4	54,36	55,17	55,86	56,47
Agosto	43,21	45,83	47,89	49,54	50,89	52,02	52,98	53,79	54,5	55,12
Septiembre	39,41	42,02	44,12	45,84	47,29	48,51	49,57	50,49	51,3	52,02
Octubre	35,24	37,87	40,04	41,86	43,41	44,76	45,93	46,97	47,89	48,72
Noviembre	37,93	40,69	42,92	44,78	46,34	47,68	48,84	49,84	50,73	51,52
Diciembre	44,08	46,81	48,95	50,67	52,08	53,24	54,23	55,06	55,78	56,41
Promedio	38,08	40,89	43,16	45,04	46,62	47,96	49,11	50,11	50,99	51,77

Variable independiente: Precipitación. Variable dependiente: Concentración de SST.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.6. Análisis de sensibilidad del modelo, sección 3.

SERIE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precipitación mm-niveles	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Meses	mg/l									
Enero	29,67	32,71	35,3	37,51	39,43	41,11	42,58	43,89	45,06	46,11
Febrero	33,11	36,16	38,71	40,85	42,68	44,26	45,64	46,85	47,92	48,87
Marzo	33,48	36,47	38,95	41,04	42,82	44,36	45,7	46,88	47,92	48,85
Abril	30,64	33,51	35,93	37,99	39,77	41,32	42,69	43,91	44,99	45,97
Mayo	33,58	36,58	39,07	41,17	42,96	44,5	45,85	47,04	48,08	49,02
Junio	38,77	41,83	44,31	46,35	48,05	49,49	50,71	51,77	52,69	53,5
Julio	42,55	45,5	47,82	49,7	51,23	52,51	53,59	54,5	55,29	55,97
Agosto	41,44	44,24	46,46	48,26	49,74	50,99	52,04	52,95	53,74	54,43
Septiembre	37,54	40,27	42,49	44,32	45,87	47,19	48,33	49,33	50,21	51
Octubre	33,26	35,96	38,2	40,1	41,72	43,14	44,39	45,49	46,47	47,36
Noviembre	35,91	38,76	41,09	43,05	44,72	46,15	47,39	48,48	49,45	50,31
Diciembre	41,74	44,65	46,97	48,85	50,41	51,71	52,82	53,77	54,59	55,31
Promedio	35,97	38,89	41,28	43,27	44,95	46,39	47,64	48,74	49,7	50,56

Variable independiente: Precipitación. Variable dependiente: Concentración de SST.

Fuente: Elaboración propia

Discusión

En condiciones de altas precipitaciones, cuando disminuye el tiempo hidráulico de retención, aumenta la concentración de SST que se transportan a través del humedal, depositándose en el tercio bajo y ocasionando procesos de sedimentación importantes en la zona más conservada del humedal. En la primera sección los valores modelados fluctuaron entre 85 mg/L y 101 mg/L, con un promedio de 65,12 mg/L y un tiempo hidráulico de retención de entre 8 y 9 días/año; en la segunda entre 57 y 69 mg/L, con un promedio de 50 mg/L y un THR de entre 20 y 23 días/año; en la tercera sección los valores de SST variaron entre 56 mg/L y 67 mg/L, con un promedio de 48,8 mg/L y un tiempo hidráulico de retención de entre 24 y 26 días/año.

En condiciones de verano, cuando disminuye la descarga de la cuenca aferente y aumenta el tiempo hidráulico de retención, disminuye la concentración de SST y así mismo el transporte entre las secciones del humedal. En la primera sección los valores modelados fluctuaron entre 34 mg/L y 59 mg/L, con un promedio de 65,12 mg/L y un tiempo hidráulico de retención de entre 24 y 15 días/año; en la segunda sección variaron entre 18 mg/L y 48 mg/L, con un promedio de 50 mg/L y un tiempo hidráulico de entre 58 y 38 días/año; en la tercera sección los SST fluctuaron entre 14 mg/L y 46 mg/L, con un promedio de 48,8 mg/L y un tiempo hidráulico de retención de entre 68 y 44 días/año. Rivera (2011) y Mejía (2011) reportan que los sólidos suspendidos en el humedal Jaboque disminuyen en las épocas secas y aumentan en la temporada invernal, confirmando la influencia del comportamiento del ciclo hidrológico en este fenómeno.

Los resultados de la modelación dinámica corroboraron que en el humedal Jaboque existe una dependencia entre las concentraciones de SST y el ciclo hidrológico, insinuando que la concentración de los SST depende más de la descarga del tributario que de la producción autóctona. Este fenómeno se encuentra influenciado por el tiempo hidráulico de retención que disminuye al aumentar la descarga, incrementando la velocidad de transporte de partículas a través de cada sección. Esta dinámica implica que la última sección del sistema, la más conservada, recibe una mayor cantidad de SST, afectando con

mayor intensidad este tercio, lo que ocurre en épocas de mayores precipitaciones. En las épocas secas la tendencia es inversa: el tiempo hidráulico de retención aumenta y las concentraciones de SST disminuyen en todas las secciones del humedal, porque disminuye la descarga de la cuenca aferente, corroborando así la influencia del ciclo hidrológico en el comportamiento de los SST. En suma, en los meses de mayor precipitación se aumentan los SST y en verano disminuyen. Hernández *et al.* (2008) reportan en épocas de estiaje o verano las más altas concentraciones de sólidos suspendidos, situación contraria a otros estudios, relacionando el fenómeno con las condiciones hidrológicas. Velázquez *et al.*, (2007) informan para la ciénaga Colombia, en Caucasia, Antioquia. Montoya & Aguirre (2010) han encontrado en la ciénaga de Escobillitas, en Córdoba, que los sólidos suspendidos disminuyen en épocas de verano y aumentan en invierno. Jorgensen (2003) sugiere que a mayores descargas de la cuenca aferente se transporta mayor cantidad de material, pero a su vez los tiempos hidráulicos de retención disminuyen, generando un fenómeno de lavado en la cubeta.

El análisis de sensibilidad del modelo reproduce en parte la relación entre las condiciones hidrológicas y la dinámica de los SST para cada una de las secciones; de allí su importancia en términos predictivos.

.183

Es de anotar que para todas las secciones y aún en condiciones de bajas precipitaciones (<500 mm/año) las concentraciones de STT se encontrarían entre 44 y 53 mg/L, indicando un estado eutrófico para todo el humedal, condición que tiende a incrementarse en la medida en que aumenta la descarga desde la cuenca aferente.

La evidencia disponible para verificar la capacidad de predicción del modelo y su fortaleza, así como los análisis de sensibilidad, permiten afirmar que su estructura y variables reproducen de manera general el comportamiento de los SST del humedal Jaboque, indicando que este se podría generalizar con los debidos ajustes para conocer el comportamiento de este material en otros humedales en el Distrito Capital y del área de influencia del río Bogotá.

Modelación de la producción primaria fitoplanctónica

Capítulo 7

Resumen

En este capítulo se presenta un modelo de simulación dinámico para explicar el comportamiento general de la producción primaria fitoplanctónica en el humedal Jaboque 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, utilizando el programa computacional Stella 9.1®. El modelo permite cuantificar la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque a partir de la concentración promedio mensual de clorofila_a para cada sección. Los resultados de la modelación de la Ppf mostraron en la primera sección un valor máximo de Ppf de 70,29 mg/cm³ en el mes de enero y un mínimo de 16,02 mg/cm³ en el mes de junio, con un promedio de 35,1 mg/cm³. En la segunda sección el valor máximo fue de 77,8 mg/cm³ en enero y el mínimo 24,85 mg/cm³ en mayo, con un promedio de 39,17 mg/cm³. En la tercera sección el valor máximo fue 15,96 mg/cm³ en febrero, el mínimo de 4,15 mg/cm³ en mayo y el promedio de 7,79 mg/cm³. Los resultados demuestran que las variaciones de la concentración de 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:

Sección 1: $r^2=0,86$; error relativo de 0,57.

Sección 2: $r^2=0,86$; error relativo de 0,35.

Sección 3: $r^2=0,79$; error relativo de 0,46.

Los valores indican que los resultados no están sobrestimados. En conclusión, el modelo muestra en términos generales los aspectos funcionales del comportamiento de la Ppf y su relación con el proceso de eutrofización y permite hacer recomendaciones para el manejo y restauración del humedal.

Introducción

En los lagos la producción primaria puede considerarse de dos modos: la que se produce 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 *et al.*, 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, estos pueden ser calificados como oligotróficos, con pocos nutrientes y por lo 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 *et al.*, 1997). En los humedales gran parte de la materia orgánica proviene de la fotosíntesis de las plantas superiores, tanto flotantes como sumergidas, y de las algas. Las altas tasas de productividad primaria en algas y cianobacterias son posibles debido al continuo reciclaje interno de nutrientes (carbón, nitrógeno, fósforo y otros nutrientes) y de gases, producido por la relación mutualista con bacterias, hongos y protistas heterotróficos, que se encargan de los detritos. En los humedales, donde el flujo de agua es mínimo, la mayoría de la materia orgánica en partículas permanece cerca 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 productividad y la absorción de nutrientes están influenciadas por parámetros hidrológicos como el nivel del agua y el pulso de la inundación. Las fluctuaciones en el nivel del agua influyen en la productividad y en la absorción de nutrientes. La entrada de agua al humedal por periodos puede traer consigo un aumento en la concentración de nutrientes y de materia orgánica que actúan como fertilizantes. La profundidad del agua, los patrones de su flujo y la duración y la frecuencia de las inundaciones, que son el resultado de todas las entradas y salidas de agua, influyen en la bioquímica de los sustratos. El ciclo de los nutrientes y son el mayor factor de selección de la biota de los humedales. La hidrología es probablemente el determinante más importante en el establecimiento y mantenimiento de los diferentes tipos de humedales y sus procesos (Mitsch y Gosselink 2007).

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 & Rast, 1989) y la producción primaria fitoplanctónica (Håkanson & Boulion, 2003) pueden ser usadas como indicadores apropiados para determinar el grado de eutrofización en lagos y en humedales (tabla 7.1).

Tabla 7.1. 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-ago	25-60
Eutrófico	jun-35	40-200
Hipertrófico	30-400	130-600

Fuente: Håkanson & Boulion (2003).

Castillo (2000) estudió la productividad y la biomasa fitoperifítica en los lagos Yahuaraca y Tarapoto en el Amazonas mediante el sistema de sustratos artificiales. Los factores que inciden en la producción y biomasa fitoperifítica de los sustratos artificiales son principalmente el periodo hidrológico, el tiempo de colonización y la profundidad, factores que en conjunto determinan la mayor o menor productividad primaria de la comunidad. Roldán *et al.* (2000) encontraron valores muy bajos de clorofila *a*, los cuales son propios de aguas oligotróficas. Dichos valores reflejan la influencia de los elementos en suspensión dentro del embalse y aunque son negativos desde el punto de vista de la productividad biológica, se consideran positivos para la vida útil del embalse, ya que mientras sean pocas las posibilidades de eutrofización mayor será la calidad del agua que utilizan las turbinas.

Según Neiff (2001), la disponibilidad, fluctuación y circulación del agua determinan la concentración de nutrientes, que son vitales para la producción primaria. Además de energía solar, agua y dióxido de carbono, las plantas requieren una serie de elementos minerales para el proceso de fotosíntesis que suelen encontrarse en proporciones limitantes en el agua, principalmente nitrógeno y fósforo.

Duarte (2004) caracterizó la productividad primaria y la biomasa del fitoplancton en el lago de Guatavita (Cundinamarca, Colombia), y encontró que la productividad primaria y la biomasa estaban influenciadas por la distribución vertical de cationes minoritarios, la temperatura del agua, la transparencia, la luz y la velocidad del viento, aunque no encontró una relación clara. Por otra parte, la producción primaria no varió de manera significativa temporal ni verticalmente en la columna de agua.

Zapata (2001) estudió las variaciones diarias y mensuales de la producción primaria en el mismo lago y encontró que se presentan periodos de estratificación del lago entre enero y junio y periodos de mezcla entre julio y septiembre. La producción primaria se relaciona con estos periodos de estratificación y mezcla: el comienzo del periodo de mezcla origina un aumento en la concentración de nutrientes que se relaciona con los valores más altos de producción primaria.

Jiménez (2006) registró las variaciones diarias de la producción primaria y la concentración de la clorofila en este lago y encontró que la producción primaria no presentó diferencias significativas a lo largo del estudio. No obstante, observó que responde sensiblemente

a las variaciones durante el día, debido a que manifiesta una fuerte dependencia de la luz solar, que tiene variaciones importantes durante el día pero no durante períodos largos de tiempo.

Zubiría & Rivera (2005) evaluaron la producción primaria neta y la descomposición de *Eichhornia crassipes*, *Pennisetum clandestinum*, *Polygonum punctatum*, *Schoenoplectus californicus* y *Typha latifolia* en el humedal Juan Amarillo. Encontraron que todas las especies presentaron un incremento en la altura, cobertura y número de individuos a lo largo del tiempo de muestreo. La biomasa también varió según la forma de crecimiento de cada especie; además, se encontraron diferencias en la descomposición de cada una debido a las diferencias en la constitución de sus tejidos.

Ramírez & Alcaraz (2002) estudiaron la dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en el lago del parque Norte en Medellín, encontrando que la eficiencia fotosintética de la comunidad en la conversión de luz en biomasa mostró una variación medianamente alta y los cocientes P/R (producción/respiración) y R/B (respiración/biomasa) presentaron una alta variación en el ciclo anual.

Pinilla (2006) evaluó y comparó la eficiencia fotosintética en un lago amazónico (lago Boa) y en un lago andino (lago Guatavita). Los resultados mostraron que las eficiencias varían entre ecosistemas y entre épocas de muestreo. La eficiencia fotosintética fue menor en el lago Guatavita, seguramente por las condiciones climáticas, de altura sobre el nivel del mar y de estratificación.

Rodríguez-Chila *et al.* (2009) estimaron la producción primaria fitoplanctónica en el Complejo Pajarales (CP) con el fin de evaluar los posibles efectos de la recomunicación del río Magdalena con su antiguo delta. Los resultados mostraron un aumento significativo de la producción primaria neta con relación a los años anteriores, impulsada principalmente por el amonio, sin encontrar relación significativa con la transparencia del agua y la clorofila_a.

Montoya & Aguirre (2010) realizaron un estudio de la dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (ciénaga Escobilletas, Antioquia) a lo largo del pulso de inundación. Los resultados mostraron una relación entre la variación de la producción primaria y el pulso de inundación, y que el sistema acuático oscila entre euproductivo y oligoproductivo, lo cual es indicador de una alta dinámica trófica.

En el lago de La Mancha ubicada en el golfo de México, Contreras-Espinosa *et al.* (2005) estudiaron el hecho de ser esta una laguna intermitente, ya que está a veces abierta y a veces cerrada al mar, a través del cierre de la boca que es regulado por la marea. Concluyeron que cuando el lago está cerrada la eficiencia fotosintética es mayor y a su vez genera elevados valores de producción primaria.

Modelos dinámicos de producción primaria

Tangirala *et al.* (2003) desarrolló un modelo de simulación dinámica para determinar la biomasa fitoplanctónica y el estado trófico en el tiempo, con el fin de proponer estrategias de manejo y control de la eutrofización, utilizando el software Stella. Boulion & Håkanson (2003) presentan un modelo dinámico para predecir la producción de bacterias, plancton y biomasa en humedales en San Petersburgo, Rusia. El modelo se desarrolló con base en submodelos de fragmentación de un modelo en un ecosistema de lago más complejo. La red trófica del lago está basada en nueve grupos funcionales: bacterias (bacterioplankton), fitoplancton, dos tipos de zooplancton (herbívoros y depredadores), dos tipos de peces (presa y predador) como también los zoobentónicos, macrófitos y algas bentónicas. El modelo usa ecuaciones diferenciales ordinarias y proporciona semanalmente variaciones, mostrando de manera general interacciones bióticas y abióticas. El modelo dinámico no ha sido calibrado en forma tradicional en algunos lagos, sino que ha sido calibrado usando regresiones empíricas basadas en datos provenientes de distintos lagos. La principal función de este modelo es poder capturar funciones típicas y patrones estructurales en varios lagos.

Håkanson & Boulion (2003) desarrollaron un modelo dinámico para predecir la biomasa y la producción de fitoplancton en lagos como parte integral de un modelo general para lagos, LakeWeb. Este modelo pretende dar cuenta de todas las interacciones bióticas y abióticas para calcular la biomasa del fitoplancton, la producción inicial de fitoplancton y el consumo de fitoplancton por el zooplancton en kilogramos por semana. Al igual que el modelo anterior, no fue probado de manera tradicional usando datos de campo de investigaciones previas, sino que se utilizaron regresiones basadas en datos de varios lagos. El objetivo era tener la estructura general y las características funcionales relevantes para esta parte de la cadena trófica en lagos. El modelo genera predicciones que concuerdan con los valores obtenidos en las regresiones.

Rivera (2006) desarrolló modelos sobre la base de la correlación entre condiciones físicas, químicas y biológicas del lago Guatavita. Los resultados mostraron que la producción primaria a escala mensual está determinada por la compleja interacción entre la radiación incidente, el aumento de nutrientes y la reducción de la transparencia. A continuación, se muestra una tabla resumen de los modelos dinámicos sobre producción primaria en humedales (tabla 7.2).

Tabla 7.2. Resumen de los modelos dinámicos de fósforo en humedales

MODELO	OBJETIVO	RESULTADO
Bouillon & Håkanson (2003)	Predecir la producción de las bacterias, de plancton y biomasa en humedales en San Petersburgo, Rusia.	La red trófica del lago está basada en nueve grupos funcionales: bacterias (bacterioplankton), fitoplancton, dos tipos de zooplancton (herbívoros y depredadores), dos tipos de peces (presa y predador) como también los zocbentónicos, macrofitos y algas bentónicas. El modelo usa ecuaciones diferenciales ordinarias y proporciona semanalmente variaciones, mostrando de manera general interacciones bióticas y abióticas. El modelo dinámico no ha sido calibrado y testado en forma tradicional en algunos lagos, sino que ha sido calibrado usando regresiones empíricas basadas en datos provenientes de distintos lagos. La principal función de este modelo es poder capturar funciones típicas y patrones estructurales en varios lagos.
Håkanson & Bouillon (2002)	Determinar la estructura general y las características funcionales relevantes para biomasa y producción de fitoplancton en lagos.	Al igual que el modelo anterior, no fue probado de manera tradicional usando datos de campo de investigaciones previas, sino que se utilizaron regresiones basadas en datos de varios lagos. El modelo produce predicciones que concuerdan con los valores obtenidos en las regresiones.
Tangirala et al. (2003)	Predecir la producción primaria fitoplanctónica en un lago y determinar el estado de eutroficación a partir de las concentraciones de clorofila y la cantidad de biomasa de fitoplancton.	La producción primaria fitoplanctónica se simuló a partir de las concentraciones de clorofila; los análisis de sensibilidad se utilizaron para predecir estados tróficos.
Rivera (2006)	Correlacionar la producción primaria y la biomasa fitoplanctónica con las variables físicas y químicas de la columna de agua.	La producción primaria a escala mensual está determinada por la compleja interacción entre la radiación incidente, el aumento de nutrientes y la reducción de la transparencia. Las variaciones diarias en la radiación y los nutrientes tienen efectos significativos distintos sobre la producción primaria, la clorofila y la eficiencia de la comunidad según las condiciones de cada período.

Fuente: Håkanson & Bouillon (2003).

Estructura del modelo de simulación dinámica

La producción primaria fitoplanctónica se considera como la cantidad de materia orgánica sintetizada por organismos autotróficos en una unidad de tiempo determinada. Los valores de la producción primaria fitoplanctónica son medidos en unidades de energía o masa de carbón orgánico (C) y se utiliza frecuentemente para estimar la productividad biológica o el estado trófico de los cuerpos de agua (Håkanson & Boulion, 2002).

La cantidad de clorofila_a en el agua es correspondiente con la cantidad de fitoplancton (Håkanson & Peters, 1995; Wetzel, 2001; Gocke *et al.*, 2003; Mitsch & Gosselink, 2007). A su vez, la cantidad de fitoplancton es proporcional al estado trófico de los cuerpos de agua. Por tanto, se puede utilizar la concentración de clorofila_a y su equivalente en mg/cm³ 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 modelo permite relacionar la concentración de clorofila_a con la producción primaria fitoplanctónica expresada en unidades de C (mg/m³) (Håkanson & Boulion, 2003; Rivera, 2006).

Método de simulación

La modelación se realizó con el software Stella 9.1[®], utilizado en modelaciones hidrológicas y ecológicas (Duever *et al.*, 1988; Jogersen & Bendoricchio, 2001; Zhang & Mitsch, 2005; Jogersen, 2008, entre otros). Se utilizó el sistema de interfaz para predecir el comportamiento de productividad primaria a partir de las concentraciones promedio de clorofila_a para cada sección; de igual manera, se usó 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 7.3). El modelo conceptual se transformó mediante el uso de algoritmos. Con cada variable se desarrollaron las respectivas ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo (anexo B4). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones de la Ppf y el estado trófico del humedal en sus tres secciones.

Con el fin de verificar el carácter determinístico del modelo y realizar la validación del mismo se realizaron regresiones simples lineares (Legendre & 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. Con el fin de evaluar la fortaleza del modelo, se determinó el error relativo (Bryhn & Håkanson, 2007, Jørgensen & Bendoricchio, 2001; Zhang & Mitsch, 2005; Håkanson, 2004) y para evidenciar el carácter predictivo se realizó el análisis de sensibilidad del mismo (Håkanson, 2004; Jørgensen, 2008).

Variables del modelo

Tabla 7.3. Variables utilizadas en el modelo

Variables e Indices	Valores/ Unidades	Fuente
Profundidad sección	m	Instituto de Ciencias Naturales – Grupo de investigación Biodiversidad y conservación – Universidad Nacional de Colombia
Precipitación	m.m/año	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 ww C/m ³ /t	Hakanson & Bouillon (2003)
Tasa de producción de fitoplancton	mgC/m ³ /t	Hakanson & Bouillon (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: Håkanson & Bouillon (2003).

Supuestos del modelo

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

- La carga (C_i) de clorofila_a se calcula a partir del punto de entrada de cada sección.
- Los datos de Chl_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 tuvo en cuenta 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 morfométricas, físicas y biológicas propias.
- El modelo hace referencia a la producción primaria fitoplanctónica.

El modelo de simulación

A partir de la relación existente entre la concentración de clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica (calculada como $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{año}$), se calculó la producción primaria fitoplanctónica y de acuerdo con Håkanson & Boulion (2002), se utilizaron los siguientes algoritmos:

$$\text{Ppf} = (2,13 \cdot \text{Chl}_a^{0,25} + 0,25)^4 \quad (1)$$

Donde:

Ppf: Producción primaria fitoplanctónica ($\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{mes}$)
 Chl_a: Concentración de clorofila_a (mg/m^3).

Realizando la transformación logarítmica (Håkanson & Boulion, 2002):

$$\log(\text{Ppf}) = 0,97 \log \cdot \log(\text{Chl}_a + 2,49) \quad (2)$$

$$P_{pf} = 30,6 \cdot Chl^{0,927} \approx 30 \cdot Chl_a \quad (3)$$

$$B_m(t) = B_{m_u}(t - dt) + (IPR - EI) \cdot dt \quad (4)$$

Donde:

- B_m: Biomasa de producción primaria por unidad en kg w
- IPR: Producción primaria inicial en kg ww * semana
- EI: Tasa de renovación de organismos consumidores kg ww*semana (Håkanson & Boulion, 2003)

$$P_{pf} = (30,6 \cdot Chl_a^{0,927}) \cdot 0,45 \cdot 30 \cdot Area \cdot Z \cdot 0,01 \cdot [(RWT + 0,1)/17] \cdot BM_p/BM_f \quad (5)$$

Donde:

- P_{pf}: Producción primaria inicial (kg ww/semana)
- Chl: Promedio mensual de concentración de clorofila_a (mg/m³)
- Chl_a: 0,927 · 30,6 = Patrón de conversión de Chl en producción primaria fitoplanctónica (Cmg/m³/d)
- 0,45: Factor de conversión estándar para transformar C_g semana a g dw/mes
- Área: Área de la cubeta
- Z: Profundidad promedio
- RWT: Temperatura media de referencia
- BM_p/BM_f: 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 (Håkanson & Boulion, 2003)

Resultados

Comportamiento de la clorofila_a

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 en todas las secciones y en los meses lluviosos tienden a descender. Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, mientras que en la tercera sección 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, 1995; Håkanson & Boulion, 2002).

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

En esta sección (figura 7.1 y tabla 7.4), en los meses secos de enero, febrero y marzo la concentración de clorofila fluctuó entre 18,9 mg/m³ y 25,5 mg/m³; en agosto y septiembre entre 19,5 mg/m³ y 15,3 mg/m³; y en el mes diciembre fue de 15,3 mg/m³. En los meses de mayores precipitaciones, abril, mayo y junio, los valores fluctuaron entre 6,6 mg/m³ y 11,4 mg/m³; en octubre y noviembre entre 9,3 mg/m³ y 14,4 mg/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 14,8 mg/m³ y la desviación estándar fue de 5,89, denotando una variación alta que podría deberse a las variaciones del hidropereodo.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

En esta sección (figura 7.1 y tabla 7.4), en los meses secos de enero, febrero y marzo la concentración de clorofila fluctuó entre 34,2 mg/m³ y 22,5 mg/m³; en agosto y septiembre entre 18,6 mg/m³ y 15,9 mg/m³; y en el mes de diciembre fue de 22,87 mg/m³. Por su parte, en los meses de mayores precipitaciones, abril, mayo y junio, los valores fluctuaron entre 12,6 mg/m³ y 11,1 mg/m³; y en octubre y noviembre entre 11,7 mg/m³ y 10,5 mg/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 17,9 mg/m³ y la desviación estándar fue de 7,3, denotando una variación alta. Esta sección sigue el mismo patrón de comportamiento que la primera sección del humedal.

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

En esta sección (figura 7.1 y tabla 7.4), en los meses secos de enero, febrero y marzo la concentración de clorofila fluctuó entre 7,8 mg/m³

y $5,3 \text{ mg/m}^3$; en agosto y septiembre entre $3,6 \text{ mg/m}^3$ y $2,7 \text{ mg/m}^3$; y en el mes de diciembre fue de $2,8 \text{ mg/m}^3$. Por su parte, en los meses de mayores precipitaciones, abril, mayo y junio, los valores fluctuaron entre $1,95 \text{ mg/m}^3$ y $1,7 \text{ mg/m}^3$; en octubre y noviembre entre $2,2 \text{ mg/m}^3$ y $1,65 \text{ mg/m}^3$. El promedio mensual para toda la sección fue de $3,21 \text{ mg/m}^3$ y la desviación estándar fue de $1,87$ mostrando que existe variación.

En la figura 7.1 se aprecian las curvas 1, 2 y 3, que corresponden a las concentraciones de clorofila_a para cada una de las secciones, en su orden, y la curva 4 a la marcha de la precipitación. Nótese el patrón inverso de las curvas de clorofila_a con respecto al comportamiento de la precipitación, indicando que la actividad biológica en humedal se incrementa en las épocas de verano y que en invierno disminuye.

También se puede apreciar que la curva 3, correspondiente al tercio bajo, no presenta cambios bruscos en comparación con las curvas de las primeras secciones. La desviación estándar es de $1,8$, indicando poca variabilidad para esta sección (tabla 7.4) y que las concentraciones son bajas con respecto a los primeros tercios, pudiéndose inferir que allí tiene lugar una menor productividad primaria. Estos resultados sugieren que las condiciones climáticas y el hidroperiodo influyen en el comportamiento de la clorofila_a, como lo sugieren (Håkanson, 1999; Ryding & Rast, 1989). Jiménez (2006) encontró para el lago de Guatavita (Cundinamarca, Colombia) variaciones de clorofila_a debidas a la radiación solar, pero no encontró que estas fueran ocasionadas por el hidroperiodo. Montoya & Aguirre (2010) encontraron una relación entre la variación de clorofila_a, la producción primaria y el pulso de inundación en la ciénaga Escobillitas, Antioquia.

En la segunda sección del humedal se encontró que los valores de clorofila_a son más altos y tienen con una alta variación en comparación con la sección 1 y la sección 3. No obstante, el patrón de variación corresponde de igual manera al hidroperiodo. La mayor variabilidad podría deberse en principio a las diferencias ocasionadas por las fluctuaciones del agua en la sección, debidas a la construcción de jarillones y la distribución de bolsas de nutrientes.

Producción primaria fitoplanctónica

Los resultados de la modelación de la producción primaria del fitoplancton (mgC/cm^3) en el humedal Jaboque para todas las secciones se presentan en la figura 7.2 y la tabla 7.4. Se observa que la producción primaria aumenta en los periodos de menores precipitaciones (diciembre a febrero y julio a septiembre) y en los periodos de altas precipitaciones disminuye (abril a junio y octubre a noviembre). Es innegable que existe una fuerte relación de la actividad biológica con el ciclo hidrológico.

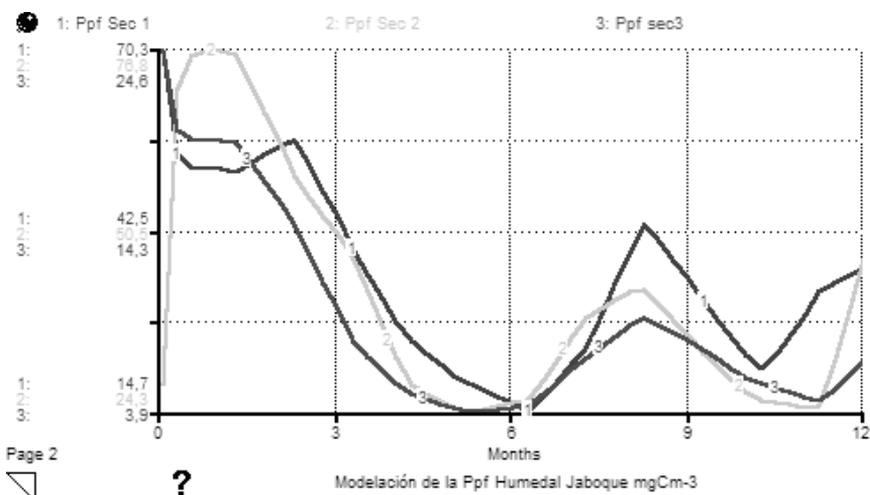


Figura 7.2. Modelación de la productividad primaria fitoplanctónica para todas las secciones.

1: Producción primaria fitoplanctónica, sección 1 ($\text{mg}/\text{cm}^3 \cdot \text{año}$); 2: Producción primaria fitoplanctónica, sección 2 ($\text{mg}/\text{cm}^3 \cdot \text{año}$); 3: Producción primaria fitoplanctónica, sección 3 ($\text{mg}/\text{cm}^3 \cdot \text{año}$).

Fuente: Elaboración propia.

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

En esta sección (figura 7.2 y tabla 7.4), en los meses secos de enero, febrero y marzo, la producción primaria fluctuó entre $70,29 \text{ mgC}/\text{m}^3$ y $44,5 \text{ mgC}/\text{m}^3$; en los de agosto y septiembre entre $21,9 \text{ mgC}/\text{m}^3$ y $39,21 \text{ mgC}/\text{m}^3$; y en el mes diciembre fue de $36,8 \text{ mgC}/\text{m}^3$ y en los meses de mayores precipitaciones, abril, mayo y junio, los valores fluctuaron entre $28,5 \text{ mgC}/\text{m}^3$ y $16,7 \text{ mgC}/\text{m}^3$; en octubre y noviembre fue de $23,3 \text{ mgC}/\text{m}^3$ y $29,53 \text{ mgC}/\text{m}^3$. El promedio mensual para

toda la sección fue de 35,10 mgC/cm³ y la desviación estándar fue de 15,77, mostrando que existe variación. Para calcular la relación entre los valores de clorofila_a estimados con los valores modelados de la producción primaria fitoplanctónica (Håkanson & Boulion, 2003; Kuo *et al.*, 2007) se realizó un análisis de regresión cuyos resultados mostraron una buena correspondencia entre los dos grupos:

$$r^2=0,85; y=0,3458(x)+2,6623 \text{ (tabla 7.4 y figura 7.3).}$$

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

En esta sección (figura 7.2 y tabla 7.4), en los meses secos de enero, febrero y marzo, la producción primaria fluctuó entre 77,8 mgC/m³ y 50,02 mgC/m³; en agosto y septiembre entre 41,6 mgC/m³ y 35,4 mgC/m³; y en el mes de diciembre fue de 31,5 mgC/m³. En los meses de mayores precipitaciones, abril, mayo y junio, los valores fluctuaron entre 32,2 mgC/m³ y 24,8 mgC/m³; en octubre y noviembre variaron entre 27,1 mgC/m³ y 25 mgC/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 39,17 mgC/m³ y la desviación estándar fue de 16,73, mostrando que existe variación. La relación entre los valores estimados de clorofila con los valores modelados de la producción primaria fitoplanctónica (tabla 7.4 y figura 7.4) demuestra que entre los dos grupos existe una buena correspondencia:

$$r^2=0,8631; y=0,4043(x)+0,8631 \text{ (tabla 7.4 y figura 7.4)}$$

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

En esta sección (figura 7.2 y tabla 7.4), en los meses secos de enero, febrero y marzo, la producción primaria fluctuó entre 15,9 mgC/m³ y 12,5 mgC/m³; en agosto y septiembre entre 8,87 mgC/m³ y 7,98 mgC/m³; y en el mes de diciembre fue de 7,5 mgC/m³. En los meses de mayores precipitaciones, abril, mayo y junio, los valores fluctuaron entre 5,61 mgC/m³ y 4,16 mgC/m³, mientras que en octubre y noviembre fluctuó entre 5,92 mgC/m³ y 4,76 mgC/m³. El promedio mensual para toda la sección fue de 7,79 mgC/m³ y la desviación estándar de 15,77, mostrando que existe variación. La relación entre los valores

de clorofila-a estimados con los valores modelados de la producción primaria fitoplanctónica (Håkanson & Boulion, 2003; Kuo *et al.*, 2007) se calculó mediante un análisis de regresión y sus resultados mostraron que entre los dos grupos existe una buena correspondencia:

$$r^2 = 0,792; y = 1,6947(x) + 2,358 \text{ (tabla 7.4 y figura 7.5)}$$

Los resultados indican que la clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica se relacionan con el hidroperiodo y el transporte de nutrientes como lo sugieren Ryding & Rast (1989). Pinilla (2006) encontró un patrón de comportamiento similar en el lago de Guatavita (Cundinamarca, Colombia) y en el lago amazónico Boa. Hernández *et al.* (2011) encontraron en la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) que los nutrientes y la clorofila_a se encuentran regulados por el hidroperiodo y el pulso de la inundación.

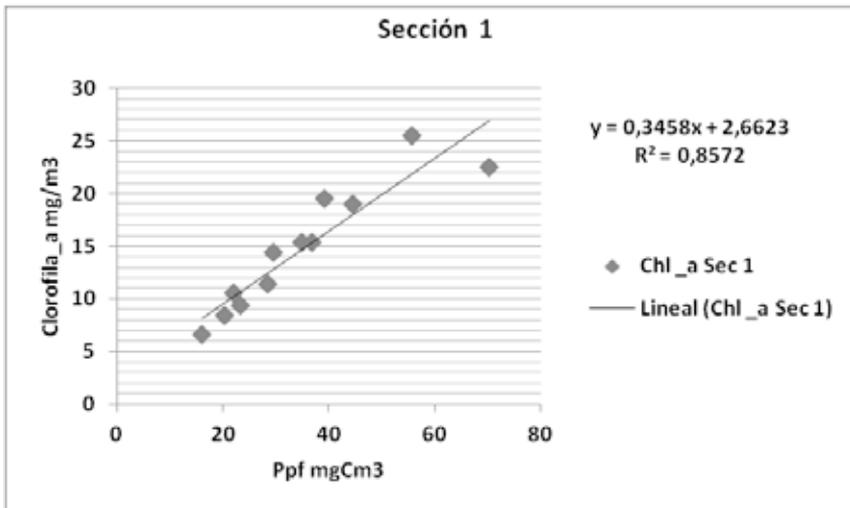


Figura 7.3. Regresión simple entre clorofila_a y Ppf, sección 1.
Fuente: Elaboración propia.

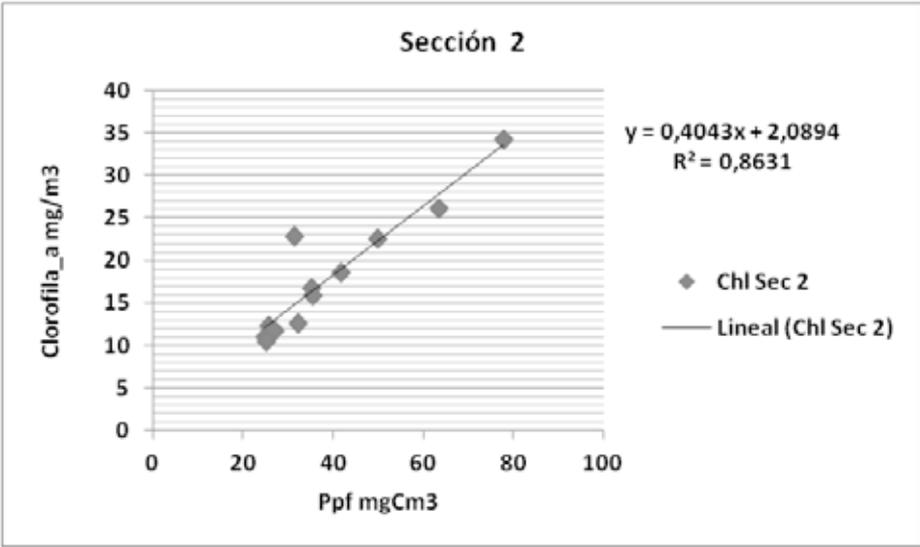


Figura 7.4. Regresión simple entre clorofila_a y Ppf, sección 2
Fuente: Elaboración propia.

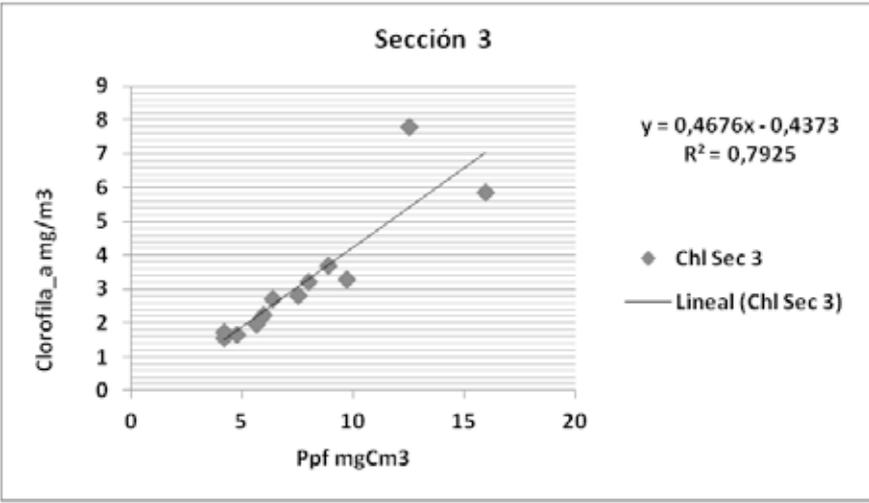


Figura 7.5. Regresión simple entre clorofila_a y Ppf, sección 3
Fuente: Elaboración propia.

Error relativo

Para verificar la capacidad de predicción o fortaleza del modelo se determinó el error relativo (Bryhn & Håkanson, 2007; Jogersen & Bendoricchio, 2001) para cada una de las secciones, para lo cual se compararon los valores medidos de clorofila_a con los valores resultantes de la modelación de la Ppf (tabla 7.5).

El valor promedio del error relativo para el tercio alto es de 1,36, para el segundo tercio de 1,21 y para el tercio bajo de 1,56. En cuanto a la desviación estándar, fue de 0,30 para el primer tercio, 0,29 para el segundo y para el tercero de 0,36. Estas cifras indican que el modelo no tiende a sobreestimar los valores y confirma su capacidad predictiva.

Tabla 7.5. Error relativo en las tres secciones

Meses	Error relativo Sección 1	Error relativo Sección 2	Error relativo Sección 3
Enero	2,12	1,27	0,6
Febrero	1,18	1,43	1,73
Marzo	1,35	1,22	1,95
Abril	1,5	1,56	1,88
Mayo	1,41	1,24	1,66
Junio	1,43	1,09	1,39
Julio	1,09	1,09	1,36
Agosto	1,01	1,24	1,4
Septiembre	1,29	1,23	1,49
Octubre	1,51	1,32	1,67
Noviembre	1,05	1,38	1,88
Diciembre	1,41	0,38	1,68
Promedio	1,36	1,21	1,56
Desviación estándar	0,3	0,29	0,36

Fuente: Elaboración propia.

Estado trófico (IST) basado en la producción primaria

Los resultados de la modelación que permitieron establecer las cantidades de clorofila_a se utilizaron para determinar la cantidad de fitoplancton y esta, a su vez, para conocer el estado trófico del cuerpo de agua, siendo ambas variables proporcionales a la cantidad de clorofila_a, de acuerdo con Håkanson & Boulion (2003) y Ryding & Rast (1989).

Sección 1. Zona intervenida (tercio alto)

Para el tercio alto los resultados de la modelación mostraron un valor promedio anual de clorofila_a de 14,8 mg/cm³ y 35,10 mg/cm³, que de acuerdo al índice de estado trófico (IST) de producción primaria, implican condiciones de eutrofia. Esta condición se acentúa en los meses de menores precipitaciones, llegando a 70,29 mg/cm³, mientras que en los meses lluviosos cambia levemente a la mesotrofica, alcanzando los 16,02 mg/cm³.

Sección 2. Zona de transición (tercio medio)

En el tercio medio el promedio de la Ppf es de 39,17 mg/cm³, indicando la prevalencia de condiciones de eutrofia a lo largo de todo el año; la atenuación de la condición eutrófica por mayores precipitaciones es apenas notable, con 25 mg/cm³, y para el periodo seco se infirió en 77,8 mg/cm³, reafirmando la tendencia a condiciones eutróficas.

Sección 3. Zona conservada (tercio bajo)

En esta sección el promedio mensual de la producción primaria fue 7,79 mg/cm³; en los meses de menores precipitaciones se alcanzan concentraciones de hasta 15,96 mg/cm³, mientras que en los meses de menor producción y mayores precipitaciones alcanza 4,16 mg/cm³, manteniendo un estado mesotrófico durante todo el año (tabla 7.4 y figura 7.2).

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 Jogersen (2003).

Un aumento en la descarga de agua permite el lavado de nutrientes, mejorando las condiciones tróficas, fenómeno similar al observado con el comportamiento del fósforo total en el humedal (capítulo 6).

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 de entre $4,0\text{mg}/\text{m}^3$ y $18\text{mg}/\text{m}^3$, y como variable dependiente la Ppf, expresada en mg/cm^3 .

En la tabla 7.6 y la figura 7.6 se aprecian los resultados de análisis de sensibilidad para la tercera sección. Las curvas de la figura corresponden a los cambios en la Ppf de acuerdo a cada nivel de variación de los valores de clorofila_a entre clases desde $4\text{mg}/\text{m}^3$ a $18\text{mg}/\text{m}^3$. Las coordenadas señalan el tiempo en meses y la abscisa los valores de Ppf en mg/cm^3 . Se observa que el rango de mesotrofia se encuentra entre la curva 1, con una concentración de clorofila_a de $4\text{mg}/\text{m}^3$ y una Ppf de $9,16\text{mg}/\text{cm}^3$, correspondiente a un mes lluvioso, y la curva 6, con una concentración de $11,8\text{mg}/\text{m}^3$ de clorofila_a y una Ppf de $29,1\text{mg}/\text{cm}^3$ en la época de verano, indicando condiciones mesotróficas. Desde la curva 7 hasta la curva 10 predominan las condiciones eutróficas, con valores de Ppf de $28\text{mg}/\text{cm}^3$ en época lluviosa y de hasta $43\text{mg}/\text{cm}^3$ en verano (curva 10).

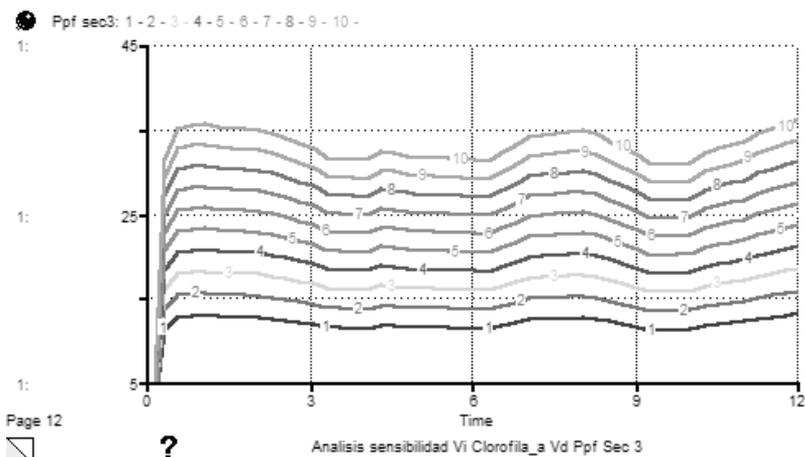


Figura 7.6. Análisis de sensibilidad, tercio bajo
 Variable independiente: clorofila_a. Variable dependiente: Productividad primaria fitoplanctónica ($\text{mg}/\text{cm}^3 \cdot \text{año}$)
 1, 2, 3, [...], 10: niveles de variación de clorofila_a entre $4\text{mg}/\text{m}^3$ y $43\text{mg}/\text{m}^3$
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados permitieron corroborar la correspondencia existente 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 *et al.* (2003) y Mitchs & Goselink (2007). 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, octubre y noviembre– la Ppf disminuye, mientras que aumenta en los periodos secos (Álvarez, 2005). Esto se debe en parte a que la oferta de nutrientes se concentra en las épocas de verano, cuando disminuye el volumen de agua, y la concentración se diluye cuando aumenta el volumen de agua. Los resultados anteriores siguen que para mantener una condición mesotrófica en el humedal el máximo nivel permisible de clorofila_a es de 11,8 mg/m³, con una Ppf de 29,1 mg/cm³.

Tabla 7.6. Resultados del análisis de sensibilidad

Niveles Ch _a mg/m ³	4	5.56	7.11	8.67	10.2	11.8	13.3	14.9	16.4	18.00
Variable	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3	Ppf mgCm-3
Meses										
Enero	10,51	14,25	17,91	21,52	25,08	28,6	32,08	35,53	38,96	42,37
Febrero	10,32	13,99	17,59	21,13	24,63	28,09	31,51	34,9	38,27	41,61
Marzo	9,67	13,12	16,49	19,81	23,09	26,33	29,53	32,72	35,87	39,01
Abril	9,25	12,54	15,77	18,94	22,07	25,17	28,23	31,27	34,29	37,29
Mayo	9,32	12,64	15,89	19,09	22,24	25,36	28,46	31,52	34,56	37,58
Junio	9,25	12,54	15,77	18,94	22,07	25,17	28,23	31,28	34,29	37,29
Julio	10,09	13,69	17,21	20,67	24,09	27,47	30,82	34,14	37,43	40,7
Agosto	10,28	13,94	17,53	21,06	24,54	27,98	31,39	34,78	38,13	41,46
Septiembre	9,42	12,77	16,06	19,29	22,48	25,63	28,76	31,85	34,93	37,98
Octubre	9,16	12,42	15,62	18,76	21,86	24,93	27,97	30,98	33,97	36,94
Noviembre	9,93	13,46	16,92	20,33	23,69	27,01	30,3	33,57	36,81	40,03
Diciembre	10,72	14,54	18,28	21,95	25,58	29,17	32,73	36,25	39,75	43,23
Promedio	9,83	13,33	16,75	20,12	23,45	26,74	30	33,23	36,44	39,62
Desviación estándar	0,55	0,75	0,94	1,13	1,32	1,5	1,69	1,87	2,05	2,23

Variable independiente: clorofila_a. Variable dependiente: productividad primaria fitoplanctónica (mg/cm²·año)

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados

En la primera sección el valor máximo de clorofila_a es 25,5 mg/m³ en el mes de febrero y el mínimo 6,6 mg/m³ en el mes de junio, con un promedio de 14,8 mg/m³; para la segunda sección el valor máximo es 34,2 mg/m³ en enero y 10,5 mg/m³ en noviembre, con un promedio de 17,9 mg/m³; en la tercera sección el valor máximo es 7,8 mg/m³ en el mes de enero, el mínimo 1,56 mg/m³ en mayo y el promedio 3,21 mg/m³. Es evidente que las variaciones de la concentración de clorofila_a en cada sección del humedal siguen un patrón inverso al comportamiento bimodal de la precipitación. En los meses secos las concentraciones aumentan en todas las secciones y en los meses lluviosos tienden a descender.

Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, mientras que en 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 es la que presenta los mayores valores de clorofila_a. En la tercera sección las concentraciones disminuyen de manera significativa, indicado mejor condición trófica, como lo señala Álvarez (2005).

Los resultados de la modelación de la Ppf mostraron en la primera sección un valor máximo de 70,29 mg/cm³ en el mes de enero y un mínimo de 16,02 mg/cm³ en el mes de junio, con un promedio de 35,1 mg/cm³; para la segunda sección el valor máximo fue 77,8 mg/cm³ en enero y 24,85 mg/cm³ en mayo, con un promedio de 39,17 mg/cm³; en la tercera sección el valor máximo fue 15,96 mg/cm³ en febrero, el mínimo 4,15 mg/cm³ en mayo y el promedio 7,79 mg/cm³. Nuevamente, es evidente que 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 se las concentraciones aumentan en todas las secciones y en los meses lluviosos tienden a descender.

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 que existe dependencia entre el ciclo hidrológico y el comportamiento de la producción primaria fitoplanctónica, como lo señala 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 & Rast (1989) y son consistentes con los resultados reportados para la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) por Hernández *et al.* (2011).

La bondad de predicción del modelo se verificó mediante la determinación de los siguientes valores de error relativo y desviación estándar, todos cercanos a cero:

Sección 1: 1,36 de error relativo y 0,3 de desviación estándar.

Sección 2: 1,21 de error relativo y 0,29 de desviación estándar.

Sección 3: 1,56 de error relativo y 0,36 de desviación estándar.

La correspondencia entre los valores modelados de clorofila_a y de Ppf mostraron una alta reciprocidad:

Sección 1: $r^2=0,86$

Sección 2: $r^2=0,86$

Sección 3: $r^2=0,78$

Si bien existen diferencias, es posible que se deban al complejo patrón de distribución de nutrientes y de los procesos biogeoquímicos en el humedal (Alvares, 2005).

El análisis de sensibilidad del modelo permitió comprobar la relación entre una variable física (precipitación) y la correspondencia entre una variable química (clorofila_a) y una de tipo biótico (Ppf), mostrando el carácter holístico e integrador del modelo (Carpenter & Cottingham, 1997; Boumans *et al.*, 2002). También se logró evidenciar la correspondencia entre las variables de entrada y salida del modelo y carácter predictivo del mismo. Se demostró que la estructura y las

variables del modelo reproducen de manera general el comportamiento de la producción primaria fitoplanctónica del humedal Jaboque.

Se modeló el comportamiento de la Ppf con el fin de relacionarla con el estado trófico del humedal, encontrándose que la primera sección el comportamiento del índice de estado trófico mostró un promedio anual de $14,8 \text{ mg/m}^3$ de clorofila_a, con un valor correspondiente de Ppf de $43,75 \text{ mg/cm}^3$, indicando condiciones de eutrofia, las cuales se acentúan en los meses enero, febrero, marzo, julio, agosto y septiembre, y una leve tendencia a la mesotrofia en los meses de mayores precipitaciones. En la segunda sección y debido a los actuales niveles de concentración de clorofila_a, el comportamiento del índice de estado trófico mostró un promedio anual de $18,86 \text{ mg/m}^3$ de clorofila_a, con un valor promedio de la Ppf de $45,65 \text{ mg/cm}^3$, indicando que en ambos casos tienen lugar condiciones permanentes de eutrofia, que incluso tiende a la hipertrofia en los meses más secos. En el tercio bajo el comportamiento del índice de estado trófico mostró un promedio anual de $3,62 \text{ mg/m}^3$ de clorofila_a con un valor correspondiente de Ppf de $10,36 \text{ mg/cm}^3$, indicando condiciones de mesotrofia, con una leve tendencia a la condición oligotrófica de carácter temporal en los meses de mayor precipitación.

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 especialmente en los meses de menores precipitaciones, mientras que 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 en la vigilancia y el control de la eutrofización.

Aproximación a la modelación dinámica de la producción de biomasa de macrófitas flotantes

Capítulo 8

Resumen

En este capítulo se presenta un modelo de simulación dinámica para explicar el comportamiento de la producción de biomasa de macrófitas en el humedal Jaboque. La modelación dinámica se basó en ecuaciones diferenciales, utilizando el método Euler de integración por medio del programa computacional Stella 9.1[®]. El modelo incluye variables fisicoquímicas como la profundidad, el área de la cubeta, la concentración del fósforo total y el pH, que fueron utilizadas para estimar la producción de biomasa de macrófitas y la cobertura sobre el espejo de agua. Los datos fisicoquímicos del agua fueron tomados por el grupo de investigación Biodiversidad y Conservación del Instituto de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se encontró una correspondencia equivalente a $r^2 = 0,57$ entre las dos variables. El análisis de sensibilidad permitió comprobar que en el humedal existe una relación funcional entre los parámetros físicos, químicos y de biomasa. Los valores simulados de producción de biomasa de macrófitas oscilaron entre 881 g/m² para época de lluvias y 923 g/m² en los periodos secos. La biomasa de macrófitas tiende a comportarse de acuerdo a la carga de fósforo, que varía de

acuerdo al ciclo hidrológico. El modelo representa una aproximación a la relación existente entre la carga de fósforo total y la producción de biomasa de macrófitas.

Procesos ecológicos

Las macrófitas son plantas adaptadas para crecer en medios acuáticos o sitios inundados. El término incluye plantas acuáticas vasculares (angiospermas y helechos), musgos, hepáticas y algunas algas que tienen un rol muy importante en los ecosistemas y sirven de refugio y alimento a muchas especies de aves, peces, mamíferos y anfibios (Roldán, 1992). Ayudan a la depuración de las aguas residuales al tomar nutrientes (nitrógeno y fósforo), filtrar partículas inorgánicas y orgánicas y crear una rizófora oxidada (Hunter *et al.*, 2000); también, aumentan la transparencia del agua (Han *et al.*, 2009). En los humedales, las macrófitas pueden estar sumergidas, ser emergentes o flotantes y estar en cualquier área del humedal que reciba luz solar (Hernández y Rangel, 2009). Las macrófitas emergentes tienen la capacidad de ventilar la rizófora a través de los tallos, lo cual contribuye también a una mayor eficiencia (Asaeda *et al.*, 2008). Las macrófitas acuáticas son comúnmente utilizadas en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Las macrófitas sumergidas se pueden utilizar para la limpieza de las aguas residuales tratadas secundariamente, mientras las macrófitas emergentes o flotantes pueden ser utilizadas en el tratamiento de aguas contaminadas (Ennabili *et al.*, 1998). Las macrófitas en humedales artificiales proveen una gran superficie para el crecimiento microbiano y suplen de carbono y oxígeno a la rizósfera, disminuyen la velocidad de la corriente y estabilizan la superficie de la cama (Brisson & Chazarenc, 2009).

Las tasas de producción primaria de las macrófitas son altas (Koch *et al.*, 1990). La producción primaria neta anual en humedales de agua dulce a menudo excede los 2000 g/m²-año (Janse *et al.*, 1998) La concentración de los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno determinan de manera significativa la presencia o ausencia de determinadas especies vegetales en un humedal. Se ha demostrado la relación existente entre los parámetros ambientales y la presencia de macrófitas, lo cual permite evaluar el estado trófico de un humedal utilizando las plantas acuáticas como bioindicadores (Kiersch *et al.*, 2004).

Modelos dinámicos

En los humedales, la dinámica de la vegetación se modela utilizando la historia de vida que determina el establecimiento y persistencia de los individuos de una especie determinada en un ambiente determinado (tabla 8.1). Janse *et al.* (1998) utilizaron el modelo PCLake para evaluar el impacto de la herbivoría en la transición de un estado limpio a turbio en el agua de un humedal. El modelo se aplicó a un lago dominado por macrófitas que mostraba signos de eutrofización y reprodujo el proceso. Los resultados mostraron que la transición hacia la dominancia del fitoplancton está fuertemente influenciada por la herbivoría por aves. Shukla (1998) investigó el efecto del crecimiento excesivo de pastos como *Paspalum distichum* sobre el crecimiento de otras macrófitas en un humedal en el Parque Nacional Keoladeo, Bharatpur, India. Los resultados del modelo muestran que *Paspalum distichum* se extendió rápidamente por el humedal mientras otras macrófitas quedaron limitadas a pequeños espacios.

Muhammetoglu & Soyupak (2000) propusieron un modelo para simular la interacción entre macrófitas y la calidad del agua. Se observó que la tasa de crecimiento de las macrófitas es el parámetro que más afecta a las otras variables. Aseada *et al.* (2001) desarrollaron un modelo para simular las interacciones entre macrófitas, nutrientes y fitoplancton en lagos con eutrofización y evaluar los impactos ambientales. En condiciones de altas temperaturas el fitoplancton disminuyó y aumentó el crecimiento de las macrófitas; sin embargo, cuando al aumentar la carga de nutrientes aumentó el fitoplancton y disminuyó la cobertura de las macrófitas (Asaeda *et al.*, 2001).

Håkanson & Boulion (2002) desarrollaron un modelo para predecir los cambios en cobertura, biomasa y producción de macrófitas en lagos de Rusia. Los resultados mostraron que aproximadamente el 40 % de la variación en la cobertura de macrófitas en los diferentes lagos se debe a la diferencia en profundidad. La producción de macrófitas depende en gran medida de la temperatura, de las características morfométricas y del sedimento, de la claridad del agua y, en menor medida, de la concentración de nutrientes. Wade *et al.* (2002) desarrollaron un modelo para medir el impacto de la extracción de fósforo durante el tratamiento de aguas residuales sobre el fósforo presente en la corriente y la dinámica macrófitas/algas epífitas en un río.

Baart *et al.* (2010), desarrollaron un modelo para estudiar la diversidad y abundancia de especies de macrófitas con respecto a diferentes parámetros hidrológicos en humedales del río Danubio (Austria). Los resultados mostraron que la diversidad y abundancia de las macrófitas aumenta con la reducción de la velocidad del agua y el aumento del área del humedal.

Tabla 8.1. Resumen de los modelos dinámicos de macrófitas en humedales

MODELO	OBJETIVO	RESULTADO
Lung & Light (1996)	Cuantificar el porcentaje de cobre de los efluentes removido por sedimentos y las macrófitas	A medida que aumenta la biomasa de las macrófitas se remueve el cobre del agua. En la descomposición de macrófitas el cobre vuelve al agua
Asaeda & Van Bon (1997)	Describir el desarrollo de macrófitas sumergidas en sitios dominados por fitoplancton	Cuando la concentración de fósforo aumenta se provoca la pérdida de biomasa del fitoplancton en el agua, y beneficia el desarrollo de las macrófitas sumergidas al tener mejor condiciones de luz
Modelo Pclake Janse et al. (1998)	Evaluar el impacto de la herbivoría en la transición de un estado limpio a turbio en el agua de un humedal.	La transición hacia la dominancia del fitoplancton está fuertemente influenciada por la herbivoría por aves.
Shukla (1998)	Estudiar el efecto del crecimiento excesivo de pastos <i>Paspalum distichum</i> sobre el crecimiento de macrófitas en un Humedal en el Parque Nacional Keoladeo, Bharatpur, India.	<i>Paspalum distichum</i> se está extendiendo rápidamente por el humedal.
Asaeda et al. (2001)	Evaluar los efectos de la descomposición de las macrófitas en el balance de nutrientes.	El fósforo liberado durante el proceso de descomposición de las macrófitas puede reducirse al menos un 75%
Muhammetoğlu & Soyupak (2000)	Simular la interacción entre macrófitas y calidad del agua	La tasa de crecimiento de las macrófitas es el parámetro que más afecta a las otras variables. El modelo puede ser una herramienta de manejo importante para predecir la reducción esperada de las consecuencias indeseadas de la eutrofización.
Asaeda et al. (2001)	Simular las interacciones entre macrófitas, nutrientes y fitoplancton en lagos con eutrofización y evaluar los impactos ambientales.	Cuando se presentan altas temperaturas el fitoplancton disminuye y aumenta el crecimiento de las macrófitas, sin embargo cuando aumenta la carga de nutrientes aumenta el fitoplancton y disminuye la cobertura de las macrófitas
Håkanson & Boulion (2002)	Predecir los cambios en cobertura, biomasa y producción de macrófitas en lagos.	La producción de macrófitas depende en gran medida de las características morfológicas y del sedimento, de la claridad del agua, y en menor medida, de la concentración de nutrientes.
Baart et al. (2010)	Estudiar la diversidad y abundancia de especies de macrófitas con respecto a diferentes parámetros hidrológicos en humedales del Río Danubio (Austria).	La diversidad y abundancia de las macrófitas aumentan con la reducción de la velocidad del agua y el aumento del área del humedal.

Fuente: Elaboración propia.

Estructura del modelo de simulación dinámica

Con el fin de estimar de manera general la biomasa de macrófitas flotantes se desarrolló un modelo de simulación dinámico conformado por variables morfométricas: profundidad promedio, área total del humedal, relación profundidad versus longitud transversal de la cubeta y variables fisicoquímicas: fósforo total y pH (tabla 8.2) (Håkanson & Boulion, 2002).

Se tuvo en cuenta la estimación del área de macrófitas del estudio de la vegetación del humedal Jaboque realizado por Hernández & Rangel (2009), quienes estimaron la cobertura de *Echhornia crassipes* en 3,5 hectáreas distribuidas entre el tercio medio y el tercio bajo del humedal y que corresponden al 2% del área total.

El modelo para la estimación de biomasa de macrófitas

El modelo se basa en la estimación de la producción de biomasa de macrófitas flotantes a partir de la concentración del fósforo total y se desarrolló a partir de la estimación de la producción inicial de macrófitas ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{semana}$) y biomasa de macrófitas en g/m^2 , de acuerdo con la siguiente ecuación (Håkanson & Boulion, 2002):

$$\text{Prod}_{\text{ini.mac}} = R_{\text{prod}} \cdot \text{Del}_{\text{pH}} \cdot \text{Del}_{\text{TP}} \cdot Y_{\text{temp}} \cdot (\text{Mac}_{\text{cov}} \cdot 0,01) \quad (1)$$

$$\text{BM}_{\text{mac}} = \text{BM}_{\text{mac}} \cdot (t - dt) + (\text{Prod}_{\text{ini.mac}} - \text{Des}_{\text{mac}} - \text{Ren}_{\text{mac}}) \cdot dt \quad (2)$$

Variables y tasas de la ecuación según Håkanson & Boulion (2002):

- BM_{mac} : Biomasa de macrófitas (g/m^2)
- $\text{Prod}_{\text{ini.mac}}$: Producción inicial de macrófitas
- Ren_{mac} : Tasa renovación de macrófitas
- R_{prod} : Tasa de producción inicial de macrófitas (g/m^2)
- Del_{pH} : Factor de cambio del pH
- Del_{TP} : Factor de cambio de fósforo total (Pt)
- Y_{temp} : Relación entre temperatura superficial y temperatura de referencia
- Mac_{cov} : Cubrimiento de macrófitas (m^2)
- Des_{mac} : Tasa de descomposición de macrófitas (g/m^2)

Variables del modelo

Tabla 8.2. Variables del modelo, unidades y fuentes

Variables e índices	Valores/ unidades	Fuente
Área estimada macrófitas	m ²	Hernández & Rangel (2009)
Temperatura superficial	°C	Grupo de investigación en Biodiversidad y conservación – Instituto de Ciencias - U. Nacional
pH promedio del humedal	Unidades	Grupo de investigación en Biodiversidad y conservación – Instituto de Ciencias - U. Nacional
Fósforo total	mg/m ²	Grupo de investigación en Biodiversidad y conservación – Instituto de Ciencias - U. Nacional
Tasa de producción de macrófitas	grs m ⁻² /ww/año	Hakanson & Boulion (2002)
Tasa de renovación de macrófitas	grs m ⁻² /ww/año	Hakanson & Boulion (2002)
Tasa de descomposición de macrófitas	grs m ⁻² /ww/año	Hakanson & Boulion (2002)
Biomasa de macrófitas	grs m ² /año	Modelado
Producción inicial macrófitas	grs m ² /wwM	odelado
Factor de formación de volumen	grs m ⁻² /ww/año	Calculado
Profundidad media	m	Grupo de investigación en Biodiversidad y conservación – Instituto de Ciencias - U. Nacional
Tasa de producción de macrófitas	grs m ² /wwH	akanson & Boulion (2002)

Fuente: Elaboración propia.

Supuestos del modelo

- Se modela la biomasa de macrófitas flotantes dada la importancia que tienen en los procesos de retención de nutrientes y purificación del agua.
 - La modelación de biomasa de macrófitas flotantes es general.
 - El área utilizada para modelar la biomasa corresponde a 3,5 hectáreas de *Eichhornia crossipes*, de acuerdo con Hernández & Rangel (2009).
 - Se tomaron en cuenta los promedios anuales de las variables físicas y químicas para realizar las modelaciones.
 - El modelo y sus resultados son una aproximación, se trata en principio de verificar la existencia entre la descarga de agua de la cuenca aferente, la concentración de fósforo y la biomasa de macrófitas flotantes.

Resultados

El modelo conceptual de estimación de biomasa se transformó mediante el uso de algoritmos para cada una de las variables; se desarrollaron las ecuaciones para establecer la relación entre las variables moderadoras, independientes y de estado del modelo (anexo B5). La simulación tuvo por objeto conocer y predecir el comportamiento de las fluctuaciones de biomasa de macrófitas.

Al establecer la correspondencia entre los valores de fósforo total y los valores de la biomasa simulada se encontró un valor de:

$$r^2=0,57; y=540,72 (x) +2182,4$$

Este resultado evidencia que existe relación entre el comportamiento de la concentración del fósforo y la producción de macrófitas. En la tabla 8.3 se muestran los resultados de la modelación de la marcha anual del fósforo total y la producción de biomasa de macrófitas. Se aprecia que las fluctuaciones de la producción de biomasa se encuentran entre 923 g/m² y 911 g/m² en los meses secos y en los de mayores precipitaciones entre 898 g/m² y 881 g/m².

Rivera-Usme (2011) encontró en el humedal Jaboque que los valores de biomasa fluctúan entre 501,6 g/m² en los meses secos y 1138 g/m² en periodos de lluvias, contrario a los resultados de la modelación. Håkanson & Boulion (2002) registró valores de producción de biomasa entre 1220 g/m² y 1848 g/m² en humedales de Europa oriental con profundidades entre 1,5 m y 0,8 m.

Los resultados de la modelación permiten inferir que existe una relación de la producción de biomasa con la marcha del fósforo, en concordancia con lo afirmado por Duever (1988) y Mann & Wetzel (2000). Así, cuando aumentan las concentraciones de fósforo se incrementa la producción de macrófitas. Durán *et al.* (2011) relacionan la oferta de nutrientes con la biomasa de macrófitas flotantes en la represa de Berlín en la zona alto andina de Santander, Colombia. En la figura 8.1 se aprecia que en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y agosto los resultados de la modelación muestran altos valores de biomasa, que coinciden con los valores del fósforo total. Por el contrario, cuando disminuye la concentración del fósforo y aumenta el caudal se reduce la biomasa de macrófitas, lo cual tiene lugar en los meses de abril, mayo, junio, octubre y noviembre, en los que se presentan altas descargas de la cuenca aferente. Montoya *et al.* (2011) concluyeron que las variaciones de las macrófitas acuáticas flotantes se encuentran asociadas al pulso de la inundación y la oferta de nutrientes en la ciénaga El Hoyo, en Los Bagres, Colombia; esto mismo podría estar ocurriendo en el humedal Jaboque.

Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad se realizó para comprobar la incidencia de una variable química como la concentración de fósforo total en la biomasa de macrófitas por unidad de área (m²). Los valores de la concentración del fósforo total se establecieron según clases o niveles entre 0,5 mg/L y 2,5 mg/L.

Los resultados permitieron confirmar que el modelo refleja una relación entre la concentración de fósforo y la biomasa de macrófitas. Se infiere que a medida que aumenta la concentración de fósforo, aumenta la biomasa de macrófitas en el humedal.

Tabla 8.3. Resultados de la modelación caudal promedio mensual, fósforo total, biomasa estimada de macrófitas en el humedal Jaboque.

Meses	Caudal promedio anual m ³ /mes	Fósforo total mg/l	Biomasa simulada grs/m ²
Enero	23030	0,98	911,56
Febrero	68881	1,03	923,9
Marzo	69919	0,74	910
Abril	194195	0,45	891
Mayo	334655	0,37	884
Junio	75935	0,55	877,55
Julio	44399	0,54	879
Agosto	136933	1,03	891,75
Septiembre	202909	0,75	898,46
Octubre	272413	0,51	881,4
Noviembre	99172	0,52	882,31
Diciembre	230711	0,72	893,93
Promedio	146096	0,68	893,74
Desviación estándar	99394,72	0,23	14,72

Fuente: Elaboración propia.

La figura 8.2 y la tabla 8.4 muestran los probables cambios de la biomasa en el humedal ocasionados por el incremento de fósforo. Las líneas numeradas de 1 a 10 señalan los niveles de biomasa en g/m² por cada nivel de fósforo. En la tabla 8.4 se muestran los resultados de la modelación con los valores correspondientes a cada nivel de concentración de fósforo. Se aprecia que cada curva tiende a comportarse de acuerdo al comportamiento estacional de la concentración de fósforo total; cuando se incrementa la concentración de fósforo, aumenta proporcionalmente la biomasa de macrófitas. Se evidencia que la variable de control del modelo modifica el comportamiento de la variable dependiente, en este caso la biomasa.

También se aprecia que a medida que aumenta la concentración de fósforo, los cambios estacionales de las curvas se hacen más fuertes, observándose un incremento de la desviación estándar para cada nivel.

También se puede inferir que a concentraciones superiores de 4 mg/m³ de fósforo, los valores de biomasa estarían entre 390 y 400 g/m², sugiriendo que este sería el límite de la relación fósforo-macrófitas para mantener una condición tendiente a la mesotrofia. Según Poi de Neiff y Neiff (2006), valores de biomasa superiores a 451 g/m² corresponden a condiciones eutróficas.

Como conclusión del análisis de sensibilidad, se puede afirmar que el modelo representa la relación existente entre la oferta de nutrientes, en este caso fósforo, y la producción de biomasa.

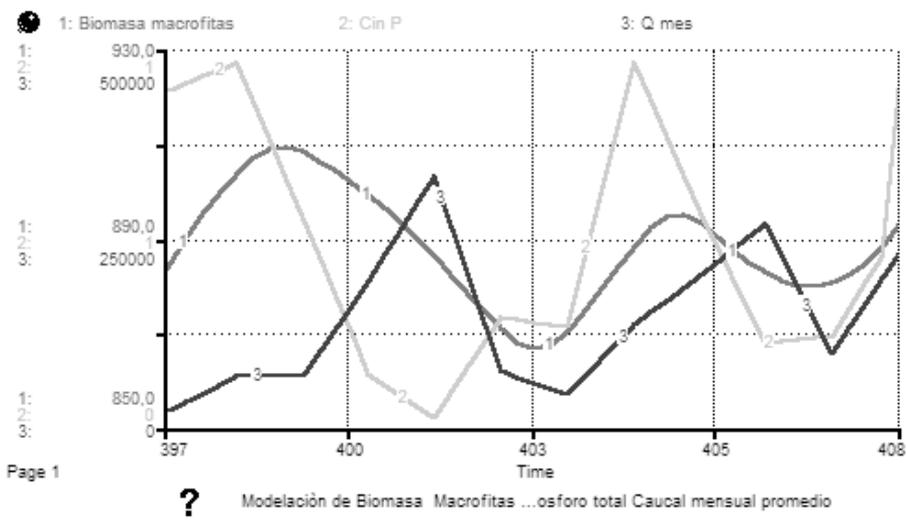


Figura 8.1. Modelación de la biomasa de macrófitas en el humedal Jaboque.
 1: Producción inicial de macrófitas (g/m²); 2: C_{in} P_t - Carga promedio mensual de P_t que ingresa al humedal en (mg/L); 3: Caudal promedio mensual estimado, sección 2 (m³/m).
Fuente: Elaboración propia.

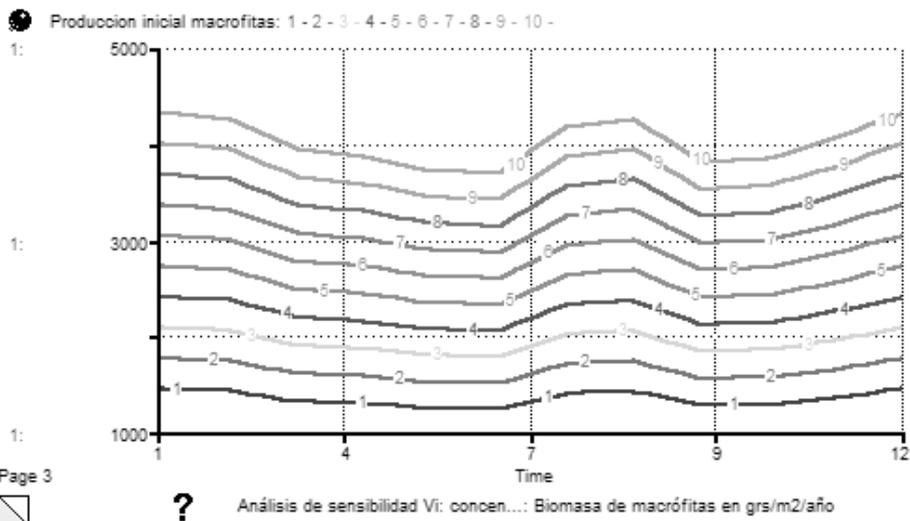


Figura 8.2. Análisis de sensibilidad concentración de Pt y biomasa de macrofitas
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.4. Resultados del análisis de sensibilidad concentración de Pt y biomasa de macrofitas

Variación de Pt mg/m ³	0,5	0,7	0,9	1,17	1,39	1,61	1,83	2,06	2,28	2,5
Meses										
Biomasa	grs/m ²									
Enero	207,2	299,2	391,3	483,4	575,5	667,6	759,6	851,7	943,8	1035,9
Febrero	210	303,3	396,6	490	583,3	676,6	769,9	863,2	956,6	1049,9
Marzo	209,9	303,2	396,5	489,8	583,1	676,4	769,7	863	956,3	1049,6
Abril	207	298,9	390,9	482,9	574,9	666,9	758,8	850,8	942,8	1034,8
Mayo	203,4	293,8	384,2	474,6	565	655,4	745,8	836,1	926,5	1016,9
Junio	199,4	288,1	376,7	465,4	554	642,6	731,3	819,9	908,6	997,2
Julio	198,9	287,2	375,6	464	552,4	640,7	729,1	817,5	905,9	994,3
Agosto	202,7	292,7	382,8	472,9	563	653,1	743,1	833,2	923,3	1013,4
Septiembre	203,7	294,3	384,8	475,4	565,9	656,5	747	837,6	928,2	1018,7
Octubre	201,2	290,6	380	469,4	568,8	648,2	737,6	827	916,4	1005,8
Noviembre	200,5	289,6	378,8	467,9	567	646,1	735,3	824,4	913,5	1002,6
Diciembre	203,2	293,5	383,8	474,1	564,4	654,6	744,9	835,2	925,5	1015,8
Promedio	203,93	294,53	385,17	475,82	566,44	657,06	747,68	838,3	928,95	1019,58
Desviación estándar	3,81	5,5	7,19	8,89	10,59	12,3	13,97	15,66	17,36	19,06

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

En principio, el modelo tiene por objetivo conocer de manera cualitativa las relaciones entre variables físicas y químicas y un proceso biológico, la producción de biomasa de macrófitas; por lo tanto, los resultados de la modelación son una aproximación general a un proceso funcional del humedal que admiten discusión. Esencialmente, se trata de un instrumento que busca facilitar la comprensión de la relación entre los fenómenos fisicoquímicos y la producción de biomasa en el humedal.

El modelo indica la posible existencia entre las variaciones de la biomasa de macrófitas de acuerdo con el comportamiento estacional de la oferta de nutrientes y en especial del fósforo; a medida que aumenta la concentración de fósforo hay un leve aumento estacional de biomasa.

Los resultados de los análisis de sensibilidad permiten afirmar que la estructura y las variables del modelo reproducen de manera general el comportamiento de la producción de biomasa de macrófitas.

Del análisis de sensibilidad se infiere que a concentraciones de 0,5 mg/L de fósforo los valores de biomasa se encontrarían entre 203 g/m² y 207 g/m²; sin embargo, el promedio de fósforo en los dos últimos tercios del humedal se encuentra por encima de 0,7 mg/L, indicando que podría existir una tendencia al aumento de la cobertura de *E. crassipes*, incrementándose de esa manera la mesotrofia en el tercio bajo.

Consideraciones finales

Capítulo 9

Los resultados de la modelación son un referente importante para aproximarse a la comprensión integrada de un sistema ambiental. En el modelo propuesto en la presente investigación se integraron variables físicas, químicas y biológicas para entender sus relaciones y su influencia sobre al estado trófico del humedal Jaboque y poder así aproximarse a una predicción del comportamiento del sistema que permita formular recomendaciones para la conservación y restauración del humedal.

En la tabla 9.1 se muestra la correspondencia entre las preguntas formuladas al inicio de la investigación y los resultados de la modelación.

La caracterización del clima se presentó en el capítulo 3. En la tabla 9.2 se resumen la marcha anual y las épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo en la estación meteorológica Aeropuerto El Dorado. Los valores de precipitación más altos se presentan en los meses de abril y mayo, con 107 mm y 100,7 mm, y en los meses de octubre y noviembre, con 111,3 mm y 93,1 mm. La distribución es de tipo bimodal-tetraestacional, dado que las épocas secas ocurren de enero a febrero y de julio a agosto.

En la variación interanual de la precipitación en series largas –40 años aproximadamente– se detectó cierto patrón asociado a los fenómenos de El Niño y de La Niña. En los años 1977, 1978, 1980, 1991, 1992,

1996 y 1997 se observa una reducción de las precipitaciones por debajo del valor promedio anual, que se asocia con las sequías generadas por el fenómeno de El Niño, que aunque con menor intensidad, se presentó también en los años 1982, 1985, 1987 y 1989.

Respecto al fenómeno de La Niña y su influencia en el aumento de las precipitaciones, los datos registrados en 1979 muestran un pico de 991,7 mm anuales y aparece levemente en los años 1984, 1986, 1988, 1990 y 1995. Los años 1999, 2006, 2008 y 2010 fueron excepcionalmente húmedos, calificándose como años típicos del fenómeno de La Niña, los dos últimos pasando los 1200 mm de lluvia anual.

Tabla 9.1. Correspondencia entre las preguntas planteadas al comenzar la investigación y los resultados de la modelación

Variable	Pregunta	Diagnóstico	Resultados de la modelación	Observaciones
Hidroperiodo	¿El hidroperiodo refleja el comportamiento bimodal – teraestacional en función de la precipitación?	Se establece la variación del hidroperiodo en función de la precipitación	La modelación confirmó que los cambios del hidroperiodo, la descarga de la cuenca aferente, al río Bogotá y el volumen de cada sección están asociados con el comportamiento de la precipitación	Se presenta una alta variabilidad del hidroperiodo en los últimos 39 años especialmente por la influencia de los fenómenos del Niño y la Niña
THR	¿El hidroperiodo y la morfometría de cada sección afectan el THR?	Se infiere que los cambios en la morfometría afectan el THR	Se confirmó que la precipitación, la descarga de agua de la cuenca aferente y la capacidad de almacenaje regulan el THR de retención en todas secciones	>precipitación> descarga cuenca aferente <THR
Fósforo total	¿La precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en el comportamiento del fósforo?	Relaciones del comportamiento del Pt con la variación de la precipitación	Se verificaron cambios en la concentración del fósforo asociados a la precipitación y la descarga de la cuenca aferente.	>precipitación < THR< fósforo total
Estado trófico	¿Se encuentra el estado trófico variando en función del hidroperiodo?	Si del hidroperiodo	Los resultados de la modelación corroboran cambios del estado trófico asociados a la precipitación y al hidroperiodo.	>precipitación<thr<fósforo total<trofia
Sólidos suspendidos totales (SST)	¿La precipitación y la descarga de la cuenca aferente influyen en el comportamiento de los SST?	La precipitación y descarga de la cuenca aferente del humedal influye en el comportamiento de SST	La modelación ratificó la influencia de la precipitación y el hidroperiodo en el comportamiento de los SST	>precipitación<thr>sst >precipitación>sst>trofia
Clorofila_a y producción primaria	¿En el comportamiento de la clorofila_a y de la producción primaria incide la variación climática?	Se relaciona e con la variación climática	Se confirmó relación entre la variación del clima y la clorofila_a y la producción primaria y su relación con el estado trófico. Se encontraron coincidencias temporales entre las marchas de la clorofila_a, fósforo total y ppf	<Precipitación>fósforo total>clorofila_a>ppf>trofia
Biomasa de macrófitas flotantes	¿Es posible relacionar la biomasa de macrófitas con la el hidroperiodo y la carga de Pt?	No lo establece	Se relaciona parcialmente con nutrientes	Los resultados no son concluyentes

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.2. Marcha anual y épocas de mayor expresión de los parámetros climáticos por periodo estación meteorológica Aeropuerto El Dorado.

PERIODOS 1972 - 1980	MESES												PROMEDIO
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
P Media (mm)			MMM	MMM	MMM				MMM	¥	MMM		790,5
T°C Media			Σ	Σ	Σ								13,1
H.R. (%)				=	=					=	=	=	80,4
Brillo Solar (h/m) 1981 - 1990	α	α	α				α					α	134,5
P Media (mm)				¥	MMM				MMM	MMM	MMM		842,9
T°C Media					Σ								13,5
H.R. (%)			=	=	=					=	=	=	80,6
Brillo Solar (h/m) 1991 - 2000	α	α	α				α	α				α	139,3
P Media (mm)			MMM	MMM	¥				MMM	MMM	MMM		757,1
T°C Media				Σ		Σ							13,8
H.R. (%)			=	=	=					=	=	=	79
Brillo Solar (h/m) 2001 - 2010	α	α	α					α				α	131,4
P Media (mm)			MMM	MMM	MMM					¥	MMM		924,6
T°C Media					Σ								13,8
H.R. (%)			=	=	=					=	=	=	80,9
Brillo Solar (h/m)	α	α					α	α	α			α	127,5

Meses de mayor precipitación; ¥: Mes con la más alta precipitación; Σ: Mes con temperatura máxima; =: Meses de mayor humedad relativa; α: Meses de mayor exposición al brillo solar.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura registró valores promedios máximos iguales a 21,5 °C, con una media de 13,6 °C y mínimos de 2,5 °C. Las altas temperaturas se asocian con el fenómeno de El Niño. En los años 2009 y 2010 se presenta una anomalía en los datos debido a que en un periodo típico del fenómeno de La Niña se registraron temperaturas superiores a los 14 °C.

La humedad relativa registró un valor de 80%, siendo 83% el más alto, en el mes de noviembre, y 77% el más bajo, en los meses de julio y agosto. Según la variación interanual, el año con mayor humedad relativa fue el 2008, con una humedad promedio de 85,8%, asociada con un fenómeno de La Niña intenso. El año con menor valor de humedad relativa fue 1992, con una humedad promedio del 75,8%, y relacionada con un año típico del fenómeno de El Niño.

De acuerdo con la clasificación climática de Thornthwaite, los datos registrados en esta estación corresponden con un clima ligeramente húmedo, sin deficiencia de agua en el ambiente, mesotermal, con baja concentración de calor en el periodo seco.

El brillo solar obtuvo un monto anual de 133,2 horas/mes, con su mayor expresión en el mes de enero (184,9 horas/mes). El año que presentó el mayor número de horas de brillo solar fue 1980, con 1912 horas anuales; el año con el menor número de horas de brillo solar fue 1975, con 1348 horas anuales.

Los datos relativos a la descarga de agua al humedal se presentaron en el capítulo 4 (tabla 9.3). Las variaciones del caudal de la cuenca aferente responden al comportamiento de la precipitación. Los valores extremos de precipitación corresponden también a montos extremos en los caudales, como lo han señalado Bradley & Gilvear (2000), Hupp (2000), Quinn & Hanna (2003) y Spieles & Mitsch (2003), entre otros. En la ciénaga de Cachimbero (Cimitarra, Colombia), Giraldo *et al.* (2007) encontraron que el régimen hidrológico de la ciénaga correspondía al patrón de comportamiento de la precipitación.

Los últimos 39 años se han caracterizado por una alta variabilidad climática; así, el menor valor de precipitación anual se presentó en 1992 y fue 432,7 mm/año, que corresponden a una descarga calculada de la cuenca aferente de 905 225 m³/mes, que se asocia con los valores más bajos en los últimos 39 años, y 1250,5 mm/año, el más alto para el año 2010, con una descarga de la cuenca aferente de 2 471 634 m³/mes. La descarga afecta de manera significativa la dinámica hidrológica del humedal, e incide en sus procesos geoquímicos y biológicos (Håkanson *et al.*, 2003; Carpenter *et al.*, 2008).

Al comparar las curvas de descarga al humedal en años con situaciones críticas, se puede apreciar que, con un fenómeno de La Niña extremo, la descarga aumenta aproximadamente en un 25% con relación al promedio histórico y 150% con relación a un año con fenómeno de El Niño. Es decir, el hidroperiodo se caracteriza por una alta variabilidad que depende de las condiciones climatológicas. Esta situación confirma que los fenómenos del clima como El Niño y La

Niña influyen directamente en el comportamiento del hidropereodo en el humedal y afectan los procesos biogeoquímicos y biológicos.

La relación entre la descarga de agua de la cuenca aferente y el volumen de cada una de las secciones del humedal osciló de la siguiente manera (tabla 9.3): en la primera sección el menor volumen estimado fue de 61 500 m³ en verano y el mayor en invierno, con 70 643 m³; en la segunda sección fue de 210 747 m³ en invierno y en verano de 161 556 m³; en la tercera sección de 193 820 m³ en verano y 245 155 m³ en invierno. Estos valores se relacionan con el patrón de distribución de la lluvia.

El comportamiento del tiempo hidráulico de retención del agua en las secciones del humedal (tabla 9.3) varía de acuerdo con la precipitación y con la descarga de la cuenca aferente. En la primera sección se estimó en 24 días/año en verano, 8 días/año en invierno; en la segunda en 59 días/año en verano y 20 días/año en invierno; y en la tercera entre 68 días/año en verano y 23 días/año en invierno.

En el embalse de El Muña, Cundinamarca, Díaz & Camacho (2005) estimaron el tiempo hidráulico de retención durante periodos lluviosos en 2 días/año y en periodos secos de 2,7 días/año, indicando que el tiempo hidráulico de retención es mayor en épocas secas y que disminuye en épocas de invierno, situaciones que concuerdan con la modelación del humedal Jaboque. Esta, en efecto, permitió establecer que la segunda y tercera sección del humedal reciben el impacto de las crecientes de la cuenca aferente y que la tercera sección cumple una función de regulación y estabilización fisicoquímica y biológica. Según Zang & Mitsch (2005), se necesitan más de 15 días de retención hidráulica del agua para que un humedal pueda desarrollar una función depuradora.

El modelo reveló que el comportamiento del tiempo hidráulico de retención del agua se encuentra en función de las condiciones hidrológicas y morfométricas del humedal y los resultados dan relevancia al modelo como instrumento práctico para predecir el impacto generado por variabilidad climática extrema como el fenómeno de El Niño y La Niña o los cambios derivados de las alteraciones físicas del humedal

que afectan el flujo de agua y la capacidad de almacenamiento de cada sección, dando validez a la primera hipótesis planteada en esta investigación.

El modelo de fósforo total muestra que las variaciones de la concentración en cada sección del humedal Jaboque siguen un patrón inverso al comportamiento bimodal de la precipitación. Los valores modelados (capítulo 5 y tabla 9.3) en la primera sección para los periodos secos fue de $1,02 \text{ mg/m}^3$ y en invierno el menor valor fue de $0,43 \text{ mg/m}^3$; para el tercio medio de $1,1 \text{ mg/m}^3$ en verano y $0,62 \text{ mg/m}^3$ en invierno; y para el tercio bajo de $0,97 \text{ mg/m}^3$ en invierno y $0,3 \text{ mg/m}^3$ en verano. Estos valores indican que el fósforo se diluye en las épocas de mayores precipitaciones, cuando hay mayor volumen de agua, y se concentra en los meses de verano. Rivera (2011) y Mejía (2011) corroboran este comportamiento en el humedal Jaboque. Niño (2003) observó una rutina similar para el embalse del Neusa (Cundinamarca, Colombia); Restrepo *et al.* (2006) y Montoya & Aguirre (2010) encontraron patrones de comportamiento similares en las ciénagas del complejo de Ayapel (Córdoba, Colombia). Pinilla (2006) encontró variaciones de la concentración del fósforo debidas a la fluctuación hidrológica en el lago Boa (Caquetá, Colombia) e igualmente Gallo *et al.* (2009) en la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia).

De acuerdo con los resultados, las dos primeras secciones se encuentran muy influenciadas por el ciclo hidrológico en condiciones de altas precipitaciones, que disminuyen el tiempo hidráulico de retención y por lo cual funcionan como canales de paso, sin ejercer ninguna función depuradora. Por el contrario, dadas sus condiciones morfológicas, el tercio bajo amortigua y depura la descarga de fósforo proveniente de los dos primeros tercios. La modelación del índice de estado trófico (tabla 9.3) mostró que las dos primeras secciones del humedal se encuentran en condiciones eutróficas que se incrementan en las épocas de verano, mientras que el tercio bajo mantiene condiciones de mesotrofia durante todo el año, con unas pequeñas variaciones en las épocas de verano. Es probable que la escasa variación del estado trófico de esta sección se deba a la redistribución de nutrientes por mezcla continua y a los altos tiempos hidráulicos de retención, fenómeno también observado por Ramirez & Alcaraz (2002) en un sistema eutrófico en Medellín, Colombia.

Los resultados anteriores muestran que en las temporadas de lluvia se reducen las concentraciones de fósforo, al igual que el THR, lo cual podría relacionarse con una acción de lavado de nutrientes por aumento de la descarga de agua y, como lo señala Jorgensen (2003), en un mejoramiento del estado trófico del humedal; no obstante, Zhang & Mitsch (2005) sugieren tiempos hidráulicos de retención superiores a 15 días para que se ejerza una función depuradora en humedales. En la tercera sección de humedal se combinan condiciones de carácter físico y biológico que permiten considerar que en el sistema del humedal Jaboque tiene lugar una función depuradora.

El análisis de sensibilidad del modelo permitió predecir el estado trófico de cada sección del humedal, determinar la carga mínima de fósforo total para mantener las condiciones de mesotrofia y corroborar la relación entre el tiempo hidráulico de retención, la carga de fósforo y el estado trófico. Estas variables deben ser tenidas en cuenta en los programas de restauración y conservación; en efecto, los resultados y los análisis permiten confirmar la capacidad de la modelación como instrumento robusto para predecir el estado trófico del humedal.

Los resultados de la modelación de los sólidos suspendidos totales (capítulo 6 y tabla 9.3) mostraron que en la primera sección los valores fluctuaron entre 101 mg/L en la temporada de invierno y 34,98 mg/L en verano; en la segunda sección entre 69,91 mg/L en invierno y 18,5 mg/L en verano; y en la tercera sección entre 60,97 mg/L en invierno y 14,4 mg/L en verano. Cuando disminuye la descarga de la cuenca aferente y aumenta el tiempo hidráulico de retención, disminuye la concentración de SST, reduciendo el transporte entre las secciones del humedal. Rivera (2011) y Mejía (2011) mencionan un comportamiento similar de los sólidos suspendidos en el humedal Jaboque. En la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) Gallo *et al.* (2009) encontraron que durante las aguas altas disminuyeron las concentraciones de sólidos suspendidos; para la misma ciénaga Hernández *et al.* (2008) encuentran en épocas de estiaje o verano las más altas concentraciones de sólidos suspendidos; ambos resultados relacionan el fenómeno con las condiciones hidrológicas. Velázquez *et al.* (2007) reportan para la ciénaga Colombia (Caucasia, Colombia) y Montoya & Aguirre (2010) para la ciénaga de Escobillitas (Córdoba, Colombia) que los sólidos

suspendidos disminuyen en verano y aumentan en invierno. Malmaeus & Håkanson (2003) y Jogersen (2003) sugieren que los SST son los responsables del transporte de la mayoría de nutrientes al cuerpo de agua y que este fenómeno puede presentarse porque el tiempo hidráulico de retención disminuye, lo cual implica un mayor transporte de agua y mayor lavado de sólidos suspendidos en el épocas de invierno.

Tabla 9.3. Resumen de los resultados de modelación por parámetros en humedal Jaboque

Parámetro	Temporada	Volumen m ³	THR Días/año	P04 mg/m ³	IST (OCED) mg/m ³	SST mg/m ³	Chl_a mg/m ³	Ppf mgCm ³	Estado trófico	Observaciones
Sección -1 Tercio alto	Verano	61500	24	1.02	60.13	34.98	22.5	77.8	Eutrófico	
	Invierno	70643	8	0.43	27.65	101.76	6.6	16.02	Eutrófico	Leve mesotrofia meses de mayor
Sección -2 Tercio medio	Verano	161556	59	1.1	67.01	18.58	34.2	77.8	Eutrófico	
	Invierno	210747	20	0.33	14.52	69.95	11.1	24.85	Eutrófico	
Sección -3 Tercio bajo	Verano	193820	68	0.97	29.7	14.4	7.8	15.96	Mesotrófico	Leve a eutrófica meses más secos
	Invierno	245155	23	0.3	12.97	67.5	1.56	4.16	Mesotrófico	

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de sensibilidad del modelo reproduce parcialmente la relación entre las condiciones hidrológicas y la dinámica de los SST en cada una de las secciones; de allí su importancia en términos predictivos. Es de notar que para todas las secciones y aún en condiciones de bajas precipitaciones (<500 mm/año) las concentraciones de STT se encontrarían entre 44 y 53 mg/L, indicando un estado eutrófico en todo el humedal, condición que tiende a incrementarse en la medida en que aumenta la descarga de la cuenca aferente.

La concentración de la clorofila_a (capítulo 7 y tabla 9.3) en cada sección del humedal sigue un patrón inverso al comportamiento bimodal-tereaestacional de la precipitación. En los meses secos, las concentraciones aumentan, en cada una de las secciones y en los meses lluviosos tienden a descender. Las dos primeras secciones muestran las mayores concentraciones de clorofila_a, indicando que se encuentran en estado eutrófico, mientras que en la tercera sección las concentraciones de clorofila_a tienden a disminuir, manteniendo condiciones de mesotrofia. Puede inferirse, entonces, un una menor

productividad primaria e influencia del ciclo hidrológico. En Colombia se han documentado situaciones similares por Pinilla (2006) quien encontró que las eficiencias varían entre ecosistemas y entre épocas de muestreo –seguramente por las condiciones climáticas– al evaluar y comparar la eficiencia fotosintética entre un lago amazónico, el lago Boa, y un lago andino, lago Guatavita. Por su parte, Montoya & Aguirre (2010), entre otros, encontraron relación entre la variación de la producción primaria y el pulso de inundación en la ciénaga Escobillitas, Antioquia.

Los resultados de la modelación de la relación entre la clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica mostraron una correspondencia de $r^2=0,71$ en la primera sección, $r^2=0,81$ en la segunda y $r^2=0,78$ en la tercera sección. Es posible inferir que a medida que aumentan las cantidades de clorofila_a aumenta la Ppf; igualmente, se percibe una fuerte influencia del ciclo hidrológico en el comportamiento de la marcha de las dos variables. Así, en las épocas más lluviosas –abril, mayo, junio, octubre y noviembre– la Ppf disminuye, mientras que esta aumenta en los meses secos. Hernández *et al.* (2011), encontraron en la ciénaga de Ayapel (Córdoba, Colombia) una correspondencia entre estas variables de $r^2=0,72$; Montoya & Aguirre (2009) encontraron una relación entre el hidropериодо y la producción primaria en la ciénaga Paticos (Córdoba, Colombia).

En la primera sección del humedal Jaboque el promedio anual de clorofila_a es de 14,8 mg/m³, con un valor correspondiente de Ppf de 35,10 mg/cm³, indicando condiciones de eutrofia; la segunda sección y debido a los actuales niveles de concentración de clorofila_a, mostró un promedio anual 17,93 mg/m³ de clorofila_a este compuesto, con un valor promedio de Ppf de 39,17 mg/cm³, indicando condiciones permanentes de eutrofia. En el tercio bajo, el comportamiento promedio anual de clorofila_a es de 3,1 mg/m³, con un valor correspondiente de Ppf de 7,79 mg/cm³, indicando condiciones de mesotrofia. Estos resultados confirman que es permisible hacer una interpretación del estado trófico del humedal a partir de las concentraciones de clorofila_a y la producción primaria fitoplanctónica, con base en la clasificación propuesta por Håkanson & Boulion (2003), y en consecuencia es posible utilizarlos como indicadores apropiados para determinar el grado de eutrofización en humedales.

El análisis de sensibilidad del modelo permitió comprobar la relación entre una variable física –la precipitación–, una variable química –la clorofila_a– y una de tipo biótico –la producción primaria–. 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 en especial en los meses de menores precipitaciones, mientras que 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. Se comprobó la bondad de utilizar indicadores de estado trófico, mostrando el potencial que tienen en la vigilancia y control de la eutrofización.

Los resultados del modelo preliminar para estimar la producción de biomasa de macrófitas flotantes (capítulo 8) mostraron que existe relación entre la concentración de fósforo en la columna de agua y la biomasa. La correspondencia entre los valores promedio estimados de fósforo y los valores modelados de biomasa de macrófitas es de $r^2 = 0.57$; esto indica que existe relación entre un fenómeno químico y uno biológico. Duran *et al.* (2011) relacionan la oferta nutrientes con la biomasa de macrófitas flotantes en la represa de Berlín (Santander, Colombia), en la zona alto andina. Montoya *et al.* (2011) concluyeron que las variaciones de las macrófitas acuáticas flotantes se encuentran asociadas al pulso de la inundación y con la oferta de nutrientes en la ciénaga El Hoyo (Los Bagres, Colombia). El análisis de sensibilidad del modelo permite afirmar que su estructura y variables reproducen de manera general la producción de biomasa de macrófitas. Debe aclararse que estos resultados son apenas una aproximación cualitativa a un fenómeno complejo en el que intervienen variables fisicoquímicas y biológicas; sin embargo, la simplificación permite una aproximación racional para tratar de comprender la producción de biomasa de macrófitas en el humedal y sus posibles implicaciones.

En síntesis, los resultados de la modelación de los procesos en el humedal Jaboque muestran que es posible utilizar las técnicas de simulación dinámica como instrumento válido para comprender un problema ecológico y fortalecer la capacidad de hacer predicciones oportunas para la gestión adecuada del recurso. Sin embargo, se debe tener presente que la modelación tiene limitaciones que se relacionan con la complejidad de los sistemas abiertos y que sus resultados son

aproximaciones racionales a la realidad. Los análisis de sensibilidad elaborados mediante la simulación dinámica permitieron validar indicadores fisicoquímicos y biológicos que pueden ser utilizados en sistemas de monitoreo de planes de preservación y restauración.

El modelo de simulación dinámica desarrollado permitió una mayor comprensión de la relación entre los fenómenos hidrológicos, geoquímicos y biológicos en el humedal Jaboque. Se corroboraron las hipótesis planteadas entorno a la incidencia del hidropereodo en el comportamiento de variables fisicoquímicas y biológicas estudiadas. Los análisis de sensibilidad y las pruebas estadísticas realizadas a los modelos revelaron que son estables, que tienen una capacidad predictiva aceptable y muestran independencia entre las variables de control y las predictivas.

El modelo resultado de este estudio puede considerarse como un instrumento útil para predecir el comportamiento de las variables fisicoquímicas y biológicas que permiten explicar las tendencias del estado trófico del humedal Jaboque y de cuerpos de agua en similares condiciones hidrológicas y morfométricas.

Recomendaciones

De los resultados de modelación se inferen acciones que se dirigen a la restauración y la conservación del humedal como patrimonio de la ciudad. De acuerdo con los resultados de la modelación y con los análisis de sensibilidad, estas acciones tendrán un efecto positivo sobre las condiciones tróficas del humedal:

1. El tiempo hidráulico de retención es una variable clave que depende de las variaciones climáticas y de las condiciones morfométricas del humedal. Por este motivo se deben priorizar todas aquellas acciones que optimicen el tiempo hidráulico de retención y en especial en el tercio bajo. Esto significa evitar o prohibir al máximo la desecación del humedal, la acumulación intensiva de sedimentos y los rellenos ilegales, acciones que disminuyen el tiempo de retención del agua.
2. En lo posible se deben evitar todos los procesos de potrerización del humedal y erradicar la colonización por especies

altamente agresivas e invasoras como el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).

3. Se debe evitar la construcción de obras de infraestructura que alteren el hidropereodo. Este tipo de acciones llevan a aumentar el volumen de agua transportada sin modificar la capacidad de almacenamiento de las cubetas, disminuyendo la capacidad hidráulica de retención del humedal.

4. Es necesario el control y disminución de las cargas externas o alóctonas de fósforo provenientes de la cuenca aferente, de los vertimientos ilegales y cultivos. Una disminución sensible de la carga de fósforo permitiría mejorar el tercio bajo y generar condiciones de mesotrofia en el tercio medio.

5. Es conveniente controlar el aporte de sedimentos desde la cuenca aferente hacia el humedal. Los resultados mostraron que en la medida en que se incrementa la descarga, aumenta la concentración de sólidos suspendidos totales, que están estrechamente relacionadas con el estado trófico.

6. La remoción de macrófitas acuáticas debe realizarse con carácter selectivo: se deben remover principalmente las que por su tipo de enraizamiento dependen de la carga de nutrientes que se encuentran en los sedimentos. En la etapas iniciales de la restauración se debe evitar remover totalmente las macrófitas acuáticas flotantes que atrapan en sus sistemas radiculares cantidades apreciables de sedimentos y que funcionan como filtros naturales.

7. Es necesario evitar el taponamiento por macrófitas de los desagües del humedal en épocas de altas precipitaciones, debido a que el tercio bajo recibe la mayor descarga de nutrientes en invierno. Es imprescindible minimizar el efecto nocivo sobre el estado trófico de esta sección.

8. Se debe poner en funcionamiento un sistema de monitoreo regular, basado en indicadores sencillos cuya implementación es poco costosa, que permita hacer seguimiento al estado trófico del humedal y que eventualmente pueda ser extendido a los demás humedales de la ciudad.

Referencias

ACREMAN, M., FISHER, J., STRATFORD, C., MOULD, D., & MOUNTFORD, J. (2007). *Hydrological science and wetland restoration: some case studies from Europe. Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (1), 158-169.

[ADESSA] Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental. (2004). *Plan de manejo integral y comunitario para la recuperación y protección del humedal Jaboque ubicado en la localidad de Engativá*. Bogotá: Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental (ADESSA), Ecofondo- Fondo para la Acción Ambiental.

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. (2009). *Diagnóstico de los aspectos físicos, demográficos y socio económicos*. Bogotá: Secretaria Distrital de Planeación.

ALMENDINGER, J. (1999). A method to prioritize and monitor wetland restoration for water-quality improvement. *Wetlands Ecology and Management*, 6 (4), 241-252.

ÁLVAREZ, J. P. (2005). Evaluación del estado trófico del humedal Jaboque: Análisis espacial y temporal de las características físico-

químicas del agua y de la comunidad planctónica. En Rangel-Ch., J. O. (Comp.). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal Jaboque*. (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

ANDERSON, C. J. & W. J. MITSCH. (2005). Effect of pulsing on macrophyte productivity and nutrient uptake: a wetland mesocosm experiment. *The American Midland Naturalist*, 154, 305-319.

ASAEDA, T., RAJAPAKSE, L., & FUJINO, T. (2008). Applications of organ-specific growth models; modelling of resource translocation and the role of emergent aquatic plants in element cycles. *Ecological Modelling*, 215 (1-3), 170-179.

ASAEDA, T., TRUNG, V. K., & MANATUNGE, J. (2000). Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in Shallow Lakes. *Aquatic Botany*, 68 (3), 217-237.

ASAEDA, T., TRUNG, V. K., MANATUNGE, J., & VAN BON, T. (2001). Modelling macrophyte-nutrient-phytoplankton interactions in shallow eutrophic lakes and the evaluation of environmental impacts. *Ecological Engineering*, 16 (3), 341-357.

ASAEDA, T., & VAN BON, T. (1997). Modelling the effects of macrophytes on algal blooming in eutrophic shallow lakes. *Ecological Modelling*, 104 (2-3), 261-287. BAYLEY, S., ZOLTEK, J., HERMANN, A. J., DOLAN, T. J., & TORTORA, L. (1985). Experimental manipulation of nutrients and water in a freshwater marsh: effects of biomass, decomposition, and nutrient accumulation. *Limnology and Oceanography*, 30 (3), 500-512.

BAART, I., GSCHÖPF, C., BLASCHKE, A. P., PREINER, S., & HEIN, T. (2010). Prediction of potential macrophyte development in response to restoration measures in an urban riverine wetland. *Aquatic Botany*, 93 (3), 153-162.

BOULION, V., & HÅKANSON, L. (2003). A new general dynamic

model to predict biomass and production of bacterioplankton in lakes. *Ecological Modelling*, 160, 91-114.

BOUMANS, R., COSTANZA, R., FARLEY, J., WILSON, M., PORTELA, P., ROTMANS, J., VILLA, F., & 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, 529-560.

BRADLEY, C. & D. GILVEAR. (2000). Saturated and unsaturated flow dynamics in a floodplain wetland. *Hydrological Processes*, 14 (16-17), 2945-2958.

BRINSON, M. M. (2004). *Niveles extremos de variación de patrones y procesos en humedales*. Documentos del curso-taller "Bases ecológicas para la clasificación e inventario de humedales en Argentina", Buenos Aires, Argentina.

BRISSON, J., & CHAZARENC, F. (2009). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection? *Science of the Total Environment*, 407 (13), 3923-3930.

BRYHN, A. & L. HÅKANSON. (2007). A comparison of predictive phosphorus load-concentration models for lakes. *Ecosystems*, 10 (7), 1084-1099.

CARLSON, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22, 361-369.

CARPENTER, S., CARACO, N., CORRELL, D., HOWARTH, R., SHARPLEY A., & SMITH, V. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8 (3), 559-568.

CARPENTER, S., & COTTINGHAM, K. L. (1997). Resilience and restoration of lakes. *Conservation Ecology*, 1 (1), 1-12.

CASTILLO, C. T. (2006). Productividad y la biomasa fitoperifítica en los lagos Yahuaraca y Tarapoto (Amazonas-Colombia). *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 1 (1), 59-68.

CHAPARRO-R., B. (2003). Reseña de la vegetación en los humedales de la sabana de Bogotá. En: *Los humedales de Bogotá y la sabana* (Vol. I) (pp. 71-90). Bogotá: Acueducto de Bogotá, Conservación Internacional Colombia.

CONTRERAS, F., CASTAÑEDA, O., & TORRES, R. (1997). Hidrología, nutrientes y productividad primaria en las lagunas costeras del Estado de Oaxaca, México. *Hidrobiológica*, 7 (1), 9-17.

CONTRERAS-ESPINOSA, F., RIVERA-GUZMÁN, N., & SEGURA-AGUILAR, R. (2005). Nutrientes y productividad primaria en una laguna costera tropical intermitente (La Mancha, Ver.) del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 15 (3), 299-310.

CUATRECASAS, J. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 10 (40), 221-268.

DAHL, M., WILSON, D. I., & HÅKANSON, L. (2006). A combined suspended particle and phosphorus water quality model: application to Lake Vänern. *Ecological modelling*, 190, 55-71.

DÍAZ, H., & CAMACHO, L. (2005). *Modelación hidrodinámica y de calidad para el embalse del Muña* (Informe técnico). Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá.

DODSON, S., & LILLIE, R. (2001). Zooplankton communities of restored depressional wetlands in Wisconsin, USA. *Wetlands*, 21 (2), 292-300.

DOLE, M., GALASSI, D., MARMONIER, P., & CREUZE DES CHATELLIERS, M. (2000). The biology and ecology of lotic microcrustaceans. *Freshwater Biology*, 44, 63-91.

DONATO, J. (1998). Los sistemas acuáticos de Colombia: síntesis y revisión. En: Guerrero, E. (Ed.). *Una aproximación a los humedales de Colombia* (pp. 31-47). Bogotá: Fondo FEN Colombia, UICN .

DUARTE, P. (2004). *Productividad primaria y biomasa del fitoplancton en una laguna tropical de alta montaña* (laguna de Guatavita) (tesis de grado). Departamento de Ecología, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

DUEVER, M. (1988). Hydrologic processes for models of freshwater wetlands. En MITSCH, W. J., STRASKRABA, M., & JØRGENSEN, S. E. (Eds.). *Wetland Modelling. Developments in Environmental Modelling* (vol. 12) (pp. 9-39). Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing.

DUEVER, M., MITSCH, W., STRASKRABA, M., & JØRGENSEN, S. (1988). *Wetland modelling*: Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing.

DUGGAN, I. (2001). The ecology of periphytic rotifers. *Hydrobiologia*, 446/447, 139-148.

DURÁN. L., TERNEUS, H., GAVILÁN, R., & POSADA, J. (2011). Composición y estructura de un ensamble de plantas acuáticas vasculares de una represa alto andina (Santander), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 33 (94), 51-68.

ENNABILI, A., ATER, M., & RADOUX, M. (1998). Biomass production and NPK retention in macrophytes from wetlands of the Tingitan Peninsula. *Aquatic Botany*, 62 (1), 45-56.

ESLAVA, J., LÓPEZ, V. A., & OLAYA, G. (1986). Los climas de Colombia (Sistema de C. W. Thornthwaite). *Atmósfera* 6, 33-76.

FISHER, J., & ACREMAN, M. (2004). Wetland nutrient removal: a review of the evidence. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8 (4), 673-685.

FRAILE, H., ORIVE, E., & POZO., J. (1995). Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses

de Cernadilla y Valparaíso (río Tera, Zamora). *Limnética*, 11 (2), 29-37.

GALLO-SÁNCHEZ, L., AGUIRRE-RAMÍREZ, N., PALACIO, J., & RAMÍREZ, J. (2009). Zooplancton (Rotifera y Microcrustacea) y su relación con los cambios del nivel del agua en la ciénaga de Ayapel, Córdoba, Colombia. *Caldasia* 31 (2), 339-353.

GAUSSEN, H. (1955). Determination des climats par la methode des courbes ombrothermiques. *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des sciences* 240. (642-644).

GIRALDO, M., PIZA, C., & WILLS, A. (2007). Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, (039), 56-68.

GOCKE, K., MANCERA, E., VIDAL, A., & FONSECA, D. (2003). Planktonic primary production and community respiration in several coastal lagoons of the outer delta of the Río Magdalena, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 32 (1), 125-144.

GÓMEZ, M., LARDUET, Y. & ABRAHANTES, N. (2001). Contaminación y biodiversidad en ecosistemas acuáticos. El fitoplancton de la bahía de Santiago de Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 22, (3), 191-197.

GONZÁLEZ, M. N., RANGEL-CH., J. O., & BERRÍO, J. C. (2005). Reconstrucción paleoecológica del Holoceno (10.000 años A. P.) en el humedal Jaboque. En RANGEL-Ch., J. O. (Comp.). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal Jaboque* (pp. 189-199) (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

GRIMSHAW, H. J., WETZEL, R. G., BRANDENBURG, M., SEGERBLUM, K., WENKERT, L. J., MARCH, G. A., CHARNETZKY, W., HAKY, J. E., & CARRAHER, C. (1997). Shading of periphyton

communities by wetland emergent macrophytes: decoupling of algal photosynthesis from microbial nutrient retention. *Archiv für Hydrobiologie*, 139, (1), 17-27.

GURKAN, Z., ZHANG, J., & JØRGENSEN, S. (2006). Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration of Lake Fure, Denmark. *Ecological Modelling*, 197 (1-2), 89-102.

HÅKANSON, L. (1999). On the principles and factors determining the predictive success of ecosystem models, with a focus on lake eutrophication models. *Ecological Modelling*, 121 (2-3), 139-160.

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

HÅKANSON, L. (2004). Internal loading: A new solution to an old problem in aquatic sciences. Lakes & Reservoirs. *Research and Management*, 9 (1), 3-23.

HÅKANSON, L. (2005). The importance of lake morphometry for the structure and function of lakes. *International Review of Hydrobiology*, 90 (4), 433-461.

HÅKANSON, L. (2009). A general process-based mass-balance model for phosphorus/eutrophication as a tool to estimate historical reference values for key indicators, as exemplified using data for the gulf of Riga. *Ecological modelling*, 220, 226-244.

HÅKANSON, L., & BOULION, V. (2002). Empirical and dynamical models to predict the cover, biomass and production of macrophytes in lakes. *Ecological Modelling*, 151, 213-243.

HÅKANSON, L., & BOULION, V. (2002). *The lake foodweb: modelling predation and abiotic/biotic interactions*. Amsterdam: Backhuys Publishers.

HÅKANSON, L., & BOULION, V. (2002). The lake foodweb: Modelling

predation and abiotic-biotic interactions. *Biological Sciences*, I-XIV, 1-344.

HÅKANSON, L. & BOULION, V. (2003). A general dynamic model to predict biomass and production of phytoplankton in lakes. *Ecological Modelling*, 165, 285-301.

HÅKANSON, L. & EKLUND, J. M. (2007). A dynamic mass balance model for phosphorus fluxes and concentrations in coastal areas. *Ecological Research* (22), 296-320.

HÅKANSON, L., OSTAPENIA, A., PARPAROV, A., HAMBRIGHT, K. & BOULION, V. (2003). Management criteria for lake ecosystems applied to case studies of changes in nutrient loading and climate change. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 8 (2), 141-155.

HÅKANSON, L., & PETERS, R. (1995). *Predictive limnology. Methods for predictive modelling*. Amsterdam: SPB Academic Publishing.

HÅKANSON, L., PARPAROV, A. & HAMBRIGHT, K. D. (2000). Modelling the impact of water level fluctuations on water quality (suspended particulate matter) in lake Kinneret, Israel. *Ecological Modelling*, 128, 101-125.

HÅKANSON, L., MIKRENSKA, M., PETROV, K. & FOSTER, I. (2005). Suspended particulate matter (SPM) in rivers: empirical data and models. *Ecological Modelling*, 183, 251-267.

HAN, H., CHEN, Y., JØRGENSEN, S. E., NIELSEN, N. S. & HU, W. (2009). A system-dynamic model on the competitive growth between *Potamogeton malaiianus* Miq. and *Spirogyra* sp. *Ecological Modelling*, 220 (18), 2206-2217.

HARTE, J. (1996). Confronting visions of a sustainable future. *Ecological applications*, 6 (1), 27-29.

HERNÁNDEZ-E., N., AGUIRRE, J., & PALACIO, J. A. (2011).

Relación entre la determinación del pigmento Clorofila a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, (60), 159-169.

HERNÁNDEZ-E., N., AGUIRRE, J., PALACIO, J. A., & 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.

HERNÁNDEZ-R., J., & RANGEL-CH., J. O. 2009. Vegetación del humedal Jaboque, Bogotá D. C. *Caldasía* 31, 355-379.

HOOGHMSTRA, H. (1984). Vegetational and climatic history of the High Plain of Bogotá, Colombia: A continuous record of the last 3.5 million years. *Dissertationes Botanicae* (Vol. 79). Vaduz: J. Cramer.

HUNTER, R. G., COMBS, D. L., & GEORGE, D. B. (2000). Growth of softstem bulrush (*Scirpus validus*) in microcosms with different hydrologic regimes and media depths. *Wetlands*, 20 (1), 15-22.

HUPP, C. (2000). Hydrology, geomorphology and vegetation of Coastal Plain rivers in the south-eastern USA. *Hydrological Processes*, 14 (16-17), 2991-3010.

[IDEAM] Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (1972-2010). *Registros climatológicos del Sistema de Información Hidrometeorológica* [Base de datos].

IZQUIERDO, D. (2005). Modelación hidráulica del humedal Jaboque. En RANGEL-Ch., J. O. (Comp.). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal Jaboque*. (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

JANSE, J. H., VAN DONK, E., & ALDENBERG, T. (1998). A model study on the stability of the macrophyte-dominated state as affected by biological factors. *Water Research*, 32 (9), 2696-2706.

JANUS, L. C., & VOLLENWEIDER, R. A. (Comps.). (1981). *Summary report. The OECD cooperative programme on eutrophication. Canadian contribution.* (Scientific Series No. 131-S). Burlington, Ontario: National Water Research Institute, Inland Waters Directorate, Canada Center for Inland Waters.

JIMÉNEZ, H. P. (2006). *Las variaciones diarias de la producción primaria y la concentración de la clorofila en un lago tropical* (Guatavita, Colombia) (tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

JOHNSTON, C. (1993). Material fluxes across wetland ecotones in northern landscapes. *Ecological Applications*, 3 (3), 424-440.

JØRGENSEN, S. (2003). The application of models to find the relevance of residence time in lake and reservoir management. *Journal of Limnology* 62 (Supl. 1, *Papers from Bolsena Conference: Residence time in lakes: science, management, education*), 16-20.

JØRGENSEN, S. (2008). Overview of the model types available for development of ecological models. *Ecological Modelling*, 215 (1-3), 3-9.

JØRGENSEN, S. & BENDORICCHIO, G. (2001). *Fundamentals of ecological modelling.* Amsterdam: Elsevier Science.

KADLEC, R. (1990). Overland flow in wetlands: vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (691).

KADLEC, R. (1994). Detention and mixing in free water wetlands. *Ecological Engineering* 3 (4), 345-380.

KADLEC, R. (1997). An autotrophic wetland phosphorus model. *Ecological Engineering*, 8, 145-172.

KADLEC, R., & HAMMER, D. (1988). Modeling nutrient behavior in Wetlands. *Ecological Modelling*, 40 (1), 37-66.

KIERSCH, B., MÜHLECK, R., & GUNKEL, G. (2004). Las macrófitas de algunos lagos alto-andinos del Ecuador y su bajo potencial como bioindicadores de eutrofización. *Revista de Biología Tropical*, 52 (4), 829-837.

KNIGHT, R. (2000). Constructed wetlands for livestock wastewater management. *Ecological Engineering*, 15 (1-2), 41-55.

KOCH, M. S., MENDELSSOHN, I. A., & MCKEE, K. L. (1990). Mechanism for the hydrogen sulfide-induced growth limitation in wetland macrophytes. *Limnology and oceanography*, 35 (2), 399-408.

KROEGER, A. C. (2008). *Monitoring and simulating nutrient removal in a constructed wetland* (Master's thesis). Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montreal.

KUEHN, K. A., LEMKE, M. J., SUBERKROPP, K. & WETZEL, R. G. (2000). Microbial biomass and production associated with decaying leaf litter of the emergent macrophyte *Juncus effusus*. *Limnology and Oceanography*, 45 (4), 862-870.

KUO, J. T., HSIEH, M. H., LUNG, W. S., & SHE, N. (2007). Using artificial neural network for reservoir eutrophication prediction. *Ecological Modelling*, 200, (1-2), 171-177.

LASSALETTA, L. (2004). *Agricultura intensiva, alteración de ciclos bioquímicos y cambio global*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

LEGENDRE, P. & LEGENDRE, L. (1998). *Numerical ecology* (Vol. 20). Amsterdam: Elsevier Science.

LINDSTROM, M., HAKANSON, L., ABRAHAMSSON, O., & JOHANSSON, H. (1999). An empirical model for prediction of lake water suspended particulate matter. *Ecological Modelling*, 121, 185-198.

LUNG, W. S., & LIGHT, R. N. (1996). Modelling copper removal in wetland ecosystems. *Ecological Modelling*, 93 (1-3), 89-100.

MALMAEUS, J. M., & HAKANSON, L. (2003). A dynamic model to predict suspended particulate matter in lakes. *Ecological Modelling*, 167 (3), 247-262.

MANCERA, J., PEÑA, E., GIRALDO, R., & SANTOS, A. (2003). *Introducción a la modelación ecológica. Principios y aplicaciones*. San Andrés: Universidad Nacional de Colombia.

MANN, C. J., & WETZEL, R. G. (2000). Hydrology of an impounded lotic wetland-wetland sedimentation characteristics. *Wetlands*, 20 (1), 23-32.

MEJIA, D. (2011). *Diatomeas perifíticas y algunas características limnológicas de un humedal urbano en la sabana de Bogotá* (Tesis de maestría). Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

MINISTERIO DE AGRICULTURA DE CHILE. (2006). *Conceptos y criterios para la evaluación ambiental de humedales* (Informe). Centro de Ecología Aplicada Ltda.

MITSCH, W. J., & DAY, J. W. (2006). Restoration of wetlands in the Mississippi-Ohio-Missouri (MOM) River Basin: experience and needed research. *Ecological Engineering*, 26 (1), 55-69.

MITSCH, W. J. & GOSELINK, J. G. (2000). The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics*, 35 (1), 25-33.

MITSCH, W. J., & GOSELINK, J. G. (2007). *Wetlands*. 4th Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

MITSCH, W. J., CRONK, J. K., WU, X., & NAIRN, R. W. (1995). Phosphorus retention on constructed freshwater riparian marshes. *Ecological Applications*, 5 (3), 830-845.

MITSCH, W. J., NAHLIK, A., WOLSKI, P., BERNAL, B., ZHANG, L., & RAMBERG, L. (2009). Tropical wetlands: seasonal hydrologic

pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands Ecology and Management*, 18 (5), 573-586.

MONTOYA, Y., & AGUIRRE, N. (2009). Cambios nictemerales de variables físicas y químicas en la ciénaga de Paticos, complejo cienagoso de Ayapel, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 57 (3), 635-646.

MONTOYA, Y., & AGUIRRE, N. (2010). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (55), 76-89.

MONTOYA, Y., VELEZ, F., & AGUIRRE, N. (2011). Características morfométricas de un lago de plano inundable tropical (ciénaga Hoyo Los Bagres, Colombia). *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, (59), 203-214.

MOOIJ, W. M., TROLLE, D., JEPPESEN, E., ARHONDITSIS, G., BELOLIPETSKY, P.V., CHITAMWEBWA, D. B. R., DEGERMENDZHY, A. G., DEANGELIS, D. L., DE SENERPONT DOMIS, L. N., DOWNING, A. S., ELLIOT, J. A., FRAGOSO, J. R., GAEDKE, U., GENOVA, S. N., GULATI, R. D., HAKANSON, L., HAMILTON, D. P., HIPSEY, M. R., HOEN, J. T., HULSMANN, S., HANS LOS, F., MAKLER-PICK, V., PETZOLDT, T., PROKOPKIN, I. G., RINKE, K., SCHEP, S. A., TOMINAGA, K., VAN DAM, A. A., VAN NES, E. H., WELLS, S. A., & JANSE, J. H. (2010). Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquatic Ecology*, 44, 633-667.

MORA, D., & MATA, A. V. (2007). *Aguas para consumo humano y disposición de aguas residuales. Instituto costarricense de acueductos y alcantarillados* (Informe técnico). Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Laboratorio Nacional de Aguas, Costa Rica.

MUHAMMETOGLU, A. & SOYUPAK, S. (2000). A three-dimensional water quality-macrophyte interaction model for shallow lakes. *Ecological Modelling*, 133 (3), 161-180.

MUÑOZ, J. M. (2004). *Humedal Jaboque: evolución geomorfológica y geológica y su relación con las culturas prehispánicas* (Trabajo de

grado inédito). Departamento de Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia.

MUÑOZ, J. M., & JARAMILLO, J. M. (2005). Evaluación geológica del humedal Jaboque. Geomorfología. En RANGEL-Ch., J. O. (Comp.). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal Jaboque*. (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

NEIFF, J. J. (2001). Humedales de la Argentina: Sinopsis, problemas y perspectivas futuras. En Fernandez Cirelli, A. (Ed.). *El Agua en Iberoamérica. Funciones de los humedales, calidad de vida y agua segura* (pp.1-30). CYTED-Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XVII, Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos.

NIÑO, J. P. (2003). *Variación espacio-temporal del nitrógeno y el fósforo en el embalse del Neusa* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

NOE, G. B., & HARVEY, J. W. (2007). Characterization of suspended particles in Everglades wetlands. *Limnology and Oceanography*, 52 (3), 1166-1178.

NUTTER, W. L., & BRINSON, M. M. (1994). Application of hydrogeomorphic principles and function to assessment of drainage intensity in forested wetlands. *Technical publication* 20, 13-26.

[OCDE] Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo. (1982). *Eutrophication of eaters. Monitoring, assesment and control*. Paris: OCDE.

ORTEGA, E., ARMENGOL, X. & ROJO, C. (2000). Structure and dynamics of zooplankton in a semi-arid wetland, the National Park Las Tablas de Daimiel (Spain). *Wetlands* 20 (4), 629-638.

PEÑUELA, S. M. (2005). Diagnóstico participativo social en la zona de influencia del humedal Jaboque, Localidad de Engativá. En RANGEL-Ch., J. O. (Comp.). *Investigación aplicada en restauración*

ecológica en el humedal Jaboque. (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

PEREIRA, R., SOARES, A., RIBEIRO, R. & GONÇALVES, F. (2002). Assessing the trophic state of Linhos lake: a first step towards ecological rehabilitation. *Journal of Environmental Management*, 64, 285-297.

PINILLA, G. A. (1996). La problemática de los sistemas acuáticos en Colombia. *La Tadeo* 51, 19-22.

PINILLA, G. A. (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.

PINILLA, G. A. (2006). Modelización del pulso de inundación en el lago Boa (Amazonas, Colombia). *Ecotrópicos*, 19 (1), 30-47.

PRESCOTT, K. L., & TSANIS, I. K. (1997). Mass balance modelling and wetland restoration. *Ecological Engineering*, 9 (1-2), 1-18.

QUINN, N., & HANNA, W. (2003). A decision support system for adaptive real-time management of seasonal wetlands in California. *Environmental Modelling and Software*, 18 (6), 503-511.

RAICH, J., RASTETTER, E., MELILLO, J., KICKLIGHTER, D., & STEUDLER, P. (1991). Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecological Applications*, 1, 399-429.

RAMÍREZ, J., & ALCARÁZ, H. (2002). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un sistema eutrófico tropical: laguna del parque Norte, Medellín, Colombia. *Caldasia*, 24 (2), 411-423.

RAMÍREZ, J. J., GUTIÉRREZ, F. L. & VARGAS, A. (2005). Respuesta de la comunidad fitoplanctónica a experimentos de eutrofización artificial realizados en la represa de la Fe, el Retiro,

Antioquia, Colombia. *Caldasia*, 27 (1), 103-115.

RANGEL-CH., J. O., & AGUIRRE-C., J. (1983). Comunidades acuáticas altoandinas - I. Vegetación sumergida y de ribera en el lago de Tota, Boyacá, Colombia. *Caldasia*, 13 (65), 719-742.

RANGEL-CH., J. O. (Comp.). (2005). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal Jaboque* (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

RANGEL-CH., J. O. (2003). El antiguo lago de la sabana de Bogotá. Su vegetación y su flora en el tiempo. En *Los humedales de Bogotá y la sabana* (Vol. I) (pp. 53-70). Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Conservación Internacional Colombia.

RANGEL CH., J. O. & ARELLANO, H. (2008). El clima en el área del transecto Sumapaz (Cordillera Oriental). En van der Hammen, T. (Ed.). Estudios de ecosistemas tropandinos. *La cordillera Oriental colombiana. Transecto Sumapaz* (Vol. 7) (pp. 143-184). Stuttgart: J. Cramer.

RANGEL-CH., J. O. & CARVAJAL-COGOLLO, J. (2009). Clima de la serranía del Perijá. En Rangel-Ch., J. O. (Ed.). Colombia. *Diversidad biótica VIII. Media y baja montaña de la serranía del Perijá* (pp. 3-49). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

REINHARDT, M., GÄCHTER, R., WEHRLI, B., & MÜLLER, B. (2005). Phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural drainage water. *Journal of Environmental Quality*, 34, 1251-1259.

RESTREPO, C. A., TORO, F. M., & AGUIRRE, N. J. (2006). Aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y el fósforo en la ciénaga de Ayapel. *Avances en Recursos Hidráulicos* 13, 7-22.

RICCI, C., & BALSAMO, M. (2000). The biology and ecology of lotic rotifers and gastrotrichs. *Freshwater Biology*, 44, 15-28.

RIVERA, C. A. (2006). *Modelos correlativos de algunas variables físicas, químicas y biológicas del lago Guatavita* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

RIVERA, J. (2011). *Relación entre la composición y biomasa de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos y las variables físicas y químicas en el humedal Jaboque, Bogotá-Colombia* (Tesis de maestría). Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

RIVERA, J. (2011). *Relación entre la composición y biomasa de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos y las variables físicas y químicas en el humedal Jaboque, Bogotá D.C., Colombia* (tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

RODRÍGUEZ-CHILA, J. D., MANCERA-PINEDA, J. E. & LÓPEZ-SALGADO, H. D. (2009). Efectos de la recomunicación del Río Magdalena con su antiguo delta: cambios en la producción primaria fitoplanctonica y respiración en el Complejo Pajarales, 1989 a 2005. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 38 (2), 119-144.

251

ROLDÁN, G. (1992). *Fundamentos de limnología neotropical*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.

ROLDÁN, G., BOHÓRQUEZ, A., CATAÑO, R. & ARDILA, J. I. (2000). Estudio limnológico del embalse del Guavio (Colombia). *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, 24 (90), 73-84.

ROMERO, J. (1996). *Acuiquímica*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, Editorial Presencia.

RYDING, S. O., & RAST, W. (1989). *The control of eutrophication of lakes and reservoirs*. New Jersey: The Parthenon Publishing Group.

SALAMA, S., & MONBALIU, J. (2004). Quantitative estimation of suspended particulate matter from CHRIS images. Proceedings of the 2nd CHRIS/Proba Workshop, April 2004, ESRIN, Frascati, Italy: ESA Publications Division.

SALAS, H. J., & MARTINO, P. (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales* (Informe No. OPS/CEPIS/PUB/01). Washington: Organización Panamericana de la Salud (OPS), Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

SAWYER, C., MCCARTY, P. & PARKIN, G. (2001). *Química para ingeniería ambiental*. Bogotá: McGraw-Hill.

SCHEFFER, M. & NES, E. (2007). Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Shallow Lakes in a Changing World*, 196 (8), 455-466.

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

SHUKLA, V. P. (1998). Modelling the dynamics of wetland macrophytes: Keoladeo National Park wetland, India. *Ecological Modelling*, 109 (1), 99-114.

SIERRA, O. R., & MONSALVE, C. A. (2005). Zonificación trófica del humedal Jaboque, con base en la familia Bacillariophyceae, Engativá. En RANGEL-Ch., J. O. (Comp.). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal Jaboque* (pp. 1-23). (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

SMITH, V. H., TILMAN, G. D., & NEKOLA, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100, 179-196.

SPIELES, D., & MITSCH, W. (2003). A model of macroinvertebrate trophic structure and oxygen demand in freshwater wetlands. *Ecological Modelling*, 161 (3), 181-192.

TANGIRALA, A. K., TEEGAVARAPU, R. S. & ORMSBEE, L. (2003).

Modelling adaptive water quality management strategies using system dynamics simulation. *Environmental Informatics Archives*, 1, 245-253.

TUTTLE, C., ZHANG, L., & MITSCH, W. (2008). Aquatic metabolism as an indicator of the ecological effects of hydrologic pulsing in flow-through wetlands. *Ecological Indicators*, 8 (6), 795-806.

UNIVERSIDAD JAVERIANA. (2007). *Obras para la restauración hidrodinámica y ecológica del humedal Jaboque* (Informe técnico).

VALENCIA, H., SÁNCHEZ, J., CASTELLANOS, D., RODRÍGUEZ, A., ENCIZO, L., MORA, C., CAMPOS, S., GAITÁN, S. & VILLAMIL, P. (2005). Evaluación de microflora en el humedal Jaboque. En RANGEL-Ch., J. O. (Comp.). *Investigación aplicada en restauración ecológica en el humedal Jaboque* (pp. 1-23). (Informe final, Convenio Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales).

VAN DER HAMMEN, T. (1995). Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. Análisis Geográficos (Vol. 24). Bogotá: Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

VAN DER HAMMEN, T. (2003). El lago de Humboldt. En: Los humedales de Bogotá y la sabana (Vol. I) (pp. 53-70). Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Conservación Internacional Colombia.

VAN DER HAMMEN, T. (2003). Los humedales de la sabana. Origen, evolución, degradación y restauración. En Guarnizo, A., & Calvachi, B. (Eds.). *Los humedales de Bogotá y la sabana*. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Conservación Internacional.

VAN DER HAMMEN, T., WHITE, H. J. L., & VAN REINEN, G. B. A. (1995). Aspectos climatológicos del área del transepto Parque Los Nevados. En van der Hammen, T. & dos Santos, A. G. (Eds.). Estudios de ecosistemas tropandinos. *La cordillera Central colombiana. Transecto Parque Los Nevados* (Vol. 4) (pp. 329-364). Stuttgart: J. Cramer.

VAN DER PEIJL, M. J., & VERHOEVEN, J. T. A. (1999). A model of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics and their interactions in river marginal wetlands. *Ecological Modelling*, 118, 95-130.

VÁSQUEZ, C., ARIZA, A. & PINILLA, G. (2006). Descripción del estado trófico de diez humedales del altiplano cundiboyacense. *Universitas Scientiarum*, 11 (2), 61-75.

VELÁSQUEZ, J. O., JAIME, G., & SEPÚLVEDA, M. L. (2007). Determinación de la calidad ambiental de la ciénaga Colombia, Cauca, Antioquia, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 10 (4), 187-199.

VITOUSEK, P., CASSMAN, K., CLEVELAND, C., CREWS, T., FIELD, C., GRIMM, N., HOWARTH, R., MARINO, R., MARTINELLI, L., & RASTETTER, E. Towards and ecological understanding of biological nitrogen fixation. *Biogeochemistry*, 57-58, 1-45.

VOLLENWEIDER, R. (1965). Calculation models of photosynthesis-depth curves and some implications regarding day rate estimates in primary production measurements. Primary productivity in aquatic environments. Verbania Pallanza, Italia: Instituto Italiano di Idrobiologia.

VOLLENWEIDER, R. (1970). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication* (Technical Report No. DAS/CSI/68.27). Paris: OECD.

VOROSMARTY, C. J., MEYBECK, M., FEKETE, B., SHARMA, K., GREEN, P., & SYVITSKI, J. P. (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and planetary change*, 39 (1-2): 169-190.

WADE, A. J., WHITEHEAD, P. G., HORNBERGER, G. M., JARVIE, H. R. & FLYNN, N. (2002). On modelling the impacts of phosphorus stripping at sewage works on in-stream phosphorus and macrophyte/epiphyte dynamics: a case study for the River Kennet. *Science of the Total Environment*, 282-283 (0), 395-415.

WANG, N. & MITSCH, W. J. (2000). A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands. *Ecological Modelling*, 126, 101-130.

WERNER, T., & KADLEC, R. (1996). Application of residence time distributions to stormwater treatment systems. *Ecological Engineering* 7 (3), 213-234.

WERNER, T. & R. KADLEC. (2000). Wetland residence time distribution modeling. *Ecological Engineering*, 15 (1-2), 77-90.

WETZEL, R. (2001). Fundamental processes within natural and constructed wetland ecosystems: short-term versus long-term objectives. *Water, Science and Technology*, 44 (11-12), 1-8.

WEYHENMEYER, G. A., HAKANSON, L., & MEILI, M. (1997). A validated model for daily variations in the flux, origin, and distribution of settling particles within lakes. *Limnology and Oceanography*, 42 (7), 1517-1529.

WINZ, I., BRIERLEY, G. & TROWSDALE, S. (2009). The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resources Management*, 23 (7), 1301-1323.

WU, J. & D. MARCEAU. (2002). Modeling complex ecological systems: an introduction. *Ecological Modelling*, 153 (1), 1-6.

YUE, T. X., JORGENSEN, S. E., & LAROCQUE, G. R. (2011). Progress in global ecological modelling. *Ecological Modelling*, 222, 2172-2177.

ZACHARIAS, I., DIMITRIOU, E., & KOUSSOURIS, T. (2005). Integrated water management for wetland protection: application in Trichonis Lake. *Environmental Modelling & Software*, 21, 177-185.

ZAPATA, A. (2001). *Variaciones diarias y mensuales de la producción primaria de un lago andino (lago Guatavita-Cundinamarca)* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

ZHANG, L., & MITSCH, W. (2005). Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. *Environmental Modelling & Software*, 20 (7), 935-946.

ZUBIRÍA, M. P., Y RIVERA, C. (2005, febrero). Producción primaria neta y descomposición de *Eichhornia crassipes*, *Pennisetum clandestinum*, *Polygonum punctatum*, *Schoenoplectus californicus* y *Typha latifolia* en el humedal Juan Amarillo. Ponencia presentada en la II Jornada Académica para Celebrar el Día Mundial de los Humedales. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Anexos

ANEXO A. Registros - Estación Aeropuerto El Dorado, desde 1972 hasta el 2010.

CONVENCIONES

EST = ESTADO DE LA INFORMACIÓN

Preliminares Ideam.

Definitivos Ideam.

Preliminares Otra Entidad.

Definitivos otra Entidad.

AUSENCIAS DE DATOS

1. Ausencia del observador.

2. Desperfecto instrumento.

3. Ausencia instrumento.

4. Dato rechazado.

6. Nivel superior.

7. Nivel inferior.

8. Curva de gastos.

9. Sección inestable.

A. Instrumento, sedimentado.

M. Máximo no extrapolado.

*. Datos insuficientes.

ORÍGENES DE DATO

1. Registrados.

3. Incompletos.

4. Dudosos.

6. Est, Regresión.

7. Est, Interpolación.

8. Est, Otros métodos.

9. Generados (Series).

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
SISTEMA DE INFORMACIÓN
VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mms) NACIONAL AMBIENTAL

FECHA DE PROCESO : 2010/08/30

ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO

LATITUD 0442 N TIPO EST SP DEPTO BOGOTÁ D.C. FECHA-INSTALACIÓN 1972-FEB
 LONGITUD 7409 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO BOGOTÁ FECHA-SUSPENSIÓN
 ELEVACIÓN 2547 m.s.n.m REGIONAL 11 BOGOTÁ CORRIENTE BOGOTÁ

```

*****
*****
AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB
* NOVIE * DICIE * VR ANUAL *
*****
*****
1972 2 01 72.1 21.9 57.2 159.4 3 118.1 58.1 36.7 39.6 17.4 71.6 101.1 28.5 781.7
3
1973 2 01 2.9 3.8 50.1 39.3 75.0 59.5 55.1 57.4 130.3 115.4 105.8 117.3 811.9
1974 2 01 79.6 100.0 28.5 83.8 61.3 65.5 15.8 46.8 91.8 100.3 150.6 24.0 848.0
1975 2 01 5.5 32.2 130.0 57.9 105.3 56.4 60.3 52.2 55.1 160.8 70.7 77.9 864.3
1976 2 01 31.2 59.9 118.3 122.1 104.4 58.9 17.4 34.7 47.3 140.0 81.6 49.5 865.3
1977 2 01 9.1 20.4 72.2 86.4 34.1 15.9 52.0 52.9 115.7 120.4 82.3 26.9 688.3
1978 2 01 5.6 25.0 55.7 121.4 73.5 71.2 52.9 12.9 66.4 3 102.9 47.4 30.2 665.1
3
1979 2 01 27.5 44.8 55.0 137.3 84.5 77.5 64.8 113.5 86.3 133.4 141.7 25.4 991.7
1980 2 01 28.2 63.4 28.9 46.0 39.5 76.9 10.6 40.3 49.3 62.1 50.7 3 102.2 3
598.1 3
1981 2 01 2.5 27.3 13.7 174.6 202.1 78.1 23.7 34.4 51.1 113.4 111.8 25.5 858.2
1982 2 01 78.5 43.3 3 86.2 218.1 81.1 15.9 12.8 21.4 14.2 112.7 63.6 44.6 792.4
3
1983 2 01 6.0 18.4 124.4 207.3 120.4 50.3 45.7 34.9 29.3 77.0 43.0 3 132.6 889.3
3
1984 2 01 99.6 55.2 65.7 140.1 118.0 90.5 35.5 73.4 74.9 50.4 3 86.3 40.2 929.8
3
1985 2 01 2.8 5.1 28.3 3 31.4 118.4 25.3 3 44.6 95.9 157.9 79.8 73.8 34.7 698.0 3
1986 2 01 112.2 61.2 96.5 74.0 3 95.6 36.2 38.3 56.9 217.5 3 122.3 4.0 3 914.7
3
1987 2 01 42.8 32.2 25.7 95.0 113.2 13.8 91.2 25.0 69.5 148.7 64.2 29.2 750.5
1988 2 01 13.8 50.5 12.2 143.9 58.7 68.5 46.9 73.2 119.1 117.9 151.0 78.8 934.5
1989 2 01 11.7 41.0 153.6 32.9 53.8 48.2 39.1 34.9 84.8 82.1 30.7 66.2 679.0
1990 2 01 48.3 48.9 3 45.6 155.7 3 102.5 21.9 35.9 35.8 75.7 195.5 85.0 97.4
948.2 3
1991 2 01 25.5 18.3 126.3 82.6 110.0 27.1 43.4 31.0 54.2 47.1 3 103.9 64.1 733.5
3
1992 2 01 14.0 3 22.1 3 26.2 35.0 28.4 3 8.8 33.3 24.5 49.7 25.4 108.3 59.0 434.7
3
1993 2 01 34.7 13.8 78.6 114.2 106.3 19.7 60.6 29.2 63.8 67.5 146.9 25.5 760.8
1994 2 01 30.6 65.6 107.1 89.4 94.2 55.0 24.4 34.5 32.6 93.9 189.1 9.3 825.7
1995 2 01 3.4 20.7 68.1 142.3 126.2 3 81.1 55.1 86.7 56.6 112.0 97.3 78.4 927.9 3
1996 2 01 6.5 53.3 60.0 57.5 102.5 30.6 47.7 43.6 28.7 90.6 12.6 34.7 568.3
1997 2 01 67.3 16.1 58.0 46.4 59.7 66.0 18.8 14.0 25.1 63.0 38.1 2.7 475.2
1998 2 01 1.9 41.8 27.8 96.2 147.5 52.7 84.1 51.6 115.2 96.3 94.7 122.7 932.5
1999 2 01 43.4 93.8 62.7 71.2 3 68.6 116.9 3 29.8 51.3 140.3 199.3 101.9 47.9
1027.1 3
2000 2 01 28.3 123.4 73.9 57.5 110.9 61.6 70.1 55.9 130.6 90.7 41.5 41.1 885.5
2001 2 01 49.3 19.3 81.9 19.4 87.0 47.2 40.5 17.7 66.4 43.1 54.2 53.8 579.8
2002 2 01 26.8 16.8 111.5 134.8 116.3 74.8 39.7 22.5 45.5 55.7 44.0 64.1 752.5
2003 2 01 3.0 24.1 75.4 128.0 46.4 61.5 31.1 67.6 42.6 54.9 134.8 78.8 748.2
2004 1 01 22.0 98.7 40.8 197.7 101.4 51.1 51.2 19.7 59.0 170.0 118.6 31.9 962.1
2005 1 01 11.1 33.2 33.7 93.6 161.3 36.6 21.4 66.0 97.8 131.3 47.8 111.2 845.0
2006 1 01 58.1 31.7 214.9 153.7 194.9 115.4 16.5 3 22.7 25.1 195.6 91.1 30.2 1149.9
3
2007 1 01 7.6 10.9 62.0 150.6 125.4 54.2 56.1 58.9 18.0 200.6 117.4 82.9 944.6
2008 1 01 30.5 84.6 93.8 112.9 225.6 119.5 61.5 94.7 48.8 140.7 134.2 60.0 1206.8
2009 1 01 51.4 91.4 142.8 55.2 15.7 64.1 53.2 28.4 21.5 129.1 95.1 58.4 806.3
2010 1 01 6.3 36.6 23.2 187.3 160.3 107.8 136.7 51.8 76.4 132.9 196.6 134.6 1250.5 1

MEDIOS 28.7 44.1 71.3 107.0 100.7 59.0 44.9 45.9 66.4 111.3 93.1 57.1 829.6
MÁXIMOS 99.6 123.4 214.9 218.1 225.6 119.5 136.7 113.5 157.9 217.5 196.6 134.6 225.6
MÍNIMOS 1.9 3.8 12.2 19.4 15.7 8.8 10.6 12.9 14.2 25.4 12.6 2.7 1.9
    
```

Formulación de un modelo dinámico de simulación ecológica del humedal Jaboque

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
 SISTEMA DE INFORMACIÓN

VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (oC) NACIONAL AMBIENTAL

FECHA DE PROCESO : 2010/08/30

ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO

LATITUD 0442 N TIPO EST SP DEPTO BOGOTÁ D.C. FECHA-INSTALACIÓN 1972-FEB
 LONGITUD 7409 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO BOGOTÁ FECHA-SUSPENSIÓN
 ELEVACIÓN 2547 m.s.n.m REGIONAL 11 BOGOTÁ CORRIENTE BOGOTÁ

AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB
*** NOVIE * DICIE * VR ANUAL ***

1972	2	01	12.6	12.3	13.2	13.0	13.9	13.4	13.3	12.9	13.2	13.0	13.4	13.0	13.1			
1973	2	01	13.3	13.0	14.2	13.6	13.6	13.2	12.8	12.9	12.6	12.8	13.1	12.4	13.1			
1974	2	01	12.1	12.8	12.9	13.5	13.0	13.0	12.5	13.0	12.4	12.5	13.2	12.0	12.7			
1975	2	01	12.3	12.8	13.0	13.3	13.2	13.1	12.4	12.5	12.6	12.4	12.9	12.3	12.7			
1976	2	01	12.2	12.4	13.2	13.0	13.4	12.8	12.7	12.4	13.1	13.3	13.0	12.9	12.9			
1977	2	01	12.7	13.1	14.2	13.9	13.6	13.3	13.3	12.9	13.4	13.6	13.2	13.3	13.4			
1978	2	01	12.5	13.6	13.6	13.8	13.9	13.3	12.7	12.7	13.1	13.2	13.2	13.2	13.2			
3																		
1979	2	01	12.9	3	13.0	13.7	14.3	13.9	13.4	3	13.3	13.2	3	13.1	3	13.7	14.0	13.3
13.5	3																	
1980	2	01	13.5	13.3	14.3	14.2	14.2	13.9	13.7	12.8	13.8	13.7	3	13.1	3	12.9	3	
13.6	3																	
1981	2	01	12.5	14.0	13.8	14.1	14.1	14.0	13.2	13.2	13.0	13.2	3	13.7	13.4	13.5	3	
1982	2	01	12.7	3	13.9	13.9	3	13.9	13.7	13.8	13.4	13.2	13.7	13.3	13.4	13.8	13.6	
3																		
1983	2	01	14.1	3	14.7	14.6	14.4	14.8	13.8	13.9	13.6	13.7	13.3	3	13.6	12.8	13.9	
3																		
1984	2	01	12.5	12.8	13.4	13.3	13.8	13.1	12.7	13.2	12.7	13.1	3	13.0	12.9	13.0	3	
1985	2	01	12.5	3	12.3	13.8	13.6	13.6	13.2	12.7	3	12.8	3	12.9	13.1	12.7	12.5	13.0
3																		
1986	2	01	13.2	12.7	13.2	13.9	3	13.9	13.3	12.9	13.3	13.3	13.4	3	13.5	13.0	13.3	
3																		
1987	2	01	13.2	14.1	13.8	14.3	14.3	14.4	14.1	3	13.8	13.6	13.9	13.8	3	13.4	13.9	
3																		
1988	2	01	13.3	14.0	3	13.8	14.1	14.0	13.3	13.3	13.1	8	13.2	13.2	3	13.3	12.7	13.4
3																		
1989	2	01	13.0	13.0	12.6	13.8	13.6	13.8	13.0	13.2	13.1	13.7	13.8	12.6	13.3			
1990	2	01	13.5	13.4	14.1	14.0	14.2	14.3	13.6	13.8	13.6	13.4	13.8	13.5	13.8			
1991	2	01	13.6	3	14.6	14.0	14.4	14.6	14.7	13.9	13.6	14.1	13.4	13.6	14.1	14.1	3	
1992	2	01	13.8	3	14.2	14.9	15.1	14.7	15.1	13.7	14.4	13.7	14.0	13.8	13.9	14.3	3	
1993	2	01	14.2	3	14.2	8	14.5	8	14.5	14.5	14.6	14.1	14.1	13.8	13.7	13.8	3	13.9
14.2	3																	
1994	2	01	13.6	14.1	14.1	14.5	14.7	14.2	13.4	13.3	13.7	13.2	13.2	13.3	13.8			
1995	2	01	12.9	13.1	13.8	3	14.0	13.8	14.0	13.3	12.8	13.7	13.4	13.1	12.5	13.4	3	
1996	2	01	11.5	12.8	13.2	13.3	13.0	13.4	12.9	13.0	13.5	13.2	13.5	3	12.9	13.0	3	
1997	2	01	13.1	14.0	13.6	13.6	14.4	14.3	13.9	3	13.9	13.9	14.5	13.8	14.1	13.9	3	
1998	2	01	14.6	15.0	15.2	15.6	14.8	14.5	13.8	13.8	13.9	14.2	14.4	13.9	14.5			
1999	2	01	13.6	3	13.7	13.6	13.9	14.0	13.5	13.8	3	13.4	13.2	13.3	13.6	13.4	13.6	
3																		
2000	2	01	12.9	13.2	13.5	13.7	13.8	14.2	13.3	13.5	13.0	3	13.5	13.2	3	13.0	13.4	
3																		
2001	2	01	12.5	13.5	14.0	14.2	14.2	13.8	13.6	13.9	13.2	14.2	13.9	14.7	13.8			
2002	2	01	13.8	14.3	14.2	14.4	14.9	14.3	14.3	14.2	14.1	14.2	14.0	14.5	14.3			
2003	2	01	14.0	14.6	14.3	14.5	14.7	3	13.5	13.6	13.7	13.3	13.5	13.3	13.5	13.9	3	
2004	2	01	13.0	13.5	14.1	13.5	14.0	13.7	13.1	13.6	13.0	3	13.3	13.6	13.4	8	13.5	
3																		
2005	2	01	13.4	8	14.1	13.9	14.4	14.2	8	14.0	8	13.9	13.6	13.6	13.1	13.3	13.1	13.7
2006	2	01	13.5	13.8	13.3	13.5	13.7	13.8	13.8	13.9	13.8	13.7	13.5	13.5	13.7			
2007	2	01	14.0	13.1	13.7	13.9	13.8	13.5	13.8	13.2	13.5	3	13.0	13.2	12.8	13.5	3	
2008	1	01	13.0	13.0	3	13.0	13.3	13.3	13.5	13.2	3	13.1	13.3	13.0	13.5	13.0	13.2	
3																		
2009	1	01	13.2	13.4	13.1	14.1	14.2	14.3	14.1	3	14.4	3	14.6	14.0	14.5	14.1	14.0	
3																		
2010	1	01	14.0	15.2	15.2	14.9	15.1	14.4	13.7	13.9	13.6		13.6	14.4	3			
MEDIOS			13.1	13.6	13.8	14.0	14.0	13.8	13.4	13.4	13.4	13.4	13.5	13.3	13.6			
MÁXIMOS			14.6	15.2	15.2	15.6	15.1	15.1	14.3	14.4	14.6	14.5	14.5	14.7	15.6			
MÍNIMOS			11.5	12.3	12.6	13.0	13.0	12.8	12.4	12.4	12.4	12.4	12.7	12.0	11.5			

*** NOVIE * DICIE * VR ANUAL ***

1972	2	01	143.5	165.4	141.0	133.7	115.9	113.0	146.3	147.1	131.5	157.7	144.8	158.2	1698.1
1973	2	01	180.3	193.4	144.6	119.5	127.4	59.1	123.6	104.8	93.2	99.8	109.3	131.8	1486.8
1974	2	01	151.2	95.6	134.5	102.1	109.7	119.9	123.5	141.8	105.7	114.2	114.0	214.9	1527.1
1975	2	01	192.7	111.9	125.0	128.1	98.1	73.2	109.0	102.8	99.8	105.3	115.6	86.8	1348.3
1976	2	01	167.1	150.5	100.1	69.8	97.4	78.7	131.5	151.2	119.8	107.5	128.4	131.4	1433.4
1977	2	01	204.7	133.7	144.1	94.7	73.2	100.4	128.4	124.5	129.5	111.4	115.8	183.1	1543.5
1978	2	01	200.3	137.6	78.0	107.6	137.9	171.8	156.2	163.1	139.3	142.8	188.6	1623.2	3
1979	2	01	243.4	209.6	140.7	121.3	117.1	124.2	170.9	118.1	143.1	114.2	135.7	159.7	1798.0
1980	2	01	220.0	206.8	152.2	146.0	146.6	138.4	177.3	146.5	141.9	127.3	149.7	3	159.2
1911	9	3													
1981	2	01	234.0	133.0	164.5	88.8	98.8	*	152.5	142.9	131.4	132.4	175.9	138.5	1592.7
1982	2	01	200.8	118.1	149.0	113.8	116.5	135.6	135.2	154.3	101.2	123.5	129.4	129.3	3
1606	7	3													
1983	2	01	190.1	172.1	156.9	85.7	135.3	126.1	3	166.1	159.8	127.8	116.5	149.5	162.1
1748	0	3													
1984	2	01	180.2	132.7	163.1	129.2	133.8	3	94.6	133.7	124.1	3	97.6	110.6	128.6
1612	0	3													
1985	2	01	214.6	164.5	155.4	116.8	128.5	116.3	139.4	136.9	131.4	134.8	145.5	227.4	1811.5
1986	1	01	154.0	132.0	123.6	93.5	131.5	109.3	160.3	163.2	124.6	102.4	136.0	183.4	1613.8
1987	1	01	200.6	144.7	159.1	127.8	127.8	130.4	123.9	132.6	129.7	105.7	153.9	197.1	3
1733	3	3													
1988	1	01	209.8	155.5	186.7	110.2	118.5	108.5	105.6	107.1	124.3	96.6	164.6	1487.4	3
1989	1	01	177.6	135.4	148.6	130.4	113.2	123.2	164.7	134.8	120.8	121.1	125.3	3	179.8
1674	9	3													
1990	2	01	153.1	133.2	118.1	111.7	103.8	129.0	145.6	152.3	142.8	118.2	123.3	156.8	1587.9
1991	1	01	237.9	157.8	136.0	128.8	93.3	3	117.8	103.7	135.0	128.8	3	100.0	156.1
1495	2	3													
1992	1	01	182.3	148.3	175.5	133.3	119.6	150.9	126.8	159.5	142.8	111.5	123.2	161.5	1735.2
1993	2	01	169.7	236.6	92.8	3	101.3	110.8	143.7	146.4	123.4	129.6	117.7	185.4	1557.4
1994	2	01	182.3	118.8	112.3				413.4	3					
1996	2	01			*	103.7	3	117.6	126.8	111.4	141.6	95.1	696.2	3	
1997	1	01	148.9	3	126.3	160.7	99.7	89.6	111.0	104.3	134.1	116.6	157.9	119.9	186.4
1555	4	3													
1998	1	01	193.0	145.7	120.7	93.5	80.4	116.9	112.9	124.3	121.3	130.9	132.7	143.2	1515.5
1999	1	01	131.1	3	83.5	127.9	95.0	3	138.4	108.0	138.6	120.5	72.5	3	111.0
1444	7	3													
2000	1	01	184.5	151.8	132.6	3	105.6	3	87.7	3	117.3	130.8	148.2	95.7	117.8
1439	7	3													
2001	1	01	234.3	150.5	110.2	131.5	97.1	119.6	136.7	3	132.1	117.7	130.2	125.3	120.6
1605	8	3													
2002	1	01	195.0	185.7	137.0	76.7	104.3	127.5	3	144.3	143.1	140.7	137.1	115.8	155.7
1662	9	3													
2003	1	01	235.7	139.2	139.8	96.2	116.5	97.5	127.2	132.2	123.6	93.7	3	117.0	3
1539	6	3													
2004	1	01	182.7	3	185.0	157.6	95.7	75.8	126.3	128.7	121.2	3	122.8	114.6	108.2
1555	8	3													
2005	1	01	150.9	158.9	70.0	103.0	163.8	123.2	117.8	110.5	119.4	147.1	1264.6	3	
2006	1	01	142.3	168.6	90.0	86.2	97.5	119.6	134.8	133.1	149.6	96.0	92.9	107.6	1418.2
2007	1	01	134.5	215.4	87.1	*	74.4	76.3	119.3	100.3	119.7	110.2	136.7	144.4	1318.3
2008	1	01	147.1	148.4	140.6	114.4	79.1	96.1	95.0	105.9	108.6	104.2	93.9	170.0	1403.3
2009	1	01	112.7	120.1	96.7	100.6	91.5	109.2	131.5	155.9	161.4	128.8	128.7	191.2	1528.3
2010	1	01	224.7	140.5	3	135.3	101.4	101.8	136.7	103.3					943.7
MEDIOS			184.9	151.7	137.9	106.4	107.1	113.2	134.0	135.0	123.1	118.9	128.0	158.0	1599.1
MÁXIMOS			243.4	236.6	186.7	146.0	146.6	150.9	177.3	163.2	163.1	157.9	175.9	227.4	243.4
MÍNIMOS			112.7	83.5	87.1	69.8	73.2	59.1	95.0	100.3	72.5	93.7	92.9	86.8	59.1

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
SISTEMA DE INFORMACIÓN
VALORES MÁXIMOS MENSUALES DE TEMPERATURA (oC) NACIONAL AMBIENTAL

FECHA DE PROCESO : 2010/08/30

ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO

LATITUD 0442 N TIPO EST SP DEPTO BOGOTÁ D.C. FECHA-INSTALACIÓN 1972-FEB
LONGITUD 7409 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO BOGOTÁ FECHA-SUSPENSIÓN
ELEVACIÓN 2547 m.s.n.m REGIONAL 11 BOGOTÁ CORRIENTE BOGOTÁ

AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI * OCTUB

*** NOVIE * DICIE * VR ANUAL ***

1972	2	01	20.4	22.0	21.4	21.5	20.6	20.0	19.9	20.8	20.7	22.0	20.5	20.6	22.0					
1973	2	01	21.0	23.8	23.0	21.8	22.0	20.2	21.4	20.9	21.3	21.4	20.6	19.3	23.8					
1974	2	01	19.8	19.6	19.8	20.6	19.4	21.1	19.2	21.5	19.2	19.8	20.6	21.3	21.5					
1975	2	01	21.2	21.6	21.1	22.0	20.1	19.8	19.6	19.7	19.8	20.0	20.3	19.2	22.0					
1976	2	01	21.2	20.2	21.0	21.2	20.2	19.4	19.1	21.6	20.2	21.0	20.8	21.3	21.6					
1977	2	01	22.0	21.8	22.2	22.2	21.0	19.6	20.9	21.6	21.6	22.0	21.2	21.8	22.2					
1978	2	01	21.6	23.4	22.1	22.2	21.6	3	20.3	20.4	19.6	21.6	21.4	22.2	3					
23.4	3																			
1979	2	01	21.6	23.1	3	22.5	21.6	20.6	3	22.0	20.0	23.6	3	20.6	21.5	3	21.0	3	21.0	
23.6	3																			
1980	2	01	21.4	23.4	22.2	22.2	21.6	20.7	21.6	21.4	3	21.6	22.0	21.8	3	21.2	23.4	3		
1981	2	01	22.0	21.8	22.2	21.5	20.8	22.2	20.3	21.7	21.2	3	21.3	21.8	21.2	22.2	3			
1982	2	01	22.6	21.8	22.4	21.0	21.2	21.0	20.0	20.4	22.5	21.7	20.2	3	22.0	22.6	3			
1983	2	01	22.9	22.9	23.6	21.4	21.5	3	21.0	20.8	20.8	20.7	21.4	21.2	20.1	23.6	3			
1984	2	01	20.5	20.8	21.7	21.4	20.8	20.6	19.5	19.4	20.0	20.6	20.8	20.7	21.7					
1985	1	01	21.7	23.0	23.4	21.4	21.4	19.8	20.6	19.6	20.6	20.3	20.2	21.1	23.4					
1986	2	01	22.2	21.2	20.0	20.8	3	22.0	19.6	3	19.6	3	21.3	21.6	21.4	3	22.1	21.8		
22.2	3																			
1987	1	01	22.4	22.1	22.6	22.5	20.6	21.3	21.4	3	21.2	22.2	21.6	21.8	22.3	22.6	3			
1988	1	01	23.1	22.7	22.7	3	21.4	3	22.6	21.6	19.3	20.1	20.8	3	20.2	19.9	23.1	3		
1989	1	01	20.6	20.8	21.9	22.1	20.8	20.4	21.4	20.7	20.9	20.8	21.6	22.2	22.2					
1990	2	01	21.4	21.4	3	21.9	3	21.8	21.6	20.4	20.6	21.0	21.4	21.5	20.2	3	21.5	3		
21.9	3																			
1991	2	01	22.8	3	22.9	22.8	22.0	3	22.4	20.6	3	19.6	20.2	3	21.4	21.6	21.0	3	22.2	3
22.9	3																			
1992	2	01	22.6	23.9	3	24.9	23.2	21.8	3	22.4	21.6	22.1	23.0	22.2	23.0	21.7	24.9	3		
1993	2	01	21.6	21.6	21.6	20.4	21.6	22.3	22.6	22.2	21.5	23.4	23.4	3						
1994	2	01	22.2	23.5	21.8	21.7	23.5	21.8	20.6	21.3	23.3	23.6	22.9	22.5	23.6					
1995	2	01	24.9	24.8	22.5	3	22.6	22.5	23.0	21.4	21.4	21.7	22.5	3	22.4	21.4	24.9	3		
1996	2	01	21.9	22.4	22.0	3	23.0	3	22.0	3	21.8	3	22.4	3	22.9	22.9	22.0	23.2	22.0	
23.2	3																			
1997	2	01	22.7	24.1	23.2	22.8	22.4	23.1	19.9	23.4	3	22.7	22.8	24.0	23.8	24.1	3			
1998	2	01	24.4	24.4	24.2	23.2	22.7	21.6	20.1	21.4	22.2	22.2	21.8	3	22.0	24.4	3			
1999	2	01	21.4	21.3	22.4	22.2	22.3	20.7	19.9	21.2	21.1	21.2	21.3	20.9	22.4					
2000	2	01	21.1	21.9	22.0	22.2	20.4	20.2	19.7	20.2	20.9	20.0	21.1	3	22.0	22.2	3			
2001	1	01	23.1	22.3	21.3	22.6	22.0	20.7	21.1	20.1	20.5	21.5	22.2	22.2	23.1					
2002	1	01	23.0	23.9	22.5	21.2	21.9	21.2	3	20.9	20.8	3	22.3	3	22.0	21.3	3	22.1	3	
23.9	3																			
2003	1	01	23.0	22.3	3	23.6	22.5	22.6	3	20.1	3	20.2	3	19.9	20.9	22.0	3	21.2	20.8	
23.6	3																			
2004	1	01	20.5	22.8	3	22.6	21.4	21.0	19.1	3	20.1	19.5	21.7	21.2	20.6	22.8	3			
2005	1	01	22.0	3	23.4	21.5	20.1	21.7	3	22.4	21.1	20.4	20.9	23.4	3					
2006	1	01	20.5	23.0	21.0	3	20.4	20.9	3	20.0	20.1	21.6	21.7	21.2	3	21.0	21.4	23.0	3	
2007	1	01	22.5	23.9	21.6	21.7	21.2	19.7	20.0	19.3	20.6	21.3	20.8	19.7	23.9					
2008	1	01	20.6	21.4	3	20.5	22.3	20.3	20.8	19.2	20.2	20.0	19.9	20.2	20.6	22.3	3			
2009	1	01	20.5	21.0	20.9	21.5	21.5	22.2	20.5	22.5	21.9	22.6	22.3	23.1	23.1					
2010	1	01	23.2	24.5	23.6	22.9	22.4	21.8	21.5	21.1	21.2	21.4	24.5	3						
MEDIOS	21.9	22.5	22.2	21.9	21.5	20.8	20.4	21.1	21.4	21.5	21.4	21.4	21.4	21.4	21.5					
MÁXIMOS	24.9	24.8	24.9	23.2	23.5	23.1	22.4	23.6	23.3	23.6	24.0	23.8	24.9							
MÍNIMOS	19.8	19.6	19.8	20.4	19.4	19.1	19.1	19.3	19.2	19.8	20.2	19.2	19.1							

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
SISTEMA DE INFORMACIÓN
VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE TEMPERATURA (oC) NACIONAL AMBIENTAL

FECHA DE PROCESO : 2010/08/30 ESTACIÓN : 2120579 APTO EL DORADO
 LATITUD 0442 N TIPO EST SP DEPTO BOGOTÁ D.C. FECHA-INSTALACIÓN 1972-FEB
 LONGITUD 7409 W ENTIDAD 01 IDEAM MUNICIPIO BOGOTÁ FECHA-SUSPENSIÓN
 ELEVACIÓN 2547 m.s.n.m REGIONAL 11 BOGOTÁ CORRIENTE BOGOTÁ

**AÑO EST ENT ENERO * FEBRE * MARZO * ABRIL * MAYO * JUNIO * JULIO * AGOST * SEPTI *
 OCTUB * NOVIE * DICIE * VR ANUAL ***


```

1971 1 01 .8 .3 5.1 1.8 1.5 3.6 2.0 2.6 .7 1.0 -1.0 .0 -1.0
1972 2 01 .2 -1.9 4.0 .0 5.3 3.6 3 6.4 2.0 1.4 .8 3.1 -2.5 -2.5 3
1973 2 01 .0 -4.9 2.0 .8 3 1.7 1.8 .9 1.5 -0.2 3 1.5 3.2 2.2 -4.9 3
1974 2 01 .8 2.8 2.0 4.0 3.6 1.0 2.5 1.8 1.0 .8 1.5 -6.0 -6.0
1975 2 01 -0.1 2.3 3 2.0 .2 2.8 3.8 3.5 2.5 .5 2.1 4.4 4.0 -0.1 3
1976 2 01 -1.7 1.4 3.0 3.2 3.6 2.2 4.6 -0.6 2.3 2.4 1.2 .4 -1.7
1977 2 01 -3.0 -3.6 1.0 3 2.3 3.7 4.0 3.4 -1.5 1.6 3 3.0 3 -3.0 3 -0.5 3 -3.6 3
1978 2 01 -2.4 -1.0 -3.2 4.0 2.2 3 4.7 .8 3 1.8 3 .6 1.4 3 .9 -0.4 3 -3.2 3
1979 2 01 -1.2 3 -3.0 3.0 2.0 3 2.6 6.0 3 4.5 1.6 3 2.0 3 3.6 3 5.8 3 3.0 3 -3.0 3
1980 2 01 1.0 -3.7 1.8 2.4 1.6 2.6 1.6 2.1 2.6 1.0 .6 1.0 3 -3.7 3
1981 2 01 -0.8 1.0 2.6 3.3 6.8 4.6 3.2 1.4 2.0 2.4 5.0 1.2 -0.8
1982 2 01 -1.7 3.0 1.5 6.5 5.6 3.0 3.4 -0.3 1.1 1.0 2.7 3 2.7 -1.7 3
1983 2 01 .8 .2 3.0 3.7 4.9 2.1 3.3 1.5 1.4 1.6 1.0 3 2.1 0.2 3
1984 2 01 .3 2.9 -0.4 1.4 .7 3.7 3.4 2.9 1.3 1.0 2.8 .8 3 -0.4 3
1985 1 01 1.0 -4.4 .0 1.7 2.9 1.8 1.0 2.2 1.4 4.0 3.6 -4.0 -4.4
1986 2 01 .1 .1 2.0 4.5 3 3.3 5.0 .4 1.0 2.1 5.0 3.8 -2.8 -2.8 3
1987 1 01 -0.8 .2 .8 1.0 3.4 4.2 4.0 3.0 .2 4.0 1.4 -1.9 -1.9
1988 1 01 .4 .6 -1.6 4.4 3.2 3.1 4.9 4.2 3 1.4 3.5 .6 -1.6 3
1989 1 01 .2 1.8 .4 1.8 3 3.7 4.1 1.4 -0.3 .0 4.4 1.7 -1.8 -1.8 3
1990 2 01 1.2 .9 3.1 4.7 3.6 3.2 2.4 3.2 1.0 3.3 2.8 2.8 0.9
1991 2 01 -2.2 3 -0.8 .8 2.8 5.4 5.9 4.3 3 3.2 3 2.0 3 .5 1.4 3 2.8 -2.2 3
1992 2 01 .1 2.6 -1.9 2.7 3.8 1.1 4.8 4.3 -0.2 1.8 1.7 1.4 -1.9
1993 2 01 .0 3.7 5.1 5.4 1.6 4.4 1.8 1.4 5.1 -2.0 -2.0 3
1994 2 01 -0.6 2.3 4.4 6.6 7.0 2.2 2.3 .8 1.5 .6 1.0 .4 -0.6
1995 2 01 -2.4 -6.4 .4 2.0 3.6 4.8 4.2 5.0 3.2 1.3 3 1.4 -1.6 -6.4 3
1996 2 01 -1.1 3 3.3 3 1.2 3 4.0 3 3.2 3 4.8 5.4 3 2.4 .6 2.8 2.2 1.5 -1.1 3
1997 2 01 3.1 3 2.0 .2 4.3 3.7 2.2 5.8 3 .0 3 .4 3.0 2.0 .0 0.0 3
1998 2 01 -0.7 1.4 4.1 8.5 9.0 5.5 6.8 3.2 4.3 5.0 5.4 3 3.3 3 -0.7 3
1999 2 01 4.1 5.2 2.6 7.3 3.6 6.4 3.4 4.4 6.8 5.0 2.8 3.5 2.6
2000 2 01 1.8 2.2 3.3 4.4 5.7 6.2 4.1 3.2 3.1 4.8 4.4 3 3.5 0.5 3
2001 1 01 -1.0 3 3.1 4.9 3 3.8 4.2 4.4 .6 2.3 .8 2.2 1.9 3 5.1 3 -1.0 3
2002 1 01 1.1 2.5 3.6 8.0 5.6 7.0 3 4.3 3.4 3 2.1 3 2.0 3.1 2.6 1.1 3
2003 1 01 .9 4.2 3 5.1 4.8 5.6 4.1 5.2 3 3.6 2.7 3.9 2.8 3.7 0.9 3
2004 1 01 .3 -1.3 3 .9 5.3 8.1 6.0 4.6 3 5.5 4.0 4.6 3.4 -1.3 3
2005 1 01 2.6 3 1.9 4.5 4.7 3.9 4.3 3.2 4.0 2.3 3 1.9 3
2006 1 01 3.4 2.6 5.9 3 6.3 4.7 6.8 6.1 5.4 4.3 4.1 3 5.6 3 4.4 2.6 3
2007 1 01 1.5 -2.4 3.7 5.9 5.2 4.5 4.5 5.1 3 3.0 4.7 2.5 4.7 -2.4 3
2008 1 01 2.6 3 1.1 3 3.7 5.6 5.0 5.0 5.6 5.1 4.9 2.6 6.7 3.5 1.1 3
2009 1 01 3.3 4.3 5.8 3 7.6 5.0 3 4.8 5.8 3 6.6 1.5 3 3.4 3.1 .9 0.9 3
2010 1 01 -0.9 4.1 3.0 6.0 8.0 5.1 5.6 6.5 4.6 5.4 -0.9 3

```

```

MEDIOS 0.2 0.7 2.2 3.9 4.3 4.1 3.7 2.7 2.1 2.6 2.7 1.1 2.5
MÁXIMOS 4.1 5.2 5.9 8.5 9.0 7.0 6.8 6.6 6.8 5.0 6.7 5.4 9.0
MÍNIMOS -3.0 -6.4 -3.2 0.0 0.7 1.0 0.4 -1.5 -0.2 0.5 -3.0 -6.0 -6.4

```

ANEXO B. Ecuaciones del modelo de simulación ecológica Humedal Jaboque.

B1. Componente Hidrológico

$$\text{Vol_Sec_1}(t) = \text{Vol_Sec_1}(t - dt) + (\text{Flujo_Cuenca_Aferente} + \text{Pre_sec_1} - \text{Flujo_Sec_2} - \text{Evapo}) * dt$$

$$\text{INIT Vol_Sec_1} = 64018$$

INFLOWS:

$$\text{Flujo_Cuenca_Aferente} = \text{Prom_anual_de_Q_año}$$

$$\text{Pre_sec_1} = (\text{P_ef_Sec_1} * 10^{-1})$$

OUTFLOWS:
 $\text{Flujo_Sec_2} = \text{Vol_Sec_1} - \text{Vol_m_sec_1} + \text{Flujo_Cuenca_Aferente}$
 $\text{Evapo} = Y_{\text{evaporacion}} * \text{Area_sec_1}$
 $\text{Vol_sec_2}(t) = \text{Vol_sec_2}(t - dt) + (\text{Flujo_Sec_2} + \text{Pre_sec_2} - \text{Flujo_Sec_3} - \text{Eva_2}) * dt$
 $\text{INIT Vol_sec_2} = 159221$

INFLOWS:
 $\text{Flujo_Sec_2} = \text{Vol_Sec_1} - \text{Vol_m_sec_1} + \text{Flujo_Cuenca_Aferente}$
 $\text{Pre_sec_2} = (P_{\text{ef_Sec_2}} * 10^{-1})$

OUTFLOWS:
 $\text{Flujo_Sec_3} = \text{Vol_sec_2} - \text{Vol_m_sec_2} + \text{Flujo_Sec_2}$
 $\text{Eva_2} = Y_{\text{evaporacion}} * \text{Area_sec_2}$
 $\text{Vol_sec_3}(t) = \text{Vol_sec_3}(t - dt) + (\text{Flujo_Sec_3} + \text{Pre_sec_3} - \text{Salida_R_Bogotá} - \text{Eva_3}) * dt$
 $\text{INIT Vol_sec_3} = 191000$

INFLOWS:
 $\text{Flujo_Sec_3} = \text{Vol_sec_2} - \text{Vol_m_sec_2} + \text{Flujo_Sec_2}$
 $\text{Pre_sec_3} = (P_{\text{ef_Sec3}} * 10^{-1})$

OUTFLOWS:
 $\text{Salida_R_Bogotá} = \text{Vol_sec_3} - \text{Vol_m_sec3} + \text{Flujo_Sec_3}$
 $\text{Eva_3} = Y_{\text{evaporacion}} * \text{Area_sec_3}$
 $\text{Area_de_cuenca_aferente} = 5.7 * 10^6$
 $\text{Area_sec_1} = 116396$
 $\text{Area_sec_2} = 261132.4$
 $\text{Area_sec_3} = 315308$
 $\text{Continentalidad} = 1250$
 $\text{Latitud} = 4.74$
 $\text{msnm} = 2547$
 $\text{Precipitación_anual} = 1 * 828$
 $\text{Prof_Sec3} = \text{Vol_sec_3} * \text{Area_sec_3}$
 $\text{Prof_Sec_1} = \text{Vol_Sec_1} / \text{Area_sec_1}$
 $\text{Prof_Sec_2} = \text{Vol_sec_2} / \text{Area_sec_2}$
 $\text{Prom_anual_de_Q_año} = \text{if } P_{\text{emp}} = 0 \text{ then } 0 * (0.38 * \text{Precipitación_anual} * \text{Area_de_cuenca_aferente} * 0.001) + 1 * (\text{Area_de_cuenca_aferente} * (\text{Precipitación_anual} / 817.7) * 0.01 * 60 * 60 * 24 * 365 * 10^{(-6)}) \text{ else } P_{\text{emp}}$
 $P_{\text{ef_Sec3}} = \text{if } P_{\text{emp}} = 0 \text{ then } 0 * (0.38 * \text{Precipitación_1972_2010} * \text{Area_sec_3} * 0.001) + 1 * (\text{Area_de_cuenca_aferente} * (\text{Precipitación_anual} / 817.7) * 0.01 * 60 * 60 * 24 * 365 * 10^{(-6)}) \text{ else } P_{\text{emp}}$

```

sec_3*(Precipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6))
else P_emp
  P_ef_Sec_1 = if P_emp=0
    then 0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_1*0.001)+1*(Area_
sec_1*(Precipitacion_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6))
  else P_emp
    P_ef_Sec_2 = if P_emp=0 then
      0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_sec_2*0.001)+1*(Area_
Q_Cuenca_afेरente = if P_emp=0 then
      0*(0.38*Precipitacion_1972__2010*Area_de_cuenca_
afेरente*0.001)+1*(Area_de_cuenca_afेरente*(Precipitaci
on_1972__2010/72)*0.01*60*60*24*365*10^(-6)) else P_emp
    THR_Jt = ((Vol_Sec_1+Vol_sec_2+Vol_sec_3)/Salida__R_
Bogotá)*365
    TRH_1_Sec1 = (Vol_Sec_1/Flujo_Sec_2)*365
    TRH_1_Sec2 = ( Vol_sec_2/Flujo_Sec_3)*365
    TRH_1_Sec_3 = (Vol_sec_3/Salida__R_Bogotá)*365
    Vol_m_sec3 = 191000
    Vol_m_sec_1 = 64018
    Vol_m_sec_2 = 159221

```

```

Precipitacion_1972__2010 = GRAPH(MOD(TIME,468))
(1.00, 72.1), (2.00, 21.9), (3.00, 57.2), (4.00, 159), (5.00, 118), (6.00,
58.1), (7.00, 36.7), (8.00, 39.6), (9.00,17.4), (10.0, 71.6), (11.0, 101),
(12.0, 28.5), (13.0, 2.90), (14.0, 3.80), (15.0, 50.1), (16.0, 39.3), (17.0,
75.0),(18.0, 59.5), (19.0, 55.1), (20.0, 57.4), (21.0, 130), (22.0, 115),
(23.0, 106), (24.0, 117), (25.0, 79.6), (26.0,100), (27.0, 28.5), (28.0,
83.3), (29.0, 61.3), (30.0, 65.5), (31.0, 15.8), (32.0, 46.8), (33.0, 91.8),
(34.0, 100),(35.0, 151), (36.0, 24.0), (37.0, 5.50), (38.0, 32.2), (39.0,
130), (40.0, 57.9), (41.0, 105), (42.0, 56.4), (43.0,60.3), (44.0, 52.2),
(45.0, 55.1), (46.0, 161), (47.0, 70.7), (48.0, 77.9), (49.0, 31.2), (50.0,
59.9), (51.0, 118),(52.0, 122), (53.0, 104)...

```

B2. Componente Estado Tráfico

$M_{TP}(t) = M_{TP}(t - dt) + (IN - Salida) * dt$

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 = if Promedio_emp_de_Q_anual=0 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))
else Promedio_emp_de_Q_anual
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...)....

267

B3. Componente Sólidos Suspendedos Totales

$M_SST_Sec_1(t) = M_SST_Sec_1(t - dt) + (IN + Carga_interna -$
 $Salida - Sedimentación) * dt$
 $INIT M_SST_Sec_1 = 25$
INFLOWS:
 $IN = (Promedio_anual_de_Q_año * C_SST_Sec_1)$
 $Carga_interna = Sed_SST_Sec_1 * Rres$
OUTFLOWS:
 $Salida = M_SST_Sec_1 / TRH_Sec_1$
 $Sedimentación = R_Sed * M_SST_Sec_1$
 $M_SST_Sec_3(t) = M_SST_Sec_3(t - dt) + (IN_3 + Carga_$
 $interna_3 - Salida_3 - Sedimentacion_3) * dt$
 $INIT M_SST_Sec_3 = 25$
INFLOWS:

$IN_3 = (Q_Sec_3 * CSST_Sec_3)$
 $Carga_interna_3 = Sed_SST_sec_3 * Rres_3$
OUTFLOWS:
 $Salida_3 = M_SST_Sec_3 / TRH_Sec_3$
 $Sedimentacion_3 = R_Sed_3 * M_SST_Sec_3$
 $M_SST_sec_2(t) = M_SST_sec_2(t - dt) + (IN_2 + Carga_interna_2$
 $- Salida_2 - Sedimentacion_2) * dt$
INIT $M_SST_sec_2 = 25$
INFLOWS:
 $IN_2 = (Q_Sec_2 * C_SST_Sec_2)$
 $Carga_interna_2 = Sed_SST_Sec_2 * Rres_2$
OUTFLOWS:
 $Salida_2 = M_SST_sec_2 / TRH_Sec_2$
 $Sedimentacion_2 = R_Sed_2 * M_SST_sec_2$
 $Sed_SST_Sec_1(t) = Sed_SST_Sec_1(t - dt) + (Sedimentación -$
 $Carga_interna - MIneralización_sec_1) * dt$
INIT $Sed_SST_Sec_1 = 10^4$
INFLOWS:
 $Sedimentación = R_Sed * M_SST_Sec_1$
OUTFLOWS:
 $Carga_interna = Sed_SST_Sec_1 * Rres$
 $MIneralización_sec_1 = Sed_SST_Sec_1 * R_min$
 $Sed_SST_Sec_2(t) = Sed_SST_Sec_2(t - dt) + (Sedimentacion_2 -$
 $Carga_interna_2 - Mineralizacion_sec_2) * dt$
INIT $Sed_SST_Sec_2 = 10^4$
INFLOWS:
 $Sedimentacion_2 = R_Sed_2 * M_SST_sec_2$
OUTFLOWS:
 $Carga_interna_2 = Sed_SST_Sec_2 * Rres_2$
 $Mineralizacion_sec_2 = Sed_SST_Sec_2 * R_min$
 $Sed_SST_sec_3(t) = Sed_SST_sec_3(t - dt) + (Sedimentacion_3 -$
 $Carga_interna_3 - Mineralización_sec3) * dt$
INIT $Sed_SST_sec_3 = 10^4$
INFLOWS:
 $Sedimentacion_3 = R_Sed_3 * M_SST_Sec_3$
OUTFLOWS:
 $Carga_interna_3 = Sed_SST_sec_3 * Rres_3$
 $Mineralización_sec3 = Sed_SST_sec_3 * R_min$

```

Area_de_cuenca_afereente_2 = 5.7*10^6
A_sec2 = 261132.4
A_sec3 = 315308.4
A_Sec_1 = 116396
FT_2 = 2.5
FT_3 = 2.5
Profundidad_media = (Zsec1+Zsec2+Zsec3)/3
Promedio_anual_de_Q_año = if Promedio_emp_de_Q_anual=0 then
0*(0.38*Precipitacion*Area_de_cuenca_afereente_2*0.001)+1*(Area_de_
cuenca_afereente_2*(Precipitacion/53)*0.01*60*60*24*365*10^(-6))
else Promedio_emp_de_Q_anual
Promedio_emp_d
e_Q_anual = 0
Promedio_mensual_de_Q = Promedio_anual_de_Q_año/12
P_precipitacion = 840
Q_Sec_2 = 1.823e+006
Q_Sec_3 = 1.8459e+006
Red_sed = (72/12)*YSPM
Red_sed_2 = (72/12)*YSPM_2
Red_sed_3 = (72/12)*YSPM_3
Rres = 0.6
Rres_2 = 0.6
Rres_3 = 0.6
R_min = 0.25
R_Sed = Profundidad_media*Red_sed
R_Sed_2 = FT_2*Profundidad_media*Red_sed_2
R_Sed_3 = FT_3*Profundidad_media*Red_sed_3
SST_Sec_1 = (M_SST_Sec_1/Vol_sec1)
SST_Sec_2 = (M_SST_sec_2/Vol_sec2)
SST_Sec_3 = (M_SST_Sec_3/Vol_sec3)
TRH_Sec_1 = (Vol_sec1/Promedio_anual_de_Q_año)
TRH_Sec_2 = (Vol_sec2/Q_Sec_2)
TRH_Sec_3 = (Vol_sec3/Q_Sec_3)
v = 5
Volumen_total = (Vol_sec1+Vol_sec2+Vol_sec3)
Vol_sec1 = A_Sec_1*Zsec1
Vol_sec2 = A_sec2*Zsec2
Vol_sec3 = A_sec3*Zsec3

```

```

YSPM = 1
YSPM_2 = 1.0
YSPM_3 = 1.0
CSST_Sec_3 = GRAPH(TIME)
(0.00, 0.00), (1.00, 50.0), (2.00, 70.0), (3.00, 91.0), (4.00, 83.0), (5.00,
69.0), (6.00, 52.0), (7.00, 38.0), (8.00, 63.0), (9.00, 74.0), (10.0, 85.0),
(11.0, 46.0), (12.0, 38.0)
C_SST_Sec_2 = GRAPH(MOD(TIME,12))
(0.00, 36.0), (1.00, 68.0), (2.00, 83.0), (3.00, 94.0), (4.00, 74.0), (5.00,
65.0), (6.00, 50.0), (7.00, 34.0), (8.00, 66.0), (9.00, 75.0), (10.0, 81.0),
(11.0, 47.0), (12.0, 36.0)
C_SST_Sec_1 = GRAPH(MOD(TIME,12))
(0.00, 40.0), (1.00, 50.0), (2.00, 70.0), (3.00, 91.0), (4.00, 83.0), (5.00,
69.0), (6.00, 52.0), (7.00, 38.0), (8.00, 63.0), (9.00, 74.0), (10.0, 85.0),
(11.0, 46.0), (12.0, 38.0)
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, 70.0), (10.0, 107), (11.0, 91.0),
(12.0, 53.0), (13.0, 31.0), (14.0, 40.0), (15.0, 64.0), (16.0, 103), (17.0,
93.0), (18.0, 55.0), (19.0, 41.0), (20.0, 45.0), (21.0, 69.0), (22.0, 104),
(23.0, 90.0), (24.0, 51.0)

```

B4. Componente Producción Primaria Fitoplanctonica

```

Biomasa_de_fitoplancton(t) = Biomasa_de_fitoplancton(t - dt) +
(Produccion_inicial_fitoplancton - Pastoreo - Eliminación_fitoplancton) * dt
INIT Biomasa_de_fitoplancton = 450000
INFLOWS:
Produccion_inicial_fitoplancton =
(30.6*Clorofilaa_sec_1^0.927)*30*0.45*A_Sec_1*Zsec1*0.01*((Temp_
norm+0.1)/17)*0.25
OUTFLOWS:
Pastoreo = Biomasa_de_fitoplancton*Rata_de_consumo
Eliminación_fitoplancton = Biomasa_de_fitoplancton*1.386/renovacion__
fitoplanctn
Biomasa_de_fitoplancton_2(t) = Biomasa_de_fitoplancton_2(t - dt) +
(Produccion_inicial_fitoplancton_2 - Pastoreo_2 - Eliminación_
fitoplancton_2) * dt

```

INIT Biomasa_de_fitoplancton_2 = 450000

INFLOWS:

Produccion_inicial_fitoplancton_2 =

$(30.6 * \text{Clorofila_a_sec_2}^{0.927}) * 30 * 0.45 * A_sec2 * Zsec2 * 0.01 * ((\text{Temp_norm} + 0.1) / 17) * 0.25$

OUTFLOWS:

Pastoreo_2 = Biomasa_de_fitoplancton_2 * Rata_de_consumo

Eliminación_fitoplancton_2 = Biomasa_de_fitoplancton_2 * 1.386 /
renovacion_fitoplanctn_2

$\text{Biomasa_de_fitoplancton_3}(t) = \text{Biomasa_de_fitoplancton_3}(t - dt) +$
 $(\text{Produccion_inicial_fitoplancton_3} - \text{Pastoreo_3} - \text{Eliminación_fitoplancton_3}) * dt$

INIT Biomasa_de_fitoplancton_3 = 450000

INFLOWS:

Produccion_inicial_fitoplancton_3 =

$(30.6 * \text{Clorofila_a_sec_3}^{0.927}) * 30 * 0.45 * A_sec3 * Zsec3 * 0.01 * ((\text{Temp_norm} + 0.1) / 17) * 0.25$

OUTFLOWS:

Pastoreo_3 = Biomasa_de_fitoplancton_3 * Rata_de_consumo

Eliminación_fitoplancton_3 = Biomasa_de_fitoplancton_3 * 1.386 /
renovacion_fitoplanctn_3

A_sec2 = 261132.4

A_sec3 = 315308.4

A_Sec_1 = 116396

A_T = A_Sec_1 + A_sec2 + A_sec3

$\text{Ppf_sec3} = (\text{Biomasa_de_fitoplancton_3} / \text{Vol_Msec3}) * 10$

$\text{Ppf_Sec_1} = (\text{Biomasa_de_fitoplancton} / \text{Vol_Msec1}) * 10$

$\text{Ppf_Sec_2} = (\text{Biomasa_de_fitoplancton_2} / \text{Vol_sec_2}) * 10$

Producción_fitoplacton = (Biomasa_de_fitoplancton / renovacion_fitoplanctn)

Producción_fitoplacton_2 = Biomasa_de_fitoplancton_2 / renovacion_fitoplanctn_2

Producción_fitoplacton_3 = Biomasa_de_fitoplancton_3 / renovacion_fitoplanctn_3

Rata_de_consumo = 0.5

renovacion_fitoplanctn = 3.2/7

renovacion_fitoplanctn_2 = 3.2/7

renovacion_fitoplanctn_3 = 3.2/7

Volumen_total = Vol_Msec1 + Vol_sec_2 + Vol_Msec3

$Vol_Msec1 = A_Sec_1 * Zsec1$
 $Vol_Msec3 = A_sec3 * Zsec3$
 $Vol_sec_2 = A_sec2 * Zsec2$
 $Z_promedio = (Zsec1 + Zsec2 + Zsec3) / 3$
 $Clorofila_a_sec_1 = GRAPH(MOD(TIME, 12))$
 (1.00, 22.5), (2.00, 25.5), (3.00, 18.9), (4.00, 11.4), (5.00, 8.40), (6.00, 6.60), (7.00, 10.5), (8.00, 19.5), (9.00, 15.3), (10.0, 9.30), (11.0, 14.4), (12.0, 15.3)
 $Clorofila_a_sec_2 = GRAPH(MOD(TIME, 12))$
 (1.00, 34.2), (2.00, 26.1), (3.00, 22.5), (4.00, 12.6), (5.00, 11.1), (6.00, 12.3), (7.00, 16.8), (8.00, 18.6), (9.00, 15.9), (10.0, 11.7), (11.0, 10.5), (12.0, 22.8)
 $Clorofila_a_sec_3 = GRAPH(MOD(TIME, 12))$
 (1.00, 7.80), (2.00, 5.85), (3.00, 3.30), (4.00, 1.95), (5.00, 1.56), (6.00, 1.74), (7.00, 2.70), (8.00, 3.69), (9.00, 3.21), (10.0, 2.22), (11.0, 1.65), (12.0, 2.80)
 $Precipitacion_24 = GRAPH(MOD(TIME, 24))$
 (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, 70.0), (10.0, 107), (11.0, 91.0), (12.0, 53.0), (13.0, 31.0), (14.0, 40.0), (15.0, 64.0), (16.0, 103), (17.0, 93.0), (18.0, 55.0), (19.0, 41.0), (20.0, 45.0), (21.0, 69.0), (22.0, 104), (23.0, 90.0), (24.0, 51.0)
 $Temp_norm = GRAPH(mod(time, 12))$
 (1.00, 16.8), (2.00, 16.6), (3.00, 15.4), (4.00, 15.2), (5.00, 14.6), (6.00, 14.4), (7.00, 16.3), (8.00, 16.6), (9.00, 14.9), (10.0, 15.1), (11.0, 15.9), (12.0, 16.9)

B5. Componente Biomasa de Macrofitas

$Biomasa_macrofitas(t) = Biomasa_macrofitas(t - dt) + (Produccion_inicial_macrofitas - Consumo_de_macrofitas - Eliminación_macrofitas) * dt$

INIT Biomasa_macrofitas = 0

INFLOWS:

$Produccion_inicial_macrofitas = Area * Cobertura_de_macrofitas * 0.01 * Factor_de_retardo_pH * Rata_de_producción_macrofitas * Y_Temp_Moderador * YTP$

OUTFLOWS:

$Consumo_de_macrofitas = Biomasa_macrofitas * Rata_de_consumo$
 $Eliminación_macrofitas = Biomasa_macrofitas * 1.386 / Rotacion_de_volumen_de_macrofitas$

```

A1 = Area*((Profundidad_maxima-Profundidad_1_mt)/(Profundidad_
maxima+Profundidad_1_mt*EXP(3-Factor_de_forma^1.5)))^(0.5/Factor_
de_forma)
Area = 3500
Cobertura_de_macrófitas = (10.49+1.052*(Sec_mv/Prof_
media)-1.993*(90/(90-Latitud))-0.422*(Profundidad_maxima^0.5)+0.490*L
OG10(A1*10^(-6)))^2.1
DR = ((Area*10^(-6))^0.5/Prof_media)
Duracion_periodo_crecimiento = 12*Latitud
Factor_de_forma = (Prof_media/Profundidad_maxima)*3
Factor_de_retardo_pH = SMTH1(pH55, Rotacion_de_volumen_de_
macrofitas, pH55)
Nor__producción_macrofitas = 0.001*Area*1/52*10^(2.472+1.028*LOG1
0(Cobertura_de_macrófitas)-0.516*90/(90-Latitud))
pH55 = IF(pH_Humedal)>5.5THEN(1+1.85)*(pH_Humedal/5.5-1)
ELSE(ph95)
ph95 = IF(pH_Humedal)>9.5THEN(1-38)*(pH_Humedal)/(9.5-1)ELSE(1)
pH_Humedal = 6.5
Profundidad_1_mt = 1
Profundidad_maxima = 1.2
Prof_media = ((Zsec1+Zsec2+Zsec3)/3)
Rata_de_consumo = 0.25
Rata_de_producción_macrofitas = 1.5
Rotacion_de_volumen_de_macrofitas = (300/7)
Sec = IF(0.75*(YDr*YpH*YCol*YDm))>(Profundidad_maxima)
THEN(Profundidad_maxima)ELSE(0.75*(YDr*YpH*YCol*YDm))
Sec_mv = (SMTH1 (Sec,52,Sec))
YCol = IF(Col<30)THEN(1-3.0)*((Col/30)-1)ELSE(1-0.05*(Col/30-1))
YDm = IF(Noname_1<10)THEN(1+0.5*(Noname_1/10-1))
ELSE(1+0.1*(Noname_1/10-1))
YDr = IF (DR<0.25)THEN(1-1*((DR/0.25)-1))ELSE(1-
0.02*((DR/0.25)-1))
YpH = (1-0.9*(pH_Humedal/6-1))
YTP = (Fósforo_en_triburario)
Y_Temp_Moderador = (Temp_norm/Temperatura_media_epil)/2
Fósforo_en_triburario = GRAPH(MOD(TIME, 12))
(1.00, 0.98), (1.92, 1.03), (2.83, 0.74), (3.75, 0.45), (4.67, 0.37), (5.58,
0.555), (6.50, 0.54), (7.42, 1.03), (8.33, 0.75), (9.25, 0.51), (10.2, 0.52),
(11.1, 0.72), (12.0, 0.72)

```

Secretaría General

2017

©



Julio Eduardo Beltrán Vargas

Biólogo marino de la Universidad Jorge Tadeo Lozano de Bogotá (1982), magíster en Planificación y Administración del Desarrollo Regional de la Universidad de los Andes (1992), M.Sc. en Ecoauditoría y Planificación Empresarial del Medio Ambiente del Instituto de Investigaciones Ecológicas (Málaga, España, 2005) y Ph.D. en Ciencias, Biología, de la Universidad Nacional de Colombia (2012). Se ha desempeñado como docente del CIDER, Universidad de los Andes, y como catedrático de la Universidad Javeriana y la Escuela Superior de Administración Pública (ESAP). El profesor Beltrán ha desarrollado investigaciones sobre planificación ambiental territorial y gestión de aéreas protegidas, en especial sobre zonas costeras y aéreas protegidas del sistema RAMSAR. Se ha desempeñado también como consultor de organismos de cooperación técnica internacional y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Es investigador asociado de Colciencias, líder grupo de investigación INDESOS. Sus trabajos incluyen libros, capítulos de libros y artículos científicos publicados en revistas nacionales y extranjeras. Actualmente se desempeña como docente de tiempo completo en Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.