

# Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural

## Evaluation of polluting loads by residual water discharges in a natural wetland

ALEXANDRA MARISOL JIMÉNEZ RAMOS<sup>1</sup> - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ<sup>2</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente.

2. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente.

alexandra.jimenez@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/06/2018 Aceptado: 01/08/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

De acuerdo con la bibliografía existente, en los sistemas naturales de humedal se destaca su contribución en la reducción de la contaminación del agua; sin embargo, en los programas desarrollados por las autoridades ambientales en Cundinamarca, en especial aquellos relacionados con los planes de manejo adoptados para estos ecosistemas lénticos, por ninguna circunstancia se admiten descargas de residuos líquidos tratados sobre su espejo de agua; esto sin que medie evidencia verídica y suficiente que demuestre hasta qué punto, y en qué condiciones, dicho servicio ecosistémico se puede aprovechar sosteniblemente en los humedales existentes.

En el marco de la situación expuesta, en el presente estudio se simuló el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua con el uso del *software* IBER 2D. Se empleó información secundaria existente del humedal La Florida, sector 2, con jurisdicción de los municipios de Cota y Funza, e información primaria resultado de visitas y pruebas de laboratorio complementarias, para de esta forma analizar la capacidad de autodepuración y respuesta del humedal natural frente a la perturbación que representa el vertimiento de aguas residuales.

Para el montaje del modelo hidráulico, se definieron condiciones de frontera cerradas para la mayor parte del dominio y contornos abiertos, correspondientes a los puntos de entrada y salida del caudal, los primeros asociados a la recarga de agua a través de las alcantarillas existentes, y el segundo, a la salida de las estaciones de bombeo del embalse La Isla. Se calculó para un año medio la producción de agua en la cuenca y en el dominio de estudio se implementó una malla no estructurada,

considerada como la condición apropiada para la irregularidad de la geometría del humedal La Florida en el sector 2.

Para las condiciones de contorno e iniciales, se plantearon tres escenarios definidos como escenario 1, correspondiente a la condición inicial del humedal con el aporte exclusivo de agua de escorrentía; escenario 2, tomando la condición inicial del humedal más el ingreso de agua procedente del río Bogotá mediante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, es decir, considerando la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada (SHMACI), y escenario 3, el cual toma como base el escenario 2 más la simulación de una descarga de agua residual doméstica.

Posteriormente, se realizó el montaje del modelo de calidad para la simulación de los parámetros demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC total), oxígeno disuelto (OD), nitrógeno amoniacal ( $N-NH_3$ ) y en forma de nitratos ( $N-NO_3$ ), adoptando en primera instancia constantes cinéticas propuestas en la bibliografía, que enseguida, tomando como punto de verificación los resultados de calidad de agua de una muestra a la salida del humedal, se ajustaron con pruebas de ensayo y error hasta obtener una mejor aproximación a los resultados de las muestras de calidad existentes y tomadas en el humedal.

Los resultados del estudio permiten dar cuenta de las bondades y limitaciones del *software* IBER 2D como herramienta para la modelación hidráulica y evaluación de la evolución espaciotemporal de contaminantes en humedales naturales, así como de la posibilidad para admitir descargas de efluentes tratados con tratamientos secundarios y terciarios en un humedal natural.

**Palabras claves:** humedal, modelación hidráulica, calidad, IBER, vertimientos, carga contaminante.

## Abstract

According to current literature, natural wetland systems excel at reducing water contamination, however, the programs devised by Cundinamarca's environmental authorities, especially those related to management plans adopted for these ecosystems, strictly forbid liquid waste discharges into the water body; this is done without enough evidence that shows the level and conditions in which this ecosystemic service can be sustainably exploited in existent wetlands.

Within this situation, this study simulated a wetland's current state and its associated behavior when faced with an organic load linked to a treated discharge, through the implementation of a hydraulic and water quality model using IBER 2D. Available secondary information was used from La Florida wetland, sector 2, Cota and Funza jurisdiction, and primary information as a result of field trips and complementary lab tests, all of this with the purpose of analyzing the wetland's self-cleaning capabilities and its response to the disturbance caused by residual water discharge.

To set up the hydraulic model, closed-frontier conditions were defined for most of the land and open contours, which belonged to the flow's entry and exits points, the former were associated to water overload through current sewers, and the latter to La Isla dam's pumping stations exit points. A one-year-and-a-half water production in the basin was calculated and for the area of study a non-structured grid was implemented, which is considered to be the appropriate condition for La Florida wetland's irregular geometry in sector 2.

For initial and contour conditions, three scenarios were defined: scenario 1, which describes the wetland's initial condition exclusively fed by surface runoff; scenario 2, which sets up the wetland's initial condition plus water intake from the Bogotá river by opening Chicú canal's floodgate, that is, considering the operation of La Ramada Hydraulic System of Environmental Management and Flood Control (SHMACI – acronym in Spanish); and scenario 3, which is based on scenario 2 plus the simulation of domestic wastewater discharge.

Subsequently, the quality model was set up to simulate the parameters of carbonaceous oxygen biochemical demand (CBOD total), dissolved oxygen (DO), ammoniacal nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), and nitrates (NO<sub>3</sub>-N). This was performed by adopting, firstly, kinetical constants proposed in the literature, which then, using the water quality results from the wetland's exit point as checkpoints, were adjusted with trial and error tests until obtaining a better approximation to water quality results both already available and field-sampled from the wetland.

The results of the study show the benefits and limitations of IBER 2D as a tool for hydraulic modelling and assessment of the spatial-temporal evolution of pollutants in natural wetlands, as well as the possibility to allow discharges that have undergone secondary and tertiary treatments in a natural wetland.

**Keywords:** wetland, hydraulic modelling, quality, IBER, discharges, pollution load.

## INTRODUCCIÓN

En el caso de los sistemas naturales de humedal, se destaca la reducción de la contaminación del agua, pues la vegetación lacustre propia del humedal, junto a los procesos físicos, químicos y biológicos que se desarrollan dentro de él y a su alrededor, contribuyen a la retención de sedimentos y metales pesados, depuran y mineralizan materia orgánica, y captan nutrientes, reintroduciéndolos como elementos y compuestos asimilables en los ciclos biogeoquímicos naturales (Kadlec & Wallace, 2009; Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., 2011); sin embargo, en Colombia, por ejemplo, la carencia de políticas orientadas a aprovechar de manera sostenible el servicio de descontaminación de aguas brindado por estos ecosistemas, sumado a su uso indiscriminado y desmedido como sumidero de residuos líquidos, han incidido para que en la actualidad dicho servicio se encuentre excluido de las estrategias nacionales de saneamiento ambiental y de gestión integral de vertimientos.

En consecuencia, en programas desarrollados por las autoridades ambientales con injerencia en los humedales de la sabana de Bogotá, en especial aquellos relacionados con los planes de manejo adoptados para estos ecosistemas lenticos, por ninguna circunstancia admiten descargas de residuos líquidos tratados sobre su espejo de agua; esto sin que medie evidencia verídica y suficiente que demuestre hasta qué punto y en qué condiciones dicho servicio ecosistémico se puede aprovechar sosteniblemente en los humedales existentes. Medidas con ese enfoque prohibitivo contribuyen a sobrecargar los cuerpos de agua lóticos que, valga anotar, desde siempre se han concebido como receptores por defecto de los vertimientos de aguas residuales generados por la sociedad.

Dicho lo anterior, en el presente estudio se simuló el estado actual y el comportamiento asociado de un humedal natural frente a una descarga con carga orgánica ligada a un vertimiento tratado, con la finalidad de aportar al proceso de aprovechamiento sostenible de los servicios ambientales de depuración de aguas que brindan estos ecosistemas acuáticos; éste es un servicio ambiental potencial no explorado en la región y que las autoridades ambientales han estudiado poco, debido a que desafortunadamente nunca se utilizó de manera racional y mesurada.

En atención a lo expuesto, con el presente estudio se evaluó la evolución de la calidad del agua en un hume-

dal natural, mediante la implementación de un modelo hidráulico y de calidad de agua a través del *software* IBER 2D<sup>1</sup>, con el fin de analizar la capacidad de autodepuración y respuesta de estos cuerpos de agua frente a la perturbación que representa el vertimiento de aguas residuales. Para ello, como caso de estudio, se trabajó con el humedal La Florida, sector 2, ubicado en los municipios de Cota y Funza, del departamento de Cundinamarca.

La información empleada se relaciona con información secundaria existente del área, suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), en lo relacionado con datos monitoreados por la estación denominada Apto El Dorado; la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, relacionada con cartografía base y temática; modelo digital de elevación y ortomosaico del humedal La Florida; inventario de vertimientos; monitoreos de calidad de agua en el humedal La Florida, y en puntos de descarga y pruebas de laboratorio complementarias realizadas con apoyo del Laboratorio Ambiental de la CAR, e información primaria resultado de visitas.

### Modelo IBER 2D

De acuerdo con los desarrolladores de IBER (Bladé et al., 2014), el módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones bidimensionales de St. Venant, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento.

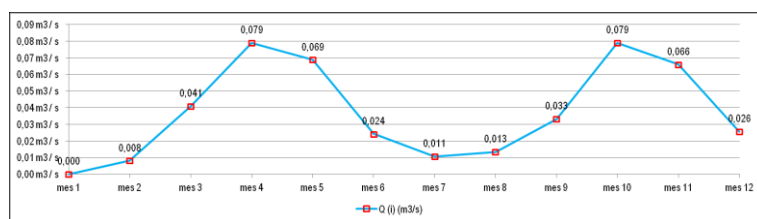
Los esquemas numéricos utilizados en este *software* se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas. Los esquemas numéricos utilizados en IBER son especialmente apropiados para la modelización de cambios de régimen y de frentes seco-mojado (frentes de inundación). La discretización del dominio espacial se realiza con volúmenes finitos en mallas no estructuradas, admitiéndose las mixtas, formadas por elementos triangulares y cuadrangulares (Bladé et al., 2014).

1. IBER 2D es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (Geama) (Universidade da Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidade de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria), y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del Cedex (Bladé et al., 2014).

Las ecuaciones y correspondientes modelos de cálculo se describen en el *Manual de referencia hidráulico* y el artículo de la herramienta de simulación numérica del flujo en ríos<sup>2</sup>, así como en el *Manual de referencia del módulo de calidad de aguas*<sup>3</sup>.

### Montaje del modelo hidráulico

Para el montaje del modelo hidráulico se definieron condiciones de frontera cerrados para la mayor parte del dominio y contornos abiertos, correspondientes a los puntos de entrada y salida del caudal, los primeros asociados a la recarga de agua a través de las alcantarillas existentes y el segundo, a la salida de las estaciones de bombeo del embalse La Isla. La producción de agua en la cuenca se estimó a partir de información disponible en las estaciones del aeropuerto El Dorado y La Ramada, con la aplicación de los modelos de Thomas (1981), modelo *abcd* y modelo T (CAR & EPAM S.A. ESP, 2016) (Thorntwaite & Mather, 1955), adoptando los resultados del modelo *abcd*, el cual representa los datos más conservadores para este tipo de cuenca con un comportamiento bimodal y una tendencia a presentar déficit de agua en los meses de enero-febrero y julio-agosto.



**Figura 1.** Producción de agua en la cuenca en estudio, aplicando el modelo de Thomas (1981), expresada en tasa volumétrica de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

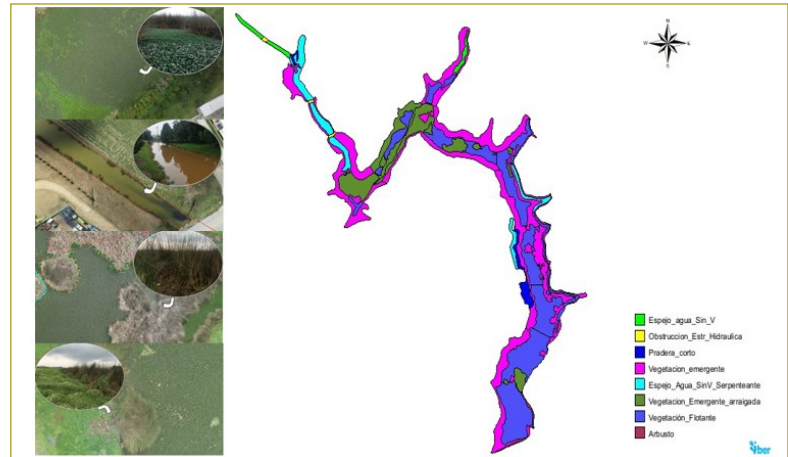
- Bladé, Cea, Corestein, Escolano, Puertas, Vázquez-Cendón, Dolz & Coll (2014). "IBER: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30 (1), 1-10.
- Cea, Bermúdez, Puertas, Conde, Bladé, Corestein & Escolano (2016). IberWQ. Herramienta numérica para la simulación 2D de la calidad de aguas en ríos y estuarios. Módulo de calidad de aguas. Retrieved February 11, 2017, from [https://www.udc.es/citeec/images/proyectos/hidraulica/proyectos\\_hidraulica11.pdf](https://www.udc.es/citeec/images/proyectos/hidraulica/proyectos_hidraulica11.pdf).

El siguiente paso para el montaje del modelo en IBER 2D se relacionó con la definición de la geometría y rugosidad de las superficies. Para ello, se realizó la digitalización de las coberturas en el humedal La Florida, sector 2, con el uso de ArcMap, y se empleó como base el ortomosaico obtenido en el estudio de la CAR & EPAM S.A. ESP (2016). Las categorías de coberturas identificadas en el humedal pertenecen a espejo de agua sin vegetación flotante ni emergente (tramos rectos y sinuosos), estructura hidráulica u obstrucción que ocupa más del 50 % del área de la sección transversal, pradera o pasto corto, vegetación emergente (densa - alta y arraigadas - medio), vegetación flotante y arbustos.

En total, se generaron 70 superficies en formato Shapefile, las cuales se importaron en IBER, procediendo a asignar de acuerdo con el tipo de cobertura el coeficiente de Manning  $n$ , según los valores indicados en la bibliografía y teniendo en cuenta los siguientes factores: a) La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal, retarda el flujo y controla la distribución del flujo (Chow, 1959; Paudel, Grace, Galloway, Zamorano & Jawitz, 2013) (Galloway, Zamorano & Jawitz, 2013); b) La caracterización de la variabilidad de los regímenes hidráulicos es importante para determinar el desempeño del tratamiento del humedal (Paudel et al., 2013); c) Se toma en cuenta que, al no hacerse un mantenimiento o limpieza en un determinado número de años, el crecimiento de vegetación puede considerarse abundante, de tal modo que se encuentren valores de  $n > 0,10$  (Chow, 1959); d) Las irregularidades en el perímetro mojado, variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de ésta a lo largo de la ciénaga, introducen rugosidad adicional a la causada por la rugosidad superficial y otros factores. En este caso, el incremento en  $n$  puede ser 0,005 o mayor (Chow, 1959); e) Se asigna el coeficiente de rugosidad de acuerdo con la característica de mayor predominancia.

### Escenarios planteados

En el modelo se aplicó el comportamiento hidrológico del humedal en condiciones de un año medio. Sin embargo, con el fin de considerar la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada, es decir, la regulación de los niveles de cuerpo lagunar a través de la alimentación



**Figura 2.** Asignación de los coeficientes de rugosidad según el tipo de cobertura en el humedal La Florida, sector 2, en IBER.

Fuente: Elaboración propia.

de agua desde el canal Chicú, conocido anteriormente como La Florida, así como de la maniobra sincronizada de las estaciones de bombeo del embalse La Isla, se plantearon tres escenarios definidos así: escenario 1, correspondiente a la condición inicial del humedal con el aporte exclusivo de agua de escorrentía; escenario 2, la condición inicial del humedal más el ingreso de agua procedente del río Bogotá mediante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, y escenario 3, el cual toma como base el escenario 2 más la simulación de una descarga de agua residual doméstica.

### Montaje del escenario 1

El caudal medio mensual en  $m^3/s$  obtenido en el balance hídrico del mes de agosto, época en la que se hicieron los muestreos de calidad, se repartió en el cuerpo lagunar en puntos claves de acuerdo con la distribución de las alcantarillas existentes, definiendo cinco (1-5) condiciones de entrada en régimen crítico/subcrítico.

Se adoptó una condición de salida con régimen supercrítico (costado norte), con el objeto de permitir el flujo de posibles excesos de caudal en el humedal. En cuanto a la condición inicial, según la cota promedio del agua en el humedal La Florida, sector 2, referenciada en el estudio de la CAR & EPAM (2016), en un valor de 2542,27 (mes de agosto) m.s.n.m., y la curva de capacidad de almacenamiento del humedal La Florida, referida en el mismo estudio, se asignó al dominio conformado por 70 superficies un calado de 0,98 m.

**Tabla 1**

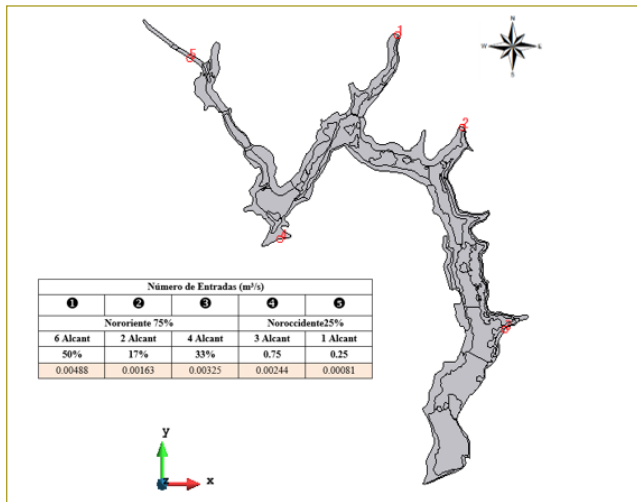
Coeficientes de Manning teóricos afectados por la existencia de la vegetación en un cuerpo de agua y seleccionados para el modelo

Tipo de vegetación	Manning $n$ (s/m <sup>1/2</sup> )	Descripción	Coefficiente seleccionado
Emergente <sup>4</sup>	0,67 <sup>A</sup>	Cattail, mixed cattail and mixed graminoids. Valor calibrado en el modelo en el modelo HD en áreas densas.	0,67
	0,05-0,10 <sup>E</sup>	Larga. Hierba de césped; arbustos, o cattails densos; arboles entremezclados.	--
	0,10-0,20 <sup>E</sup>	Extreme. Sauce denso espesa, mezquite y pino salado o unos árboles caídos.	--
	0,05 <sup>G</sup>	Cañas emergentes, juncos, pabellón y grandes hierbas [partes sobre el terreno].	--
	0,3 <sup>G</sup>	Plantas arraigadas emergentes (valor medio).	0,3
	0,15 <sup>B</sup>	Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles.	--
Flotante <sup>5</sup>	0,12 <sup>A</sup>	Las plantas flotantes como algas.	0,12
	0,05 <sup>D</sup>		--
	0,1 <sup>G</sup>	Las plantas flotantes como algas. Plantas de raíces flotantes arraigadas.	--
	0,08 <sup>B</sup>	Tramos lentos, con malezas y pozos profundos.	--
Arbusto <sup>6</sup>	1,00 <sup>A</sup>		--
	0,885-0,902 <sup>F</sup>		--
	0,08 <sup>B</sup>	Pocos matorrales y árboles en verano.	--
	0,16 <sup>B</sup>	Matorrales medios a densos en verano.	0,16
Espejo de agua sin vegetación	0,035 <sup>C</sup>		--
	0,033 <sup>B</sup>	Corrientes en planicies, limpio, recto, sin montículos ni pozos profundos.	0,033
	0,045 <sup>B</sup>	Corrientes en planicies, limpio, serpenteante, pozos y bancos de arena.	0,045
Pradera	0,021 <sup>G</sup> 0,03 <sup>H</sup> 0,035 <sup>B y C</sup>	Césped. Hierba corta (normal). Pasto corto (valor máximo considerando un mantenimiento pobre)	0,035
	0,024 <sup>A</sup>		--
	0,02-0,03 <sup>E</sup>	Apreciable. Las obstrucciones ocupan de 15 a 50 % del área de la sección transversal.	--
Estructura hidráulica	0,04-0,05 <sup>E</sup>	Severo. Las obstrucciones ocupan más del 50 % del área de la sección transversal.	0,05

<sup>A</sup>. (Min & Wise, 2010), <sup>B</sup>. (Chow, 1959), <sup>C</sup>. (Min & Wise, 2009), <sup>D</sup>. (Medeiros, Hagen, & Weishampel, 2012), <sup>E</sup>. (Arcement & Schneider, 1989), <sup>F</sup>. (Galema, 2009), <sup>G</sup>. (Fisher & Dawson, 2003), <sup>H</sup>. Modified from Chow (1959) and Thomsen and Hjalmarson (1991), citado por Phillips & Tadayon, 2007).

Fuente: Elaboración propia.

- Las plantas emergentes están arraigadas en el fondo del cuerpo de agua, pero sus hojas y tallos se extienden fuera del agua. Crecen en los humedales y a lo largo de la orilla, donde la profundidad del agua es 1,2 o 1,5 m, por lo general.
- Una planta de agua que flota en la superficie de un cuerpo de agua, con sus raíces arrastrándose en el agua.
- Planta leñosa, más pequeña que un árbol, que tiene varios tallos principales que surgen en el suelo o cerca de éste.



**Figura 3.** Condiciones de contorno definidas en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

### Montaje del escenario 2

Considera la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada. Para ello, se mantienen las condiciones de entrada procedentes de escorrentía del mes de agosto establecidas para el escenario 1 y se contempla la apertura de la compuerta, se procede a asignar de acuerdo con el cálculo realizado los siguientes caudales  $Q_1 = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (abierta 100 %) y  $Q_2 = 1,87 \text{ m}^3/\text{s}$  (abierta 75 %), en régimen crítico como ingreso de agua desde el río Bogotá hacia el humedal La Florida, sector 2.

En cuanto a la condición de salida, se contempló para este escenario con fundamento en el registro del año 2016 (contrato CAR 1185/2014), la operación de dos bombas de tornillo de  $0,625 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir, un caudal total de  $1,25 \text{ m}^3/\text{s}$  desde el extremo occidental de la ciénaga La Florida, sector 2, para la alimentación del embalse La Isla. En este sentido, se procedió a asignar en condición de flujo subcrítico una curva de gasto en el canal a la salida del humedal, a partir de la verificación de la cota máxima del agua en el extremo occidental ( $C_{\text{máx.}} 2542,3 \text{ m.s.n.m.}$  y  $C_{\text{mín.}} 2540,6 \text{ m.s.n.m.}$ ).

La condición inicial asignada al dominio conformado por 70 superficies fue un calado de 2,9 m, que de acuerdo con el perfil de profundidad permite alcanzar el nivel para la alimentación del embalse La Isla, a partir de la operación de las dos bombas de tornillo.

### Montaje del escenario 3

Este escenario adopta la condición hidrodinámica del escenario 2 e incorpora una descarga de agua residual doméstica (ARD) dentro del dominio en las coordenadas E: 991935, N: 1016250, en la abscisa 2100 m, con características de un efluente con un tratamiento terciario<sup>7</sup> de una actividad residencial. La descarga de agua residual da cumplimiento a la norma de vertimiento fijada a escala nacional en el artículo 8 de la Resolución 631 de 2015, promulgada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

Los valores que se ingresan al modelo del efluente tratado de ARD corresponden a: DBOC =  $0,06444 \text{ kg/m}^3$ , nitratos  $\text{N-NO}_3 = 0,000513 \text{ kg/m}^3$ , nitrógeno amoniacal  $\text{N-NH}_3 = 0,089 \text{ kg/m}^3$ , temperatura =  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  y caudal =  $1,156 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Montaje al modelo de calidad

Las constantes que intervienen en el módulo de calidad de IBER para las sustancias y variables se adoptaron inicialmente de la bibliografía, tomando como referencia la calidad de agua y estudios existentes sobre el río Bogotá en el tramo ubicado entre las partes alta y media de esta cuenca, dado que es la principal fuente hídrica de abastecimiento del humedal La Florida, sector 2, a través de la captación de agua en la estación de bombeo El Chicú, del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones, operado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

### Demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC)

La revisión bibliográfica hecha para determinar la constante de degradación de materia orgánica carbonosa tomó como referencia los valores citados por Bowie, Mills, Porcella, Campbell & Chamberlin (1985); Consorcio Cuencas & CAR (2006), UNAL & EAAB (2008) y Díaz (2004). A partir de dicha información, la relación de la DBOC ejercida en un tiempo  $t$  (DBOC $_t$ ) con la DBOC se calculó con una constante de degradación de materia carbonosa igual a  $k = 0,15 \text{ d}^{-5}$  (Estudio del

7. Sistema de tratamiento de agua residual compuesto por unidades de homogeneización, reactor biológico, sedimentación, filtración y desinfección.

río Bogotá a la altura de Puente Vargas, realizado por el Consorcio Cuencas & CAR, 2006). En esta forma, el valor obtenido a través del uso de la expresión y variables ilustradas a continuación se aplicó en cada uno de los resultados de DBO<sub>5</sub> existentes en el humedal La Florida.

Fórmula:

$$DBOC_5 = DBOC_0 (1 - e^{-k \cdot 5})$$

$$\frac{DBOC_0}{DBOC_5} = \frac{1}{(1 - e^{-k \cdot 5})} \quad \frac{DBOC_0}{DBOC_5} = 1,90$$

Donde:

DBOC<sub>5</sub> = demanda orgánica carbonosa ejercida en 5 días

DBOC<sub>0</sub> = demanda orgánica carbonosa total o última.

K = constante de degradación de materia orgánica carbonosa (k = 0,15 d<sup>-1</sup>).

A continuación, se presentan los resultados de cálculo de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total (DBOC<sub>0</sub>), correspondientes a los datos que finalmente se ingresan en el modelo IBER.

**Tabla 2**

Cálculo de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total (DBOC<sub>0</sub>)

Datos puntos	Coordenadas		DBO <sub>5</sub> mg/L	DBOC <sub>0</sub> kg/m <sup>3</sup>
	X (Este)	Y (Norte)		
1	992039	1015217	7,68	0,0146
2	992047	1016127	<5,0	0,0095
3	992020	1016517	77	0,1459
4	990689	1016886	7,23	0,0137

Fuente: Muestréos CAR & EPAM (2016).

Posteriormente, en cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico se asignaron las concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total indicadas en la tabla 2, adoptando los datos de los puntos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4 no se ingresó al modelo y se mantuvo como punto de control. Así mismo, se impuso la condición inicial de la DBOC registrada en el punto 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada el 4 de agosto de 2016 por parte de EPAM, en un valor de 0,0146 kg/m<sup>3</sup>.

### Descarga

El vertimiento procedente de la zona de Intexzona, ubicado en las coordenadas E: 990666, N: 1016891, tiene valores entre 0,000805 y 0,00064 m<sup>3</sup>/s, según los caudales aforados. Para este caso se adopta un valor promedio de 0,00072 m<sup>3</sup>/s. La concentración de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa total de este vertimiento corresponde a DBOC<sub>0</sub> = 0,0038 kg/m<sup>3</sup>.

Además de los datos indicados, en el modelo de calidad de IBER se ingresaron los siguientes datos de cálculo: salinidad nula, temperatura promedio del agua 17,7 °C, tasa de degradación K<sub>dboc</sub> = 0,17 1/d y velocidad de caída 0,04 m/d.

### Demanda de oxígeno del sedimento (SOD)

De acuerdo con los datos referidos en la bibliografía (Bowie et al., 1985, y UNAL & EAAB, 2008), se adoptó un valor de K<sub>dos</sub> = 0,0012 kg/m<sup>2</sup>d.

### Oxígeno disuelto (OD)

En cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico, se asignaron las concentraciones del oxígeno disuelto en kg/m<sup>3</sup>. Se adoptan los datos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4 no se ingresó al modelo y se mantuvo como punto de control.

**Tabla 3**

Concentraciones de oxígeno disuelto ingresados al modelo

Datos puntos	Coordenadas		OD mg/L	OD kg/m <sup>3</sup>
	X (Este)	Y (Norte)		
1	992039	1015217	0,19	CondInicial
2	992047	1016127	0,71	0,0007
3	992020	1016517	6,85	0,0069
4	990689	1016886	1,18	0,0012

Fuente: Elaboración propia.

Se establece como condición inicial en el humedal La Florida, sector 2, un valor equivalente al oxígeno disuelto de saturación del punto de muestreo 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada el 4 de agosto de 2016 por parte de EPAM. El cálculo se realizó mediante el uso de

las ecuaciones de APHA (1992) y Zison et al. (1978), indicadas a continuación:

$$\ln[OD_{sat}(T,S,0)] = -139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T^2} + \frac{1,243800 \cdot 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 \cdot 10^{11}}{T^4} - S \cdot \left( 1,764 \cdot 10^{-2} - \frac{10,754}{T} + \frac{2140,7}{T^2} \right)$$

Donde:

$OD_{sat}(T,S,0)$  = concentración de saturación de oxígeno disuelto en mg/l a la temperatura T en kelvin, con una salinidad del agua S en kg/m<sup>3</sup> y al nivel del mar.

El efecto de la altitud sobre el nivel del mar se tiene en cuenta con la siguiente ecuación:

$$OD_{sat}(T,S,z) = OD_{sat}(T,S,0) \cdot (1 - 0,0001148Z)$$

Siendo Z la altitud sobre el nivel del mar en metros.

**Tabla 4**  
Cálculo de oxígeno disuelto de saturación  $OD_{sat}$

Condición Inicial - Concentración de Saturación del Oxígeno Disuelto $OD_{sat}$		
Temperatura	16.3 °C	289.45 Kelvin
$OD_{sat}(T,S,0)$	9.8 mg/L	
Elevación	2542.8 m.s.n.m	
$OD_{sat}(T,S,Z)$	6.94 mg/L	
	0.0069 Kg/m <sup>3</sup>	

Fuente: Elaboración propia.

### Nitrógeno $N-NO_3$ y $N-NH_3$

En cada uno de los contornos de entrada definidos en el componente hidrodinámico se asignaron las concentraciones de nitrógeno amoniacal ( $N-NH_3$ ) y en forma de nitratos ( $N-NO_3$ ) expresados en kg/m<sup>3</sup>. Se adop-

taron los datos de los puntos 2 y 3 como condiciones de frontera. El punto 4 no se ingresó al modelo y se mantuvo como punto de control, tal como se indicó.

Como condición inicial en el humedal La Florida, sector 2, se establecen las concentraciones de nitrógeno amoniacal ( $N-NH_3$ ) y en forma de nitratos ( $N-NO_3$ ) del punto de muestreo 1, de acuerdo con los resultados obtenidos en la jornada de muestreo desarrollada por EPAM el 4 de agosto de 2016.

Los valores de las constantes cinéticas adoptadas con base en la bibliografía revisada (Bowie et al., 1985; Consorcio Cuencas & CAR, 2006, y Díaz, 2004), corresponden a tasa de nitrificación  $K_{nit}$  0,1 d<sup>-1</sup> y tasa de desnitrificación  $K_{denit}$  0,27 d<sup>-1</sup>.

Respecto al número de Schmidt, no se cambia el valor por defecto definido en IBER debido a que no se dispone de datos precisos para la comprobación del modelo. En cuanto a la tasa de amonificación, no se define en el modelo dado que se considera la concentración de nitrógeno orgánico como cero en toda la ciénaga. Lo mismo ocurre con la velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico.

### Generación de mallado: IBER 2D

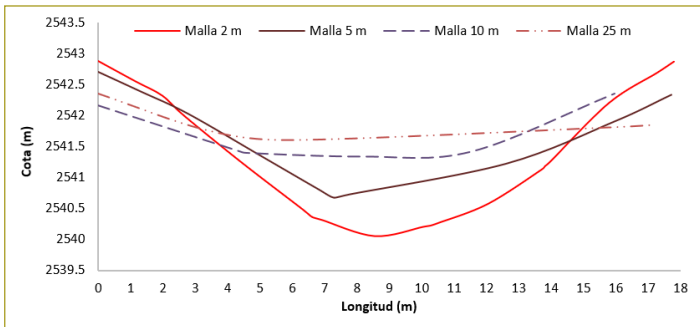
En el dominio de estudio se decide implementar una malla no estructurada que puede estar conformada por elementos de tres a cuatro lados, debido a que este tipo de malla se adapta a cualquier tipo de geometría, considerada como la condición apropiada para la irregularidad de la geometría del humedal La Florida, en el sector 2. En la definición del mallado se efectuaron pruebas con mallas compuestas por celdas con tamaños de 2 m, 5 m, 10 m y 25 m, a partir de los cuales se corrió el modelo hidrodinámico, y a través de cortes transversales se

**Tabla 5**  
Concentraciones de nitrógeno  $N-NH_3$  y  $N-NO_3$  ingresados al modelo

Datos puntos	Coordenadas		Nitratos $N-NO_3$	Nitrógeno amoniacal $N-NH_3$
	X (Este)	Y (Norte)	kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
1	992039	1015217	CondInicial 0,00907	CondInicial 0,00376
2	992047	1016127	0,00953	0,000106
3	992020	1016517	0,0129	0,0215
4	990689	1016886	0,00311	0,00584

Fuente: Elaboración propia.





**Figura 4.** Corte transversal del canal de salida del humedal La Florida, sector 2, con diferente mado.

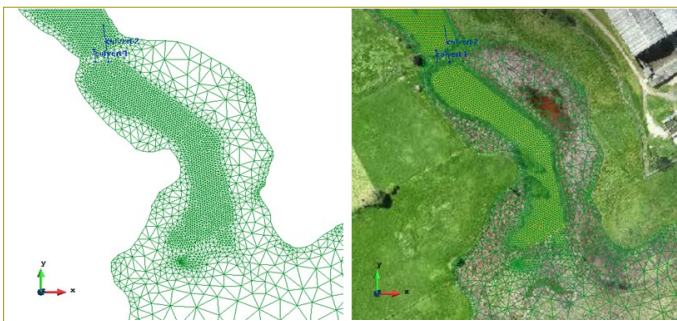
Fuente: Elaboración propia.

determinó el nivel de generalización al que se llega con el incremento de los tamaños del mado (figura 4).

Por lo anterior, tomando como referencia la profundidad promedio del agua en el humedal y la separación entre secciones de las batimetrías realizadas en el cuerpo lagunar por la CAR y EPAM S.A. ESP (2016), se optó por trabajar con dos tamaños de malla con elementos de lado de 5 m para la superficie del humedal cubierto por vegetación flotante y emergente, así como de 2 m para los elementos que cubren el espejo de agua en el canal de salida en el humedal La Florida, sector 2.

Posteriormente, la elevación de la malla se asignó con el archivo del modelo digital de elevación generado por la CAR y EPAM S.A. ESP (2016), el cual se transformó en un archivo en formato ASCII empleando el *software* Arcmap, específicamente la herramienta Raster to ASCII

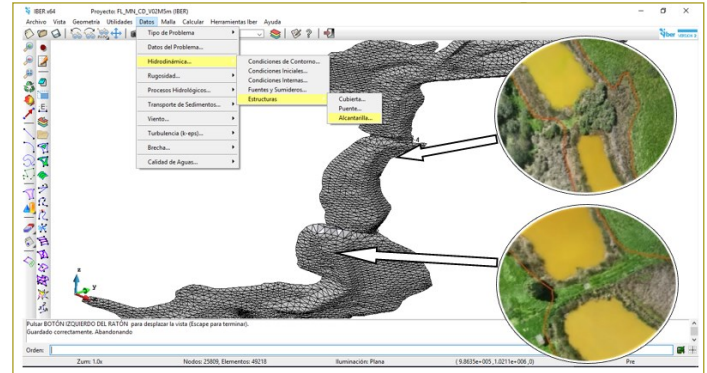
Debido a la topografía del terreno y con el objeto de permitir el tránsito del caudal en dos puntos en los cuales en el modelo digital de elevación sobresalen dos diques, se ingresaron sobre la malla dos alcantarillas en cada uno de los pasos artesanales existentes en el humedal e identificados en las coordenadas E: 990907,



**Figura 5.** Malla de cálculo no estructurada.

Fuente: Elaboración propia.

N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452. Cada alcantarilla tiene un diámetro de 1,5 m, para transportar con un tirante de 0,75 m un caudal de 1,1 m<sup>3</sup>/s en régimen subcrítico y a tubo lleno un caudal máximo de 2,2 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 6.** Alcantarillas introducidas al modelo en los pasos artesanales existentes.

Fuente: Elaboración propia.

### Selección de las constantes cinéticas

Con la finalidad de evaluar el potencial del programa IBER para la construcción de un modelo hidráulico y de calidad del agua en el humedal La Florida, en el presente trabajo académico se adoptaron los resultados de los muestreos llevados a cabo sobre el humedal La Florida, sector 2, del año 2016 por la CAR & EPAM, acordes con el comportamiento de las sustancias de calidad de agua en el tiempo y en el espacio. Con esta hipótesis y con base en constantes cinéticas propuestas a partir de la bibliografía especializada, se procedió a realizar la comprobación de las variables tomando como punto de comparación los resultados de calidad de agua de la muestra 4, ubicada a la salida del humedal en las coordenadas E: 990689, N: 1016886, ubicado en el canal de succión de la estación de bombeo La Isla.

Inicialmente se hicieron varias pruebas para determinar el comportamiento de las sustancias y la capacidad del modelo para simular las condiciones de calidad de agua en el humedal La Florida, sector 2, haciendo uso de un equipo con un procesador Intel Core i7-2670QM CPU de 2,2 GHz, con sistema operativo de 64 bits. Para cada prueba, con una malla conformada por 49.192 elementos y una simulación de 3600 segundos, se requirió un tiempo de cálculo de aproximadamente 7 horas.

Las simulaciones A a G (tabla 6) conservan el modelo hidrodinámico definido en este estudio para el

escenario 1, y en cuanto al módulo de calidad incluyen la variación de las constantes cinéticas, considerando los valores mínimos y máximos recomendados en el *Manual de referencia* de IBER (2015), los valores adoptados de la bibliografía y otros valores introducidos manualmente a prueba y error que hay que cambiar para obtener un mejor ajuste de la dinámica del modelo (Mancera, Peña, Giraldo & Santos, 2003).

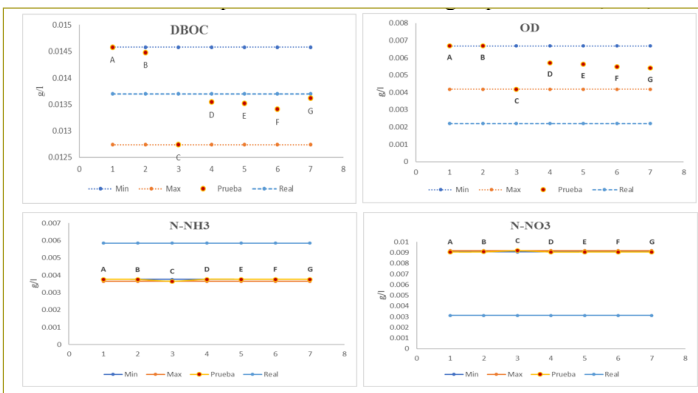
Como se ha descrito en el presente artículo tres puntos o resultados de los muestreos se emplearon para la alimentación del modelo, y el último, ubicado en la salida noroccidental del humedal La Florida, sector 2, se empleó para verificación. En consecuencia, las gráficas que a continuación se presentan indican el valor observado en campo del punto 4 (línea azul discontinua), con respecto a los valores simulados en cada una de las pruebas (figura 7).

De acuerdo con lo expresado, las constantes cinéticas que se adoptan para el análisis del comportamiento de la calidad del agua en el humedal La Florida, sector 2, corresponden a las utilizadas en la prueba 4 o G, es decir:  $K_{nit} = 0,01$  1/día,  $K_{denit} = 0,001$  1/día,  $K_{dboc} = 1,95$  1/día,  $V_{sDBOC} = 0,04$  m/día y  $K_{dos} = 0,008$  kg/m<sup>2</sup>/día, dejando en claro que sólo se logró un buen ajuste para la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC total).

Tras las pruebas realizadas en este estudio se establece que para alcanzar un estado estacionario<sup>8</sup> en las variables demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBOC total) y oxígeno disuelto (OD), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y nitratos (N-NO<sub>3</sub>), las simulaciones deben correrse mínimo hasta los 27.000 segundos, lo que exige un tiempo computacional de alrededor de 48 horas (1,9 días), para el caso del escenario 1, y de 72 horas (3 días) para los escenarios 2 y 3.

Para el presente caso no se dispone de información suficiente que admita realizar la verificación del modelo, es decir, no se cuenta con otros datos en un escenario diferente con los cuales sea posible evaluar el comportamiento del modelo aplicando las constantes cinéticas resultantes de la calibración. Esta situación confirma la

- Un sistema o proceso se encuentra en estado estacionario si las variables que definen su comportamiento, respecto al tiempo, permanecen invariantes. Un sistema puede ser estático, esto es, que significa que se mantiene constante en el tiempo, pero también puede presentar dos tipos de conductas; generalmente, cuando empieza su funcionamiento, pasa por un estado dinámico y luego alcanza un estado estacionario o de régimen.



**Figura 7.** Análisis de las pruebas de calidad de agua para DBOC, OD, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub>.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6**  
Resultados de las simulaciones en el humedal La Florida, sector 2

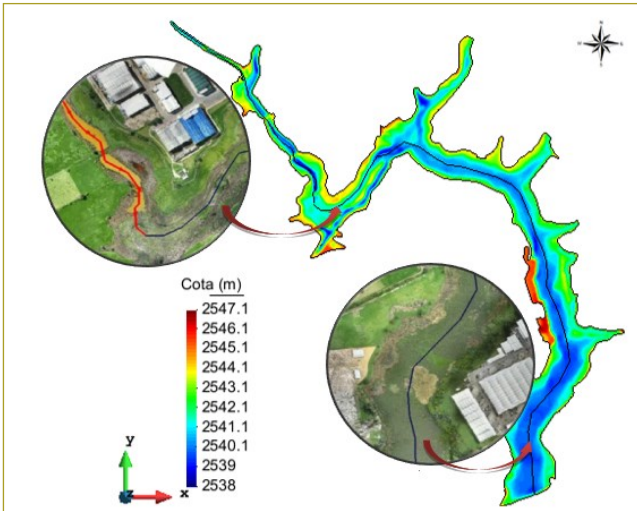
Variable	Mínimo	Valor adoptado	Máximo	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Valores reales (g/l)
	A (g/l)	B (g/l)	C (g/l)	1 - D	2 - E	3 - F	4 - G	
<b>DBOC</b>	0,01458	0,01448	0,01274	0,01355	0,01352	0,01341	<b>0,01362</b>	0,0137
<b>% error</b>	6,0 %	5,4 %	7,5 %	1,1 %	1,3 %	2,2 %	<b>0,6 %</b>	--
<b>OD</b>	0,00669	0,00669	0,00418	0,00572	0,00563	0,00549	<b>0,00541</b>	0,0022
<b>% error</b>	67,1 %	67,1 %	47,4 %	61,5 %	61,0 %	59,9 %	<b>59,3 %</b>	--
<b>N-NH<sub>3</sub></b>	0,00376	0,00375	0,00364	0,00376	0,00376	0,00376	<b>0,00376</b>	0,00584
<b>% error</b>	55,4 %	55,8 %	60,3 %	55,4 %	55,4 %	55,4 %	<b>55,4 %</b>	--
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	0,00907	0,00908	0,00918	0,00907	0,00907	0,00907	<b>0,00907</b>	0,00311
<b>% error</b>	65,7 %	65,7 %	66,1 %	65,7 %	65,7 %	65,7 %	<b>65,7 %</b>	--

Fuente: Elaboración propia.

necesidad de establecer puntos de control y monitoreo continuos en el humedal La Florida, sector 2, con el fin de validar el modelo y obtener las constantes cinéticas que permitan que las simulaciones coincidan con los muestreos de campo.

**RESULTADOS**

Para el análisis de resultados se hizo un corte longitudinal sobre el eje del humedal La Florida, sector 2, que representa el trayecto principal del agua en una longitud total de 3290 m. En este sentido, las salidas producidas por el modelo hidráulico y de calidad en el humedal La Florida, para los diferentes escenarios, con el uso de los módulos básico de modelación hidráulica y avanzado de calidad del agua de IBER 2D, se describen a continuación.



**Figura 8.** Corte longitudinal sobre el eje del humedal La Florida, sector 2 (longitud total 3290 m).

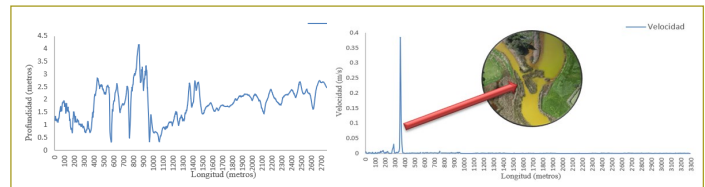
Fuente: Elaboración propia.

**Escenario 1. Condición inicial**

El perfil de profundidades del corte realizado se presenta en la figura siguiente (figura 9), con profundidades que no superan los 2 m en los primeros 400 m, donde se distinguen una sección del humedal sin vegetación y un ancho superficial de máximo 20 m; continúa el humedal con un trayecto importante (500 m) de un espejo de agua sin vegetación, con una superficie más amplia y profundidades más variables que van desde los 0,5 m hasta los 3,8 m. Entre los 900 y 3290 m de longitud, el humedal se caracteriza por la presencia de

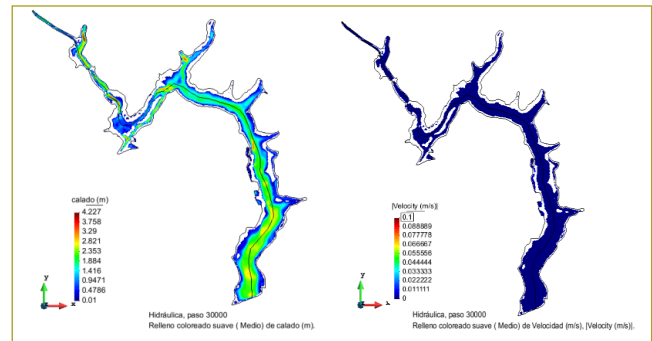
vegetación emergente y flotante en superficies amplias de hasta 150 m y profundidades más homogéneas, entre 2 y 2,5 m, aproximadamente.

Con respecto a la velocidad del flujo, en un tramo ubicado entre los 300 y 400 m se evidencia una velocidad máxima de 0,38 m/s; en el resto del humedal las velocidades oscilan entre 0,9 m/s y  $6,32 \cdot 10^{-5}$  m/s, tendiendo a aguas estancadas. El pico de velocidad obedece a una reducción ostensible del ancho superficial del humedal, en el que se llega aproximadamente a 3 m en una garganta creada entre el lecho de agua y la vegetación del cuerpo lagunar.



**Figura 9.** Perfil de profundidad (izq.) y velocidad (der.) en el escenario 1, corte longitudinal en el humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

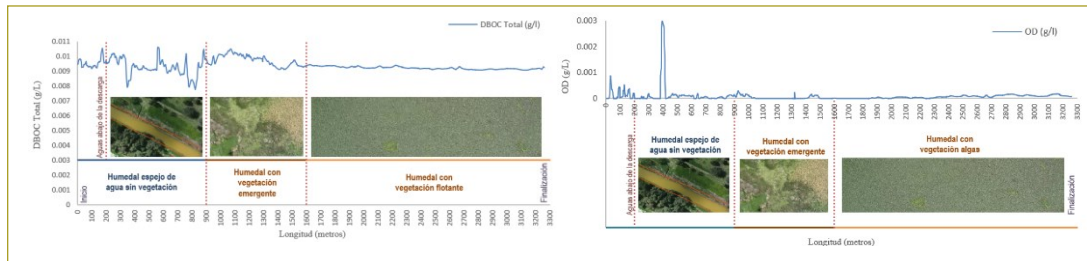


**Figura 10.** Distribución espacial de profundidades y velocidades en el escenario 1, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

**DBOC total y OD**

Podría relacionarse cómo la DBOC total fluctúa a lo largo del humedal a medida que la vegetación cambia. Sin embargo, los coeficientes de rugosidad asignados en las 70 superficies del dominio para las coberturas en el humedal no demuestran una influencia significativa en la evolución longitudinal de las sustancias; por lo tanto, dichas variaciones se asocian a la irregularidad de la batimetría del humedal y a estructuras hidráulicas existentes en el tránsito del caudal.



**Figura 11.** Evolución de la DBOC total y OD en el escenario 1, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

La concentración de la  $DBO_5$  en el humedal La Florida, sector 2, en toda su extensión para el escenario en estudio, es inferior al objetivo de calidad mínimo (20 mg/L) asignado a la calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006. En tal sentido, en las condiciones actuales, el humedal La Florida, sector 2, no excede la cantidad de materia orgánica permisible en cuerpos de agua de esta naturaleza en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

En cuanto al oxígeno disuelto, los resultados obtenidos en la modelación podrían indicar que tanto la cantidad de materia orgánica presente en el humedal como los procesos de degradación que consumen el oxígeno disponible reducen rápidamente a cero la concentración del oxígeno disuelto en el humedal (Baedecker, 1980). Sin embargo, debido a la diferencia del 59,3 % entre las concentraciones reales y simuladas (sobrestimación), los resultados no se consideran confiables y demuestran la necesidad de correr el modelo con muestreos de calidad tomados en condiciones diferentes de aguas quietas o estancadas, como las empleadas en el presente trabajo.

Por otra parte, con respecto a las variaciones en la concentración de oxígeno disuelto observadas a través del corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2, tampoco se encuentra una influencia relevante por la descarga existente en la zona con un caudal promedio de 0,72 L/s y una concentración de OD de 4,4 mg/L, debido a que ésta se realizó a una distancia de 200 m de la abscisa y de 400 m de donde se presenta el pico en el oxígeno.

Frente a este punto, conviene considerar el rol de la vegetación y la composición de los suelos como algunas de las variables que determinan la concentración de oxígeno disuelto en el humedal, debido a que la exis-

tencia de vegetación flotante (algas y plantas similares) que cubre el espejo de agua conforma una barrera que, según lo descrito por Kadlec & Wallace (2009), dificulta el intercambio de oxígeno con la atmósfera, lo que normalmente induce a la disminución del OD del agua y al desarrollo de condiciones anaerobias.

El oxígeno disuelto en este escenario es inferior al valor mínimo admisible establecido como criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

### Nitrógeno

En este escenario, la velocidad del agua en el humedal La Florida, sector 2, es tan baja ( $V_{prom} = 0,00107$  m/s) que las aguas se comportan como aguas en reposo, consideradas como comunidades cerradas en las que los materiales alimenticios se mantienen o acumulan por circulación a través de los diferentes niveles tróficos, especialmente cuando los flujos entrantes y salientes son pequeños (Fair & Geyer, 2001). Es así como se evidencia que el nitrógeno amoniacal<sup>9</sup> y el nitrógeno en forma de nitratos ( $NO_3^-$ ) y de nitritos ( $NO_2^-$ )<sup>10</sup> mantienen concentraciones casi constantes en el trayecto del humedal, con excepción del tramo comprendido entre la abscisa 600 y 900 m, en el que hay un descenso del

9. IBER considera únicamente el nitrógeno amoniacal total, sin hacer distinción entre amoníaco ( $NH_3$ ) y de ion amonio ( $NH_4^+$ ).
10. IBER considera en forma conjunta los nitritos y nitratos, ya que generalmente la conversión entre estas dos formas es muy rápida. No se distingue, por lo tanto, entre los procesos de nitrificación y nitratación.

nitrógeno amoniacal (3,08 mg/L) debido a los procesos de degradación de materia orgánica y de nitrificación, proceso este último que genera un aumento en la concentración de los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) de 9,7 a 10,51 mg/L.

El modelo hidrodinámico tiene una condición que perturba el modelo de calidad. Esto ocurre entre la abscisa 600 y 800 m, tramo en el que se encuentran dos alcantarillas por punto, que representan la condición real del humedal La Florida; sin embargo, en los resultados del modelo de calidad de agua se identifican como factores que alteran la solución numérica de IBER 2D.

De la abscisa 900 m en adelante, los valores de la concentración en el humedal de nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) retornan a los iniciales, con una concentración promedio de oxígeno disuelto en el humedal de 0,0506178 mg/L, oxígeno que desde el inicio de la simulación se consume en los procesos de degradación de materia orgánica y de nitrificación, sin que de forma natural, por procesos de reaeración, pueda recuperarse el oxígeno en el trayecto restante, a consecuencia del crecimiento desmedido de algunas especies vegetales (como buchón de agua) que cubren con manto vegetal el agua (Cárdenas, 2005).

Las concentraciones tanto del nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) como en forma de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el humedal La Florida, sector 2 (figura 12), representan el comportamiento de la calidad del agua muestreadas en los puntos 1 y 2 (tabla 7), adoptado por el modelo para el dominio de estudio, por otro lado, el punto de verificación del muestreo 4 presenta una relación inversa a los puntos 1 y 2, por lo que en la verificación del modelo el nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) fue subestimado y los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) fueron sobrestimados. Estos resultados confirman la necesidad de contar con un monitoreo constante de la calidad de agua de este humedal, con el fin de estudiar con mayor precisión la evolución de contaminantes en el interior de éste.

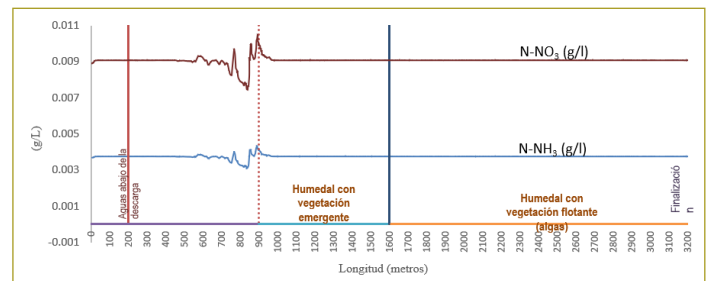
La concentración del nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y en forma de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el humedal La Florida, sector 2, en toda su extensión para el presente escenario, excede el objetivo de calidad mínimo asignado al recurso agua en humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

**Tabla 7**

Muestras de calidad N-NH y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el humedal La Florida, sector 2

Ítem		1	2	3	Verificación 4
Fecha muestreo		4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016	4/8/2016
Coordenadas / parámetro	X	992039	992047	992020	990689
	Y	1015217	1016127	1016517	1016886
Nitratos N-NO <sub>3</sub>	mg/L	9,07	9,53	12,9	3,11
Nitrógeno amoniacal N-NH <sub>3</sub>	mg/L	3,76	0,106	21,5	5,84

Fuente: CAR & EPAM S.A. ESP (2016).



**Figura 12.** Evolución del nitrógeno amoniacal y de nitratos en el escenario 1, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

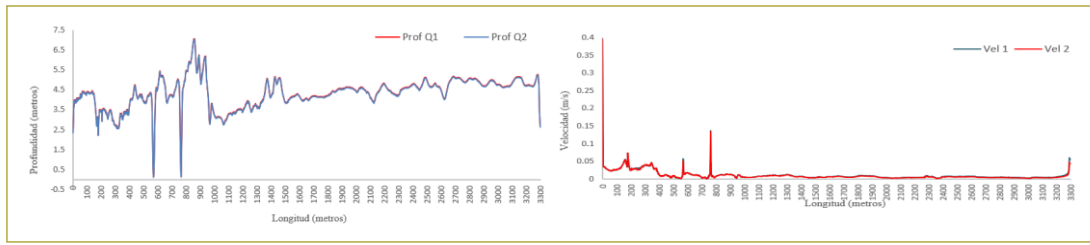
Fuente: Elaboración propia.

### Escenario 2. Apertura de la compuerta en el canal Chicú

Este escenario simula la recarga del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SH-MACI), a través de la captación de agua del río Bogotá realizada desde la estación Chicú en dirección al embalse La Isla, transportando los caudales de ingreso Q1 = 2,5 m<sup>3</sup>/s y Q2 = 1,87 m<sup>3</sup>/s por el humedal La Florida, bajo un calado con una condición inicial de 2,9 m.

Para la modelación se adoptaron los resultados de calidad de agua de la muestra tomada en junio de 2016 por el Laboratorio Ambiental de la CAR, sobre el punto de derivación de agua hacia el humedal La Florida, sector 2, en el canal Chicú; esto con el fin de determinar el comportamiento del humedal ante el aporte de contaminantes captados del río Bogotá.

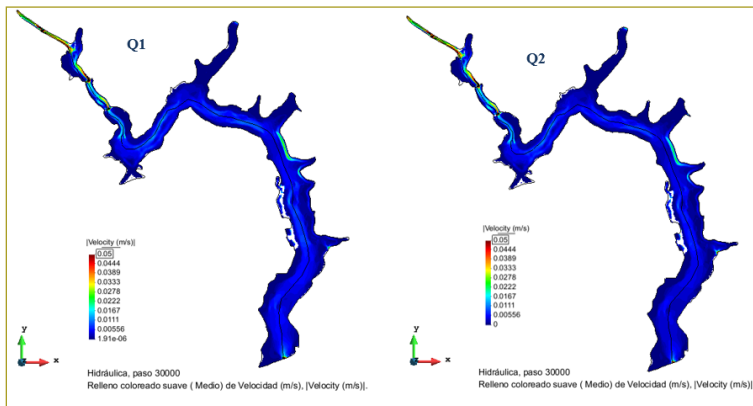
Para los caudales Q1 = 2,5 m<sup>3</sup>/s y Q2 = 1,87 m<sup>3</sup>/s se adoptaron las siguientes concentraciones: DBO<sub>5</sub> 7,4 mg/L, DBOC total 0,01402 kg/m<sup>3</sup>; OD 1,5 mg/L, 0,0015 kg/m<sup>3</sup>; nitratos N-NO<sub>3</sub> 0,371 mg/L, 0,000371 kg/m<sup>3</sup>; nitrógeno amoniacal N-NH<sub>3</sub> 4,322 mg/L, 0,004322 kg/m<sup>3</sup> y temperatura 16,5 °C.



**Figura 13.** Perfil de profundidad y velocidad en el corte longitudinal en el escenario 2, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

En este escenario, y para las condiciones reales de topografía del humedal La Florida, sector 2, se evidencia cómo en el instante 30.000 s el flujo se secciona en tres tramos identificados principalmente entre las abscisas 0 - 570 m, 570 - 780 m, 780 - 3290 m, como consecuencia de los pasos artesanales existentes en las coordenadas E: 990907, N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452, que en el modelo se encuentran asociados a dos alcantarillas por punto. Esta particularidad influye en los resultados de calidad, como podrá observarse en los resultados que a continuación se presentan, destacando que cada pico de velocidad en el perfil longitudinal obedece a los tramos próximos a estructuras hidráulicas, así como a la reducción ostensible de la sección superficial (canal de salida hacia el embalse La Isla).



**Figura 14.** Distribución espacial de la velocidad en el escenario 2, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

#### DBOC total

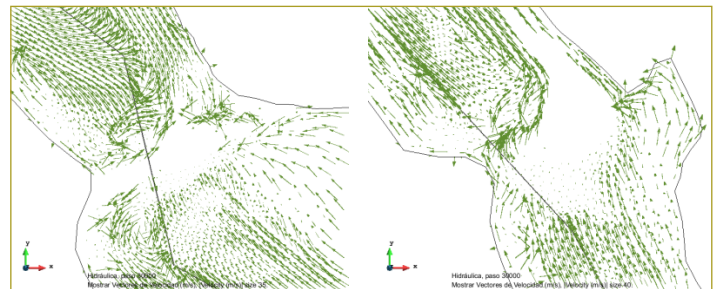
En la condición de flujo de los caudales Q1 y Q2, el modelo demuestra que para el instante 30.000 segundos el humedal La Florida, sector 2, tiene la capacidad para

tratar y mejorar la calidad del agua en términos de la cantidad de materia orgánica carbonosa aportada desde el río Bogotá, con 38 % de eficiencia en remoción, aproximadamente.

$$\text{Eficiencia} = \frac{[\text{Afluente}] - [\text{Efluente}]}{[\text{Afluente}]} = \frac{[0,01402\%] - [0,00874\%]}{[0,01402\%]} * 100 = 38 \%$$

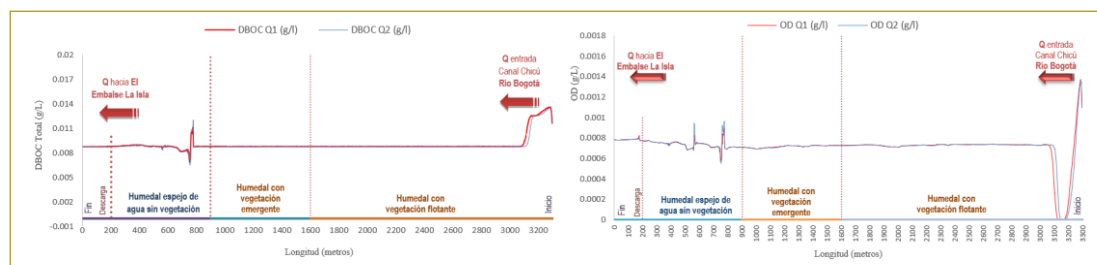
No obstante, entre las abscisas 0 y 800 m, sobre el tramo del humedal que no cuenta con vegetación espejo de agua (salida hacia el embalse La Isla), en el perfil longitudinal se observa una variación importante en la concentración de la DBOC total; sin embargo, en este tramo no hay aportes de caudal o contaminantes que influyan en la variación de la DBOC total, pero si la existencia en las abscisas 570 m y 780 m de dos alcantarillas por cada punto, que generan reflujos y remansos de agua, como muestran los vectores de velocidad para los Q1 y Q2 (figura 5); por lo tanto, en el modelo numérico se producen tales resultados.

A pesar de las concentraciones de DBOC total aportadas por el caudal de ingreso del río Bogotá, por medio de la captación de agua del canal Chicú, la concentración de la DBO<sub>5</sub> en el humedal La Florida, sector



**Figura 15.** Vectores de velocidad de los caudales Q1 y Q2 en el escenario 2, humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 16.** Evolución de la DBOC total y OD en el escenario 2, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

2 (expresada en mg/L), es inferior al objetivo de calidad mínimo asignado a la calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006. Es decir, que se cumple con el objetivo de calidad establecido en este parámetro para el cuerpo lagunar.

### Oxígeno disuelto

Con respecto a la concentración inicial de oxígeno disuelto en el caudal de entrada del río Bogotá, se obtiene una reducción en la concentración de OD del 52 %, aproximadamente (OD entrada = 1,5 mg/L y OD salida = 0,78 mg/L), como resultado posible del consumo de la materia orgánica carbonosa, de los procesos de nitrificación, pero en mayor medida por la mezcla con el agua del humedal que tiene como condición inicial una concentración de 0,19 mg/L de OD. Debido a estos resultados, es necesario alimentar el modelo con varios muestreos de calidad para minimizar la diferencia obtenida entre las concentraciones reales y simuladas en este parámetro.

A pesar de la recuperación del oxígeno disuelto en algunos tramos del humedal La Florida, sector 2, la dinámica de este cuerpo lagunar no logra recuperar ni alcanzar el valor mínimo admisible establecido como criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Para este escenario, es importante considerar la influencia de algunas especies vegetales que cubren el espejo de agua en el cuerpo lagunar, que se han desarrollado en forma descontrolada en el humedal La Florida, sector 2, obstaculizando los procesos de

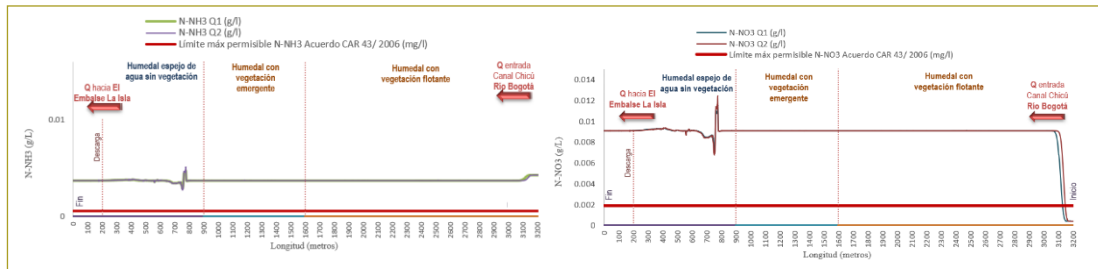
reaireación natural. Esto como consecuencia de la alta presencia tanto de amoníaco como de nitratos, que son nutrientes esenciales para la fotosíntesis que estimulan el crecimiento excesivo de plantas en el proceso denominado eutrofización y que afectan directamente el nivel de oxígeno en el agua (Chapra, 1997).

### Nitrógeno

La evolución de la concentración del nitrógeno amoniacal ( $N-NH_3$ ) y nitratos ( $NO_3^-$ ) tiene un comportamiento muy similar al primer escenario en un tramo con una longitud aproximada de 2200 m, caracterizado por vegetación flotante y emergente, que denota el grado de eutrofización en el que el nitrógeno actúa como un fertilizante que sobrestimula el crecimiento de plantas. En la longitud del tramo restante, tanto el nitrógeno amoniacal ( $N-NH_3$ ) como los nitratos ( $NO_3^-$ ) presentan unos picos de ascenso y descenso, que como en los anteriores parámetros se asocian a la influencia de las estructuras hidráulicas existentes, en los que el modelo de calidad se afecta por los reflujos y remansos de agua que se generan en el trayecto del agua.

Debido a que el humedal La Florida, sector 2, integra el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), es inevitable el ingreso de agua desde el río Bogotá, que aporta al cuerpo lagunar una concentración importante de contaminantes; para el caso del nitrógeno amoniacal ( $N-NH_3$ ) la concentración inicial del río Bogotá, luego de su tránsito por el humedal, es reducida en un 0,57 mg/L, aproximadamente, equivalente a un porcentaje de eficiencia en remoción del 13,2 %.

$$Eficiencia = \frac{[Afluente] - [Efluente]}{[Afluente]} = \frac{[0,00432\%] - [0,00375\%]}{[0,00432\%]} * 100 = 13,2\%$$



**Figura 17.** Evolución de nitrógeno en el escenario 2, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), la concentración de entrada se incrementa en 8,70 mg/L ( $\text{NO}_3^-$  Entrada = 0,37 mg/L y  $\text{NO}_3^-$  Salida = 9,08 mg/L), como resultado de la prevalencia de la concentración inicial de nitratos en el humedal (9,07 mg/L), así como por procesos de nitrificación, donde la mayor presencia de nitratos como nutrientes esenciales para la fotosíntesis fomenta el crecimiento excesivo de las plantas (Chapra, 1997).

De acuerdo con lo expuesto, el cuerpo lagunar no cumple en nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) con el objetivo de calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

### **Perturbación por alcantarillas**

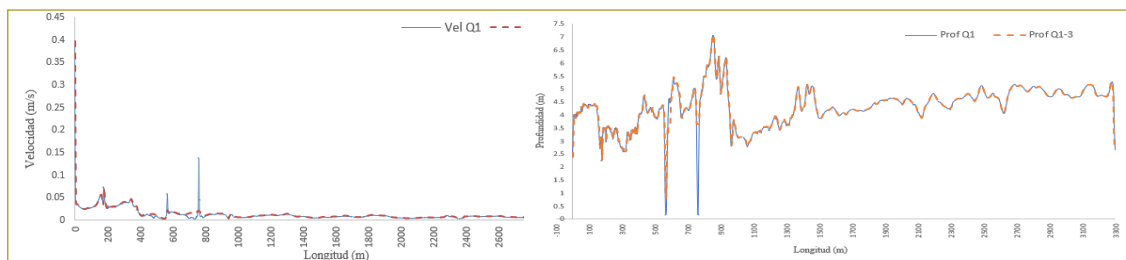
Teniendo en cuenta el efecto identificado en los resultados de los modelos de calidad para las condiciones sin apertura de compuerta  $Q_0$  y con apertura de compuertas para los caudales  $Q_1$  y  $Q_2$  con calado inicial de 2,9 m, concerniente a la existencia en las coordenadas E: 990907, N: 1016606 y E: 991013, N: 1016452 de dos pasos artesanales entre las fincas existentes, y que en el modelo se asocian a dos alcantarillas por punto,

se tomó la decisión de modificar el modelo digital de elevación, suprimiendo las alcantarillas instaladas, con el fin de confirmar que la perturbación al modelo de calidad obedece a dichas estructuras.

El modelo digital de elevación con el uso de IBER 2D, se modificó manualmente con la edición de la elevación original, transformando la topografía real del humedal La Florida, sector 2, y adoptando en el cuerpo lagunar que el caudal fluye sin la obstrucción de estructuras hidráulicas.

La comparación de los resultados en las modelaciones permite inferir que la alcantarilla, situada en las coordenadas E: 990907, N: 1016606, genera un incremento igual a tres veces la velocidad del tránsito del  $Q_{1-3}$ , sin la existencia de la estructura hidráulica; así mismo, con la alcantarilla ubicada en las coordenadas E: 991013, N: 1016452 el incremento en la velocidad es igual a siete veces sin la existencia de la estructura hidráulica.

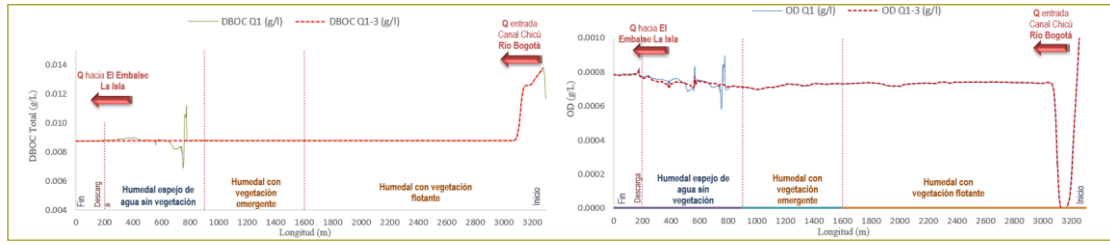
Las perturbaciones en las concentraciones de DBOC, OD y nitrógeno antes mencionadas no desmejoran la calidad del agua en la salida del humedal sector 2, es decir, en el punto de entrega del caudal hacia el embalse La Isla. Según los resultados de las modelaciones, se concluye que las concentraciones de



**Figura 18.** Perfil de velocidad y profundidad en el escenario 2  $Q_1$ ,  $Q_{1-3}$ , en el corte longitudinal en el humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.





**Figura 19.** Comparación de la evolución temporal de la DBOC y OD en el escenario 2 para Q1, Q1-3, editando el MDE (Clnicial 2,9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

las sustancias entre las abscisas 0 y 100 m se estabilizan y se entregan superando las variaciones en los puntos indicados (figuras 19 y 20).

que las velocidades son tan bajas que tienden a aguas estancadas, por lo que hay menos oxígeno y menos autodepuración (Seoáñez, 1999).

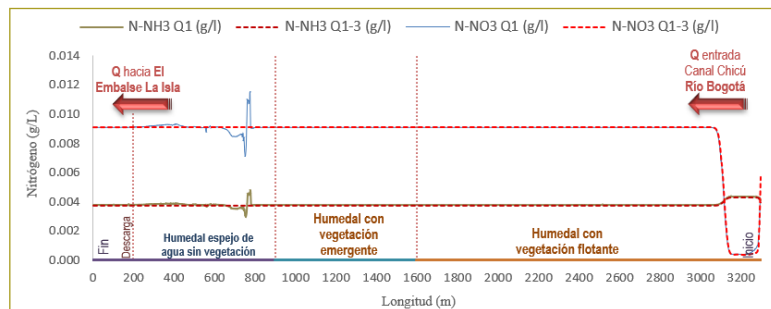
### Escenario 3. Simulando una descarga de agua residual doméstica

Adoptando las condiciones hidrodinámicas del escenario 2 con apertura de compuertas para los caudales  $Q1 = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q2 = 1,87 \text{ m}^3/\text{s}$ , se incorporó una descarga de agua residual doméstica (ARD), con características de parámetros dentro de los límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales definidos en el artículo 8 de la Resolución MADS 631 de 2015. La descarga se incluyó en las coordenadas E: 991935, N: 1016250 en el interior del dominio, en la abscisa 2100 m, donde el humedal en el instante 30000 segundos tiene una profundidad promedio de 4 m en dicho punto.

Teniendo en cuenta que la velocidad del agua influye en el proceso de autodepuración, no se adoptó como escenario de simulación el escenario 1, debido a

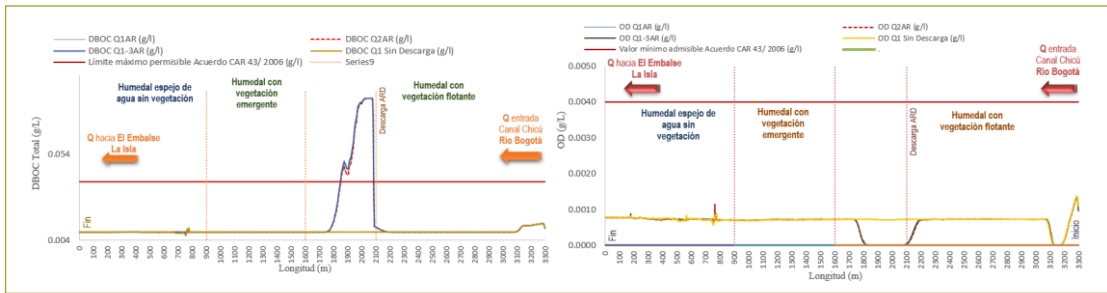
### DBOC total

En las condiciones de calidad del humedal La Florida, sector 2, entre las que sobresalen la influencia por el aporte de los contaminantes procedentes del río Bogotá ante la apertura de la compuerta en el canal Chicú, el vertimiento de agua residual doméstica entre las abscisas 2100 m y 1850 m impacta negativamente el cuerpo de agua, excediendo el objetivo de calidad del Acuerdo CAR 43 de 2006. Sin embargo, en un trayecto de 350 m aproximadamente entre el punto de descarga y la abscisa 1850 m, el vertimiento se asimiló en el cuerpo lagunar, la materia orgánica es degradada hasta alcanzar una concentración de  $4,7 \text{ mg/L}$  en  $\text{DBO}_5$ , valor que se mantiene hasta la salida del humedal, sin evidenciar el desmejoramiento de las condiciones iniciales del cuerpo lagunar.



**Figura 20.** Comparación de la evolución temporal del nitrógeno en el escenario 2 para Q1 y Q1-3, editando el MDE (Clnicial 2,9 m - Sin alcantarillas - Instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 21.** Evolución de la DBOC total y OD escenario 3, con una descarga de ARD en el corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

### Oxígeno disuelto

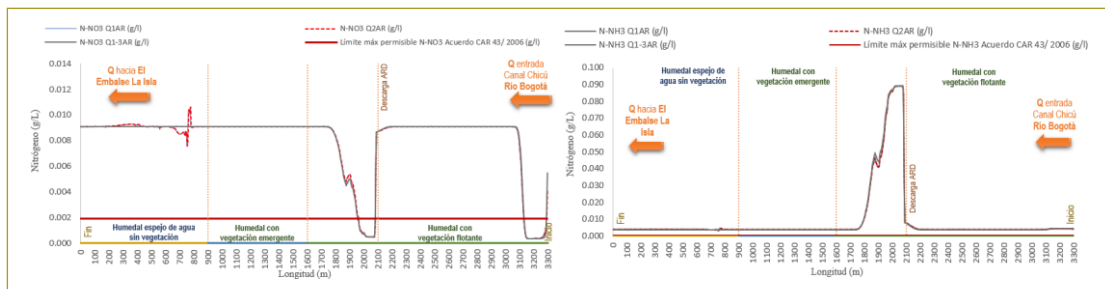
Después de la descarga de agua residual doméstica, se presenta un marcado descenso en el oxígeno disuelto desde la abscisa 2100 m hasta llegar a niveles de oxígeno disuelto iguales a cero mg/L. Dicha condición anóxica se conserva en aproximadamente 250 m, incluida la abscisa 1800 m ante procesos de degradación de materia orgánica, procesos de nitrificación, y como producto de la mezcla con el agua del humedal, que tiene como condición inicial una concentración baja de OD de 0,19 mg/L.

Los niveles de oxígeno disuelto en el humedal La Florida, sector 2, luego de la descarga de agua residual y dilución en el cuerpo lagunar, no cambian las condiciones de calidad del escenario 2; es decir, continúa siendo crítica y no muestra recuperación por causa de procesos de reaireación, variación de la topografía, cambios de dirección y velocidad del agua, incumpliendo en todo el tránsito del humedal (3290 m) el criterio de calidad de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

### Nitrógeno

En el caso de los nitratos, la concentración aportada en el vertimiento por el efluente de ARD tratado de 0,513 mg/L es inferior al nivel de nitratos del humedal La Florida, sector 2, que se mantiene en un promedio de 9,07 mg/L (valor muestreado en el punto 1 del humedal). En este sentido, se observa luego de la descarga puntual el descenso de los nitratos, hasta llegar a una concentración de 0,517 mg/L. Posteriormente, en un tramo de unos 300 m entre las abscisas 1800 m y 2100 m, los nitratos ascienden y alcanzan de nuevo el nivel inicial, sin que éste vuelva a recuperarse a lo largo del dominio, por oxidación bacteriana de materia orgánica y nitrificación.

La producción de nitratos aguas abajo del punto de descarga de agua residual doméstica concuerda con el agotamiento del oxígeno disuelto (condiciones anóxicas), que desde la abscisa 1800 m mantiene una concentración de 9,07 mg/L, aproximadamente, demostrando niveles de eutrofización en el cuerpo lagunar y el incumplimiento del objetivo de calidad de agua de humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá,



**Figura 22.** Evolución del nitrógeno en el escenario 3, corte longitudinal del humedal La Florida, sector 2 (instante 30.000 s).

Fuente: Elaboración propia.

clasificado como clase III con un horizonte proyectado al año 2020, según el Acuerdo CAR 43 de 2006.

Las condiciones anóxicas entre las abscisas 1800 m y 2100 m manifiestan la alta presencia de nitrógeno amoniacal que alcanza el cuerpo lagunar después de la descarga de agua residual doméstica simulada, con concentraciones de 88,9 mg/L, el cual se produce por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno, por la hidrólisis de la urea y también por la reducción de los nitratos en condiciones anaerobias (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010).

## CONCLUSIONES

Para el paso de tiempo analizado (30.000 s) y a través de la visualización de los vectores de dirección de la velocidad en torno a las estructuras hidráulicas instaladas (alcantarillas), se demuestra la formación de reflujos y remansos de agua que, tal como se evidencia en los resultados, afectan directamente el modelo de calidad. En cambio, la asignación de los coeficientes de rugosidad en las 70 superficies del dominio de estudio, conforme a las coberturas existentes en el humedal, no demostró una influencia significativa en la evolución de la concentración de los contaminantes.

Los cambios en los componentes de velocidad del flujo, así como la discontinuidad en el calado, en el modelo IBER influyen directamente en la evolución de la concentración de los contaminantes, aspectos evidenciados cuando en el modelo hidrodinámico se introducen estructuras hidráulicas, tal como ocurrió en el presente trabajo con las alcantarillas instaladas en el sector occidental del humedal La Florida, sector 2.

A la característica del modelo hidrodinámico de IBER, relativo a admitir zonas con presencia de remansos o zonas de reflujos en algunos sitios, que implicaría aumentos en las láminas de agua (Sierra, 2015), se suma la influencia de estas zonas en los resultados del modelo de calidad, que reflejan un comportamiento similar a una descarga de agua residual debido a que elevan los niveles de contaminación de todas las sustancias analizadas (DBOC, N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub>); así mismo, ocasiona un ascenso y un descenso bruscos en el oxígeno disuelto en algunos tramos. En consecuencia, estas características del modelo IBER 2D se identifican como restricciones para cuando el análisis de resultados implica hacer cortes longitudinales, debido a que los datos no

demuestran consistencia en algunas secciones, tanto en las condiciones hidráulicas como de calidad (escenario 1, principalmente).

El mejor ajuste alcanzado del modelo con respecto a los valores reales medidos en campo en el punto 4 del humedal La Florida, sector 2 (salida hacia el embalse La Isla) lo constituye la concentración de la DBOC total (6 % de diferencia entre los valores reales y simulados). En contraste, el modelo no obtuvo un buen ajuste de las concentraciones de OD, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub>, habida cuenta de que, según los resultados de las pruebas de ensayo y error realizadas, se evidencia que con todos los coeficientes cinéticos empleados las diferencias entre las concentraciones reales y simuladas fueron superiores al 55 %. Por lo tanto, los resultados de las simulaciones para determinar el comportamiento de las concentraciones de OD, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub> no son confiables y presentan un grado de incertidumbre importante.

En este sentido, una vez verificados los datos de entrada y las constantes alimentadas en el módulo de calidad de IBER, se encuentra que la falta de ajuste en las concentraciones reales y simuladas de OD, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>3</sub>, obedece a una deficiencia en los datos de calidad empleados, principalmente en razón de que los muestreos de calidad se tomaron en condiciones de aguas quietas o estancadas, no se hizo el seguimiento a la masa de agua y algunos resultados de las muestras, como la relación de nitrógeno amoniacal y nitratos en los puntos 1 y 2, no son consecuentes con la relación de estas sustancias para las muestras 3 y 4.

De acuerdo con la simulación del escenario 3 en el humedal La Florida, sector 2, correspondiente a una descarga de agua residual doméstica (ARD) con características de calidad dentro de los límites permisibles en los vertimientos específicos a cuerpos de aguas superficiales definidos en el artículo 8 de la Resolución 631 de 2015, promulgada por el MADS, se puede establecer que el efluente tratado fue asimilado por el humedal en un tramo aproximado de 350 m, punto a partir del cual el cuerpo de agua retorna a las condiciones previas a la descarga, manteniendo hasta el punto de salida concentraciones constantes (abscisas 1850 m a 0 m), sin que se desmejore en la salida, en ninguna medida, la calidad de agua del cuerpo lagunar.

En la bibliografía existente se demuestra la capacidad de remoción de contaminantes en humedales naturales en el caso del humedal La Florida, sector 2, de con-

formidad con los resultados obtenidos. Este servicio ambiental se presta principalmente para la depuración de algunos contaminantes aportados con el agua que ingresa desde el río Bogotá por la compuerta ubicada en el canal Chicú, como es el caso de la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa. Sin embargo, las condiciones iniciales de calidad, como por ejemplo los bajos niveles de oxígeno disuelto y la restricción a la que se encuentra sometido este cuerpo lagunar por la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), pueden limitar esta función.

Los bajos niveles de oxígeno disuelto (OD) en las simulaciones realizadas en los escenarios 1 a 3 reflejan la necesidad de sanear el agua aportada desde el río Bogotá a la altura del canal Chicú, como principal afluente del humedal La Florida, sector 2; no obstante, teniendo en cuenta que para las condiciones actuales no es posible dejar de operar el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), se podría plantear la implementación de estructuras que favorezcan la reaireación, así como la inyección de oxígeno puro o aire a través de aireadores superficiales o por medio de difusores de inyección.

Siempre y cuando se trate de efluentes tratados, especialmente de aguas residuales domésticas (ARD), para optimizar el control y evitar impactos con otro tipo de sustancias y descargas al ecosistema, se considera viable admitir en el humedal La Florida, sector 2, descargas de efluentes con tratamientos secundarios y terciarios debido a que pueden contribuir y mejorar la calidad de agua de este cuerpo lagunar, todo en el marco del cumplimiento de los objetivos de calidad mínimos asignado a humedales ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá con clase III, según el Acuerdo CAR 43 de 2006 y de los planes de manejo ambiental de éstos. Por lo anteriormente descrito, el uso de humedales en el manejo de aguas residuales puede contemplarse como una opción para el humedal en comento y abre la puerta para que se lleven a cabo otros estudios en los humedales existentes que cuenten con caudales de entrada y salida continuos.

El humedal La Florida, sector 2, presenta altos niveles de fósforo y nitrógeno total, que aceleran el proceso de eutrofización (Baracaldo, 2017), por lo tanto, con el fin de que el servicio ambiental de depuración de agua tenga resultados óptimos, es necesario implementar técnicas o métodos para la restauración, teniendo presente

que según se demuestra en los resultados del escenario 1, la autopurificación natural y la dilución con aguas no contaminadas (agua escorrentía) son mínimas.

IBER 2D es una herramienta útil para la modelación hidráulica y evaluar la evolución espaciotemporal de algunas sustancias contaminantes en humedales naturales que no se encuentren estratificados. Además, tiene una plataforma amigable para los usuarios y una ventaja importante frente a otros modelos, por tratarse de un *software* libre; sin embargo, como limitantes para su uso se encuentran la demanda computacional de las modelaciones (mínimo 72 horas), la no inclusión de algunas sustancias y variables en el actual módulo de calidad, como es el caso del fósforo, al igual que la admisión de zonas con presencia de remansos o zonas de reflujos. Este último aspecto se debe a que incide directamente en los resultados de los modelos hidráulicos y de calidad.

A lo largo del presente trabajo se evaluó la capacidad del modelo IBER 2D para la modelación hidráulica y de calidad de humedales naturales, y se evidenciaron fortalezas y limitaciones de dicho *software* para las condiciones analizadas. Sin embargo, a causa de la deficiente información de calidad existente en este tipo de cuerpos de agua, se recomienda establecer puntos de control y monitoreo en el humedal La Florida, sector 2, en cada uno de los afluentes y efluentes, en coordinación con la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones (SHMACI), con el fin de disponer de información válida para calibrar el modelo y ajustarlo al comportamiento de este cuerpo lagunar.

### Agradecimiento

La autora desea expresar su agradecimiento a su director de proyecto, ingeniero Héctor Matamoros, por la confianza, conocimiento y apoyo brindados, así como a la Escuela Colombiana de Ingeniería y a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, por aportar los insumos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

### REFERENCIAS

Arcement, G. & Schneider, V. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. Denver: United States Government. Retrieved from <http://dpw.lacounty.gov/lacfd/wdr/files/WG/041615/Guide%20for%20Selecting%20n-Value.pdf>.

- Bowie, G., Mills, W., Porcella, D., Campbell, C. & Chamberlin, C. (1985). *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling* (Second Edition). U.S. Environmental Protection Agency.
- CAR & EPAM S.A. ESP (2016). Realizar los diseños detallados para la reconfiguración hidromorfológica de los humedales La Florida, Gualí, Tres Esquinas, y laguna del Funzhé, laguna de la Herrera, Tierra Blanca y Neuta; determinar las capacidades de asimilación de nutrientes y contaminantes, y proponer las acciones a realizar para la rehabilitación y recuperación de sus hábitats. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Contrato 1390 de 2014.
- Cárdenas, J. A. (2005). Calidad de aguas para estudiantes de ciencias ambientales. Recuperado de <https://www.amazon.com/Calidad-aguas-estudiantes-ciencias-ambientales/dp/9588247306>.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water Quality Modeling*. Nueva York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Consortio Cuencas & CAR. (2006). Modelación de la calidad de las corrientes hídricas cuencas de segundo orden de la jurisdicción CAR. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Contrato 279 de 2016.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, F. & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro Agua). Recuperado de <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>.
- Díaz, M. B. E. (2004). Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas - Observatorio Ambiental de Bogotá (tesis de maestría). Bogotá: Universidad de los Andes. Recuperado de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/modelacion-de-la-calidad-del-agua-en-el-interceptor-rio-bogota-en-los-tramos-fucha-tunjuelo-canoas>.
- Fair, G. M. & Geyer, J. C. (2001). *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales* (vol. II). México: Limusa. Recuperado de <https://www.scribd.com/document/238705081/Fair-Geyer-Okun-Cap1-5-8>.
- Fisher, K. & Dawson, H. (2003). Roughness Review (vol. W5A-057). Londres: Environment Agency DEFRA. Retrieved from [http://www.river-conveyance.net/ces/documents/RoughnessReviewFinal\\_July07.pdf](http://www.river-conveyance.net/ces/documents/RoughnessReviewFinal_July07.pdf).
- Galema, A. (2009). Vegetation Resistance Evaluation of Vegetation Resistance Descriptors for Flood Management. Berlin: University of Twente. Recuperado de [http://essay.utwente.nl/59345/1/scriptie\\_A\\_Galema.pdf](http://essay.utwente.nl/59345/1/scriptie_A_Galema.pdf).
- Kadlec, R. (1990). Overland Flow in Wetlands: Vegetation Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(5), 691–706. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:5\(691\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:5(691)).
- Kadlec, R. & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Mancera, E., Peña, E., Giraldo, R. & Santos, A. (2003). *Introducción a la modelación ecológica. principios y aplicaciones*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Medeiros, S. C., Hagen, S. C. & Weishampel, J. F. (2012). Comparison of floodplain surface roughness parameters derived from land cover data and field measurements. *Journal of Hydrology*, 452, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.043>.
- Min, J.-H. & Wise, W. R. (2009). Simulating Short-Circuiting Flow in a Constructed Wetland: The Implications of Bathymetry and Vegetation Effects. *Hydrological Processes*, 23(6), 830–841. <https://doi.org/10.1002/hyp.7219>.
- Min, J.-H. & Wise, W. R. (2010). Depth-Averaged, Spatially Distributed Flow Dynamic and Solute Transport Modelling of a Large-Scaled, Subtropical Constructed Wetland. *Hydrological Processes*, 24(19), 2724–2737. <https://doi.org/10.1002/hyp.7686>.
- Paudel, R., Grace, K. A., Galloway, S., Zamorano, M. & Jawitz, J. W. (2013). Effects of hydraulic resistance by vegetation on stage dynamics of a stormwater treatment wetland. *Journal of Hydrology*, 484, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.031>.
- Phillips, J. & Tadayon, S. (2007). *Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and Non-Vegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizona*. Virginia: U.S. Geological Survey.
- Shelef, O., Gross, A. & Rachmilevitch, S. (2013). Role of Plants in a Constructed Wetland: Current and New Perspectives. *Water*, 5(2), 405–419. <https://doi.org/10.3390/w5020405>.
- UNAL & EAAB. (2008). Modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá: EAAB, Universidad Nacional de Colombia, Contrato Interadministrativo 9-07-26100-1059 de 2008. Recuperado de <file:///C:/Users/Daniel/Desktop/campanas-de-monitoreo-calidad-del-agua-rio-bogota.pdf>.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow: A Review. *Hydrobiology*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>.