

Simulación de calidad del agua en un tramo de la sub-cuenca río alto Bogotá en el periodo 2014-2016 a partir del modelo HEC-RAS

Water quality simulation in the rio alto Bogotá sub-basin stretch in 2014-2016 period based on the HEC-RAS model

Fajardo MD, Agudelo VR. Simulación de calidad del agua en un tramo de la sub-cuenca río alto Bogotá en el periodo 2014-2016 a partir del modelo HEC-RAS. Rev Colombiana Cienc Anim. Recia. 2019; 11(2):Articulo720. DOI: <https://doi.org/10.24188/recia.v11.n1.2019.720>

Universidad de Sucre, Colombia


Los autores permiten a RECIA reimprimir el material publicado en él. En caso de que un autor quiera traducir o usar una publicación parcial o completa de nuestro Diario, el autor debe obtener un permiso por escrito del editor de la revista.

Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA está distribuido bajo una Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional.




Simulación de calidad del agua en un tramo de la sub-cuenca río alto Bogotá en el periodo 2014-2016 a partir del modelo HEC-RAS

Water quality simulation in the rio alto Bogotá sub-basin stretch in 2014-2016 period based on the HEC-RAS model

Daniela Fajardo M. Ing Amb.
Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Ambiental, Bogotá D.C., Colombia.
daniela.fajardom@unilibrebog.edu.co
 <https://orcid.org/0000-0002-0241-5467>

DOI: <https://doi.org/10.24188/recia.v11.n2.2019.720>

Rafael Nikolay Agudelo VM.Sc.
Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Ambiental, Bogotá D.C., Colombia.
rafaeln.agudelov@unilibre.edu.co
 <https://orcid.org/0000-0002-6646-7725>

Recepción: 26 Abril 2019

Aprobación: 15 Septiembre 2019

Publicación: 20 Septiembre 2019

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio cuantitativo en la subcuenca río alto Bogotá con relación a las condiciones de calidad químicas y biológicas en las que se encuentra el tramo del río estudiado y su estado en cuanto a calidad del recurso hídrico, para lo cual, se analizaron los parámetros de temperatura del agua (T° Agua), demanda biológica de oxígeno (DBO) y oxígeno disuelto (OD). El estudio se fundamentó en la recolección y análisis de información, para ser aplicado en el software libre HEC-RAS (ver. 5.0.4.). Se llevó a cabo la calibración del modelo hidrodinámico a partir de las velocidades tomadas en campo, alcanzándose una diferencia entre los valores reales y los valores de salida del 22.58%. Una vez calibrado el modelo hidrodinámico, se efectuó la simulación de calidad de agua a partir de las condiciones de mayor vulnerabilidad del recurso hídrico en el periodo 2014-2016 y posterior a ello, su calibración en donde se ajustaron los valores de los parámetros de nutrientes y la radiación solar obteniéndose así una variación promedio de error del 1-5%. Seguido a la calibración, se representaron cartográficamente los resultados para facilitar el entendimiento de los parámetros simulados y evidenciar el comportamiento en el río. Estos se compararon contra los objetivos de calidad del agua propuestos por la autoridad ambiental para la clase I y II (Acuerdo CAR No 43/2006) encontrándose que con respecto a *DBO* y *OD* las altas cargas contaminantes recibidas por el río no permiten alcanzar los objetivos de calidad hídrica.

Palabras clave: Contaminación del recurso hídrico, Modelo de calidad del agua, Modelo hidrodinámico, Parámetros de calidad hídrica, Río Bogotá.

ABSTRACT

This work presented a quantitative study in the rio alto Bogotá sub-basin with relation to the chemical and biological conditions in which is found the studied river stretch and state regarding the quality as hydric resource. In this case, is was performed an analysis of water temperature (T° water), Biological Oxygen Demand (BOD) and Dissolved Oxygen (OD) parameters. The following research was grounded on the collection and analysis of information, to be later applied to the free software, HEC-RAS (ver. 5.0.4). The hydrodynamic calibration was conducted from the velocities taken in fieldwork, tracing a difference between the real values and output values of 22.58%. Once calibrated the hydraulic model, water and quality simulation is conducted from the conditions of greatest vulnerability hydric resources in 2014-2016 period and subsequently, its calibration where the values of the parameters of nutrients and solar radiation were adjusted, thus obtaining an average error variation of the 1-5%. Followed the calibration, the results were represented cartographically to facilitate the understanding of the simulated parameters and demonstrate the behavior in the river. This were compared to the proposed water quality objectives by the environmental authorities for class I and II (agreement CAR No. 43/2006), encountering that regarding BOD and OD the high contaminant loads received by the river would not result in the achievement of the hydric quality objectives.

Keywords: Hydrodynamic model, Pollution of water resources, Río Bogotá, Water quality model, Water quality parameters.

Como citar (Vancouver).

Fajardo MD, Agudelo VR. Simulación de calidad del agua en un tramo de la sub-cuenca río alto Bogotá en el periodo 2014-2016 a partir del modelo HEC-RAS. Rev Colombiana Cienc Anim. Recia. 2019; 11(2):Articulo720. DOI: <https://doi.org/10.24188/recia.v11.n1.2019.720>

INTRODUCCIÓN

El agua constituye un elemento vital y articulador de la naturaleza, por lo tanto, su manejo debe ser un tema prioritario de la gestión ambiental y el ordenamiento territorial, debido a que los recursos hídricos se interrelacionan con otros recursos naturales, el ambiente y las actividades humanas (1). Dentro del manejo que se debe dar a los cuerpos de agua, la calidad hídrica es un factor imprescindible a la hora de preservar las potencialidades de uso del recurso. La calidad de los afluentes debe ser analizada desde dos posibles interpretaciones, la primera, el punto de vista funcional que corresponde a la capacidad de respuesta de la fuente hídrica a los usos que se pueden obtener de ella; y el punto de vista ambiental que representa aquellas condiciones que deben darse en el agua para mantener un ecosistema equilibrado y cumplir unos determinados criterios (2). Dichas circunstancias se ven afectadas directamente por la acción humana, puesto que influyen sobre el régimen natural del ciclo hidrológico, ocasionando impactos negativos tanto en términos de cantidad del agua como en calidad y su variación espacio-temporal (2). Es por esto que, La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) realizada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente MADS) (3) se refiere a la calidad del agua como un factor limitante en la disponibilidad del recurso hídrico restringiendo el rango de posibles usos; por lo que, es importante realizar una mejor planificación de los cuerpos de agua para su correcto uso y aprovechamiento.

Conforme a lo anterior y en la búsqueda de aplicaciones informáticas que faciliten realizar un análisis para la gestión de los recursos hídricos, se han elaborado modelos que permiten evaluar el efecto producido por el desarrollo humano y de cómo este incide en la calidad hídrica de un cuerpo de agua superficial; generando así, mecanismos que ayuden a simular el estado actual de un río y posterior a ello establecer escenarios de caso. Estos modelos han venido tomando mayor importancia, debido a que es una herramienta que posibilita plasmar el comportamiento hidrológico y la calidad de agua de una corriente; en donde favorece su entendimiento y permitiendo generar predicciones sobre algún factor (4).

Varios autores han evaluado el comportamiento de un cuerpo fluvial a partir del uso de programas informáticos especializados para poder evidenciar la capacidad de resiliencia que los cuerpos de agua poseen y para entender las relaciones causa-efecto existentes. Chihhao et al (5), exponen una alternativa para la simulación de calidad hídrica a partir de la integración de dos modelos básicos de calidad del recurso (QUAL2K y HEC-RAS) y comparan dichos resultados con los datos de monitoreo que existen para el río Keelung, Taiwán. Por otro lado, Halaj y colaboradores (6), presentan algunas características del software HEC-RAS para la simulación del transporte de un contaminante en un cuerpo hídrico. Mohammad et. al. (7) evalúan los sedimentos en embalses de la presa de Mosul en Iraq, usando como alternativa el modelo HEC-RAS con el cual se describe la tendencia de los sedimentos en el sitio de interés. Ahora bien, para el contexto de la presente investigación, dentro de los estudios más relevantes realizados en el río Bogotá se desarrolló un proyecto entre la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y la Universidad Nacional de Colombia en el periodo 2008–2013 (convenio 9-07-26100-1059), en el cual se efectuó la modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá a partir del modelo QUAL2E. El proyecto se dividió en siete productos técnicos que permitieron llevar a cabo la modelación dinámica del afluente en las cuencas alta, media y baja, en actividades conjuntas para poder estimar la capacidad de asimilación de cargas contaminantes en el río y determinar las condiciones actuales y a futuro, contemplando obras proyectadas para el saneamiento del cuerpo de agua (8). En otro estudio realizado por Camacho y Rodríguez (9) fue desarrollado un modelo a raíz de la problemática sobre la excedencia de los límites de calidad del agua para uso en consumo humano en el tramo de Villapinzón – Tibitoc, incorporando incertidumbre.

Pese a los modelos realizados por algunas instituciones oficiales y universidades, se aprecia que para el caso específico de la subcuenca río alto Bogotá, no se ha desarrollado un modelo que permita visualizar el comportamiento de la calidad del agua que tiene el cuerpo receptor a pocos kilómetros de su nacimiento en condiciones de mayor vulnerabilidad en términos de caudal junto con los parámetros de calidad hídrica, para su posterior análisis y evaluación; además de esto, poder generar una línea base para las personas interesadas permitiendo así, plantear alternativas que posibiliten el mejoramiento del preciado recurso teniendo en cuenta los objetivos ambientales pactados por las autoridades ambientales junto con la reglamentación ambiental vigente. Basándose en la consideración anterior, se propuso en el presente estudio ejecutar una simulación de calidad hídrica, a partir del software libre HEC-RAS, el cual integra el modelo hidrodinámico y de calidad de agua para poder evidenciar el comportamiento en el periodo 2014-2016 de las condiciones más críticas registradas en las estaciones de monitoreo de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) para los parámetros de T° Agua, DBO y OD. Dichos parámetros se tuvieron en cuenta puesto que la temperatura del agua ralentiza o acelera los procesos de autodepuración de una fuente superficial y los cambios de este parámetro drásticamente puede causar la súbita desaparición de la fauna acuática (10); el oxígeno disuelto, dado que es el

principal indicador de calidad ecológica del agua; y por otra parte, la DBO, la cual influye directamente en la concentración de oxígeno disuelto, ya que el exceso de materia orgánica agota el oxígeno del agua y por ende, hay una fuerte reducción de la diversidad de especies de macroinvertebrados y de organismos acuáticos (10).

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio. La simulación matemática fue realizada en el software HEC-RAS para la subcuenca río alto Bogotá. La localización geográfica del tramo objeto de estudio se presenta en la figura 1.

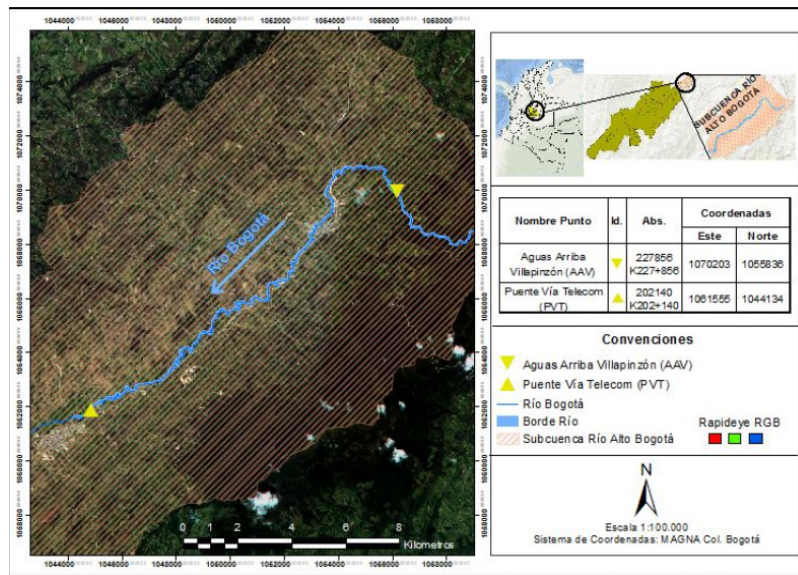


Figura 1. Delimitación del área de estudio. Subcuenca Río Alto Bogotá.

La longitud aproximada del río tenida en cuenta para la simulación fue de 30 km la cual se determinó empleando el software ArcGIS. Esta distancia es tomada 6 km después del nacimiento del cauce. La figura 1, corresponde a la representación cartográfica del área de interés para la simulación de calidad del agua.

Descripción del modelo. El software HEC-RAS fue desarrollado por el Programa de Investigación y Desarrollo de Ingeniería Hidrológica de Obras Civiles del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Este modelo tiene cuatro componentes para el análisis de los cuerpos receptores, que son: el cálculo de perfil de la superficie del agua de flujo estable, simulación de estado inestable, el cálculo de transporte de sedimentos y análisis de calidad de agua (11).

Para la condición de estado estable, es necesario contar con el número máximo de perfiles, el flujo máximo y las condiciones de contorno (11); el procedimiento computacional básico que usa HEC-RAS es la solución iterativa de la ecuación de energía. En cuanto al módulo de calidad de agua, este utiliza métodos numéricos explícitos para resolver la ecuación unidimensional de advección-dispersión bajo el esquema numérico denominado QUICKEST-ULTIMATE (12). El programa permite simular los parámetros de temperatura del agua, algas, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, nitritos, nitratos, nitrógeno orgánico, fosfato orgánico, ortofosfato y amonio. Además, HEC-RAS le posibilita al usuario controlar la ruta entre las variables de estados de los criterios del agua utilizando los rangos de parámetros de nutrientes incorporados. Estos parámetros incluyen una tasa constante para las reacciones químicas y físicas entre las variables mencionadas anteriormente, siendo estas la fuente (S) en la ecuación de advección-dispersión (11).

$$\frac{\partial}{\partial t}(V\phi) = -\frac{\partial}{\partial x}(Q\phi)\Delta x + \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)\Delta x \pm S \quad (1)$$

Donde:

V = Volumen de la celda de calidad de agua (m³)

φ = Concentración (mg/L) o temperatura del agua (°C)

Q = Flujo (m³/s)

Γ = Coeficiente de dispersión definido por el usuario (m²/s)

A = Área de la sección transversal (m²)

S = Fuentes o sumideros (mg/L).

Modelo hidrodinámico. El presente estudio se basó en el levantamiento topobatimétrico e hidráulico realizado por la CAR en el año 2015 la cual posee una longitud aproximada de 158 km y un total de 3024 secciones transversales (13). En este caso, se tuvo en cuenta para la simulación un total de 577 secciones transversales y 30 puentes, los cuales van desde la cota K227+856 hasta la cota K202+140. En las condiciones de entrada del modelo se fijó un número de manning con un valor de 0.070 en las márgenes derecha e izquierda del canal, lo que corresponde a una característica de rugosidad de un *tramo de alta montaña para matorrales medios a densos en una condición normal* (13). Para el canal principal, fue seleccionado un valor de 0.050. Por otra parte, en cuanto a los coeficientes de expansión y contracción del río se definieron de 0.1 y 0.3; en el caso de presentarse puentes los valores se ajustaron a 0.3 y 0.5 respectivamente.

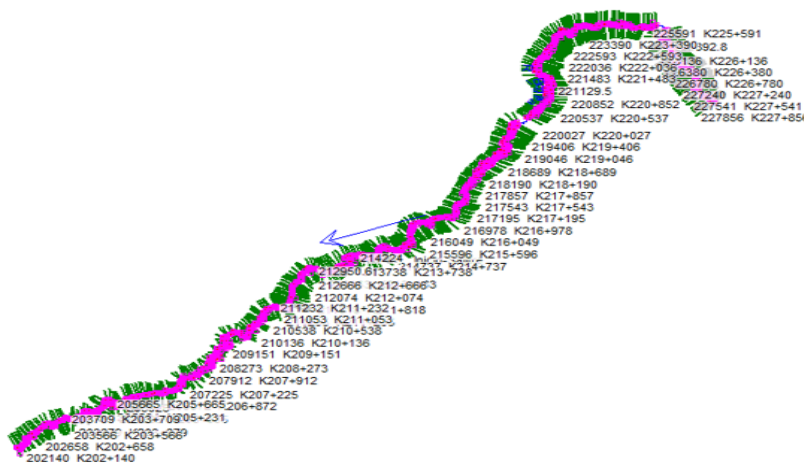
Ahora bien, en cuanto a la recopilación de información que fue necesaria para el desarrollo del modelo hidrodinámico se tuvieron en cuenta las estaciones más cercanas al tramo de estudio, las cuales se muestran en la tabla 1. La variable de interés fue el caudal para este modelo.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona del proyecto.

Estación	Coordenadas		Código
	Latitud (N)	Longitud (W)	
El Triunfo	04° 32'	74° 28'	2120712
Villapinzón	05° 13'	73° 36'	2120815
Pte. Chocontá	05° 09'	73° 40'	2120917

Fuente: Adaptada de los boletines informativos de hidrología y meteorología del periodo 2014-2016 CAR

La simulación se ejecutó en estado estable o permanente, con un caudal de estiaje representativo de 0.124 m³/s registrado en la estación *Villapinzón* durante el periodo comprendido de los años 2014 – 2016. La simulación fue desarrollada en régimen de flujo mixto dada la variación de la morfología del cauce. Las condiciones de contorno se establecieron aguas arriba y aguas abajo como profundidad normal. La figura 2 muestra el modelo hidrodinámico tenido en cuenta para el presente estudio.



Fuente: CAR, 2015 – Contrato 930/2012.

Figura 2. Modelo hidrodinámico del tramo en estudio en la subcuenca Río Alto Bogotá.

Fuente: Adaptado del Contrato 930/2012 (Modelo HEC-RAS), CAR

Toma de datos para verificación del modelo hidrodinámico. Para poder calibrar el modelo proporcionado por la CAR, fue preciso realizar una jornada de reconocimiento en campo de la zona de estudio, por lo que se procedió a determinar puntos de referencia cada 500 m sobre la margen del cuerpo hídrico empleando un GPS (modelo Garmin 60csx). En cada punto, se midió la velocidad del agua del río, el caudal promedio y el perfil de la sección transversal (Figura 3).

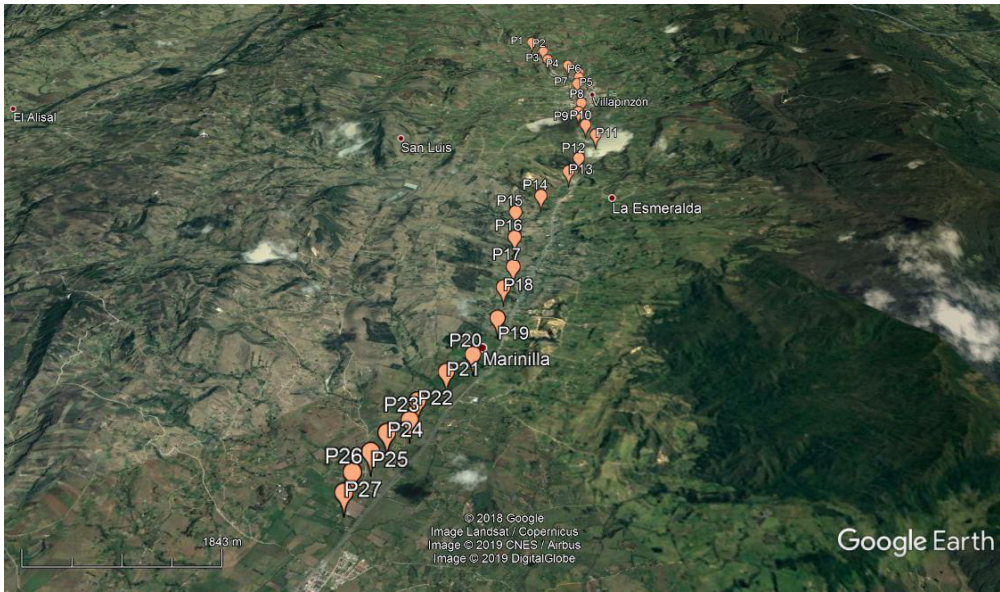


Figura 3. Proyección de puntos de referencia tomados en campo en la sección de estudio en la subcuenca Río Alto Bogotá.

Modelo de calidad de agua. La CAR monitorea semestralmente la calidad del agua del río, para lo cual cuenta con 7 estaciones de monitoreo a lo largo del tramo de estudio (Figura 4).

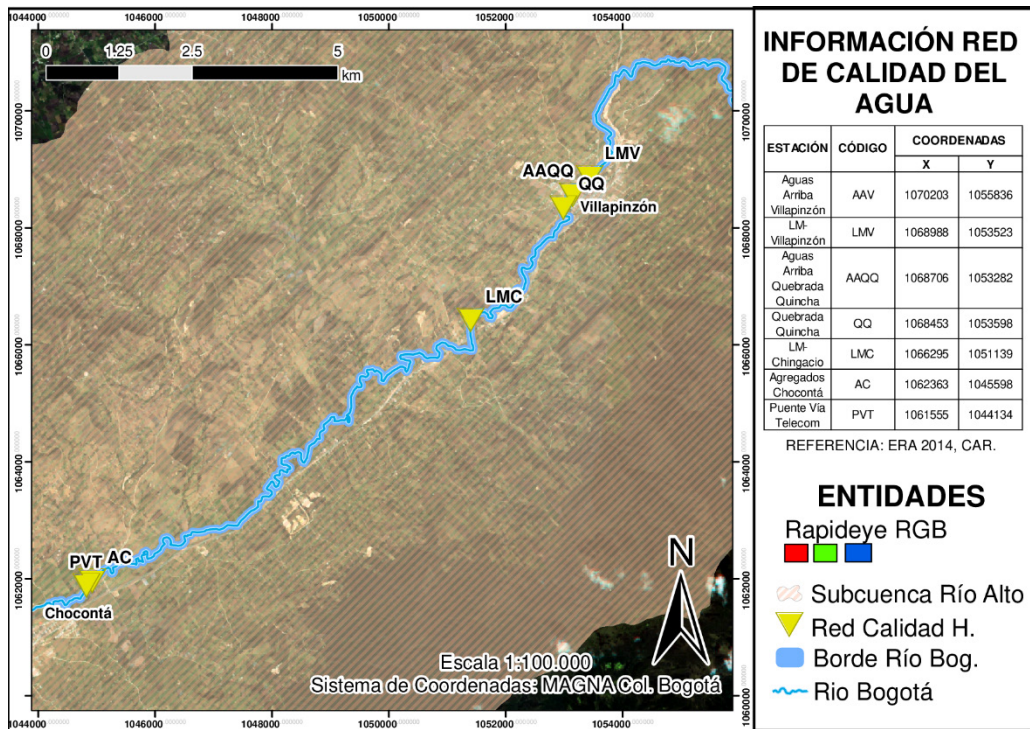


Figura 4. Ubicación estaciones de monitoreo de calidad hídrica.

Condiciones de entrada en el modelo de calidad de agua. Se creó un plan de datos de calidad de agua, en donde los constituyentes que se consideraron fueron el modelo de temperatura y el modelo de nutrientes [NSMI (N-P-Cycle)]. La longitud de las celdas de calidad del agua se fijó en 500 m. La simulación inicial para el caso de nutrientes fue realizada con los parámetros que por defecto trae el software. Los datos ingresados al modelo correspondieron a las condiciones críticas evidenciadas en los reportes suministrados por la CAR durante el periodo establecido en el proyecto (Tabla 2).

Tabla 2. Valores críticos de entrada de calidad de agua.

Estación	Abscisa	T° Agua (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
AAV	K 227+856	14.3	6.00	2.00
LMV	K 220+338	15.2	4.64	23.00
AAQQ	K 219+796	16.6	3.18	17.00
QQ	K 219+460	16.1	5.83	49.60
LMC	K 216+007	17.2	3.00	61.40
AC	K 202+761	19.3	1.00	23.40
PVT	202607.3	17.4	0.52	100.0

Fuente: Adaptada de registros de monitoreo de calidad hídrica del periodo 2014 – 2016, CAR

En el mismo sentido se importaron en el modelo los valores de las estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona del proyecto con los datos requeridos para la simulación (ver tabla 1). Los datos de interés para la simulación fueron, la radiación solar, la temperatura media mensual del aire, la velocidad del viento, la presión atmosférica y la humedad relativa. En caso de no contar con todos los parámetros, se procedió a calcular los valores faltantes por medio de los métodos de proporción normal anual cuando se conocían los datos durante un periodo en otras estaciones cercanas (14). De no ser así, se realizaron los cálculos por medio de los métodos de interpolación lineal y de extrapolación. Con respecto a los datos no registrados en las estaciones y que no podían hallarse mediante los métodos planteados anteriormente, se hizo uso de la base de datos de la NASA (15) para los valores de radiación solar, velocidad del viento a una altura de 2 metros, humedad relativa, temperatura media anual y presión atmosférica registrados en el área de influencia del estudio.

Supuestos. En este proyecto solo se tuvo en cuenta la información del tramo principal del río Bogotá, de manera que no se involucraron las corrientes secundarias relacionadas dentro del área de influencia debido a no tener información para la simulación. La simulación fue realizada teniendo en cuenta que las cinéticas de transformación se consideraron de primer orden; el flujo del río y concentraciones de este fueron tomados para las condiciones de más bajo caudal entre los años 2014 y 2016, suponiendo estado permanente. Se asumió para la fracción de nubes requerida en los valores meteorológicos un valor de 0.9 en todas las estaciones (16). Para el cálculo del coeficiente de dispersión, se hizo uso de la alternativa proporcionada por el programa HEC-RAS el cual computa valores del coeficiente (16). La ecuación 2 muestra el cálculo desarrollado por el modelo:

$$D = m \times 0.011 \frac{u^2 w^2}{y u^*} \quad (2)$$

Donde:

m = Multiplicador asignado por el usuario (sin unidades)

u = Velocidad de la cara (m/s)

w = Ancho promedio del canal (m)

y = Profundidad media del canal (m)

u* = Velocidad de corte (m/s)

Acerca de la velocidad de corte, esta se estima por medio de la siguiente ecuación 3:

$$u^* = \sqrt{gdS} \quad (3)$$

Donde:

g = Constante gravitacional (9.81 m/s²)

d = Profundidad media del canal (m)

S = Pendiente de fricción (sin unidades)

Los valores para cada variable a excepción de m (el cual se asumió como m=1), se toman a partir de la salida de los resultados hidráulicos de la simulación.

Con la finalidad de calcular la diferencia de los datos de entrada con los datos de salida del modelo, se procedió a determinar el porcentaje de error entre cada parámetro. Dichos porcentajes se calcularon por medio de la siguiente ecuación (4):

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Valor Medido} - \text{Valor Calculado}}{\text{Valor Medido}} \times 100\% \quad (4)$$

RESULTADOS

Modelo hidrodinámico. Luego de ejecutada la simulación en estado estable, se seleccionaron ocho puntos de referencia tomados en campo con el fin de validar los resultados de velocidad promedio simulados contra los datos tomados en campo (Figura 3); el caudal promedio tomado en campo fue de 0.140 m³/s. Se procuró que los puntos coincidieran con algunas de las secciones transversales del modelo realizado por la Corporación (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de validación del modelo hidrodinámico.

Punto Corte Abscisas (HEC-RAS)	Velocidad Tomada en el Punto (m/s)	Resultado de la Velocidad en HEC-RAS (m/s)	% Error
K 222+648	0.31	0.24	22.58
K 221+380	0.72	0.76	5.26
K 220+590	0.87	0.83	4.59
K 218+893	0.378	0.40	5.5
K 216+142	0.195	0.18	7.69
K 208+655	1.12	1.09	2.67
202366.5	0.62	0.72	13.88
202151.4	0.60	0.63	4.76

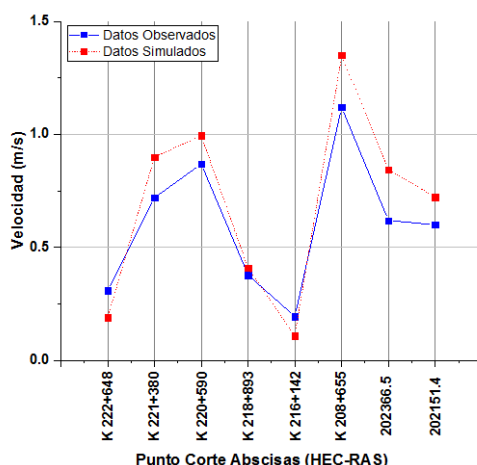


Figura 5. Gráfico comparativo velocidad promedio medida en campo observadas vs. datos simulados.

Se observó que los resultados de salida del modelo hidrodinámico se acercan a los datos reales del tramo de estudio. Los valores de salida se encuentran por debajo de un porcentaje de diferencia del 30% lo cual es un buen indicador del modelo hidráulico y geométrico realizado por la CAR. Los valores más altos se presentan en los puntos de corte de abscisas K 222+648 y 202366.5 con unos errores del 22.58% y del 13.88% respectivamente.

Modelo de calidad de agua. Los gráficos comparativos de los datos simulados y observados para cada parámetro en estudio se presentan en la figura 6.

Se encontró que la diferencia entre los valores de salida y de entrada para el modelo de calidad de agua en los parámetros de temperatura del agua y de oxígeno disuelto varió aproximadamente del 1–5% del margen de error. Esto es un buen indicador, pese a que los coeficientes de los parámetros no se establecieron conforme a las condiciones del tramo del río en estudio. Por otra parte, para el caso de DBO los porcentajes de error en la mayoría de los datos, se encontraron por encima de un rango del 5%, lo que puede ser debido a que no se tuvo en cuenta en la simulación los valores de los demás nutrientes, los cuales inciden en los parámetros de calidad de agua en el programa, posiblemente generando así la oscilación de los datos, encontrándose que el valor más alto de error, se registró en la primera estación aguas arriba con un porcentaje del 26.874%.

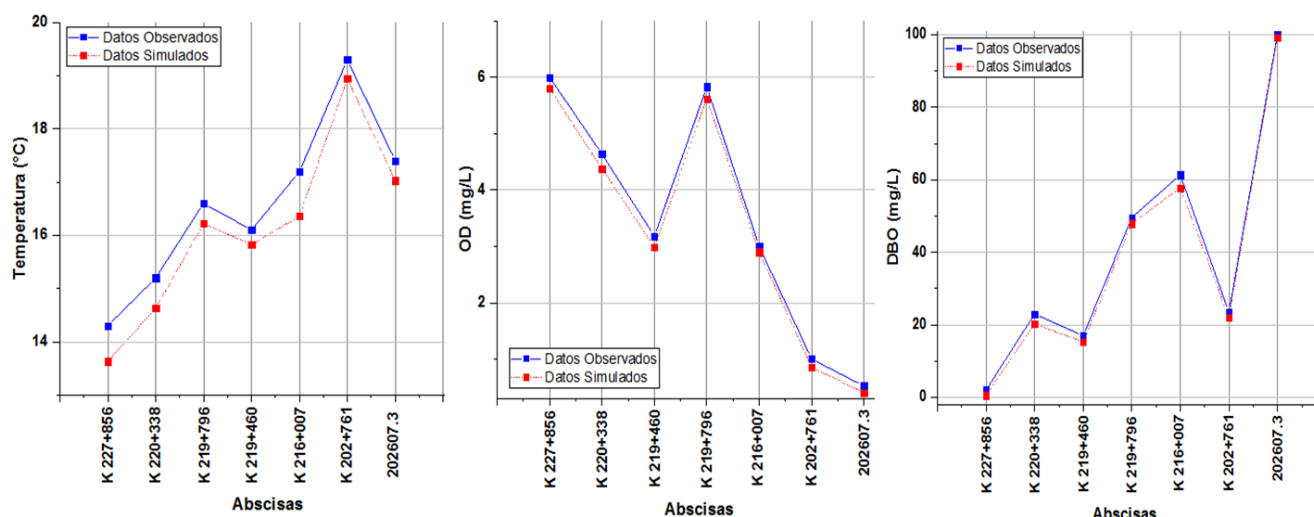


Figura 6. Datos de salida del modelo de calidad del agua (Parámetros Medidos: T° Agua, OD, DBO).

Calibración. Para la calibración del modelo, fue necesario ajustar los parámetros de nutrientes y algunas condiciones meteorológicas, las cuales influyen de manera directa en el comportamiento de los nutrientes dentro del modelo. En primer lugar, se procedió a calibrar el modelo de temperatura del agua por lo que se ajustó la radiación solar debido a que representa el factor de mayor importancia sobre la temperatura del afluente (17). De ese modo, fue realizado el ajuste de este criterio por ensayo y error estableciendo así un valor de 17 MJ/m² día para las estaciones El Triunfo y Villapinzón respectivamente. Para la estación Puente Chocontá se fijó un valor de 14 MJ/m² día.

En segunda instancia, se calibró el coeficiente de reaeración atmosférica (K₂) y el coeficiente de desoxigenación (K₁); el ajuste fue llevado a cabo teniendo en cuenta lo establecido en los rangos del software y la literatura (17). La tabla 4, presenta la información adaptada de los coeficientes cinéticos de primer orden.

Tabla 4. Ajuste valores de parámetros de calidad de agua.

Variable	Símbolo	Unidad	Valor Inicial	Valor Ajustado	Metodología
Reaeración Atmosférica	K ₂	Día ⁻¹	1	0.547	$K_2(20^\circ C) = \frac{3.3\bar{u}}{d^{1.32}} \times 2.31 \quad (4)$ Donde: \bar{u} = velocidad media (m/s) d = Profundidad media (m) Método realizado por Langbien y Durum, 1967. (17).
Coefficiente de desoxigenación	K ₁	Día ⁻¹	0.02	0.20	Rango: (0.12 - 0.23), para muestra de agua de río contaminado. Rango propuesto por Valdez et al, 2013. (17).

Las demás variables se mantuvieron por defecto de acuerdo al software, puesto que no influyen directamente sobre los parámetros modelados. Además de esto, se seleccionó un tamaño de celdas para la simulación con una longitud de 180 m. Luego de ajustar el cálculo de la celda de calidad del agua, los parámetros se acercaron más a los valores reales, dando como resultado los siguientes valores de error para los datos de salida (Tabla 5).

Tabla 5. Porcentajes de error de la calibración del modelo de calidad de agua.

Abcisas	T° Agua	% ERROR	OD % ERROR	DBO %ERROR
K 227+856		0.070	0.033	10.274
K 220+338		1.235	1.272	3.687
K 219+796		0.602	2.687	5.973
K 219+460		1.273	1.389	1.392
K 216+007		1.047	0.433	2.036
K 202+761		0.067	2.4	1.026
202607.3		0	0	0

A partir de los resultados obtenidos en la calibración, se pudo inferir que los ajustes realizados dieron una respuesta positiva a los valores de salida del modelo para el caso del oxígeno disuelto y de la temperatura del agua, puesto que sus porcentajes de error se mantuvieron por debajo del 5%. Sin embargo, para el caso de la DBO, algunos de los datos de las estaciones se mantuvieron por encima de un error del 5%, razón por la cual se reflejó la dependencia de los parámetros no ajustados de calidad del agua, tales como algas, nitrógeno y fósforo.

Las salidas gráficas del modelo se realizaron por medio del software Origin, versión de prueba, las cuales evalúan los datos iniciales y ajustados del parámetro y la distancia recorrida para cada estación de monitoreo. Las representaciones cartográficas se efectuaron a partir de ArcGIS con los datos obtenidos en la simulación para cada sección transversal. La integración de resultados se hizo por medio de las tablas de atributos de salida de la herramienta HEC-RAS. Los resultados para los parámetros de calidad hídrica evaluados se muestran en los gráficos que se presentan a continuación:

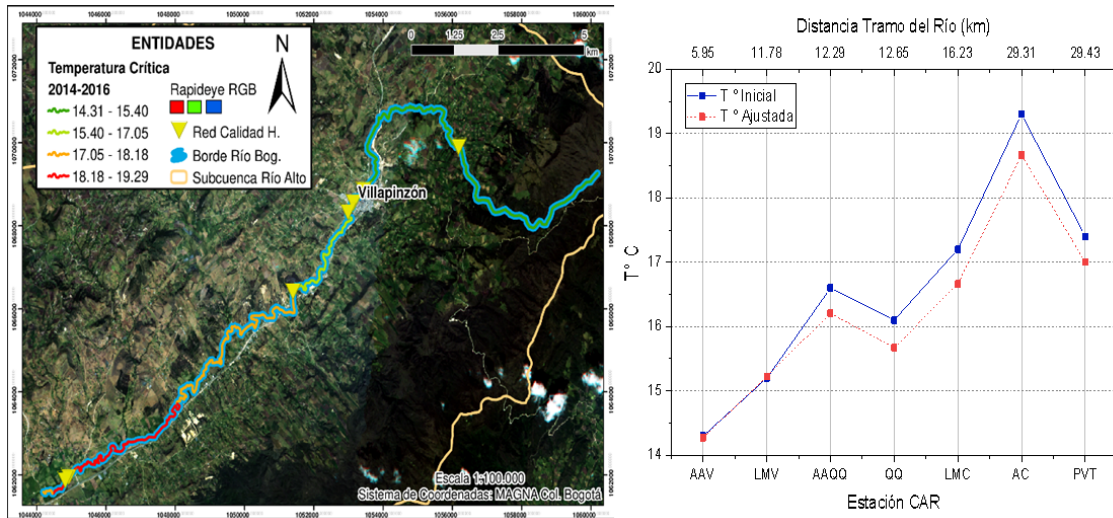


Figura 7. Condiciones críticas de la temperatura del agua (°C) durante el periodo 2014-2016.

La figura 7, muestra la variación de la temperatura del agua a lo largo del tramo del en estudio, en esta se puede visualizar que la temperatura va aumentando significativamente hasta la estación AAQQ, y vuelve a descender en la estación QQ. Sin embargo, vuelve a ascender los valores, encontrando que pasados 29.31 km del tramo en estudio se registra la temperatura más alta con un valor de 19.3°C, pudiéndose inferir que el factor incidente en el aumento de la temperatura del agua puede ser causada por la industria curtidora que se encuentra en el área y a las descargas de aguas residuales del municipio de Villapinzón. Es preciso señalar en que este municipio no cuenta con una planta de tratamiento de sus aguas residuales. Luego, la temperatura vuelve a bajar para la estación PVT lo que se debe a tributarios recibidos por el río en este segmento del trazado analizado. Además de las condiciones morfológicas del río en este punto que ayudan a autodepurar el cuerpo de agua superficial.

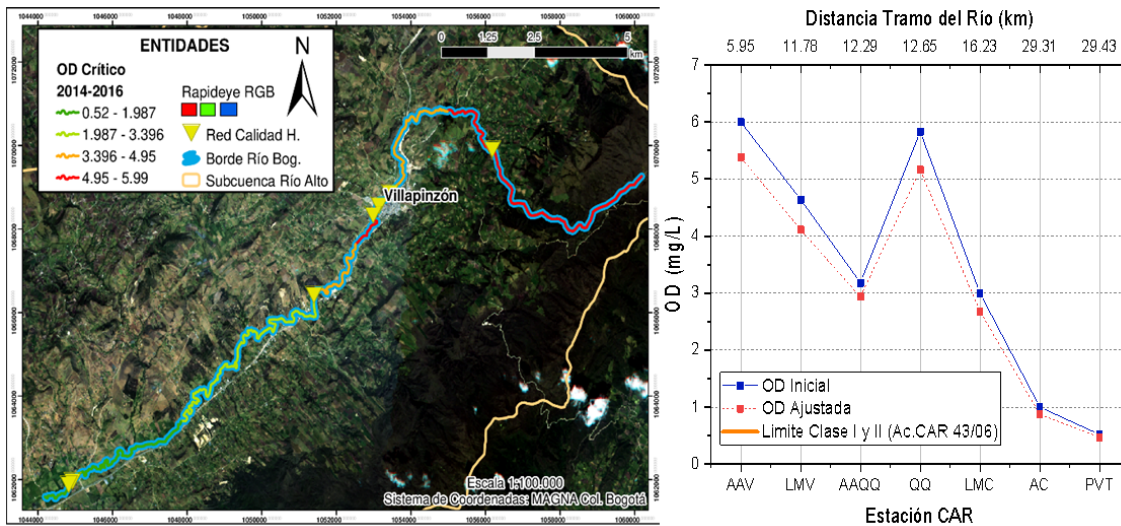


Figura 8. Condiciones críticas del oxígeno disuelto (mg/L) durante el periodo 2014-2016.

Al simular el oxígeno disuelto, se observa en términos generales en la figura 8, que desde aguas arriba la concentración toma un valor de 6 mg O₂/L el cual es un valor apto para las vida aerobia en este punto, luego, a tan solo 12.29 km de la estación AAQQ, la concentración toma un valor de 3.18 mg O₂/L, siendo este un valor muy bajo para una corriente de agua de alta montaña, hecho que se debe a que el río es objeto del vertimiento de aguas residuales del alcantarillado público del municipio de Villapinzón y de los sectores productivos asentados en la zona de estudio. En la estación QQ el agua recupera oxígeno disuelto alcanzando un valor de 5.83 mg O₂/L, regresando al río las condiciones aerobias que permiten la supervivencia de distintas especies (18).

Desde este punto hasta el kilómetro 29.43 del recorrido, las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyen sustancialmente encontrándose el registro más crítico en la estación PVT la cual se encuentra pocos metros antes de la entrada del río a la zona de influencia del municipio de Chocontá. Se infiere que aquí, el cuerpo de agua recibe altas cargas contaminantes de las actividades económicas productivas del municipio, por lo que, hasta este punto, la capacidad del río para autodepurarse no se determina o distingue con facilidad. Por otra parte, la concentración de OD no permite cumplir con los objetivos de calidad ni tampoco con las condiciones adecuadas para la vida acuática y de microorganismos del afluente, dado que hay que tener en cuenta que el OD está estrechamente relacionado con la carga orgánica que transporta el río, por lo que, a mayor carga orgánica, la demanda de oxígeno será mayor.

La influencia del municipio de Villapinzón y las descargas de aguas residuales municipales y del sector productivo ocasionan que tan solo a pocos kilómetros de la estación AAV el parámetro de la DBO supere el valor máximo permisible establecido en los objetivos de calidad del agua propuestos por la CAR para la clase I y II, clase a la cual debe pertenecer el agua del río en este tramo, en esta zona la concentración de DBO vario entre 16.88 y 100 mg/L, este último valor fue alcanzado en la estación de monitoreo PVT, punto en la cual y a causa de la carga orgánica trasportada por el río se agota el oxígeno llegando a un valor mínimo de 0.52 mg O₂/L. (Figura 9).

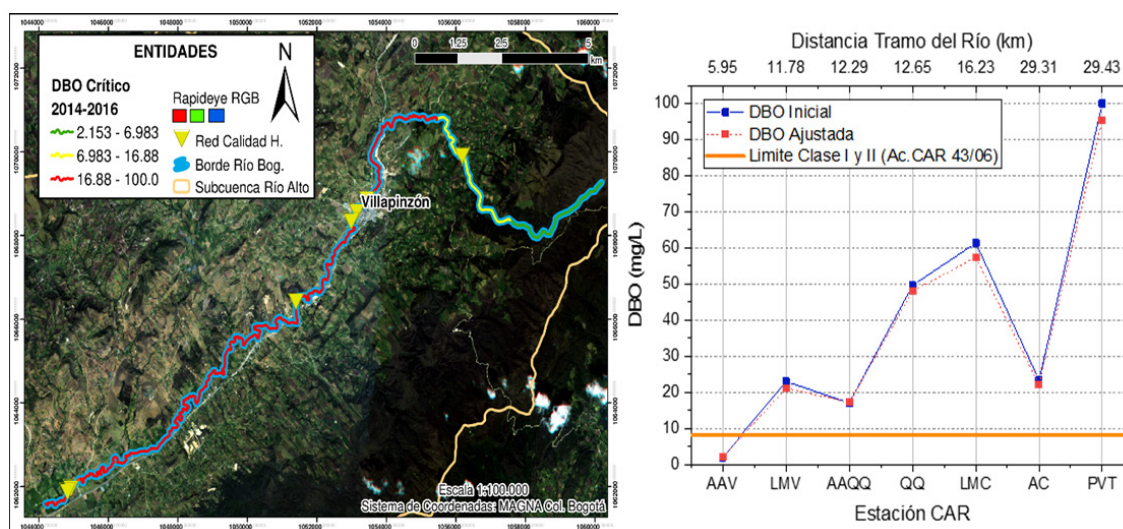


Figura 9. Condiciones críticas de DBO (mg/L) durante el periodo 2014-2016.

En vista de lo anterior, se puede reflejar la relación estrecha entre estos tres parámetros, en donde el aumento de temperatura a lo largo del tramo y las altas concentraciones de materia orgánica, suscitan la degradación en los valores de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua por efecto de los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica, implicando en ello una problemática en la calidad de agua y afectando, además, la biota acuática aerobia (19).

DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos con las simulaciones del software HEC-RAS, puede concluirse en cuanto al modelo hidrodinámico que se reflejó un máximo error de la salida del modelo con un porcentaje de 22.58%, lo que puede deberse a los métodos de campo realizados para el levantamiento de los perfiles y de las secciones transversales con respecto a los realizados por la CAR.

Luego de calibrado el modelo hidrodinámico y ejecutar el módulo de calidad del agua se evidenció que los porcentajes de error de salida del modelo al inicio fueron relativamente altos obteniéndose un valor de error máximo aguas arriba de 26.87%, pero luego de realizar la calibración a través de ajustes de parámetros tales como radiación solar, longitud de la celda de calidad de agua para la solución numérica de las ecuaciones del modelo y los coeficientes cinéticos, los errores disminuyeron en promedio del 1-5% y el valor de error máximo aguas arriba fue de 10.27%, lo que indica una reducción de más de la mitad del error obtenido al inicio de la ejecución de la simulación. En cuanto a la calibración del módulo de calidad de agua, el ajuste de los coeficientes cinéticos los cuales se hicieron a partir de la metodología expuesta anteriormente, se alcanzaron valores de 0.547 día⁻¹ para el coeficiente de reaeración atmosférica y un valor ajustado del coeficiente de desoxigenación o reducción de DBO de 0.20 día⁻¹. Aunque el coeficiente de reaeración es mayor que el de desoxigenación, la concentración de oxígeno disuelto no aumenta a lo largo del tramo a causa de la elevada concentración de materia orgánica, y por ende, una alta tasa de demanda de oxígeno disuelto por lo que no se observa un aumento en la concentración de oxígeno disuelto en el agua a lo largo del tramo estudiado.

De manera general, se concluye en el ejercicio que el agua del río Bogotá no cumple con los parámetros máximos permisibles para los usos establecidos por la autoridad ambiental. El análisis fue realizado empleando el valor mínimo de caudal entre los años 2014 a 2016, la simulación indica que las descargas de aguas residuales domésticas e industriales descalifican el agua para los posibles usos potenciales y limita el uso del recurso hídrico en el resto de la cuenca. Con base en lo anterior es claro que es necesario aplicar y/o ejecutar alternativas que ayuden a disminuir notablemente las cargas contaminantes en el río, dado que las simulaciones realizadas en condiciones críticas señalan un panorama desalentador.

Por otro lado, se pudo demostrar que el modelo HEC-RAS es una herramienta robusta para establecer la calidad de agua de determinados cuerpos hídricos superficiales sometidos a afectaciones por las actividades antrópicas realizadas por el ser humano. En cuanto a sus ventajas como programa informático libre se resalta que es una potente herramienta que se ha venido desarrollando la cual cuenta con una interfaz gráfica simple al usuario y de fácil manejo e interpretación de resultados; y además, que al ser relativamente reciente el módulo de calidad de agua es importante dar a conocer la aplicación de estas herramientas computacionales como opciones para posteriores estudios. En cuanto a las desventajas, se evidenció que permite modelar un número limitado de componentes sin opción de agregar algún otro y así mismo, se encuentra aún en desarrollo por lo que presenta algunos errores de código que interrumpen el funcionamiento del programa de manera repentina.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la CAR, especialmente a la dirección del Laboratorio Ambiental, la Dirección de Recursos Naturales-DRN y al Grupo de Rondas Hídricas de la DRN, los cuales facilitaron la información requerida para el presente estudio. De igual forma, al Ing. Jesús Ernesto Torres Quintero ingeniero y docente investigador de la Universidad Libre por su asesoría en el uso del software HEC-RAS y por hacer entrega de la documentación pertinente de la cuenca del río Bogotá, la cual fue de gran ayuda para el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

1. CAR. Diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. [en línea]. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR: Bogotá D.C; 2006. https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/adminverblobawa?tabla=T_NORMA_ARCHIVO&p_NORMFIL_ID=305&f_NORMFIL_FILE=X&inputfileext=NORMFIL_FILENAME
2. CAR. Evaluación regional del agua-ERA. Cuenca Alta río Bogotá. [en línea]. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR: Bogotá D.C; 2014. URL Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ae21dac0e581.pdf>
3. MAVDT. Política nacional para la gestión del recurso hídrico [en línea]. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT: Bogotá D.C; 2010. URL Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Presentación_Política_Nacional_-_Gestión_/libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf
4. Díaz BEM. Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas [en línea]. Universidad de los Andes; 2004. URL Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10312/u250840.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

5. Fan C, Wang W-S, Liu KF-R, Yang T-M. Sensitivity Analysis and Water Quality Modeling of a Tidal River Using a Modified Streeter-Phelps Equation with HEC-RAS-Calculated Hydraulic Characteristics. *Environmental Modeling & Assessment*. 2012; 17(6):639–651. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10666-012-9316-4>.
6. Halaj P, Bárek V, Anna B, Denisa H. Application of HEC-RAS water quality model to estimate contaminant spreading in small stream. *International Scientific Publications*. 2011; 5(2):482–491. URL: <https://www.scientific-publications.net/download/ecology-and-safety-2011-1.pdf>
7. Mohammad ME, Al-Ansari N, Issa IE, Knutsson S. Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. *Lakes Reserv Res Manag*. 2016; 21(3):235–44. DOI: <http://doi.wiley.com/10.1111/ire.12142>
8. EAAB, UNAL. Modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá - Informe producto No. 2 - Entendimiento de la dinámica de la calidad del agua del río Bogotá y diseño de campañas de medición de la calidad del agua [en línea]. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB, Universidad Nacional de Colombia - UNAL: Bogotá D.C; 2009. URL Disponible en: <http://orarbo.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/dinamica-de-calidad-del-agua-del-rio-bogota.pdf>
9. Nicolas RJ, Luis CB. Modelación de la calidad del agua del río Bogotá en la cuenca alta incorporando incertidumbre [en línea]. Universidad de los Andes; 2013. https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzlyMDEzMjIwLzE3MTMucGRm
10. Roldán Pérez G. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia : propuesta para el uso del método. Editorial Universidad de Antioquia: Antioquia, Colombia; 2003.
11. Hussien H. Water quality modeling of Dubai Creek using HEC-RAS. [Tesis]. American University of Sharjah: Sharjah, United Arab Emirates; 2015. <http://hdl.handle.net/11073/8045>
12. Vijay R, Gupta R, Dash S. Modelling approach for water quality assessment of Pili River using HEC-RAS. *Journal of Indian Water Works Association*. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/317003578>
13. CAR. Contrato 930-2012: Producto 1. Adecuación hidráulica de la cuenca alta del río Bogotá en el cauce principal - Modelación Hidráulica (C310-IT-01). Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR: Bogotá D.C; 2015. (Versión 6). Report No.: Capitulo 3. Modelación Hidrológica e Hidráulica.
14. Monsalve G. Hidrología en la Ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería- Alfaomega: Bogotá D.C, Colombia;1999.
15. NASA POWER Data Access Viewer. Multiple Data Access Options. [en línea]. National Aeronautics and Space Administration - NASA: Washington D.C; 2018. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.
16. Brunner G, CEIWR-HEC. HEC-RAS River Analysis System - User's Manual. [en línea]. Hydrologic Engineering Center's River - Analysis System - HEC-RAS: State of California; 2016. URL Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>
17. Guano M, Velasteguí V. Manual básico para la modelación numérica de la calidad del agua en ríos: Programa computacional HEC-RAS versión 4.0, ejemplo de aplicación a un tramo del río Machángara dentro de la zona de influencia de la Ciudad de Quito. [Tesis]. Escuela Politécnica Nacional: Quito, Ecuador; 2014. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8556/3/CD-5767.pdf>
18. CAR. Acuerdo 43 [en línea]. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR: Bogotá D.C; 2006. URL Disponible en: https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/acuerdo_43_de_2006.pdf
19. Whitman College. Oxígeno disuelto en agua [en línea]: Washington D.C; 2012. URL Disponible en: https://www.whitman.edu/chemistry/edusolns_software/DO_Spanish.pdf