

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE OXIGENACIÓN Y DESOXIGENACIÓN PARA LA CURVA DE COMPORTAMIENTO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL RÍO FUCHA

Nataly Moreno Dueñas, Javier Andrés Escobar Pintor

nmoreno97@ucatolica.edu.co, jaescobar87@ucatolica.edu.co

Programa de ingeniería civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia
Bogotá D.C., Colombia

Abstract

The Fucha River is one of the most important water bodies of the Bogotá city, born in the eastern hills and empties into the Bogotá river at the town of Fontibón. Not only receives water from streams in the high, but effluent from the sewer ten locations in the capital, major sources of pollution of the stream basin. In this research work deoxygenation coefficients (K1) and oxygenation (K2) of the river in question from model calibration QUAL2K are determined. Values of the constants are in the first instance, by applying the respective mathematical equations, with data reported and documented quality of the water system of the Bogotá City, taken in the field, by the District Department of Environment in partnership with other entities for the last decade. From the data obtained the Streeter and Phelps model is applied to generate the SAG curves and other curve with hydraulic characteristics depending on the flow required to calibrate the American model. It can be seen that the constant recalibration curves are consistent with OD and BOD5 measured and consistent with what dictate the scientific data on the subject parameters. For the recovery of Fucha river is necessary that the entities responsible conduct appropriate follow-up and control of the tributaries that deliver water to water their body.

Keywords: model calibration, water quality, SAG curve, deoxygenation, oxygenation, Fucha River.

RESUMEN

El río Fucha es uno de los cuerpos hídricos más importantes de la ciudad de Bogotá, nace en los cerros orientales y desemboca en el río Bogotá a la altura de la localidad de Fontibón. En su recorrido no solo recibe las aguas de quebradas en la cuenca alta, sino de afluentes provenientes de la red de alcantarillado de diez localidades de la capital, principales fuentes de contaminación de la corriente. En el presente trabajo de investigación se determinan los coeficientes de desoxigenación (K1) y oxigenación (K2) del río en mención a partir de la calibración del modelo QUAL2K. En primera instancia se hallan los valores de las constantes, aplicando las ecuaciones matemáticas respectivas, con los datos reportados y documentados de calidad del sistema hídrico de la ciudad de Bogotá, tomados en campo, por la Secretaria Distrital de Ambiente en convenio con otras entidades durante la última década. A partir de los datos obtenidos se aplica el modelo de Streeter y Phelps para generar la curva SAG y demás curvas de

características hidráulicas en función del caudal necesarias para calibrar el modelo estadounidense. Se puede constatar que las constantes resultantes de la calibración son acordes a las curvas de OD y DBO5 de datos medidos y coherentes con lo que dictaminan los parámetros científicos respecto al tema. Para la recuperación del río Fucha se hace necesario que las entidades encargadas realicen el debido seguimiento y control de los afluentes que entregan sus aguas al cuerpo hídrico.

Palabras Claves: calibración de modelos, calidad del agua, curva SAG, desoxigenación, oxigenación, río Fucha.

1 INTRODUCCIÓN

El río Fucha es uno de los más importantes cuerpos hídricos que atraviesa la ciudad de Bogotá, el cual nace en los cerros orientales, empieza su recorrido en la localidad de San Cristóbal y desemboca en el río Bogotá a la altura de la localidad de Fontibón. Hace parte de la gran red fluvial de la capital colombiana donde también se encuentran los ríos Torca, Salitre y Tunjuelo. El río recibe las aguas de quebradas en la parte alta y a lo largo de su cauce sus principales afluentes son canales provenientes de la red de alcantarillado, de diez localidades de la ciudad, el cual es de tres sistemas: pluvial, residual y combinado.

La contaminación presente en el río Fucha no solo se debe a las aguas que recibe de la red de alcantarillado, sino a vertimientos provenientes de hogares y diferentes sectores de la industria sin un tratamiento previo, conexiones erradas a la red de aguas lluvias, una inadecuada disposición de los residuos y demás contaminación en las zonas de ronda y en su cauce principal.

La metodología empleada es de orden analítico, ya que este estudio se hace en base de métodos matemáticos y con datos promedio tomados de estudios realizados por parte de La Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) y La Universidad de los Andes acerca de la calidad del recurso hídrico de la ciudad de Bogotá, en el período comprendido entre los años 2006 y 2015; debido a la imprecisión de dichos métodos, se hace una verificación y una calibración de las constantes halladas en el modelo QUAL2K, lo anterior con el fin de determinar el

comportamiento de Oxígeno disuelto (OD) presente en uno de los principales afluentes del Río Bogotá, el río Fucha.

El sistema hídrico de Bogotá está conformado por los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo. Estas corrientes nacen en los cerros orientales, atraviesan la ciudad de oriente a occidente para luego desembocar en el río Bogotá, además son receptores de las aguas provenientes del alcantarillado pluvial y residual de la ciudad. Debido al crecimiento y desarrollo que ha tenido la capital en las últimas décadas se han generado presiones ambientales que dichos los ecosistemas no logran soportar.

La Secretaria Distrital de Ambiente junto con la Universidad de los Andes ha realizado unas campañas, desde el segundo semestre del año 2009 hasta el primer semestre del año 2013, para el seguimiento a la calidad del recurso hídrico superficial bajo metodologías establecidas y de acuerdo a los puntos de monitoreo definidos por la RCHB. En los documentos publicados por la entidad y la universidad, reportan los resultados obtenidos para el índice de calidad del agua (WQI), además de las variables como: oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), grasas y aceites, nitrógeno fosforo, sulfuros, fenoles, metales, conductividad eléctrica y pH.

2 METODOLOGÍA

La metodología empleada para determinar los coeficientes de oxigenación y desoxigenación del caso en estudio, el río Fucha, es de orden analítico. En primera instancia se hallan los valores de las constantes, aplicando las ecuaciones matemáticas respectivas, con los datos reportados y documentados de calidad del sistema hídrico de la ciudad de Bogotá por la Secretaria Distrital de Ambientes en convenio con otras entidades durante los últimos años. Debido a la insuficiencia de datos fue necesario el uso de curvas hidráulicas a partir de los datos conocidos y realizar un trabajo de campo que consistió en la toma de velocidades del cauce en los puntos de monitoreo de la RCHB para completar así los datos actuales y relacionar con los datos históricos.

Para la verificación de resultados se emplea el modelo de Streeter y Phelps, donde, a partir de datos medidos de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno, se generan unos valores calculados los cuales son usados para calibrar el programa QUAL2K, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). De esta manera y a partir de un proceso iterativo se llega a los valores definitivos de las constantes K1 y K2, teniendo en cuenta que este caso es de régimen permanente y estacionario.

2.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES

Se seleccionan las estaciones o puntos de monitoreo dados por la RCHB para el río Fucha, las cuales se localizan en la siguiente imagen.

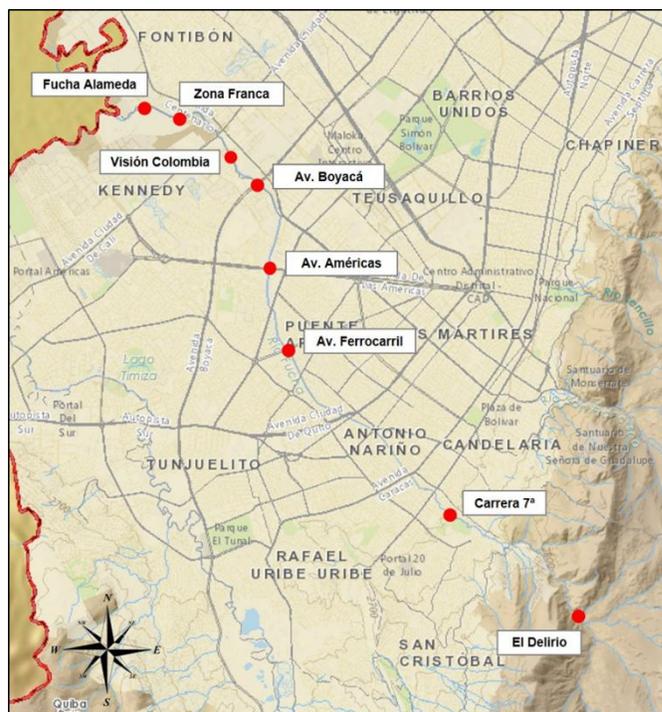


Fig. 1. Ubicación de los puntos de monitoreo de la RCHB en el río Fucha

2.2 PARÁMETROS HISTÓRICOS

Para el cálculo de los coeficientes se utilizan los resultados promedio de DBO5, OD y caudales reportados en los estudios de calidad del recurso hídrico de Bogotá realizados por la Secretaria Distrital de Ambiente desde el año 2006 hasta el 2015.

PARÁMETRO	UND	ESTACIÓN			
		El Delirio	Carrera 7a	Av. Ferrocarril	Av. Américas
DBO5	mg/l	2.16	51.04	91.12	114.13
OD	mg/l	7.53	5.93	1.19	0.86
Q	l/s	373.44	657.76	974.44	1496.80
	m3/S	0.37	0.66	0.97	1.50
A	m2	1.04	1.59	2.75	3.67
H	m	0.06	0.07	0.11	0.18
V	m/s	0.36	0.52	0.35	0.42
T	°C	12.75	15.80	17.85	17.95
ABS	K0+000	K00+000	K04+431	K10+206	K12+304
COTA	m.s.n.m.	2912	2597	2555	2550
PARÁMETRO	UND	Av. Boyacá	Visión Colombia	Zona Franca	Fucha Alameda
DBO5	mg/l	139.00	245.29	239.21	249.00
OD	mg/l	0.42	0.07	0.04	0.03
Q	l/s	2062.72	6902.15	7540.60	7874.97
	m3/S	2.06	6.90	7.54	7.87
A	m2	4.56	25.05	31.53	42.01
H	m	0.26	1.58	1.76	1.86
V	m/s	0.47	0.28	0.24	0.20
T	°C	17.00	17.70	17.30	17.30
ABS	K0+000	K14+435	K14+994	K16+918	K17+933
COTA	m.s.n.m.	2547	2545	2542	2541

Tabla 1. Parámetros hidráulicos y de calidad del agua promedio en las estaciones del río Fucha.

2.3 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS MATEMÁTICOS

2.3.1 MODELO DE STREETER Y PHELPS

Para la implementación del modelo de Streeter y Phelps el río Fucha se divide en siete tramos delimitados por las ocho estaciones de monitoreo.

Para el inicio de este método se hace otros cálculos que son las constantes de desoxigenación (K1), donde la relación para el cálculo se basa por tramos teniendo en cuenta las estaciones de monitoreo y para la constante de oxigenación (K2) los métodos se relacionan con la velocidad y la altura de la lámina de agua.

ESTACIÓN	K1 (1/d)	K2 (1/d)
El Delirio	0.00	427.17
Carrera 7a	31.96	460.46
Av. Ferrocarril	6.36	152.24
Av. Américas	10.48	70.67
Av. Boyacá	9.39	39.54
Visión Colombia	103.69	1.06
Zona Franca	0.75	0.83
Fucha Alameda	1.56	0.69

Tabla 2. Resultados de las constantes K1 y K2.

El cálculo de las condiciones iniciales para un determinado tramo se hace por las ecuaciones de balance de masa (ODO y Lo) relacionando el DBO, OD y la temperatura de cada estación. Además para cada tramo se emplea las correcciones correspondientes del ODO y las constantes K1 y K2.

CURVA SAG			
DATOS PARA EL CALCULO TRAMO 1			
El Delirio	Q	m ³ /S	0.37
	DBO ₅	mg/l	2.16
	OD	mg/l	7.53
	T	°C	12.75
	K1	1/d	31.96
Carrera 7a	Q	m ³ /S	0.66
	DBO ₅	mg/l	51.04
	OD	mg/l	5.93
	T	°C	15.8
	K1	1/d	31.96
CALCULO DE LAS CONDICIONES INICIALES TRAMO 1			
DBO ₀	mg/l	33.33	
ODO	mg/l	6.51	
To	°C	14.70	
CORRECCIÓN DEL ODO			
OXIGENO DE SATURACIÓN	mg/l	6.85	
Do	mg/l	0.34	
CORRECCIÓN CONSTANTE DE DESOXIGENACIÓN K1			
K1	1/d	25.05256299	
CORRECCIÓN CONSTANTE DE REAIREACIÓN K2			
K2	1/d	406.0293291	

Tabla 3. Ejemplo para el cálculo de cada tramo.

En la tabla de resultados las condiciones de OD y DBO dependen de la abscisa recorrida, y así es para cada uno de los tramos a desarrollar.

Abscisa(m)	t(d)	D(mg/L)	OD(mg/L)	DBO(mg/L)
K00+000	0,00	0,34	6,51	33,33
K00+500	0,01	0,66	6,19	33,20
K01+000	0,03	0,48	6,38	33,07
K02+000	0,05	0,25	6,61	32,81
K02+215	0,06	0,21	6,64	32,76
K03+000	0,08	0,13	6,73	32,55
K04+000	0,11	0,07	6,79	32,30
K04+431	0,12	0,05	6,80	32,19

Tabla 4. Resultados de OD y DBO calculados para cada tramo.

2.3.2 MODELO QUAL2K

La implementación de este modelo, para la calidad del agua, requiere datos adicionales a los anteriormente calculados como la posición geográfica de las estaciones, además se hace un esquema donde se indican los parámetros de cada estación teniendo como base los puntos de monitoreo inicial y final (véase la figura 1).

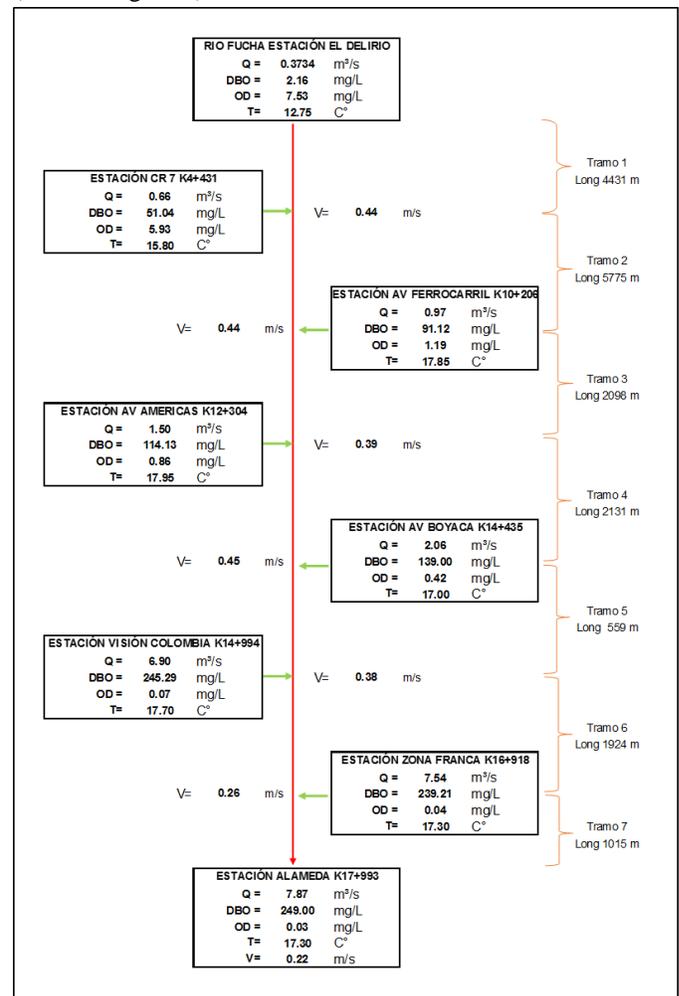


Fig. 2. Esquema para los datos iniciales del QUAL2K

En la calibración hidráulica se ajusta con los datos promedio de las estaciones del río Fucha reportados anteriormente, generando las curvas características de velocidad y profundidad en función del caudal. Esta información permite al programa reconocer de una manera adecuada la sección transversal de cada estación.

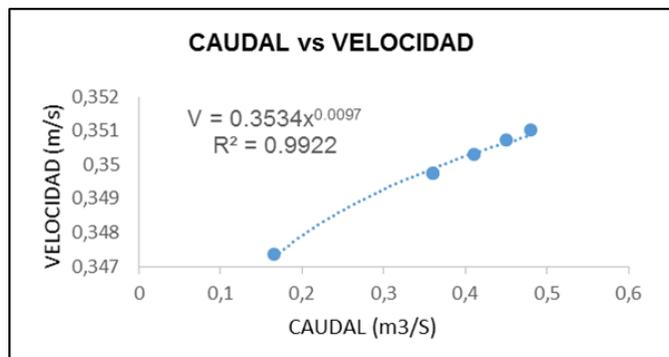


Fig. 3. Ejemplo estación El delirio para la curva característica

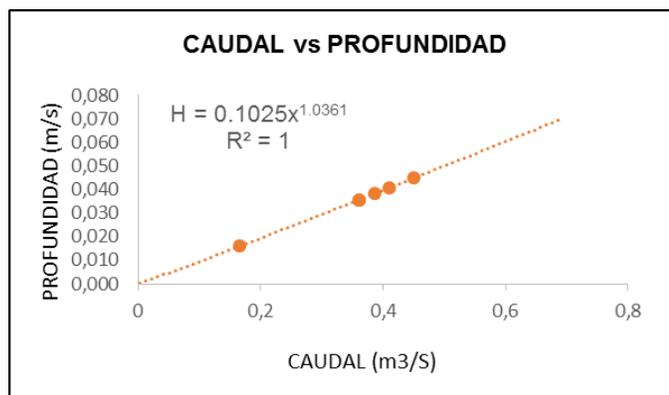


Fig. 4. Ejemplo estación El delirio para la curva característica.

3 RESULTADOS

Al determinar las curvas de OD y de DBO5 por los dos modelos seleccionados, donde para cada uno de ellos se hace el análisis de manera individual mostrando el comportamiento de la corriente del río Fucha y las variaciones de las constantes K1 y K2.

3.1 MODELO STREETER Y PHELPS

Los resultados del modelo de Streeter y Phelps se resumen en la tabla 5 y 6, a partir de dichos resultados se obtienen las curvas de comportamiento de OD y DBO5 durante el recorrido propuesto por el análisis en el río Fucha (véase en la Figuras 5).

TRAMO	RESUMEN DATOS GRÁFICA SAG				
	Abscisa(m)	t(d)	D(mg/L)	OD(mg/L)	DBO(mg/L)
1	K00+000	0.00	0.34	6.51	33.33
	K00+500	0.01	0.66	6.19	33.20
	K01+000	0.03	0.48	6.38	33.07
	K02+000	0.05	0.25	6.61	32.81
	K02+215	0.06	0.21	6.64	32.76
	K03+000	0.08	0.13	6.73	32.55
	K04+000	0.11	0.07	6.79	32.30
K04+431	0.12	0.05	6.80	32.19	
2	K04+431	0.00	3.76	3.10	74.96
	K05+000	0.02	0.90	5.96	74.63
	K06+000	0.04	0.46	6.39	74.04
	K07+000	0.07	0.39	6.46	73.45
	K07+500	0.08	0.36	6.49	73.16
	K08+000	0.09	0.34	6.52	72.87
	K09+000	0.12	0.29	6.56	72.29
K10+206	0.15	0.24	6.61	71.60	
3	K10+206	0.00	5.86	0.99	105.06
	K10+400	0.01	4.59	2.25	104.87
	K10+900	0.02	2.78	4.06	104.41
	K11+300	0.03	2.09	4.76	104.04
	K11+600	0.04	1.77	5.07	103.76
	K11+900	0.05	1.55	5.30	103.48
	K12+100	0.06	1.43	5.42	103.29
K12+304	0.06	1.33	5.52	103.11	
4	K12+304	0.00	6.39	0.60	128.54
	K12+500	0.01	5.82	1.17	128.35
	K12+800	0.01	5.09	1.90	128.05
	K13+200	0.02	4.32	2.67	127.65
	K13+500	0.03	3.87	3.12	127.35
	K13+800	0.04	3.48	3.50	127.06
	K14+100	0.05	3.16	3.83	126.76
K14+435	0.06	2.86	4.13	126.43	
5	K14+435	0.00	6.74	0.15	220.83
	K14+500	0.00	9.08	-2.20	220.70
	K14+600	0.01	11.93	-5.04	220.50
	K14+700	0.01	14.05	-7.16	220.29
	K14+800	0.01	15.64	-8.75	220.09
	K14+850	0.01	16.27	-9.38	219.99
	K14+900	0.01	16.81	-9.93	219.89
K14+994	0.02	17.64	-10.75	219.70	
6	K14+994	0.00	6.90	0.05	242.12
	K15+200	0.01	6.93	0.01	241.46
	K15+500	0.02	6.98	-0.04	240.51
	K15+800	0.04	7.03	-0.08	239.56
	K16+100	0.05	7.08	-0.13	238.61
	K16+400	0.06	7.12	-0.18	237.67
	K16+700	0.07	7.17	-0.22	236.73
K16+918	0.08	7.20	-0.25	236.05	
7	K16+918	0.00	6.92	0.03	244.21
	K17+000	0.00	6.98	-0.03	243.90
	K17+150	0.01	7.10	-0.15	243.32
	K17+300	0.02	7.21	-0.26	242.74
	K17+450	0.03	7.32	-0.37	242.16
	K17+600	0.04	7.43	-0.48	241.59
	K17+750	0.04	7.53	-0.58	241.02
K17+933	0.05	7.66	-0.71	240.32	

Tabla 5. Resumen resultados para el perfil de OD y DBO5 del río Fucha.

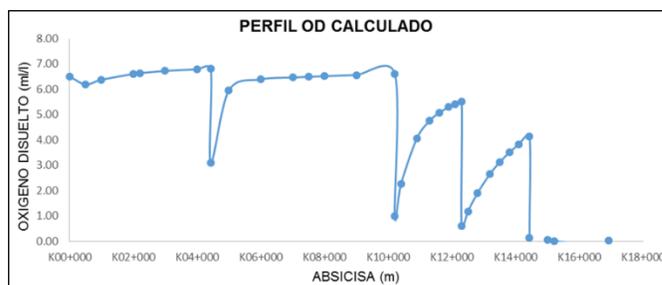


Fig. 5. Perfil de OD calculado del río Fucha.

El comportamiento del oxígeno disuelto en el río Fucha se ve representado por los cambios notables de la anterior figura resaltando los diversos fenómenos que se presentan en una corriente de agua (degradación, zona activa de descomposición y zona de recuperación), además aguas abajo el comportamiento de OD está en niveles críticos.

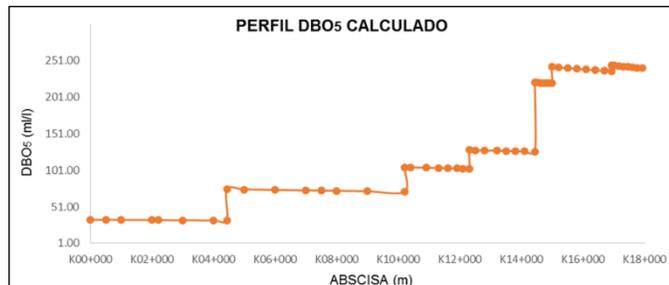


Fig. 6. Perfil de DBO5 calculado del río Fucha

En el perfil de DBO5 calculado del río Fucha se identifica un aumento considerable de contaminación al paso de cada estación por los vertimientos de aguas residuales, lo cual genera que la zona de recuperación sea muy pequeña para la cantidad de DBO5 suministrada a la corriente del río Fucha.

3.2 MODELO QUAL2K

Los resultados obtenidos por el programa QUAL2K dependen de la calibración realizada para la determinación de las constantes de desoxigenación (K1) y reaeración (K2) ya que estas deben tener relación con los perfiles obtenidos de OD y el DBO5 medido en las estaciones del río Fucha

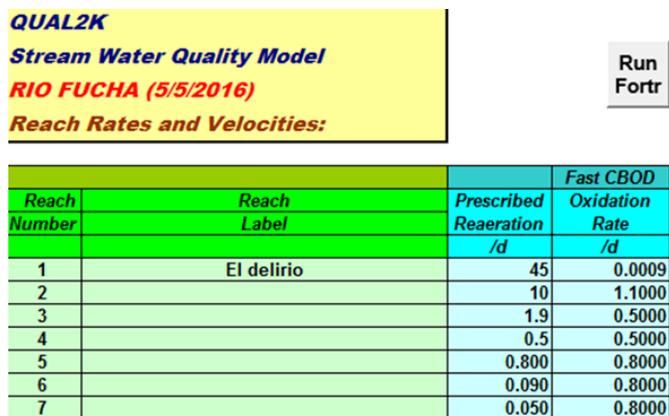


Fig. 7. Constantes K1 y K2 del río Fucha calibradas con el modelo QUAL2K

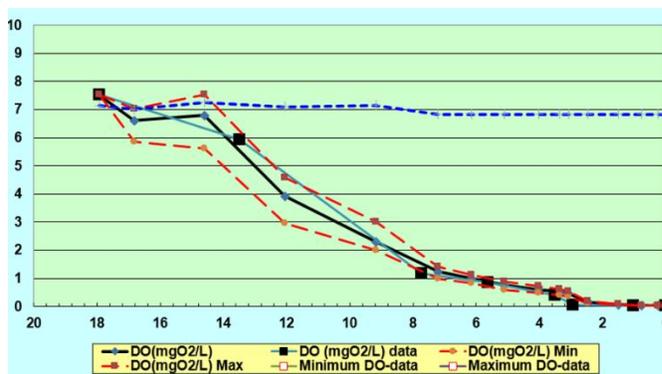


Fig. 8. Curva de OD calibrada del río Fucha con el modelo QUAL2K

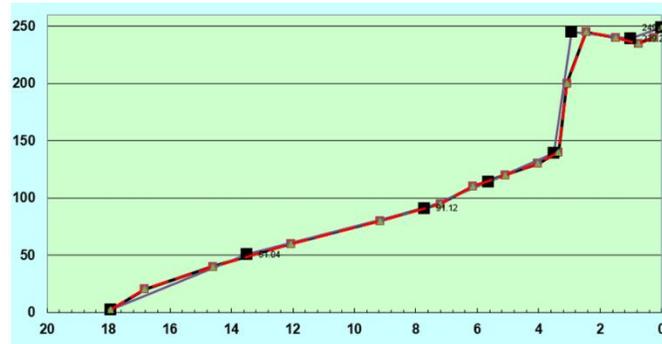


Fig. 9. Curva de DBO5 calibrada del río Fucha con el modelo QUAL2K

En la gráfica OD y DBO5 (Figura 8 y 9) por la simulación del programa, se muestran las condiciones de estado del río Fucha, además, se observa el nivel de saturación que debería estar en condiciones ideales para esta corriente del río Fucha y la calibración de la gráfica respecto a la gráfica representada por los datos medidos, para obtener las constantes K1 y K2.

4 CONCLUSIONES

- De acuerdo a los perfiles de OD y DBO5 medidos se refleja que sólo en el tramo 1 del río Fucha el agua se encuentra en condiciones óptimas y saludables, de igual manera se hace evidente que a partir de la carrera 7ª el oxígeno disuelto disminuye de manera notoria hasta alcanzar niveles negativos en su cuenca baja. Esto se debe a las conexiones de vertimientos con gran carga contaminante que se hacen a su cauce principal a partir de este punto y en el transcurso de todo su recorrido.
- Los coeficientes K1 y K2 obtenidos por los métodos matemáticos en la primera etapa de la metodología reportan valores altos, especialmente para la constante de oxigenación en las primeras estaciones. Lo anterior se debe a que en este primer tramo, correspondiente a la cuenca alta del río Fucha, las láminas de agua son

mínimas y la corriente conserva una buena oxigenación.

- El comportamiento del oxígeno disuelto en el río Fucha representado por el perfil de OD calculado, hace notable las transiciones en la curva que resaltan los diversos fenómenos que se presentan en una corriente de agua: degradación, zona activa de descomposición y zona de recuperación, de igual manera se evidencia que aguas abajo el comportamiento de OD está en niveles críticos.
- En el perfil de DBO5 calculado del río Fucha se identifica un aumento considerable de contaminación, al paso de cada estación, por los vertimientos de aguas residuales, lo cual genera que la zona de recuperación sea muy pequeña para la cantidad de DBO5 suministrada a la corriente del río.
- En la gráfica OD y DBO5 derivadas del programa QUAL2K, se muestran las condiciones de estado del río Fucha y el nivel de saturación de oxígeno que debería tener el afluente para estar en condiciones ideales.
- Los valores de las constantes K1 y K2 resultantes de la calibración por el modelo QUAL2K, son acordes a las curvas de OD y DBO5 a partir de datos medidos y coherentes con lo que dictaminan los parámetros científicos respecto al tema.
- Para la recuperación del río Fucha se hace necesario que las entidades encargadas realicen el debido seguimiento y control de los afluentes que entregan sus aguas al cuerpo hídrico de tal manera que se cumplan los objetivos de calidad para los años 2015 a 2020 de acuerdo a lo estipulado en la resolución 3162 del 30 de diciembre de 2015 emitida por Secretaría Distrital de Ambiente.
- Se recomienda para posteriores trabajos de grado relacionados con el tema tomar un mayor número de datos en campo, analizando otras variables de calidad del agua como: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales, grasas y aceites; de igual manera también se recomienda determinar los coeficientes K1 y K2 por la metodología empleada en la presente investigación para los demás ríos que conforman el sistema hídrico de la ciudad de Bogotá: Torca, Salitre y Tunjuelo.

5 REFERENCIAS

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. Calidad del Sistema Hídrico de Bogotá. 1a ed. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2008. 361 p.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Estado de Calidad de los Ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo: Índice de Calidad Hídrica – WQI 2014 - 2015. Informe Técnico N° 01608. Bogotá: SDA, 2015. 78 p.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Descripción y Contexto de la Cuencas Hídricas del Distrito Capital (Torca, salitre, Fucha y Tunjuelo). Informe Técnico N° 01575. Bogotá: SDA, 2015. 36 p.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Línea base-Usuarios, Cargas y Legalidad: Proceso de establecimiento de Meta Global de Carga Contaminante Quinquenio 2016-2020. Informe Técnico N° 01606. Bogotá: SDA, 2015. 51 p.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Marco Jurídico – Normatividad Ambiental. {En línea}. {19 marzo de 2016}. Disponible en: (<http://ambientebogota.gov.co/web/escombros/marco-juridico>).

COLOMBIA. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Resolución 3162. (30, diciembre, 2015). Por el cual se establecen los objetivos de calidad para el año 2020 y la meta global de carga contaminante de los cuerpos de agua del perímetro urbano de Bogotá D.C., y las metas individuales de la carga contaminante 2016 – 2020, y se adoptan otras determinaciones. Bogotá: La Secretaría, 2015. 26 p.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Plan Quinquenal 2016 – 2020. {En línea}. {19 marzo de 2016}. Disponible en: (<http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/plan-quinquenal-2016-2020>)

SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. Calidad del agua Evaluación y diagnóstico. 1a ed. Medellín: Universidad de Medellín. Ediciones de la U, 2011. 457 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE. VI Fase de Seguimiento de Efluentes Industriales y Corrientes

Superficiales de Bogotá D.C. 1a ed. Bogotá: IDEAM. DAMA, 2006. 91 p.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Programa de monitoreo de afluentes y efluentes en Bogotá Fase XI. 1a ed. Bogotá: SDA, 2014. 199 p.

CARDONA ALMEIDA, César Antonio. Desarrollo de un Modelo espacio-temporal de la hidrodinámica y la temperatura de un cauce fluvial: Caso de estudio río Fucha. Bogotá, 2009, 146 p. Trabajo de Investigación (magíster en hidrosistemas). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá (2008 – 2009). 1a ed. Bogotá: Ediciones Uniandes, 2010. 266 p.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá (2009 – 2010). 1a ed. Bogotá: Ediciones Uniandes, 2011. 226 p.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá (2010 – 2011). 1a ed. Bogotá: Ediciones Uniandes, 2012. 210 p.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá (2011 – 2012). 1a ed. Bogotá: Ediciones Uniandes, 2012.

DOMÍNGUEZ CATASÚS, Judith; BORROTO PORTELAS, Jorge; HERNÁNDEZ GARCÉS, Anel. Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río "Almendares". Revista CENIC. Ciencias Químicas. La Habana. 2005, vol. 36, no. 2. p. 98-105.

JIMÉNEZ J., Mario Alberto; VÉLEZ O., María Victoria. Análisis comparativo de Indicadores de la Calidad de Agua Superficial. Avances en Recursos Hidráulicos. Medellín. Octubre, 2006, no. 14. p. 53-69.

VERA PUERTO, Ismael Leonardo; LARA BORRERO, Jaime Andrés. Discusión de operadores involucrados en un proceso de calibración mediante algoritmos genéticos para un modelo de calidad del agua de corrientes superficiales trabajando con la herramienta Qual2Kw. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Medellín. Diciembre, 2009, no. 50. p. 77-86.

FORMICA, Stella Maris; SACCHI, Gabriela Andrea; CAMPODONICO, Verena Agustina; PASQUINI, Andrea Inés; CIOCCALE, Marcela Alejandra. Modelado de calidad de agua en ríos de montaña con impacto antrópico. Caso de estudio: Sierra Chica de Córdoba, Argentina. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Ciudad de México. 2015, vol. 31, no. 4. p. 327-34.

