



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN EN EL RÍO TUNJUELO,
CON RESPECTO A LAS ESTACIONES DE MONITOREO REAL
COMPRENDIDAS ENTRE LA ESTACIÓN REGADERA HASTA LA ESTACIÓN
ISLA PONTÓN SAN JOSÉ

JEAN PAUL EDUARDO GARCÍA VÁSQUEZ
Jpgarcia56@ucatolica.edu.co

JUAN SEBASTIAN MORENO BARRETO
Jsmoreno02@ucatolica.edu.co

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ DC
2020

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN EN EL RÍO TUNJUELO,
CON RESPECTO A LAS ESTACIONES DE MONITOREO REAL
COMPRENDIDAS ENTRE LA ESTACIÓN REGADERA HASTA LA ESTACIÓN
ISLA PONTÓN SAN JOSÉ

JEAN PAUL EDUARDO GARCÍA VÁSQUEZ
jpgarcia56@ucatolica.edu.co

JUAN SEBASTIAN MORENO BARRETO
jsmoreno02@ucatolica.edu.co

Trabajo de Grado período 2020-1

Profesor:
FELIPE SANTAMARIA ALZATE
Ingeniero Ambiental y Sanitario, ESP., M.SC.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ DC
2020



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirnos culminar este proyecto y este ciclo en nuestra vida en la que hemos disfrutado y aprendido, a nuestros padres por su apoyo y amor incondicional tanto los momentos de adversidad como la gloria. Además a nuestros compañeros y amigos por siempre apoyarnos en este proceso.

Con gran admiración a nuestro director Felipe Santamaría por su gran conocimiento y siempre disposición a ayudarnos.

Juan Sebastián Moreno Barreto

Jean Paul Eduardo García Vásquez

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D. C. 24 de Junio de 2020

TÍTULO

Estudio de la capacidad de Autodepuración en el río Tunjuelo, con respecto a las estaciones de monitoreo real comprendidas entre la estación Regadera hasta la estación Isla pontón San José.

ALTERNATIVA.

Trabajo de investigación

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Saneamiento de comunidades.

EJE TEMÁTICO

El eje está formado por las áreas de Hidráulica, Plantas de Tratamiento, Hidrología, Acueductos y Alcantarillado Instalaciones y Redes, siendo así el eje central del proyecto enfocado al saneamiento de los ríos, específicamente el Río Tunjuelo en la ciudad Bogotá.

Tabla de Contenido

TÍTULO	3
ALTERNATIVA	6
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	6
EJE TEMÁTICO	6
INTRODUCCIÓN	12
ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	13
ANTECEDENTES	13
JUSTIFICACIÓN	24
PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	26
MARCO DE REFERENCIA	27
ESTADO DE ARTE	27
MARCO CONCEPTUAL	31
ENFERMEDADES DEL AGUA	31
DIAGNOSTICO DEL AGUA	33
<i>Consumidores del OD</i>	34
<i>Oxidación de la materia orgánica carbónica</i>	34
<i>Oxidación de material nitrogenado</i>	34
RECUPERACIÓN DEL AGUA	35
<i>Aportantes del OD</i>	36
MARCO TEÓRICO	37
<i>Comportamiento de materia orgánica</i>	37
MODELOS DE CALIDAD DE AGUA	40
MARCO GEOGRÁFICO	47
MARCO LEGAL	49
OBJETIVOS	50
Objetivo General	50
Objetivos Específicos	50
ALCANCES Y LIMITACIONES	51
LIMITACIONES	51

METODOLOGÍA Y RESULTADOS.....	52
RESULTADOS.....	75
Escenario 1	75
Escenario 2	79
Escenario 3	82
CONCLUSIONES.....	85
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS	91

Lista de Tablas

Tabla 1. Comportamiento de la DBO5 Según RCHB 2008	14
Tabla 2. Comportamiento del OD Según RCHB 2008	14
Tabla 3. Comportamiento del Caudal RCHB 2008.....	15
Tabla 4. Tramos de implementación en el río Tunjuelo	19
Tabla 5. Objetivos de Calidad Río Tunjuelo 2018-2020	49
Tabla 6. Estaciones de monitoreo.....	52
Tabla 7. Localización de las estaciones de monitoreo.....	54
Tabla 8. Resultados de la campaña 2009-2018.....	54
Tabla 9. Datos de calibración del modelo	67

Lista de Figuras

Figura 1 Perfil de DBO5 río Tunjuelo 2012 - 2013.....	16
Figura 2. Perfil de oxígeno río Tunjuelo 2012 - 2013	17
Figura 3. Perfil oxígeno disuelto resultante de la calibración. Tramo 1	20
Figura 4. Perfil oxígeno disuelto resultante de la calibración tramo 2.....	21
Figura 5. Comportamiento DBOC y DBON en el tiempo	37
Figura 6. Comportamiento DBOu en el tiempo	38
Figura 7. Relación DBO ejercida y DBO remanente	39
Figura 8. Mapa de la Cuenca del río Tunjuelo	47
Figura 9. Ubicación de las estaciones de monitoreo	53
Figura 10. Perfil del oxígeno disuelto medido	55
Figura 11. Perfil de materia orgánica.....	55
Figura 12. Curva hidráulica Velocidad. Estación Regadera	56
Figura 13. Curva hidráulica Profundidad. Estación Regadera	57
Figura 14. Curva hidráulica Velocidad. Estación Yomasa	57
Figura 15. Curva hidráulica Profundidad. Estación Yomasa	58
Figura 16. Curva hidráulica Velocidad. Estación Doña Juana	58
Figura 17. Curva hidráulica Profundidad. Estación Doña Juana	59
Figura 18. Curva hidráulica Velocidad. Estación Barrio México	59
Figura 19. Curva hidráulica Profundidad. Estación Barrio México	60
Figura 20. Curva hidráulica Velocidad. Estación San Benito	60
Figura 21. Curva hidráulica Profundidad. Estación San Benito	61
Figura 22. Curva hidráulica Velocidad. Estación Makro Autopista Sur.....	61
Figura 23. Curva hidráulica Profundidad. Estación Makro Autopista Sur.....	62
Figura 24. Curva hidráulica Velocidad. Estación Transversal 86	62
Figura 25. Curva hidráulica Profundidad. Estación Transversal 86	63
Figura 26. Curva hidráulica Velocidad. Estación Puente Independencia	63
Figura 27. Curva hidráulica Profundidad. Estación Puente Independencia	64
Figura 28. Curva hidráulica Velocidad. Estación Isla Ponto San José	64
Figura 29. Curva hidráulica Profundidad. Estación Isla Ponto San José	65
Figura 30. Perfil de referencia río Tunjuelo.....	66
Figura 31. Curva SAG.....	67
Figura 32. Datos de la cabecera. Estación Regadera.....	68
Figura 33. Datos en la pestaña Reach	69
Figura 34. Datos en la pestaña Reach	69
Figura 35. Datos en la pestaña Reach	70
Figura 36. Aporte de entrada de caudal y DBO5	71
Figura 37. Curva DBO calibrada	72
Figura 38. Curva OD calibrada.....	73
Figura 39. K1 y K2.....	74
Figura 40. Escenario 1 perfil OD	75

Figura 41. Escenario 1 perfil DBO5	76
Figura 42. Escenario 1 perfil de referencia	77
Figura 43. Escenario 2 perfil OD	79
Figura 44. Escenario 2 perfil DBO5	80
Figura 45. Escenario 2 perfil de referencia	81
Figura 46. Escenario 3 perfil OD	82
Figura 47. Escenario 3 perfil de referencia	84

Lista de Anexos

Anexos 1. Solicitud datos SDA.....	91
Anexos 2. Estación Regadera	92
Anexos 3. Estación Yomasa	94
Anexos 4. Estación Doña Juana	96
Anexos 5. Estación San Benito	97
Anexos 6. Estación TV 86	98
Anexos 7. Estación P. Independencia	99
Anexos 8. Estación Barrio México	101
Anexos 9. Estación Makro Sur	102
Anexos 10. Estación Isla Ponton San José	103

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los territorios a lo largo del país han visto en los ríos una fuente de abastecimiento y transporte lo que ha permitido un mayor crecimiento en las grandes ciudades. Ahora bien en la ciudad de Bogotá se evidencia que la concentración de la población es muy alta, permitiendo que los desechos bien sean domésticos o industriales generen un impacto directo en las fuentes hídricas que transitan por esta ciudad. Es pertinente mencionar que los cuerpos de agua tienen la capacidad de auto regenerarse a sí mismos sin intervención antrópica, a esto se le conoce como la autodepuración.

Con el fin de evidenciar la capacidad de autodepuración que tienen los ríos, se planteó el estudio de un tramo del río Tunjuelo ubicado en la ciudad de Bogotá y más específicamente se investigó los puntos de monitorio que se encuentran a lo largo de este, teniendo como base de análisis los datos de algunas parámetros de calidad de agua a lo largo de 43 km aproximadamente que abarcan estos puntos.

Al identificar que a lo largo del río se encuentra datos que permiten observar que el río tiene un grado de contaminación alto, se plantearon 3 escenarios con el uso de software Qual2k el cual permitió determinar con que valores de calidad de agua el río presenta autodepuración y además que puntos del río tienen un comportamiento crítico.

Para la realización de esta investigación se tomó como base la información de calidad de agua suministrada por la Secretaria de Ambiente para determinar un comportamiento aproximado a la realidad de este río.

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

ANTECEDENTES

La cuenca hídrica del río Tunjuelo nace en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá. Atravesando la ciudad de oriente a occidente, siendo uno de los últimos afluentes del río Bogotá. La corriente superficial ha sido objeto de múltiples estudios en la parte ambiental y sanitaria, ya que en las últimas décadas las agencias ven con preocupación el daño colateral en los ecosistemas acuáticos, además de que es receptor del alcantarillado residual de la parte Sur de la ciudad.

Por esto se ha visto la necesidad de hacer un monitoreo constante de la calidad del recurso hídrico; la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) junto con otras entidades, a partir de convenios y campañas realizadas, ha desarrollado proyectos del seguimiento de calidad de agua del sistema hídrico, a través de la operación Red de Calidad Hídrica de Bogotá (RCHB).

La Secretaria Distrital de Ambiente junto con el Acueducto de Bogotá por medio del convenio 005/2006-EAAB-ESP presentan el informe de estudio de la calidad de agua de los ríos que conforman el sistema hídrico de Bogotá, mediante la conformación de la red utilizaron la siguiente metodología y validación de los puntos de monitoreo, como lo indica el informe cruzaron los puntos seleccionados en el recorrido de campo con los vertimientos relacionados en el PSMV de la Empresa, y tramos, según la Resolución 1813 de 2006 del DAMA. De esta manera se ubicaron puntos que brindaran información útil para la RCHB, que permitieran la verificación de los objetivos de calidad y determinaron la afectación de los vertimientos definidos en el PSMV; así dio un total de 37 puntos de monitoreo en las 5 corrientes superficiales a estudiar, 4 dentro del perímetro urbano y una por fuera de éste.

En la metodología, la ejecución del aforo se realizó por el método de área y velocidad. Respecto a la recolección de las muestras lo hicieron según lo establecido por el Sistema de Gestión de Calidad del Laboratorio de Aguas y del Sistema de Normalización Interna de la EAAB-ESP.¹

Una vez determinado los parámetros de calidad de agua se presentan los resultados en tablas y gráficas, cabe aclarar que son múltiples y diversos los parámetros que se realizó en esta campaña, sin embargo, se presentan los resultados que son de gran relevancia para la realización del proyecto.

¹ Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente : Empresa de Acueducto y. *Calidad del sistema hídrico de Bogotá*. Bogotá : Editorial Pontificia Universidad, 2008. 978-958-716-124-3.

Tabla 1. Comportamiento de la DBO5 Según RCHB 2008

Punto de monitoreo	No. del tramo	Resol. 1813/06 de IDAMA (mg/l)	Concentración de DBO ₅ en el río Tunjuelo (mg/l)			
			Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Valor mediana
La Regadera	1	≤100	2	4	2	2
100 m aguas abajo de la quebrada Yomasa	2	≤110	2	123	43	43
Doña Juana	2	≤110	4	278	100	106
Barrio México	3	≤110	6	89	45	49
San Benito	3	≤110	13	180	88	95
Makro Autopista Sur	4	≤150	13	201	66	57
Transversal 86	4	≤150	20	534	213	215
Puente Independencia	4	≤150	38	405	233	245
Isla Pontón San José	4	≤150	54	711	195	164

Fuente (convenio 005/2006-EAAB-ESP)

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la DBO5 en los puntos de monitoreo, donde se puede observar que las concentraciones de la carga contaminante son altas.

Tabla 2. Comportamiento del OD Según RCHB 2008

Punto de monitoreo	No. del tramo	Resol. 1813/06 de IDAMA (mg/l)	Concentración de OD en el río Tunjuelo (mg/l)			
			Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Valor mediana
La Regadera	1	≥1	1,90	10,50	6,98	6,50
100 m aguas abajo de la quebrada Yomasa	2	≥0	ND	8,20	4,27	3,65
Doña Juana	2	≥0	ND	8,00	3,44	3,40
Barrio México	3	≥0	ND	2,80	0,45	0,10
San Benito	3	≥0	ND	2,60	0,37	0,10
Makro Autopista Sur	4	≥0	ND	2,00	0,52	0,10
Transversal 86	4	≥0	ND	0,60	0,15	0,10
Puente Independencia	4	≥0	ND	4,00	0,34	0,10
Isla Pontón San José	4	≥0	ND	0,20	0,10	0,10

Fuente (convenio 005/2006-EAAB-ESP)

Al contrario de las concentraciones de la Tabla 1 las concentraciones del oxígeno disuelto son bajas como se observa en la

Tabla 2, permitiendo suponer un inverso entre estos dos parámetros. De igual forma se presentan los resultados del caudal en cada punto de monitoreo para ver el comportamiento hidráulico del río, como vemos en la Tabla 3.

Tabla 3. Comportamiento del Caudal RCHB 2008

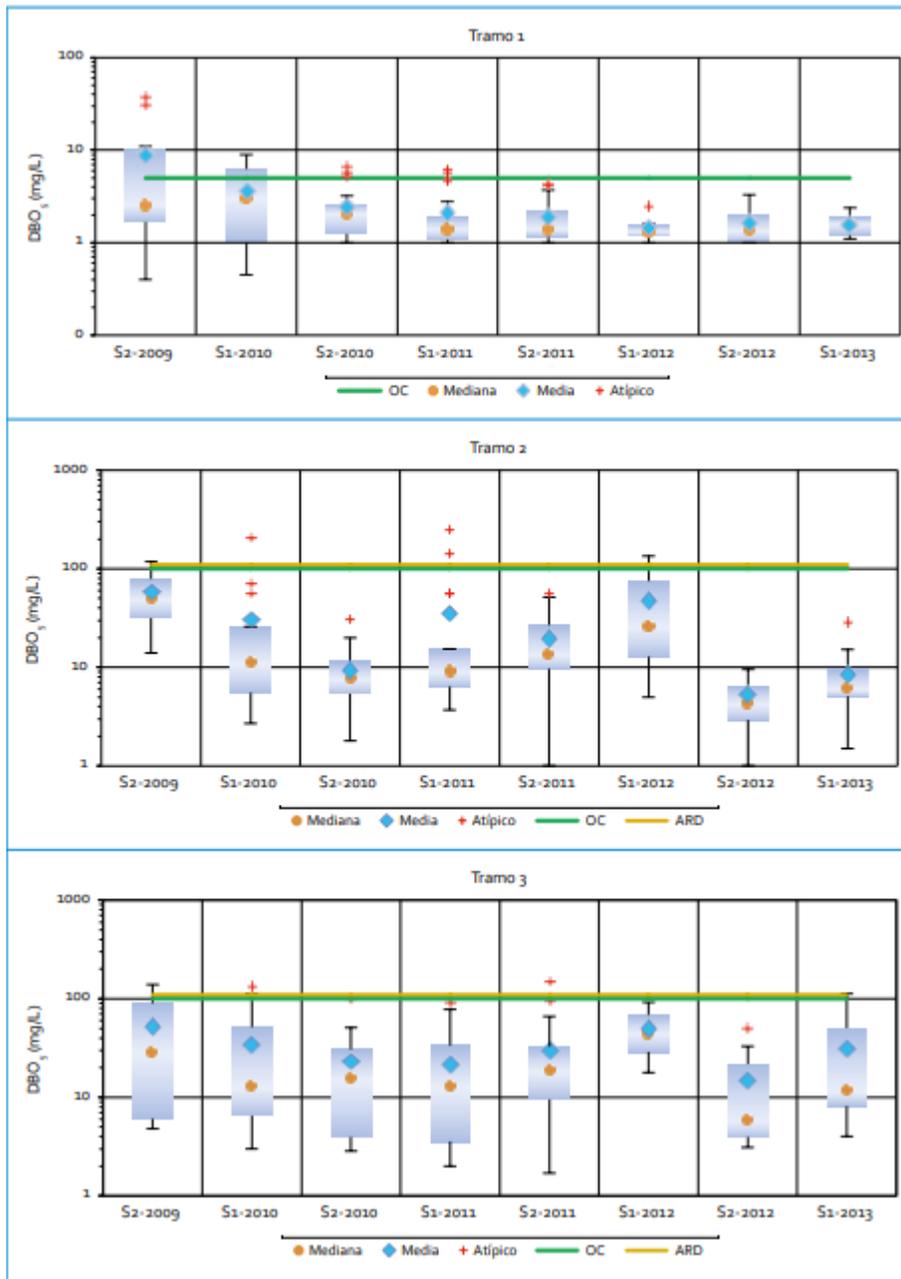
Punto de monitoreo	No. del tramo	Valores de caudal (l/s) en el río Tunjuelo			
		Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Valor mediana
La Regadera	1	2	300	26,5	11,5
100 m aguas abajo de la quebrada Yomasa	2	135	44.702	3.481	454,7
Doña Juana	2	207	15.751	2.450,1	585,7
Barrio México	3	317	15.024	1.902,8	771,9
San Benito	3	624,1	42.000	6.162,3	1.477,6
Makro Autopista Sur	4	676	19.436	4.696	1.665,5
Transversal 86	4	1339	23.686	5.518,3	3.130,4
Puente Independencia	4	2352	20.753	5.160	3.173,8
Isla Pontón San José	4	2252	20.748	6.686	4.802,5

Fuente (convenio 005/2006-EAAB-ESP)

De esta manera se ha venido haciendo el monitoreo de la cuenca del río Tunjuelo, como se mencionó anteriormente la entidad más involucrada es la Secretaria Distrital de Ambiente que en los trascurros de años ha estado presente junto con otras entidades e instituciones académicas como la Universidad de los Andes, donde por medio del contrato de Ciencia y Tecnología 01202 de 2009, al igual que en las anteriores fases de monitoreo de la Red de Calidad Hídrica de Bogotá (RCHB), involucró la revisión de los puntos de monitoreo que hasta la fecha poseía la red. Para la evaluación del número de puntos constituyentes de la RCHB en el periodo de monitoreo 2012-2013, la Universidad de los Andes evaluó la pertinencia y ubicación de cada uno de estos puntos. Como resultado de esta evaluación, se mantuvieron en su totalidad los sitios de monitoreo existentes para todos los ríos.

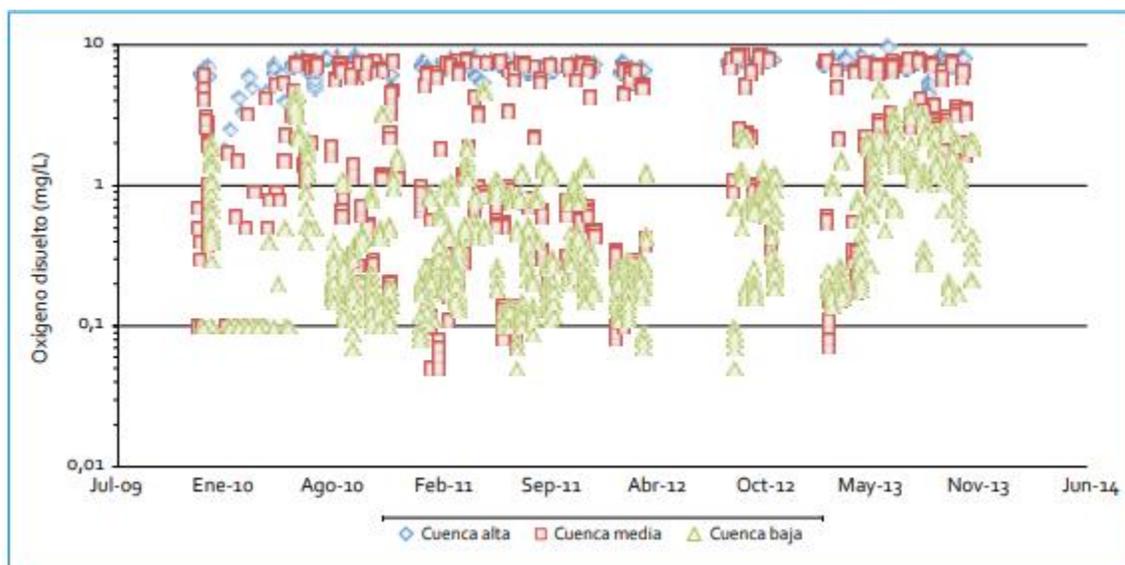
Para la validación y análisis de datos, utilizaron los percentiles ya que observaron un dato frente a un conjunto de datos, las medidas más utilizadas para determinar la tendencia central, fue la media y la mediana. Al igual que en el informe anterior se presenta los resultados de gran relevancia para el proyecto como se muestra en la Figura 2 donde se observa el perfil de oxígeno disuelto y los resultados del perfil DBO5 en la Figura 1.

Figura 1 Perfil de DBO5 río Tunjuelo 2012 - 2013



Fuente (RCHB 2012–2013)

Figura 2. Perfil de oxígeno río Tunjuelo 2012 - 2013



Fuente (RCHB 2012–2013)

La evaluación de la calidad del agua con respecto a los objetivos de calidad se implementó por medio del Índice de Calidad del Agua (WQI). Donde los valores lo catalogaron de la siguiente forma.

Excelente [$95 < WQI < 100$]:

La calidad del agua alcanza los objetivos de calidad; la calidad está protegida sin que las condiciones deseables estén amenazadas.

Buena [$80 < WQI < 94$]:

La calidad del agua alcanza los objetivos de calidad; la calidad está protegida en un menor nivel. Sin embargo, las condiciones deseables pueden estar amenazadas.

Regular [$65 < WQI < 79$]:

La calidad del agua no alcanza los objetivos de calidad; ocasionalmente las condiciones deseables están amenazadas.

Marginal [$45 < WQI < 64$]:

La calidad del agua no alcanza los objetivos de calidad; frecuentemente las condiciones deseables están amenazadas.

Pobre [$0 < WQI < 44$]:

La calidad del agua no alcanza los objetivos de calidad; la mayoría de veces la calidad está amenazada o afectada, por lo general apartada de las condiciones deseables.

Una vez obtuvieron los resultados de parámetros de calidad de agua definieron el estado actual de cada tramo como lo indica el estudio en el tramo 1 del río Tunjuelo únicamente se encuentra un punto de monitoreo (La Regadera). Sobre este se obtuvo un total de 103 datos, de los cuales 7 no alcanzaron los objetivos de calidad. A partir de la estimación del WQI, la calidad del agua en este tramo 1 fue buena. En el tramo 2 de este río hay dos puntos de monitoreo (Yomasa y Doña Juana) con un total de datos de 187, de los cuales 19 no lograron los objetivos de calidad. El WQI de este tramo fue bueno. El tramo 3 de este río está conformado por cuatro puntos: Doña Juana, Barrio México, San Benito y Makro Autopista Sur, con 376 datos en total, de los cuales 58 no alcanzaron los objetivos de calidad. De acuerdo con el cálculo del WQI, para este tramo la calidad del agua fue pobre. Por último, el WQI en el tramo 4 (Makro Sur, Tv 86, Puente Independencia e Isla Pontón) mostró una calidad del agua del mismo comportamiento que el tramo anterior; el WQI para este tramo fue de 43. En este tramo se obtuvieron 382 datos, de los cuales 127 no cumplieron los objetivos de calidad.²

Esta operación ha impulsado el interés de varios proyectos a ejecutar la recuperación de los sistemas hídricos de Bogotá, una de las herramientas más utilizadas son las modelaciones de los ríos respecto al saneamiento del mismo, para mejorar la calidad de agua y contribuir al mantenimiento de este recurso. Como es el caso de la modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá el cual que presenta la aplicación de un modelo integrado de calidad del agua en el río Tunjuelo (QUAL2Kw), el cual fue implementado a partir de información secundaria recopilada de diferentes entidades locales y regionales. La implementación de este modelo tuvo como propósito evaluar el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y el Oxígeno Disuelto (OD) en el río. Para la calibración del modelo se adoptó información de los puntos de medición de la Red de Calidad del Recurso Hídrico de la SDA. Se consideraron dos escenarios: el primero, que el sistema de drenaje sanitario que actualmente vierte al río persista, con un aumento de caudal de acuerdo al crecimiento poblacional de la cuenca; el segundo, corresponde al

² Manuel Salvador Rodríguez Susa, Lina Sabrina. Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2012-2013). Bogotá : Uniandes, 2014. pág. 231. 978-958-774-047-9.

saneamiento de dichos vertimientos, a través de los interceptores que conducirán el agua residual a la futura Planta de tratamiento Canoas.³ La metodología implementada en el proyecto consistió en los siguientes pasos.

Toma de muestra: La toma de muestras la ejecutaron simultáneamente con el aforo del caudal, las mediciones in situ correspondió a pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad, las muestras restantes las analizaron en los laboratorios de la Universidad de los Andes. Cabe aclarar que la toma de muestra fue en las descargas que le llega al río.

Datos hidráulicos: Utilizaron el software HEC-RAS, para proporcionar las características hidráulicas, denominadas las curvas de calibración que tienen una relación de la velocidad y profundidad en función del caudal. Esta relación es de tipo potencial.

Tramos modelados: seleccionaron dos tramos independientes debido a la dificultad que presenta el río, debido a que en el recorrido del río se instaló una explotación minera de CEMEX lo que dificultó una continuidad de los datos reales en la corriente. Los tramos que contemplaron fueron los que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Tramos de implementación en el río Tunjuelo

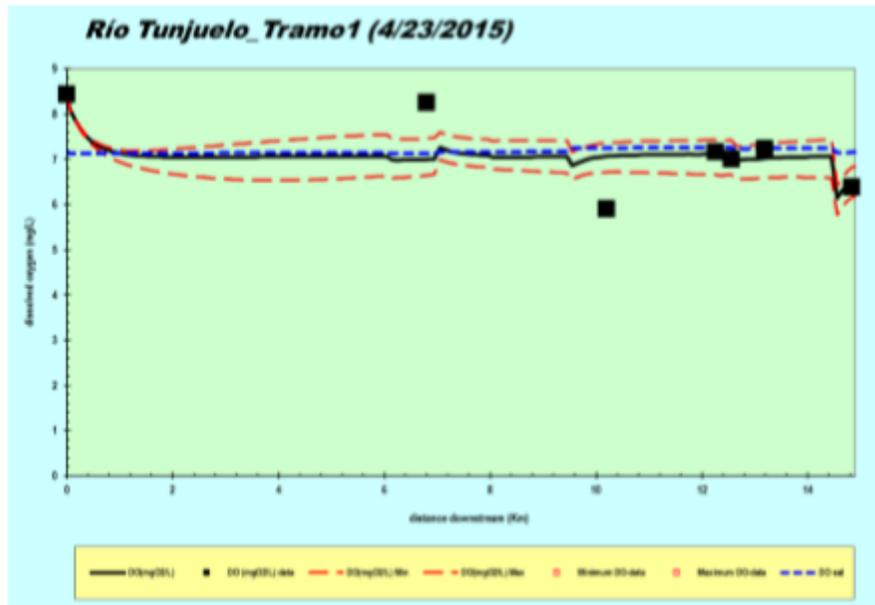
Tramo	Estación Aguas Arriba	Estación Aguas Abajo	Longitud [km]
1	Puente Vía Pasquilla	La Rápida	14.84
2	Barrio México	Isla Pontón – San José	21.88

Fuente: Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de Implementación del plan de saneamiento de Bogotá

Aplicaron los resultados tomados en campo y laboratorio, junto con la recopilación de las estaciones del río, en el software QUAL2K, presentando los siguientes resultados.

³ Ossa, Juan Manuel Castaño. Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá. [En línea] Universidad Nacional de Colombia, 2015. <http://bdigital.unal.edu.co/52643/1/1088000081.2015.pdf>.

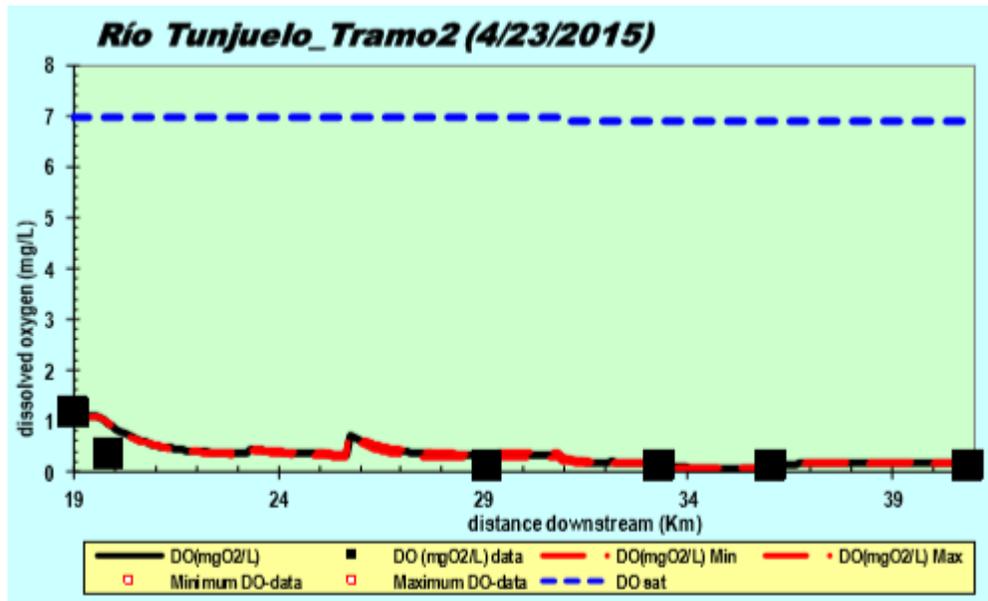
Figura 3. Perfil oxígeno disuelto resultante de la calibración. Tramo 1



Fuente: Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de Implementación del plan de saneamiento de Bogotá

En la Figura 3 se observa el perfil del oxígeno modelado en el tramo 1 en el cual se observa que para el tramo 1 la salida del modelo es similar para condiciones sin interceptor y con interceptor, esto se debe a que la mayoría de los desarrollos urbanos de la zona están conectados al interceptor Tunjuelo Alto y solo algunas urbanizaciones continúan descargando sus aguas residuales al río ante la imposibilidad de conectarse por gravedad a dicho interceptor. De acuerdo con esto sería importante evaluar los usos del agua en la cuenca e identificar si existen conflictos a lo largo del tramo y/o a la salida y si existe la necesidad de la construcción de un nuevo interceptor que recoja dichas aguas residuales.

Figura 4. Perfil oxígeno disuelto resultante de la calibración tramo 2



Fuente: Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de Implementación del plan de saneamiento de Bogotá

En la Figura 4 se observa en perfil del oxígeno modelado el tramo 2 muestra la importancia de la construcción del interceptor. No obstante, las cargas contaminantes a la entrada son altas y el oxígeno disuelto es casi cero. Lo anterior permitiría establecer la importancia de tratar las aguas provenientes de las canteras antes de que ingresen al río, y que estas sean entregadas por lo menos en las mismas condiciones de entrada. Aun así, la modelación indica que el río continuará, aguas abajo, prácticamente en las mismas condiciones (anóxicas), por la poca pendiente y baja velocidad del flujo.⁴

Por otro lado, otros proyectos se han arriesgado hacer propuestas que mejoren la operación de RCHB del río Tunjuelo, debido que en el transcurso de los años los resultados ambientales no se han modificado positivamente. Si no al contrario han venido en déficit en la parte sanitaria, ya que la mayoría de estudios se enfocan en realizar el estudio del estado actual de la corriente mediante la validación de los datos de la red, ahora bien la modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá propone la optimización de la red de calidad hídrica de Bogotá (RCHB) para los ríos Fucha y Tunjuelo en la ciudad de Bogotá D.C donde tiene como finalidad plantear mejoras

⁴ Ossa, Juan Manuel Castaño. Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá. [En línea] Universidad Nacional de Colombia, 2015. <http://bdigital.unal.edu.co/52643/1/1088000081.2015.pdf>.

sobre la Red de Calidad Hídrica de estos ríos; partiendo de la recopilación de registros históricos de la RCHB; seguido de la selección y aplicación de metodologías geoestadísticas y estadística multivariada aplicadas al comportamiento de la red desde el año 2008 al 2013, en base en una revisión bibliográfica que permita elegir la mejor alternativa metodológica.

La metodología que implementaron fue analizar la toma de muestra por estación y no por tramo, para esto tuvieron en cuenta 10 parámetros de calidad de agua (pH, OD, DBO5, DQO, SST, Grasas y Aceites, SAAM, Nitrógeno Total, Fosforo Total y Coliformes Fecales). Posteriormente establecieron el periodo de análisis, el cual fue mensual multianual. El paso siguiente, fue que calcularon los valores atípicos y cuartiles.

Una vez desarrollaran estos procesos compararon las metodologías Análisis Jerárquico (AJ), Análisis Discriminante Lineal (ADL), Redes Neuronales, IDW y krigging por medio de los siguientes criterios.

- Complejidad de implementación.
- Programación.
- Temporalidad.
- Espacial.
- Parámetros evaluados de calidad.
- Resultados.

Al aplicar cada metodología en los resultados históricos de los parámetros de calidad de agua se llegó a las siguientes conclusiones del río Tunjuelo.

- Para el río Tunjuelo el análisis jerárquico presento resultados diferentes a los resultados que se generaron por las metodologías de LDA e IDW, por consecuente se le dio principal importancia a la metodología de LDA y de IDW para el análisis de este río.
- Inicialmente las estaciones Regadera y UAN son muy similares por ende se debería monitorear solo UAN, teniendo en cuenta que si se realiza un análisis horario dicha decisión podría modificar. No es eficiente distribuir las mediciones en las estaciones para misma frecuencia, pero diferente espacialidad.⁵

⁵ANGIE E. DIAZ LEON,LINA P. SOTO C. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ (RCHB) PARA LOS RÍOS FUCHA Y TUNJUELO EN LA CIUDAD DE BOGOTA D.C. [En línea] UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, 2016.

- La estación Yomasa debe de ser medida en los meses de mayo y agosto, y dejar de monitorear las estaciones Regadera y UAN, dado que UAN y Regadera para dichos meses presentan las mismas concentraciones; en el mes de septiembre se monitorean todas las estaciones menos Regadera, ya que tiene el mismo comportamiento que la estación Barrio México. Por último, la estación Regadera para el mes de noviembre puede monitoreada bien sea por San Benito o la Estación UAN.

JUSTIFICACIÓN

A medida que la humanidad ha buscado asentarse cerca de las fuentes de agua, esto ha contribuido a la contaminación progresiva de estas, ya que las descargas de aguas domésticas residuales e industriales comenzaron a contaminar los cuerpos de agua en grandes proporciones, deteriorando los ecosistemas acuáticos.

Debido a que el agua es un elemento fundamental para la existencia y el mantenimiento de la vida, existiendo una relación directa entre el desarrollo social y la demanda de este recurso. Se ha vuelto un tema primordial la recuperación de las aguas residuales, mediante mecanismos de control. Esta problemática genera un costo alto en los tratamientos de aguas contaminadas provocando alternativas de estudio que implemente una mejora en el cuerpo de agua.

Frente a esto, desde hace tiempo se había observado que un río contaminado por aguas residuales recupera progresivamente su pureza inicial aguas abajo del punto de descarga, sin necesidad de intervención humana alguna. Esta providencial recuperación del medio natural, que durante largo tiempo pareció compleja y misteriosa, ha sido objeto de múltiples estudios para comprenderla, evaluarla y utilizarla al máximo. Los primeros estudios mostraron que la autodepuración es un complejo fenómeno natural, que se da en los medios acuáticos, y aplicable en microorganismos de distintas especies, que utilizan y mineralizan las sustancias orgánicas aportadas por los vertidos.

Para este proyecto se abordó el caso del río Tunjuelo ubicado en la ciudad de Bogotá, y tomando como base los estudios realizados anteriores se observa que la calidad de agua es deficiente; por lo tanto se vio la importancia de realizar un estudio de la capacidad de autodepuración de la corriente del río, y se efectuó además un análisis de calidad del agua para el conocimiento del estado actual del mismo. Aunque la autodepuración depende de distintos parámetros de calidad de agua, el enfoque de dicha investigación es respecto al oxígeno disuelto (OD) ya que es el indicador de que el cuerpo de agua presente o no autodepuración, como además concentraciones altas causan la presencia de vida animal como vegetal, asimismo la insuficiencia de oxígeno disuelto puede causar fuertes cambios en las especies en diversas masas de agua, malos olores y enfermedades en el cuerpo humano.

Por consiguiente, para establecer la capacidad de autodepuración del río, se planteó la cuantificación del oxígeno disuelto, es decir, el comportamiento del río frente a las descargas contaminantes, de tal manera saber la cantidad de oxígeno presente en el cuerpo de agua. Para efectuar dicho estudio se implementó el software QUAL2K que es un programa que utiliza como base las ecuaciones de Streeter-Phelps para el cálculo del oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno, esto a partir de la estación la Regadera hasta la estación Isla Ponto San José ya que cubre la mayor parte del río en el sector urbano.

Con el fin de cumplir con los estándares de calidad de agua exigidos por la entidad Secretaría Distrital de Medio Ambiente, y mejorar el estado actual del río, se establece el modelamiento de distintos escenarios que cumplan los requisitos exigidos. De igual forma el desarrollo de esta investigación podría basarse para la toma de decisiones en cuanto a mejorar la calidad de agua de la cuenca del río Tunjuelo.

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia de la planeación de Bogotá los escenarios ambientales han sido ocupados progresivamente por marginalidad urbana, producto de diferentes factores como la pobreza rural, la marcada exclusión social, entre otros. Esto ha generado que se presente una remodelación territorial debido a la gran concentración demográfica de la ciudad. Por tal motivo, la expansión urbana ha sido responsable de la contaminación de las aguas del río Tunjuelo, ya que llevan 60 años contaminándose con los vertimientos de materia orgánica e inorgánica de los yacimientos cercanos.

Desde su nacimiento en el páramo de Sumapaz hasta su desembocadura en el río Bogotá, el afluente ha sido blanco de alertas por los índices de contaminación constante. En la parte alta las aguas se han visto afectadas por la molienda y demolición de residuos de construcción. Allí se captaba agua de manera ilegal, luego se incorporaba a los molinos y Finalmente se vertían al río las aguas sobrantes. Entre las primeras industrias en aparecer sobre la ronda del río se encuentran las empresas de procesamiento de pieles de ganado, que desde entonces inciden de manera directa en la calidad del agua de la cuenca media del afluente. Las curtiembres del barrio San Benito, en Tunjuelito, son en su gran mayoría muy artesanales, por lo que el tratamiento de los químicos utilizados para su producción no cumple las respectivas normas de disposición de residuos.⁶

Esto implica que el río reciba y transportan agentes contaminantes de agua, logrando un impacto negativo en los ciclos naturales. Del mismo modo los vertimientos no permiten el proceso de autodepuración debido a que las condiciones hidráulicas que presenta el río probablemente son incapaces por sí misma para adsorber y neutralizar las descargas contaminantes del río Tunjuelo. Estas consecuencias implican un riesgo en la conservación y utilización del cuerpo de agua, debido a que los afluentes del río Tunjuelo desembocan en el río Bogotá que a su vez es afluente del río Magdalena, una de las cuencas más importantes del país.

Respecto a la pregunta formulada, se plantea una posible solución para las problemáticas presentadas por el río Tunjuelo; ¿Qué escenarios nos contribuyen a mejorar la calidad de agua del río Tunjuelo respecto al oxígeno disuelto, según los índices del parámetro DBO?

⁶ Valencia, Manuela. Las persistentes amenazas al río Tunjuelo. [En línea] EL ESPECTADOR, 27 de 09 de 2018. <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/las-persistentes-amenazas-al-rio-tunjuelo-articulo-814828>.

MARCO DE REFERENCIA

ESTADO DE ARTE

- El método que propone el presente estudio para determinar la capacidad de autodepuración del río Fonje, es el balance de oxígeno disuelto en un tramo del mismo en San Gil, basándose en la cuantificación del oxígeno, la carga por medio de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y su evolución a través del cauce del río. Los resultados del estudio arrojaron que, si la capacidad del río Fonce se mide por su recuperación y nivel de oxígeno disuelto, es autodepurable en el tramo de estudio; si esta capacidad del río Fonce se mide por la degradación de la carga microbiológica, este se considera muy contaminado y no es autodepurable en la zona de estudio.⁷
- El presente trabajo de investigación se realizó en el río Grande del distrito de Celendín con la finalidad de conocer la calidad del ecosistema acuático, para lo cual se plantea como Objetivo General de estudio. Evaluar el porcentaje de remoción de materia orgánica biodegradable presente en el río Grande del distrito de Celendín luego de su contaminación con aguas residuales; estableciendo tres estaciones de monitoreo (EM) a lo largo de su vertiente, teniendo en cuenta el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos ANA y MINAG (2011); donde se evaluaron por un período de 6 meses con una frecuencia de una vez al mes, las concentraciones de oxígeno disuelto (OD), materia orgánica (MO) biodegradable, evaluada mediante el ensayo de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) para ello se aplicó modelos y fórmulas matemáticas, entre ellas la de Streeter y Phelps, se consideró el monitoreo de las características físicas del río como longitud, temperatura, caudal, ancho y tirante.⁸
- En este trabajo se presenta los resultados de modelación de la quebrada Churuguaco, frente al vertimiento que está realizando actualmente por parte

⁷ Duarte Silva, Cristian Camilo, Pico Pinto, Gerardo Sebastián y Estupiñán Pinto, Rafael Antonio. Determinación de la capacidad de autodepuración en un tramo del río Fonce en San Gil con base en el balance de oxígeno disuelto. [En línea] 2014.
<http://publicaciones.unisangil.edu.co/index.php/revista-matices-tecnologicos/article/view/257>.

⁸ VILLANUEVA, EVER ZABALETA. EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL RÍO GRANDE – DISTRITO CELENDÍN. [En línea] UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, 2016.
http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1762/TESIS%20_%20EVER%20ZABALETA%20VILLANUEVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

de la PTARD del municipio de Tenjo-Cundinamarca. Los escenarios modelados fueron: 1) Caudal medio de la quebrada Churuguaco con caudal de vertimiento de 40 l/s con las características fisicoquímicas actuales; 2) Caudal medio de la quebrada con caudal de 40 l/s cumpliendo norma de vertimientos; 3) Caudal medio de la quebrada con caudal de 10 l/s con características fisicoquímicas actuales; 4) Caudal medio de la quebrada con caudal de 10 l/s cumpliendo norma de vertimiento; 5) Caudal ecológico de la quebrada con caudal de 40 l/s cumpliendo la norma; 6) Caudal ecológico de la quebrada con caudal de 40 l/s con características actuales; 7) Caudal medio de la quebrada cumpliendo con los objetivos de calidad de la CAR con vertimiento de 40 l/s cumpliendo la norma. Frente a los diferentes escenarios, se determinó la capacidad de asimilación de la quebrada, y se plantearon algunas acciones que permitan reducir los impactos ambientales generados por el vertimiento, de acuerdo a los resultados del modelo.⁹

- El análisis de la calidad del agua es un tema riguroso y con mucha extensión, para esto podemos encontrar muchas formas de análisis y dependiendo del sitio de estudio, en Colombia es importante llevar a cabo un análisis de las fuentes hídricas que posee el país y de esta manera determinar la calidad de las mismas, a continuación se analizara un tramo del río San Juan en donde se hablará de que tanto se oxigena este cauce, los posibles factores de contaminación, la importancia que tiene este río para la población y por medio de algunos software miraremos como es el comportamiento de este para después poder dar posibles soluciones.
- En el presente trabajo de investigación orientado desde la Universidad Católica de Colombia, facultad de Ingeniería Civil, se determinan los coeficientes de desoxigenación (K1) y oxigenación (K2) del río Fucha a partir de la calibración del modelo QUAL2K, así como la curva que describe el comportamiento del Oxígeno disuelto (OD) en dicho afluente.¹⁰
- Mediante esta investigación se realizó una descripción detallada de las características de la zona donde se encuentra la problemática presente en un tramo del río Tunjuelo en la localidad séptima de Bosa, esta considera la descarga puntual de un vertimiento de aguas negras y la deposición de una conexión errada intermítete, todo esto como antesala a la caracterización de

⁹ Rubio Giraldo A. M., Amézquita Bautista, L. M. & Martínez Torres, E. J. Determinación de la capacidad de asimilación del vertimiento de la PTAR del municipio de Tenjo Cundinamarca en la quebrada Churuguaco mediante el modelo QUAL2KW. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Especialización en Recursos Hídricos., 2017. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14631>.

¹⁰ Escobar Pintor, J. A., & Moreno Dueñas, N. Determinación de los coeficientes de oxigenación y desoxigenación para la curva de comportamiento de oxígeno disuelto en el Río Fucha. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil., 2016. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/6805>.

los componentes hidráulicos y de calidad, para ello se realizó un levantamiento batimétrico junto con aforo de caudal que fueron complementados posteriormente con la tomas de las muestras de agua necesarias para cada uno de los puntos de monitoreo considerados, haciendo uso de los datos levantados y los resultados de los ensayos de laboratorio para las muestras tomadas se alimentaron los modelos de simulación hidráulica y de calidad en los software HEC-RAS y QUAL2K los cuales nos arrojaron las condiciones actuales del tramo de estudio y las correspondientes a la normatividad usada para la investigación (resolución 631 de 2015), finalmente estos modelos fueron usados para hacer una valoración numérica de las condiciones encontradas mediante el cálculo de un ICA (Índice de Calidad del Agua). Acá se resalta importancia de realizar y extender estos análisis para considerar algún tipo de intervención que mejore el estado del tramo analizado y los recursos hídricos en general.¹¹

El presente estudio es una propuesta para evaluar el grado de contaminación por materia orgánica del Río San Pedro, en el tramo comprendido entre Amaguaña y Guangopolo. El río San Pedro al atravesar zonas altamente pobladas del Valle de los Chillos exhibe un notable deterioro en la calidad de sus aguas, por tal motivo se desarrolló un modelo matemático de contaminación de aguas, basado en las ecuaciones de Streeter-Phelps que permite evaluar y predecir el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) a partir de los datos recopilados en campo. Los resultados del modelo en base a balance de masas y criterios de cinética química aplicados al río San Pedro, muestran que existe contaminación por materia orgánica la cual va en aumento a medida que se avanza en el tramo de estudio. El promedio de concentración de materia orgánica es de 5,81 mg/l.¹²

- Este trabajo tuvo como objetivo analizar el comportamiento del contenido de Oxígeno Disuelto (OD) y de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en el

¹¹ Reyes Ojeda, C. F. & Ruiz Bravo, L. E. Diagnóstico de la calidad del agua mediante cálculo de un ICA y modelación de un tramo del río Tunjuelo en el sector de Bosa Libertador. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil., 2017. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15510>.

¹² González, Gabriela del Carmen Carrera. “MODELACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO Y MATERIA ORGÁNICA Y SU INFLUENCIA EN LA DISTRIBUCIÓN Y DIVERSIDAD DE INDICADORES BENTÓNICOS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO EN EL TRAMO AMAGUAÑA – GUANGOPOLO”. [En línea] ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE, 2011. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/3702/T-ESPE-031368.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Brazo Aña Cuá (BAC), mediante la utilización del modelo matemático HEC-RAS. Se realizó la recopilación y análisis de relevamientos topo batimétricos del cauce del BAC, de mediciones de calidad de agua en el río Paraná y de registros de las variables climáticas de esa zona. Los procesos de transporte por advección y dispersión, y la modelación del oxígeno disuelto fueron caracterizados mediante coeficientes que describen la forma y/o velocidad en que esos procesos ocurren, DL (Dispersión Longitudinal), K1 (Desoxigenación por DBO Carbonácea) y K2 (Reaireación). Se han recopilado y analizado las fórmulas para el cálculo de estos coeficientes y las mediciones de campo de un importante número de autores. A partir de dichos análisis se adoptaron valores mínimos, medios y máximos de cada coeficiente. Se han simulado 27 escenarios con todas las combinaciones posibles de los coeficientes mencionados para caudales de 100, 300 y 500m³ /s.¹³

- El presente trabajo se realizó en la ciudad de Cuenca, en los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay. Se presenta una modelación de los parámetros más importantes de calidad de agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Coliformes y Oxígeno Disuelto (OD). Se utilizó un modelo matemático en Excel. Para el estudio se estableció una red de monitoreo de trece puntos a lo largo de los tres ríos, que comprenden tres sitios de monitoreo continuo y diez sitios de contaminación puntual. Se realizaron dos muestreos en diferentes épocas del año (lluvia y sequía). El modelo matemático desarrollado, se basa en la ecuación de Streeter & Phelps: el mismo que ha permitido obtener el transporte de contaminantes puntuales a sitios de monitoreo continuo. Este modelo ha sido ya calibrado y verificado en estudios anteriores de manera que se pueda obtener valores confiables.¹⁴

- El estudio de los efectos en la calidad del agua de las corrientes mediante herramientas tales como los modelos de simulación de la calidad del agua, se requiere en forma intensiva en países como Colombia, esto debido a que la mayor parte de los recursos hídricos no cuenta con una adecuada planificación y los conflictos por los usos están presentes en la mayoría de ellos. Se presenta en este trabajo los resultados de la calibración y

¹³ Amarilla, Roberto. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL CONTENIDO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL BRAZO AÑA CUÁ, AGUAS ABAJO DE LA REPRESA DE YACYRETÁ. [En línea] UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, Maestría en Ecohidrología, 10 de Noviembre de 2017.

¹⁴ PARRA, VALERIA ANDREA CAJAS. “ESTIMACIÓN DE VALORES DE CONTAMINACIÓN DIFUSA PARA EL RÍO TOMBAMBAMBA EN ZONAS PERIFÉRICAS Y URBANAS – PRIMERA APROXIMACIÓN”. [En línea] UNIVERSIDAD DE CUENCA, FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL, 2015. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23122/1/TESIS.pdf>.

confirmación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw en el río Guacaica, corriente ubicada en el departamento de Caldas, Colombia. La implementación del modelo estableció una línea base en términos de modelación de calidad de agua para esta corriente, y permitió formular un escenario de saneamiento futuro para evaluar la respuesta de la corriente ante el escenario planteado.¹⁵

MARCO CONCEPTUAL

Cuando se habla de un cuerpo de agua, su análisis no debe ser tomado como una medida longitudinal o topográfica. Su evaluación debe ser como un cuerpo viviente, asemejado al cuerpo humano ya que las masas de agua desde la más pequeña como el arroyo hasta el océano tienen un comportamiento determinado el cual permite un desarrollo de los ecosistemas, donde diferentes organismos pueden coexistir.

En la actualidad la contaminación en los cuerpos de agua ha generado un impacto negativo en la calidad de agua generando consecuencias marcadas en la salud de las personas y el medio ambiente, por lo que ha sido un foco de preocupación en todo el mundo.¹⁶

ENFERMEDADES DEL AGUA

Un río está sometido a cargas contaminantes causadas por efectos antrópicos o por sí mismo, afectando la calidad del cuerpo de agua presente en la corriente. Este efecto se presenta en las siguientes zonas.

Zona de degradación: Es la zona inmediata a la incorporación de las aguas contaminadas al río. Es el área con mayores concentraciones de contaminantes. Desaparecen peces y algas; en el fango aparecen gusanos tubíficos, hongos y protozoos ciliados. Es posible la existencia de peces que necesitan poco oxígeno y se alimentan de materia orgánica.¹⁷

¹⁵HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO. APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA. [En línea] Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química, 2015.
<http://bdigital.unal.edu.co/51032/1/1053781847.2015.pdf>.

¹⁶ Pramod K Pandey. Contamination of water resources by pathogenic bacteria. [En línea] Department of Biological and Agricultural Engineering & Zachry Department of Civil Engineering, Texas A & M University, College Station, Texas, USA, 2014.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4077002/>.

¹⁷ Suárez, J. Modelos de Calidad de Agua. [En línea] Universidade da Coruña, Febrero de 2008.
file:///C:/Users/Asus/Downloads/MCA_Tema_5__MODELOS_DE_CALIDAD_DE_AGUAS_EN_RIOS%20(1).pdf.

Zona de descomposición activa: El oxígeno desciende a los niveles mínimos, pudiendo llegar a cero. No viven peces, y los organismos encargados de la descomposición orgánica trabajan activamente. Se pueden desprender gases (metano, hidrógeno, nitrógeno, ácido sulfhídrico y otros de mal olor, etc.). Pueden aparecer espumas en la superficie.

A lo anterior existen un gran número de contaminantes del agua entre los cuales podemos encontrar:

Microorganismos patógenos: Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, entre otros. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños. Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La OMS recomienda que en el agua para beber haya 0 colonias de coliformes por 100 ml de agua.¹⁸

Sustancias químicas inorgánicas: En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.

Nutrientes vegetales inorgánicos: Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable.

Compuestos orgánicos: Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc. acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo, porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.

Sedimentos y materiales suspendidos: Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos, y los

¹⁸ Prim, Luis Echarri. Tema 11. Contaminación del agua. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. 2005.

sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, ríos y puertos.

Sustancias radiactivas: La radioactividad en el agua no es un fenómeno nuevo, habiendo estado presente en cierta medida desde que se formó la tierra¹⁹, los isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y, a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua. El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.

Por esto cuando las cuencas superficiales están sometidos a estos agentes, generan un impacto negativo deteriorando todo tipo de vida en el cuerpo de agua. Provocando una mala calidad de agua por las cargas contaminantes vertidas a lo largo de su recorrido.

DIAGNOSTICO DEL AGUA

La evaluación y diagnóstico del cuerpo de agua se realiza por los múltiples parámetros de calidad de agua. Sin embargo, el parámetro más importante es el oxígeno disuelto debido a que este es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua ya que el oxígeno libre es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos; por eso, desde siempre, se ha considerado como un indicador de la capacidad de un río para mantener la vida acuática.²⁰

Asimismo, El oxígeno disuelto es una variable de vital importancia en el diagnóstico y control de la contaminación de los cuerpos de agua, debido a su alta sensibilidad en su concentración a la presencia de contaminantes de tipo orgánico o inorgánico, bien sea que estos se encuentren en forma disuelta o suspendida. La calidad del agua en un cauce es influenciada directamente con el consumo de oxígeno disuelto debido a la descomposición de la materia orgánica y a los sedimentos presentes en el fondo del mismo.

Del mismo modo Los efectos que produce la contaminación en los cuerpos de agua son muy variados. Sin embargo, se puede afirmar que la materia orgánica exige una fuerte demanda de oxígeno disuelto (OD) por la oxidación de materia orgánica e inorgánica, lo cual genera problemas en los ecosistemas acuáticos. El OD es fundamental en la medida que es un factor energético para los seres vivos. Este está en función de la reaireación desde la atmósfera, el proceso de la fotosíntesis,

¹⁹ New Jersey. Department of environmental protection. A North Jersey Homeowner's Guide to Radioactivity in Drinking Water: Uranium. [En línea] April de 2004.
<https://sosradon.org/files/sosradon/resources/New%20Jersey%20Radon%20in%20Water.pdf>.

²⁰ Sawyer, C.N. and McCarty. Chemistry for Environmental Engineering (3rd ed),. [En línea] McGrawHill Book Company, New York, 1978.
https://www.whitman.edu/chemistry/edusolns_software/DO_Spanish.pdf.

el oxígeno disuelto presente en tributarios y afluentes, los procesos de descomposición de materia orgánica carbonácea y nitrogenada, la demanda de oxígeno de los bentos y la demanda de oxígeno por parte de organismos heterotróficos al consumir la materia orgánica presente en el agua.²¹

En conclusión tener un déficit de oxígeno origina un ecosistema desbalanceado. Por lo que es importante conocer los consumidores del oxígeno disuelto.

Consumidores del OD

- Oxidación de la materia orgánica carbónica.
- Oxidación de material nitrogenado.
- Oxígeno demandado por el material depositado en el fondo SOD.
- Oxígeno utilizado por las plantas acuáticas para respirar.

Oxidación de la materia orgánica carbónica

En el desarrollo del análisis de la DBO total se alcanza en dos etapas la cual la primera fase se relaciona a la desoxigenación en la cual se estabiliza la materia orgánica carbonácea.

Por consiguiente representa la DBO de compuestos orgánicos, así como la oxidación de compuestos inorgánicos, tales como el hierro ferroso y el sulfuro, esto es gracias a organismos heterotróficos capaces de derivar la energía que necesitan del carbono orgánico que posee la materia orgánica. A excepción de los casos donde el agua posea sustancias tóxicas la DBOC se ejerce inmediatamente.

Oxidación de material nitrogenado

Como segunda fase del análisis de la DBO total encontramos la demanda bioquímica de oxígeno nitrogenado en la cual se oxidan los compuestos nitrogenados, es también conocida como nitrificación. Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas residuales son generalmente proteínas, ureas, amoníaco y en algunos casos nitratos. En el caso donde toda la demanda de oxígeno es por la presencia de compuestos nitrogenados se presenta por lo general en las plantas de tratamiento de aguas residuales cuando no incluyen el proceso de nitrificación.

El término demanda bioquímica de oxígeno nitrogenado (DBON) normalmente hace referencia a la diferencia entre la DBO y la DBOC (demanda bioquímica de oxígeno carbonácea). La DBO suele ser inferior a la DBOC, pero puede producirse la situación contraria (algunos microbios consumirán parte del inhibidor de

²¹ CÁRDENAS, NATALIA SÁNCHEZ. ESTIMACIÓN DE CONSTANTES DE DESOXIGENACIÓN CARBONÁCEA EN EL RÍO TEUSACÁ . [En línea] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES ,FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL, 2015.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17675/u714053.pdf?sequence=1>.

nitrificación). Por tanto, la $DBON = DBO - DBOC$ y puede ser positiva o negativa, aunque, por lo general, es positiva.²²

Demanda béntica de oxígeno SOD: La caída marcada del oxígeno en relación a los sedimentos se ve reflejado no solo en un deterioro de la calidad del agua sino también en el hábitat de los organismos que se encuentran en los diferentes cuerpos de agua.

La SDO ha sido un campo de poco estudio en el mundo, sin embargo, se ha podido encontrar que tiene una relación directa con algunos problemas ambientales presentes en fuentes hídricas, del mismo modo este es dependiente de algunos factores que pueden influir en su comportamiento, tales como:

El oxígeno disuelto biodisponible en la columna de agua, el contenido de materia orgánica, la naturaleza y características físicas del sedimento, la temperatura del cuerpo de agua y la velocidad del agua en donde se encuentran expuestos los sedimentos acumulados en el fondo.

Por lo tanto, las descargas de materia sedimentable provocan la formación de una capa de sedimentos o de lodo en el fondo de agua. A medida que estos depósitos se incrementan se inicia la descomposición anaeróbica, generando gases. La capa de sedimentos superior que tenga contacto con el cuerpo de agua incita el proceso del consumo de la columna de agua.

El SOD no siempre son de los vertimientos, puede ser causado por las plantas acuáticas (algas), cuando cumplen su ciclo de vida mueren y se sedimenta aportando a este efecto.

RECUPERACIÓN DEL AGUA

Una vez se tiene presente los agentes contaminantes, se tiene en cuenta el método principal para el análisis de calidad de agua de esta investigación, que es el enfoque del oxígeno disuelto, que puede ser el indicador del grado de contaminación que tiene el cuerpo de agua, como el soporte esencial para el desarrollo de la vida acuática. La recuperación del cuerpo de agua consiste en el fenómeno de la autodepuración, es decir por medio de sus condiciones hidráulicas y la concentración de oxígeno que obtenga la cuenca superficial, se recupera y presenta un estado más favorable, respecto a los parámetros de calidad de agua. Este fenómeno puede presentarse en las siguientes zonas.

²² Ramirez, Carlos Alberto Sierra. Calidad del Agua Evaluación y Diagnostico. [En línea] 2011. <https://es.slideshare.net/overluismarzolahernandez/calidad-del-agua-evaluacin-y-diagnostico-carlos-alberto-sierra-ramires>.

Zona de recuperación: Aumento del oxígeno, agua más clara, reaparición de la vida acuática macroscópica, disminución de hongos y aparición de algas. Es posible encontrar nitratos, sulfatos, fosfatos y carbonatos. Aparecen peces resistentes.²³

Zona de agua limpia: Condiciones de corriente natural. El oxígeno disuelto está cerca de la saturación. Peces útiles para la pesca. Pueden quedar bacterias patógenas resistentes y compuestos metálicos no alterados por los procesos bioquímicos existentes.

Así como ahí consumidores del oxígeno disuelto, también ahí aportantes que ayudan la recuperación del cuerpo de agua.

Aportantes del OD

- Re aireación
- Fotosíntesis
- OD aportado por los tributarios

Re aireación: Se denomina reaireación al proceso por el cual el oxígeno y demás componentes gaseosos del aire son renovados en las aguas en movimiento de un río o cuerpo de agua.

La tasa de reaireación se presenta alternativamente como una función sencilla de los parámetros hidráulicos, tales como la velocidad del corriente, ancho y la profundidad propios de los cuerpos de agua, a su vez estos modelos de predicción, que simulan el intercambio de oxígeno pueden dar a conocer la ubicación y el impacto de las descargas de aguas residuales en el recorrido de los ríos.²⁴

Fotosíntesis:

La fotosíntesis está relacionada con la producción de oxígeno en los cuerpos de agua, dado que en estos se produce y se consume oxígeno al mismo tiempo; el consumo está determinado por la respiración, descomposición, respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas.²⁵

²³ Suárez, J. Modelos de Calidad de Agua. [En línea] Universidade da Coruña, Febrero de 2008. file:///C:/Users/Asus/Downloads/MCA_Tema_5__MODELOS_DE_CALIDAD_DE_AGUAS_EN_RIOS%20(1).pdf.

²⁴ MEDINA, LUIS ALEJANDRO ORDUZ. DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA TASA DE REAIREACIÓN DE LOS RÍOS MOLINOS, TORCA, ARZOBISPO Y DE LA QUEBRADA LA VIEJA, EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE . [En línea] UNIVERSIDAD SANTO TOMAS, FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL, 2016. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2853/Orduzluis2016.pdf?sequence=6>.

²⁵ Goyenola, Guillermo. Guía para la utilización de las Valijas Viajeras MAPSA. [En línea] Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos, Junio de 2004. http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf.

Como se mencionó anteriormente el proceso por el cual el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua superficiales es denominado reaeración, la cual con la fotosíntesis, son considerados las principales fuentes de oxígeno para las aguas superficiales. Sobre los cauces existen diferentes fuentes de oxígeno disuelto como pueden ser, la transferencia de oxígeno atmosféricos, producción de oxígeno disuelto por fotosíntesis, y el oxígeno disuelto que pueden suministrar los diferentes tributarios. Del mismo modo existen demandas de oxígeno debido a la necesidad de oxígeno para la respiración de las plantas acuáticas, y diferentes procesos de oxidación de materia orgánica.

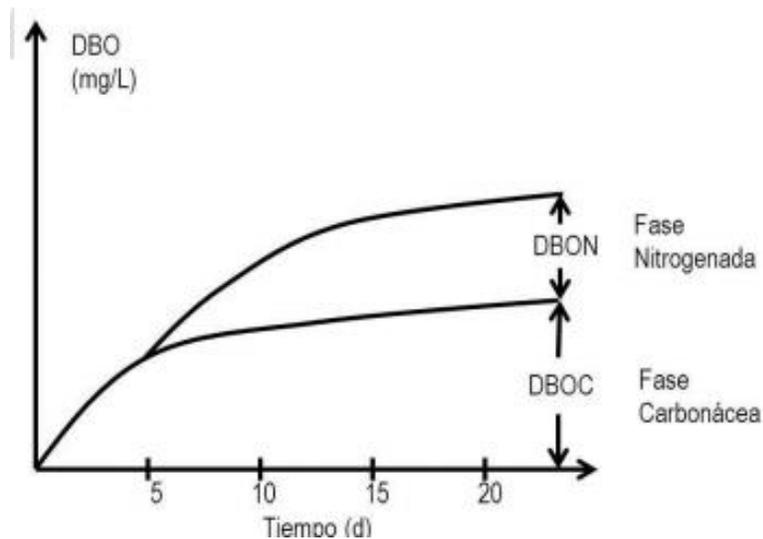
MARCO TEÓRICO

En relación a las teorías que debe manejar el proyecto, son relacionadas al comportamiento de parámetros de calidad de agua y las variables de cálculo.

Comportamiento de materia orgánica

Como se mencionó anteriormente en los consumidores del oxígeno disuelto, el DBON por lo general es menor que el DBOC, esto se debe a que parte de la teoría que la materia orgánica nitrogenada se reproduce después de los 5 o más días, como se ve en la F.

Figura 5. Comportamiento DBOC y DBON en el tiempo

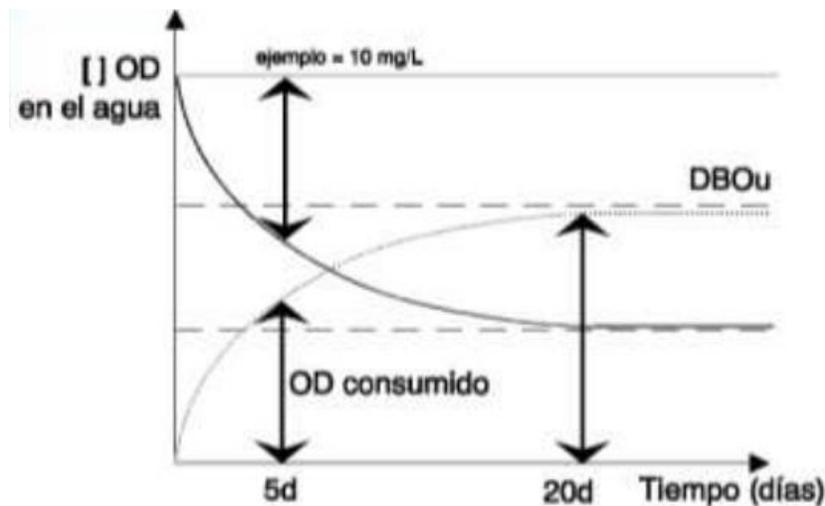


Fuente: Determinación de la constante k de la botella Winkler para ensayos de DBOC

Como se observa en la F la fase de la reproducción de los compuestos nitrogenados ocurre después de los 5 días como se evidencio anteriormente en la figura, donde eventualmente a los cinco días se empieza a evidenciar crecimiento eventual de la DBON, lo que causa el comportamiento que se logra apreciar en la figura. Esto se debe a que a los cinco días aparecen las bacterias nitrificantes que consumen la materia orgánica proteínica.²⁶

Ante esto la biodegradación de la materia orgánica está en función del tiempo. A partir de varios ensayos y laboratorios realizados se soporta que la biodegradación completa de la materia orgánica ocurre a los 21 días.

Figura 6. Comportamiento DBOu en el tiempo



Fuente: Determinación de la constante k de la botella Winkler para ensayos de DBOC

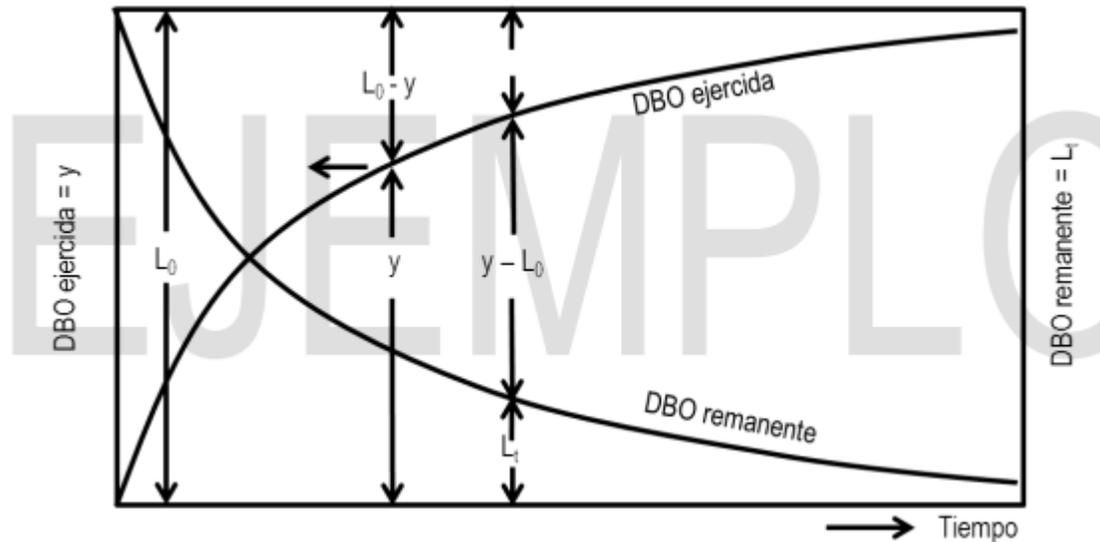
Cuando la descomposición de materia orgánica de una muestra es tan completa como se pueda obtener aeróbicamente, el OD consumido representa la DBO total o última (DBOu).²⁷

²⁶ Sierra, Augusto Ortégón. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE k DE LA BOTELLA WINKLER PARA ENSAYOS DE dboc. [En línea] 29 de 04 de 2015. https://www.researchgate.net/profile/David_Ortegon_Sierra/publication/275964396_Determinacion_de_la_Constante_k_de_la_botella_Winkler_para_ensayos_de_DBOC_-Version_PDF-/links/554c20810cf29752ee7eda78/Determinacion-de-la-Constante-k-de-la-botella-Winkler-p.

²⁷ Ramos, David Sánchez. Introducción a la Ingeniería Sanitaria y Ambiental. [En línea] Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real, Universidad de Castilla la Mancha , 2006.

A lo anterior se puede concluir que el DBO5 trabaja con la biodegradación de materia orgánica carbónica y no tiene en cuenta los compuestos nitrogenados, también que la DBO5 es un 80 o 70 % de la DBOc. Es posible calcular la DBO en cualquier instante de tiempo, con la relación de la DBO remanente, debido que a medida que se va oxidando la materia orgánica queda un porcentaje remanente. Ver Figura 7.

Figura 7. Relación DBO ejercida y DBO remanente



Fuente: Determinación de la constante k de la botella Winkler para ensayos de DBOC

Es posible encontrar constantes de datos experimentales a partir de líneas rectas que se ajusten a métodos como el de mínimos cuadrados o similares. Este método, requiere la aplicación de una serie de cálculos. En muchos casos, una relación no lineal puede transformarse en una relación de línea recta o rectificada. Lo anterior, no sólo simplifica el manejo de los datos, sino que también da lugar a una presentación gráfica más reveladora en lo que a la evaluación de la dispersión se refiere. Una de las formas de cálculo para determinar los parámetros k y L_0 es el método gráfico de Thomas propuesto en 1950.²⁸

$$K = 2.61 * \left(\frac{b}{a}\right) \text{ Ecuación 1}$$

$$L_0 = \frac{1}{2.3 * k * a^3} \text{ Ecuación 2}$$

²⁸ Sierra, Augusto Ortegón. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE k DE LA BOTELLA WINKLER PARA ENSAYOS DE dboc. [En línea] 29 de 04 de 2015.

Donde:

K: contante experimental

b: pendiente del método gráfico

a: punto de corte del método gráfico

Lo: DBOUc Total

MODELOS DE CALIDAD DE AGUA

Los modelos de calidad de agua son herramientas que nos ayudan a observar el comportamiento de una cuenca respecto al saneamiento del mismo, para que la modelación sea confiable debe trabajar con las condiciones reales y aceptables. Al igual un modelamiento es un aproximado, debido a que los modelos de calidad de agua se basan en un conjunto de ecuaciones matemáticas que definen los procesos físicos, biológicos y químicos que tienen lugar en un cuerpo de agua, fundamentalmente sustentados en la conservación de la masa y/o energía, ingreso de contaminantes al cuerpo de agua desde el exterior del sistema, su transporte y sus reacciones en el cuerpo de agua.²⁹

Modelo de Streeter y Phelps

El modelo de Streeter- Phelps se basa en el déficit de oxígeno disuelto cuando una corriente recibe descargas de agua residual, por lo que tiene en cuenta dos principales mecanismos que gobiernan el oxígeno disuelto, estos mecanismos son la descomposición de la materia orgánica y reaireación de oxígeno, en pocas palabras el balance de DBO y de oxígeno disuelto.³⁰

Con base en esto el modelo se permite calcular la variación del oxígeno disuelto a medida que recibe descargas contaminantes, es importante aclarar que el método es basado en los vertimientos de la corriente receptora en tramos definidos.

La ecuación general y directa del modelo es la siguiente:

²⁹ ALZATE, FELIPE SANTAMARÍA. ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL RÍO UBATÉ POR EL MODELO QUAL2K. [En línea] ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL , 2013.

<https://es.slideshare.net/alfonsoherrero566/analisis-simplificado-de-oxigeno-disuelto-en-el-rio-ubate-por-el-modelo-qual2-k>.

³⁰ CÁRDENAS, NATALIA SÁNCHEZ. ESTIMACIÓN DE CONSTANTES DE DESOXIGENACIÓN CARBONÁCEA EN EL RÍO TEUSACÁ . [En línea] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES ,FACULTAD DE INGENIERÍA,DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL, 2015.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17675/u714053.pdf?sequence=1>.

$$D = \frac{k_1 * L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

D : deficit de oxígeno en cualquier punto $\left(\frac{mg}{l}\right)$

D_0 : deficit de oxígeno en el punto inicial $\left(\frac{mg}{l}\right)$

L_0 : DBO_{Uc} del punto inicial $\left(\frac{mg}{l}\right)$

K_2 : constante de oxigenación $\left(\frac{1}{d}\right)$

K_1 : constante de desoxigenación $\left(\frac{1}{d}\right)$

t : tiempo de transcurso de la corriente (d)

Para aplicar la ecuación anterior se requiere de datos ambientales e hidráulicos como:

- DBOU
- OD
- Temperatura del agua
- Velocidad media del río
- Profundidad del río

Constante de Desoxigenación

El coeficiente de desoxigenación, K_1 , compone el principal término de consumo de OD en el cuerpo de agua y se calcula como la tasa global de remoción con datos de caudal y velocidad del río además de la concentración del DBO entre tramos consecutivos.³¹

La fórmula que se usa para calcular este coeficiente es:

³¹ Amarilla, Ing. Roberto. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL CONTENIDO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL BRAZO AÑA CUÁ, AGUAS ABAJO DE LA REPRESA DE YACYRETÁ. [En línea] UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, Maestría en Ecohidrología, 10 de Noviembre de 2020.
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/63748/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

$$K1 = V \frac{\ln \frac{Q1L1}{Q2L2}}{X2 - X1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$K1 =$ Constante de desoxigenación (d^{-1})

$V =$ Velocidad media del río $\left(\frac{m}{s}\right)$

$Q1 =$ Caudal estación aguas arriba $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$Q2 =$ Caudal estación aguas abajo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$L1 =$ Concentración de DBO estación aguas arriba $\left(\frac{mg}{l}\right)$

$L2 =$ Concentración de DBO estación aguas abajo $\left(\frac{mg}{l}\right)$

$X1 =$ Distancia estación aguas abajo (m)

$X2 =$ Distancia estación aguas arriba (m)

COEFICIENTE DE OXIGENACIÓN

El coeficiente de oxigenación ($K2$), conocido también como constante de reaeración, representa la capacidad o velocidad con la que se oxigena un cuerpo de agua por introducción de oxígeno ya sea por el contacto directo con la atmosfera o por fotosíntesis de las plantas acuáticas. Esta constante depende de diversos factores como turbulencia, condiciones de mezcla internas en el río, temperatura, velocidad del viento y la presencia de caídas, resaltos, entre otros.³²

Para el cálculo del coeficiente de oxigenación en ríos se aplican las siguientes fórmulas:

$$O' Connor \text{ y } Dobbins: k_2 = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$$

³² Escobar Pintor, J. A., & Moreno Dueñas, N. Determinación de los coeficientes de oxigenación y desoxigenación para la curva de comportamiento de oxígeno disuelto en el Río Fucha. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 2016. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/6805/4/Determinaci%C3%B3n%20de%20los%20Coeficientes%20de%20oxigenaci%C3%B3n%20y%20desoxigenaci%C3%B3n%20para%20la%20curva%20de%20comportamiento.pdf>.

$$\text{Churchill: } k_2 = 5.026 \frac{U}{H^{1.67}}$$

$$\text{Owens y Gibbs :: } k_2 = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$$

Donde:

$K_2 =$ Coeficiente de Oxigenación (d^{-1})

$U =$ Velocidad de la corriente ($\frac{m}{s}$)

$H =$ Altura de lámina de agua (m)

Oxígeno disuelto de saturación

El déficit de oxígeno calculado parte de la diferencia del oxígeno disuelto de saturación con el oxígeno disuelto encontrado en el río. Se calcula el oxígeno de saturación en función de temperatura, agua dulce y a 1 atmosfera.³³

$$\begin{aligned} \ln(OD_{sat}) = & -139.34411 + \left(\frac{1.575701 * 10^5}{Ta} \right) - \left(\frac{6.642308 * 10^7}{Ta^2} \right) \\ & + \left(\frac{1.243800 * 10^{10}}{Ta^3} \right) - \left(\frac{8.621949 * 10^{11}}{Ta^4} \right) \end{aligned}$$

Ecuación 5

Donde:

OD_{sat} : oxígeno de saturación ($\frac{mg}{l}$)

Ta : Temperatura en kelvin = $T + 273.15$

T : Temperatura del agua (C°)

Se presenta la ecuación de Zison et, 1978 la cual propone un aproximado de la corrección del oxígeno de saturación por elevación.³⁴

³³ E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton, editors. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition. [En línea] 2017. <https://yabesh.ir/wp-content/uploads/2018/02/Standard-Methods-23rd-Perv.pdf>.

³⁴ Suárez, J. Modelos de Calidad de Agua. [En línea] Universidade da Coruña, Febrero de 2008. file:///C:/Users/Asus/Downloads/MCA_Tema_5__MODELOS_DE_CALIDAD_DE_AGUAS_EN_RIOS%20(1).pdf.

$$OD_{sat,c} = OD_{sat}[1 - 0.1148 * elevación(Km)]$$

Ecuación 6

Donde:

$OD_{sat,c}$: oxígeno de saturación corregido $\left(\frac{mg}{l}\right)$

OD_{sat} : oxígeno de saturación sin corregir $\left(\frac{mg}{l}\right)$

Modelo QUAL2K

El modelo de calidad del agua QUAL2K fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos por Chapra y Pelletier en el año 2003 y permite la simulación de los parámetros básicos de calidad de agua como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno y fósforo, principalmente.³⁵

En general el QUAL2K se usa para simular desde las corrientes principales hasta sus tributarios en sus respectivas cuencas. Se aplica a corrientes donde las cuales se puede asumir que la calidad del agua es importante en dirección del flujo.

El programa está diseñado en una serie de macros las cuales se deben chequear para comenzar el análisis, además de tener una serie de celdas las cuales se diferencian por sus colores los cuales corresponden a las siguientes convenciones:

Las celdas de color azul se caracterizan por que se ingresan los datos de entrada, ahora bien las que tienen color verde son aquellas las cuales tienen los resultados del programa, teniendo en cuenta que las de color verde oscuro contienen los títulos de las variables que el mismo software calcula, cabe aclarar que estas no se modifican.

Dentro del programa se puede realizar una representación conceptual la cual grafica el sistema del río con todos sus atributos topológicos y geométricos que deben ser preservados en el modelo y que identifican el dominio espacial. Esta representación se analiza como una red ramificada, conformada por elementos llamados tramos o segmentos los cuales se articulan manteniendo la topología real del río.

³⁵ HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO. APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA. [En línea] Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química, 2015. <http://bdigital.unal.edu.co/51032/1/1053781847.2015.pdf>.

Para determinar los segmentos se tienen en cuenta diferentes criterios como los cambios en las características hidráulicas del río, las entradas de un tributario importante, el cual se considera cuando el caudal promedio multianual del mismo es mayor al 10% multianual del río principal. Además se tiene en cuenta el aporte de una carga dominante que puede considerarse como un vertimiento industrial o doméstico y por último los retiros de agua que se presenten a lo largo del río.³⁶

Fuente difusa

La fuente difusa es aquella que es aportada o abstraída a lo largo de la corriente sin tener en cuenta un punto específico, esto se puede presentar tanto por la entrada o salida ya que se dan naturalmente de esa forma o porque existe un gran número de pequeñas descargas que no podría caracterizarse una a una siendo necesario representarlas como una fuente difusa a lo largo de un tramo en la corriente superficial. Para este tipo de descargas como dato de entrada debe especificarse la longitud en la cual ocurre y las características físico-químicas de las mismas.

Fuente puntual

La característica de los aportes y abstracciones puntuales es que se especifica principalmente el sitio exacto donde ocurren y las características físico-químicas de dichas entradas o salidas, tales como: bocatomas, quebradas o descoles de alcantarillado, entre otras.³⁷

La ecuación para encontrar estas cargas es la de Streeter Phelps.

$$L_o = \frac{Q_w L_w + Q_r L_r}{Q_r + Q_w} \text{ Ecuación 7}$$

Donde:

Q_w = Caudal del vertimiento

Q_r = Caudal del río

L_w = Materia orgánica del vertimiento

L_r = Materia orgánica del río

Curva SAG

El fin de los modelos de calidad de agua, consiste en obtener la curva SAG, ya que esta representa el comportamiento de OD en una corriente de agua. Cuando un río está en condiciones óptimas y no ha sufrido ningún tipo de contaminación la concentración de OD se encuentra en un grado de saturación alto. Inmediatamente

³⁶ Ramirez, Carlos Alberto Sierra. Calidad del Agua Evaluación y Diagnostico. [En línea] 2011. <https://es.slideshare.net/overluismarzolahernandez/calidad-del-agua-evaluacin-y-diagnostico-carlos-alberto-sierra-ramires>.

³⁷ CORPONARIÑO. MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA QUEBRADA MIRAFLORES. [En línea] <http://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp5.pdf>.

después de la descarga de un vertimiento de aguas residuales en él, se generan fenómenos como la turbiedad por la presencia de sólidos que impide el paso suficiente de luz para el proceso de fotosíntesis de las algas y disminución de oxígeno debido a las grandes cantidades que consumen los microorganismos heterotróficos.³⁸

³⁸ Escobar Pintor, J. A., & Moreno Dueñas, N. determinación de los coeficientes de oxigenación y desoxigenación para la curva de comportamiento de oxígeno disuelto en el Río Fucha. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil., 2016. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/6805>.

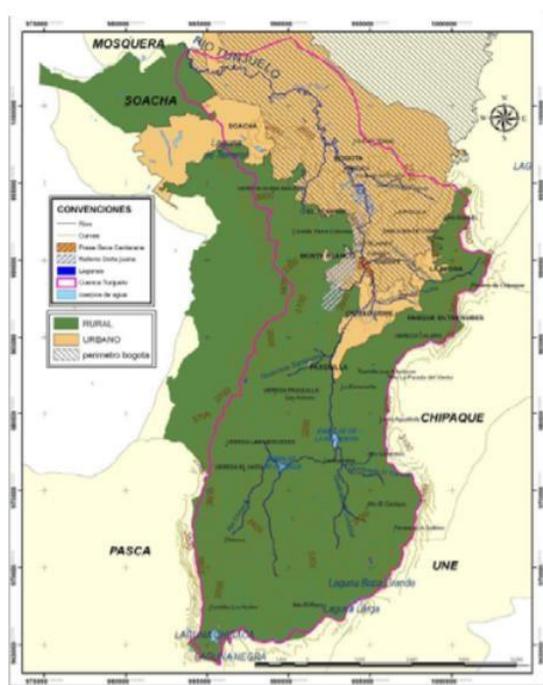
MARCO GEOGRÁFICO

La cuenca del río Tunjuelo se encuentra localizada al suroriente de la ciudad de Bogotá y el municipio de Soacha. Las 41.534,6 Ha de área total de la cuenca están distribuidas en diversa proporcionalidad en las localidades de Usme, Ciudad Bolívar, Kennedy, Tunjuelito, Rafael Uribe, San Cristóbal, Puente Aranda, Antonio Nariño, Bosa y el municipio de Soacha. Como se muestra en la

Figura 8. Mapa de la Cuenca del río Tunjuelo

La cuenca posee una fuerte variación en las precipitaciones anuales debido al paso de la Zona de Confluencia Intertropical, que junto a la carga de humedad proveniente del Amazonas generan precipitaciones entre 1400-1500 mm/año con una tendencia a disminuir según la altitud, por tanto, en la cuenca baja anualmente el nivel de pluviosidad se encuentra entre 400 a 500 mm/año. Se estima en 856 mm/año la precipitación media anual en la cuenca. Teniendo en cuenta la variación altitudinal de la cuenca que va desde los 2.540 m hasta los 3.900 m se originan variaciones de temperatura.³⁹

Figura 8. Mapa de la Cuenca del río Tunjuelo



Fuente: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Tunjuelo, 2007, CAR

³⁹MARÍA JOHANNA CASTAÑO PACHÓN, LAURA MARCELA URREGO MUÑOZ. PROBLEMÁTICAS SOCIOAMBIENTALES EN LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO: una posibilidad en la enseñanza y el aprendizaje de la geografía. [En línea] 2015. file:///C:/Users/Asus/Downloads/Dialnet-ProblematicasSocioambientalesEnLaCuencaDelRioTunju-5489975%20(1).pdf.

Estas variaciones están definidas “desde los 5.5°C en las zonas más altas del páramo hasta 13.7°C en las zonas bajas de la planicie aluvial del río Tunjuelo” Las características hidrográficas y morfológicas de la cuenca del río Tunjuelo permiten clasificarla en cuenca alta, media y baja. La zona alta y media de la cuenca está constituida por suelo rural, con bastante riqueza hídrica y biodiversidad, mientras que la cuenca baja posee un uso del suelo mayoritariamente urbano.

Ahora bien según RCHB la principal fuente de contaminación en el río Tunjuelo es el vertido de aguas residuales y a continuación se describirán algunas de las fuentes de contaminación del río desde la descarga del fondo del embalse de la Regadera hasta la desembocadura al río Bogotá.⁴⁰

- La Regadera - quebrada Yomasa: Gran parte de los aportes de este tramo son de aguas servidas en los barrios altos de la Localidad de Usme (Especialmente del río Fucha y Yomasa los cuales aportan descargas por lo general de origen residual doméstico). Además se descargan lixiviados de la planta del relleno sanitario Doña Juana y de las canteras que son explotadas cerca de las rondas del río que generan grandes aportes de sólidos.
- Avenida Boyacá - Autopista Sur: Al río se descargan las quebradas Chiguaza y Limas, a las cuales se confluyen vertimientos de origen residual de los barrios ubicados en las zonas aferentes. Asimismo, recibe las descargas de las quebradas y vertimientos directos de los barrios en desarrollo del sector de Ciudad Bolívar y Tunjuelito.
- Autopista- desembocadura al río Bogotá, es el sector con mayor número de descargas de agua residual directas.
 - Margen izquierdo descarga el interceptor Tunjuelo Medio: El cual transporta las aguas servidas interceptadas desde antes de la avenida Boyacá (Incluyendo las servidas domesticas e industriales del sector de curtiembres de San Benito)
- Barrio México - San Benito: El río recibe la quebrada Chiguaza, la cual lleva vertimientos de origen residual doméstico y gran cantidad de sólidos de las actividades de trituración y molienda de agregados que se desarrollan en el margen izquierdo de la quebrada.

⁴⁰Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente : Empresa de Acueducto y. *Calidad del sistema hídrico de Bogotá*. Bogotá : Editorial Pontificia Universidad, 2008. 978-958-716-124-3.

- San Benito- Makro Autopista Sur: El río recibe las quebradas Limas y Trompeta, que incrementan la materia orgánica biodegradable y total en el río.
- Makro Autopista Sur - la transversal 86: El río recibe la descarga del interceptor Tunjuelo Medio, el cual transporta las aguas servidas industriales y domésticas de un gran sector del sur de Bogotá y las aguas del sector de San Benito.

MARCO LEGAL

Se tuvo en cuenta los parámetros establecidos en la Resolución 3162 de 2015, dispuestos por de la Secretaría Distrital de Ambiente, ya que el Río Tunjuelo siendo el eje central de esta investigación está ubicado en el perímetro urbano de la ciudad de Bogotá siendo la jurisdicción de este ente.

Para el proyecto los parámetros evaluados en relación con los objetivos de calidad propuestos por la SDA para el año 2018-2020 fueron el DBO5 y oxígeno disuelto, los cuales se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Objetivos de Calidad Río Tunjuelo 2018-2020

Objetivos de Calidad Rio Tunjuelo 2018-2020		
TRAMO	<i>DBO₅</i>	Oxígeno Disuelto
	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>
1	5	7
2	20	5
3	30	2
4	20	0.1

Fuente: Resolución 3162 de 2015

Se hace énfasis en que el cumplimiento de estos objetivos son complejos debido al gran número de descargas que vierten sus aguas al río.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la capacidad de autodepuración con respecto al oxígeno disuelto en el río Tunjuelo.

Objetivos Específicos

- Determinar los coeficientes de reacción para oxigenación y desoxigenación del cuerpo de agua.
- Modelar la curva de oxígeno disuelto tanto matemáticamente como con el uso del software QUAL2K asemejándose a la realidad del río Tunjuelo.
- Presentar los escenarios posibles para cumplir con los niveles mínimos de oxígeno disuelto según la Resolución SDA 3162 del 2015.

ALCANCES Y LIMITACIONES

El mayor aporte del trabajo de investigación, es modelar los escenarios que mejoren el comportamiento del río respecto al oxígeno disuelto, por medio del programa QUAL-2k, de igual forma busca dar los índices de estado actual que presenta el cuerpo de agua a medida que recibe las descargas contaminantes, a partir de datos históricos ambientales e hidráulicos en las estaciones de monitoreo real que cubren el recorrido de la corriente en el sector urbano. Proporcionando información que contribuya a la toma de decisiones para la evaluación de las condiciones de calidad de agua.

LIMITACIONES

- Debido a la información que fue suministrada por la secretaria distrital del medio ambiente, el modelamiento trabajo con el parámetro DBO5 mas no con la DBOu, ya que la duración del laboratorio de DBOu contempla una duración de 21 días, lo cual no es recomendado en la práctica.
- La calibración del modelo, debido a que el cálculo por medio de las ecuaciones de las constantes de oxigenación y desoxigenación, posiblemente no den acorde al escenario del parámetro medido. Se optó calibrar el modelo ajustando las constantes a través de interacciones.
- Se toman en cuenta ciertos parámetros para el estudio de calidad de agua, ya que para un análisis definitivo se debe tener en cuenta en su totalidad.
- La información errónea, como la relación de la DBO, ya que existen numerosos factores que afectan esta prueba, entre ellos encontramos la relación de la materia orgánica soluble a la materia orgánica suspendida, los sedimentables, los flotantes, la presencia de hierro en su forma oxidada o reducida, la presencia de compuestos azufrados, peróxido, cloro y las aguas no bien mezcladas. Al momento no existe una forma de corregir o ajustar los efectos de estos factores.
- Falta de información de los datos ambientales y aforos de los vertimientos del río Tunjuelo, ya que es muy limitada la accesibilidad a esa información.
- No se cuenta con el tiempo suficiente para desarrollar de manera autónoma los laboratorios debido a que se debe realizar durante un periodo extenso de tiempo (alrededor de 6 meses aproximadamente) para un análisis acertado, así mismo los costos para estos laboratorios es alto por el gran número de muestras que se debe realizar.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El modelamiento de calidad de agua del río Tunjuelo, consiste en observar gráficamente la concentración de oxígeno disuelto en el recorrido del río, por medio del programa Qual2k y la ecuación directa del modelo de Streeter and Phelps se puede analizar otra vez de tramos definidos por las estaciones de monitoreo real, como afecta la materia orgánica este parámetro. Así mismo el programa QUAL-2K permite analizar por medio de graficas el comportamiento del río respecto al parámetro de oxígeno disuelto, donde podemos acceder el análisis mediante el cambio de los valores de la DBO5 para observar que valores permiten que el río auto depure. Para que el modelo se puede aplicar confiablemente se debe seguir los siguientes pasos.

Recopilación de datos:

En la Tabla 6 se encuentran las estaciones seleccionadas para desarrollar el modelamiento de calidad de agua respecto al oxígeno disuelto del río Tunjuelo.

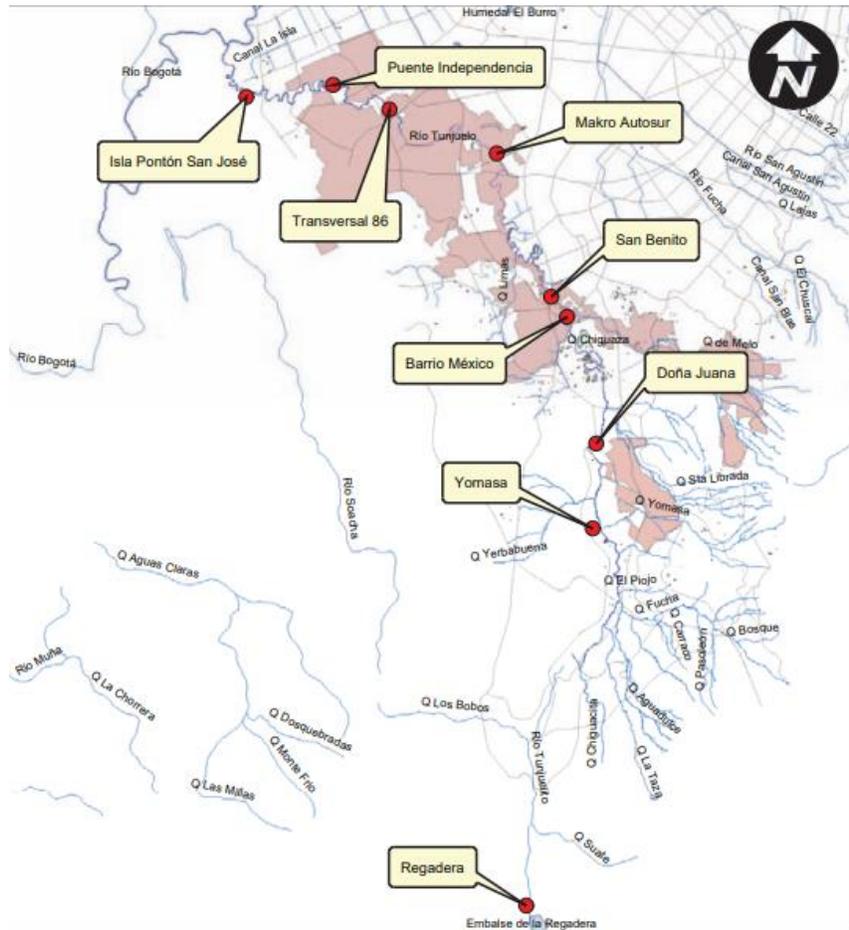
Tabla 6. Estaciones de monitoreo

N°	ESTACIÓN
1	Regadera
2	Yomasa
3	Doña Juana
4	Barrio México
5	San Benito
6	Makro Autopista Sur
7	Transversal 86
8	Puente independencia
9	Isla Ponto San José

Fuente: RCHB 2008

En la Figura 9 se ubican las estaciones de monitoreo en el río Tunjuelo.

Figura 9. Ubicación de las estaciones de monitoreo



Fuente: RCHB 2008

Las localizaciones geográficas y altitud de las estaciones de monitoreo se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7. Localización de las estaciones de monitoreo

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	COTA (msnm)
Regadera	4,405922	-74,144237	2944
Yomasa	4,503064	-74,127094	2616
Doña Juana	4,525544	-74,126717	2588
Barrio México	4,559332	-74,134120	2561
San Benito	4,563680	-74,138194	2560
Makro Autopista Sur	4,599750	-74,152222	2553
Transversal 86	4,612415	-74,179867	2548
Puente independencia	4,613378	-74,187442	2547
Isla Ponto San José	4,616111	-74,217286	2544

Fuente: Ubicación Estaciones Calidad del Agua, Bogotá, D.C.

Para la calibración del modelo se utilizó la mediana de los datos suministrados por la Secretaria Distrital de Medio Ambiente, las campañas realizadas fueron del año 2009 hasta 2018.

Tabla 8. Resultados de la campaña 2009-2018

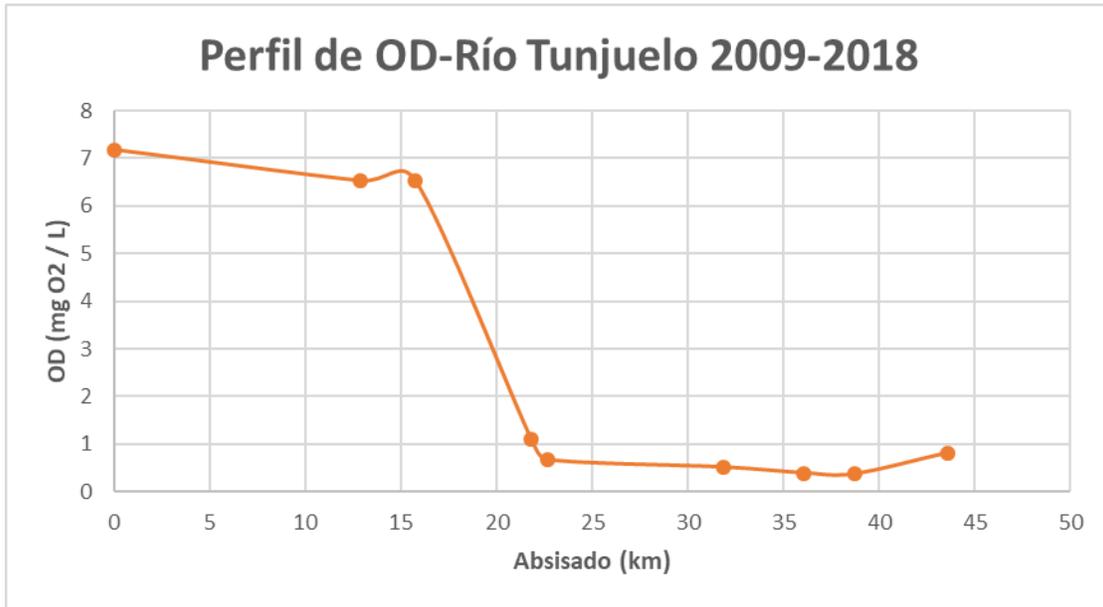
ESTACIÓN	DBO (mg/l)	OD (mg/l)	Temperatura (°c)	Absisado (km)	Q(m³/s)
Regadera	1,7	7,18	13,5	0	0,014
Yomasa	10,55	6,53	14,64	12,881	0,914
Doña Juana	23,25	6,53	14,8	15,76	1,084
Barrio México	8,1	1,11	14,8	21,801	1,444
San Benito	42	0,67	15,5	22,652	1,142
Makro Autopista Sur	35,6	0,51	15,8	31,839	1,329
Transversal 86	211,5	0,39	16,8	36,036	3,240
Puente independencia	178	0,37	16,5	38,725	3,514
Isla Ponto San José	179	0,81	16,8	43,55	4,629

Fuente: Secretaria Distrital de Medio Ambiente

En Anexos 1 se encuentra la respuesta al radicado de la petición de la información ambiental e hidráulica del río Tunjuelo solicitada a la Secretaria Distrital del Medio Ambiente.

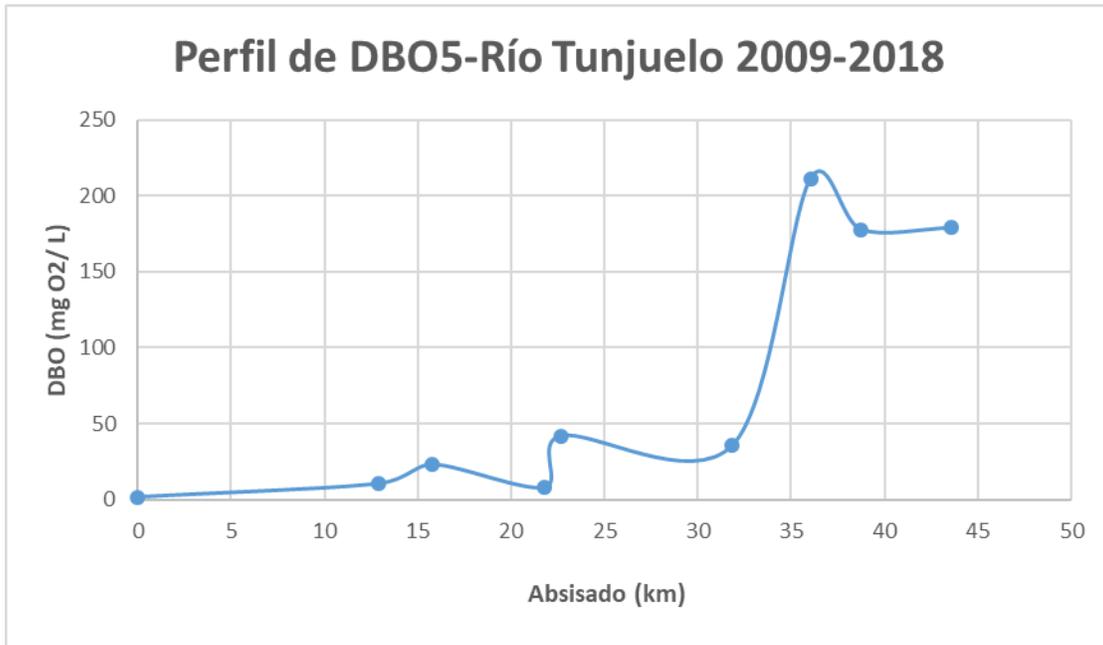
Con los datos de la Tabla 8 se realizan los perfiles de OD y DBO del río Tunjuelo. Ver Figura 10 y Figura 11.

Figura 10. Perfil del oxígeno disuelto medido



Fuente: Autores

Figura 11. Perfil de materia orgánica



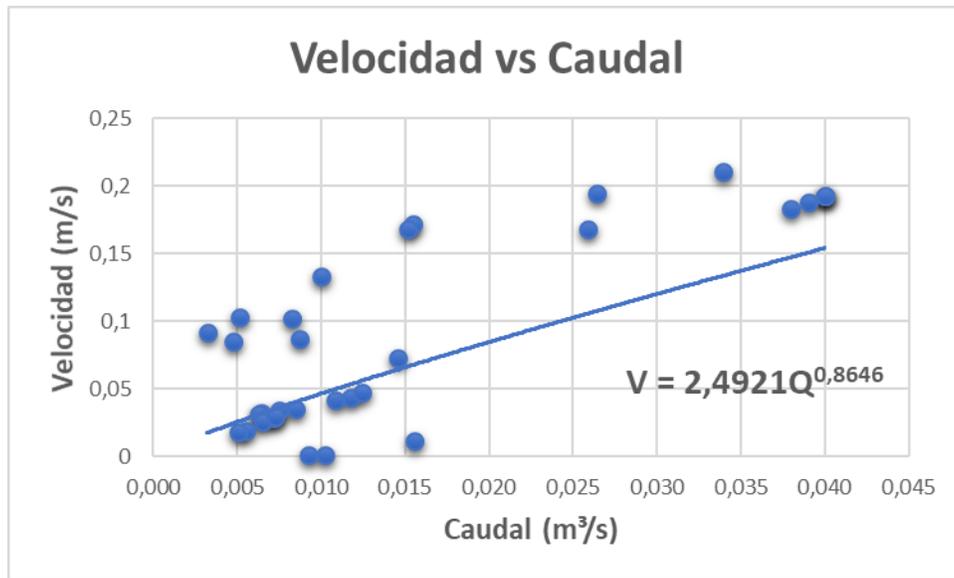
Fuente: Autores

Curva hidráulica de calibración

Para el régimen hidráulico del modelo QUAL-2k se optó por la curva de calibración de profundidad y velocidad en dependencia del caudal, donde se obtiene por medio de los aforos realizados por la secretaria distrital de medio ambiente del año 2015 hasta el año 2018.

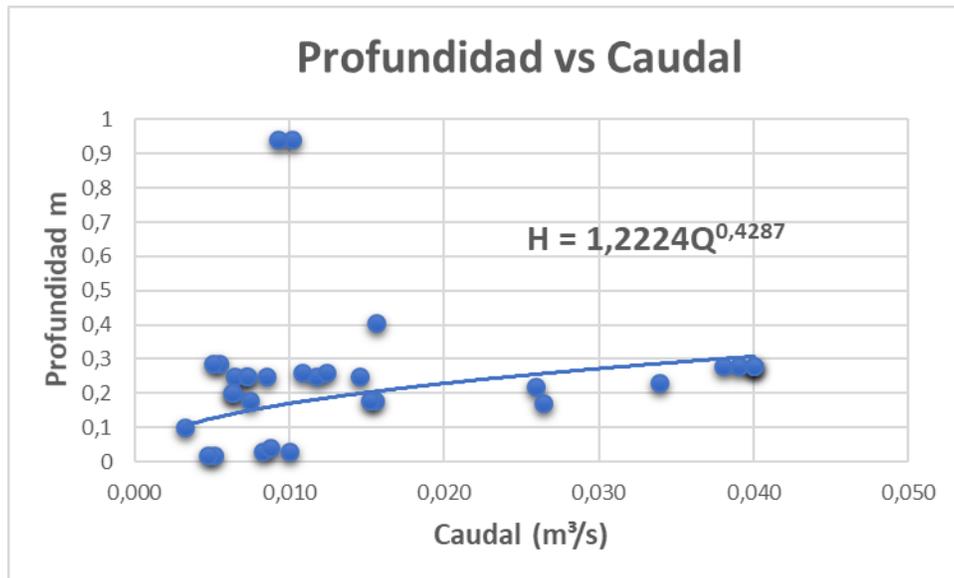
Los resultados de la estación Regadera se indican en Anexos 2 mientras que las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 12 y la Figura 13.

Figura 12. Curva hidráulica Velocidad. Estación Regadera



Fuente: Autores

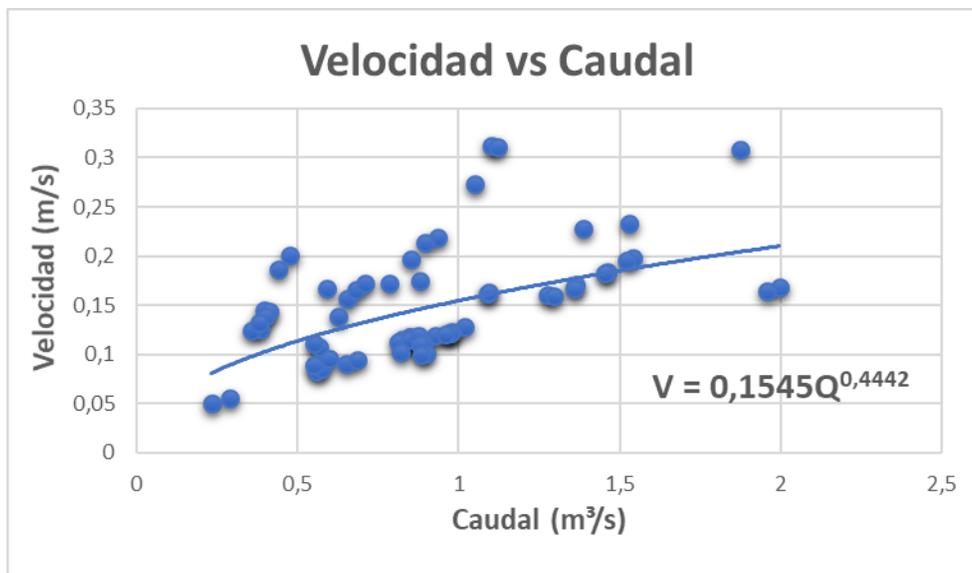
Figura 13. Curva hidráulica Profundidad. Estación Regadera



Fuente: Autores

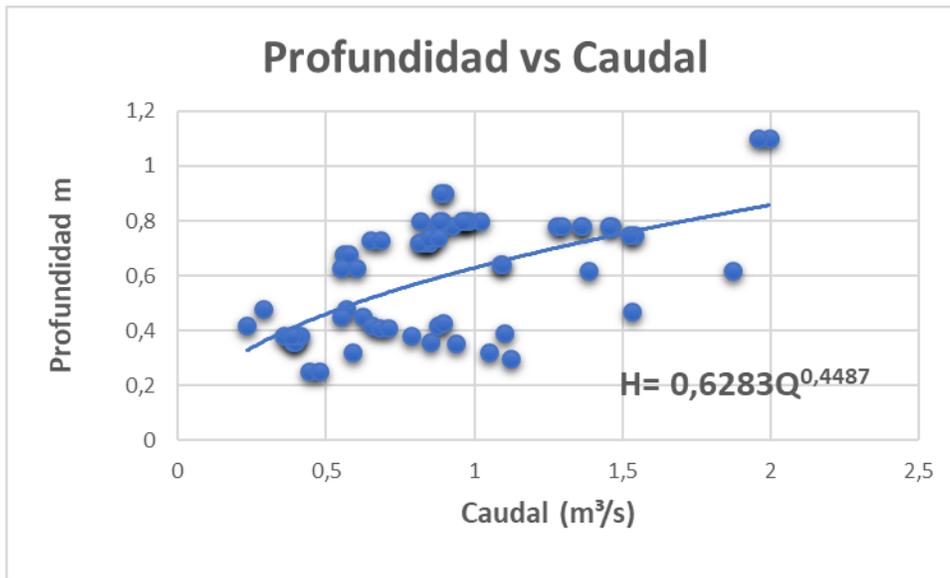
Los resultados de la estación Yomasa se indican en anexos 3. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 14 y la Figura 15.

Figura 14. Curva hidráulica Velocidad. Estación Yomasa



Fuente: Autores

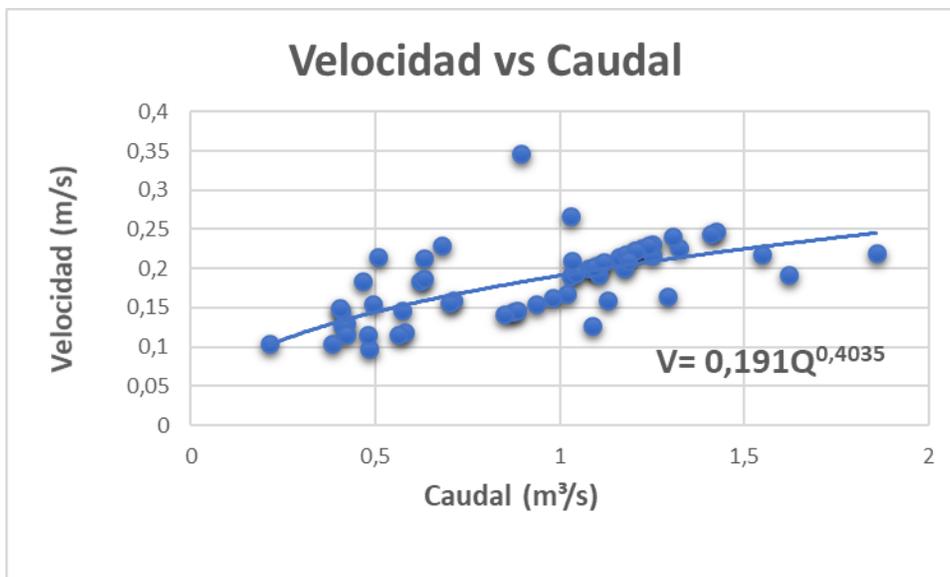
Figura 15. Curva hidráulica Profundidad. Estación Yomasa



Fuente: Autores

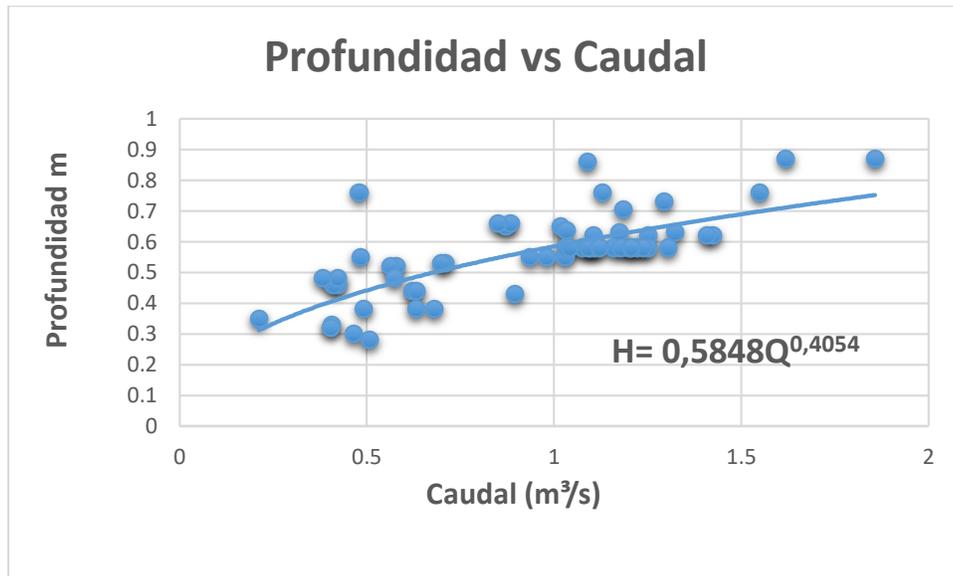
Los resultados de la estación Doña Juana se indican en Anexos 4. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 16 y la Figura 17.

Figura 16. Curva hidráulica Velocidad. Estación Doña Juana



Fuente: Autores

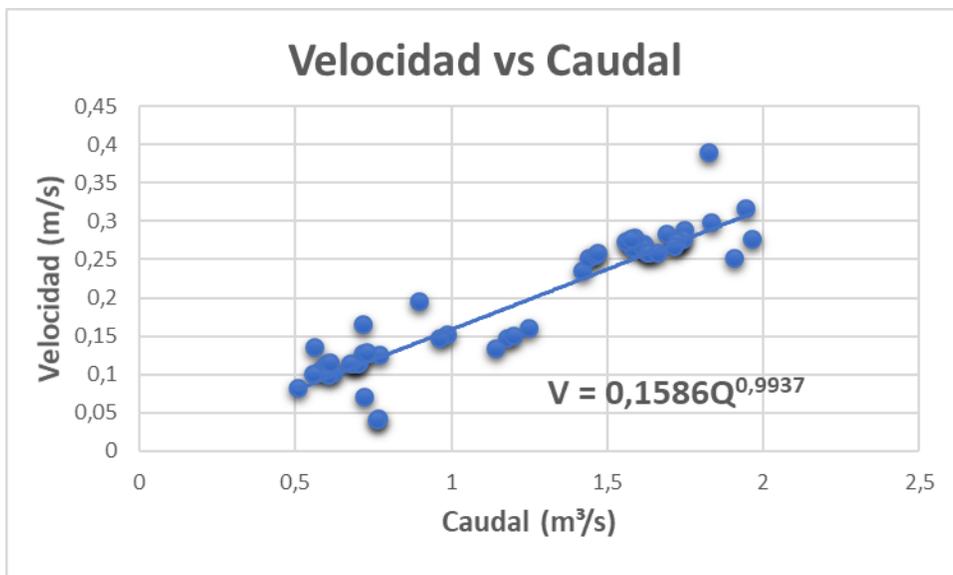
Figura 17. Curva hidráulica Profundidad. Estación Doña Juana



Fuente: Autores

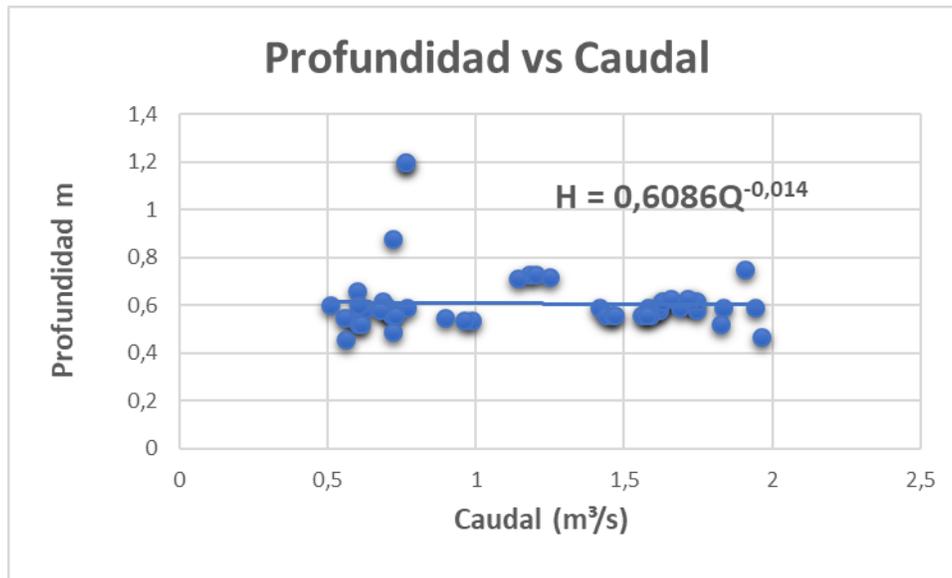
Los resultados de la estación Barrio México se indican en Anexos 8. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 18 y la Figura 19.

Figura 18. Curva hidráulica Velocidad. Estación Barrio México



Fuente: Autores

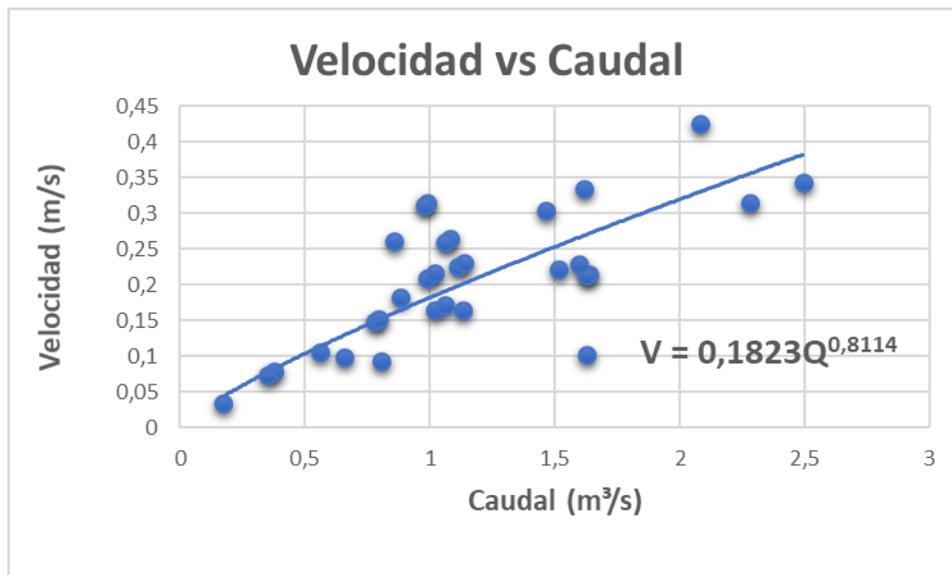
Figura 19. Curva hidráulica Profundidad. Estación Barrio México



Fuente: Autores

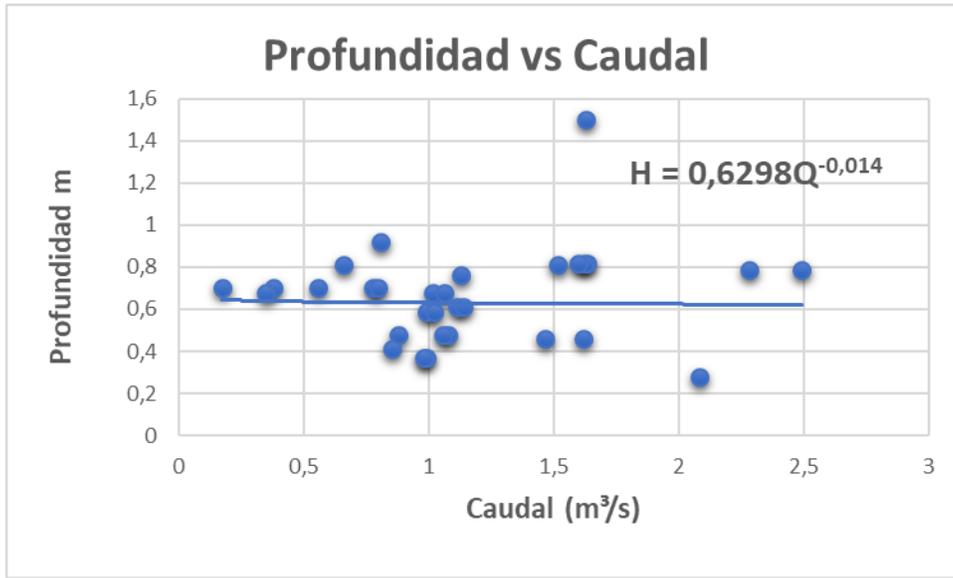
Los resultados de la estación San Benito se indican en Anexos 5. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 20 y la Figura 21.

Figura 20. Curva hidráulica Velocidad. Estación San Benito



Fuente: Autores

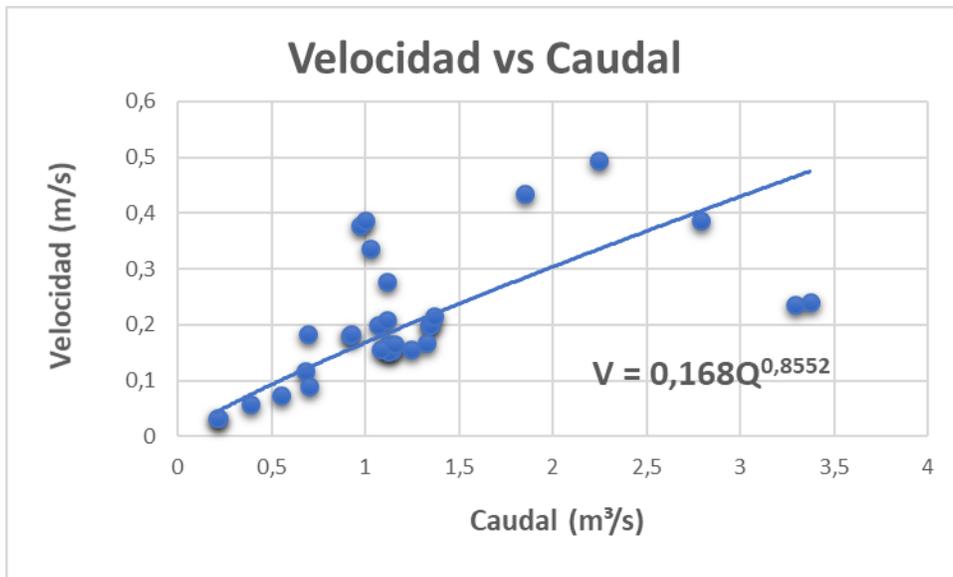
Figura 21. Curva hidráulica Profundidad. Estación San Benito



Fuente: Autores

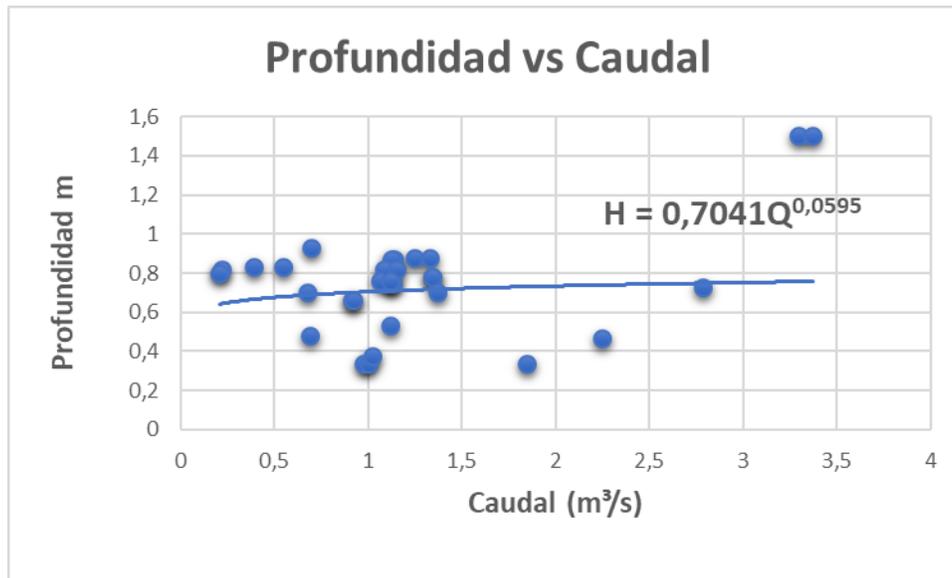
Los resultados de la estación Makro Autopista Sur se indican en Anexos 9. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 22 y la Figura 23.

Figura 22. Curva hidráulica Velocidad. Estación Makro Autopista Sur



Fuente: Autores

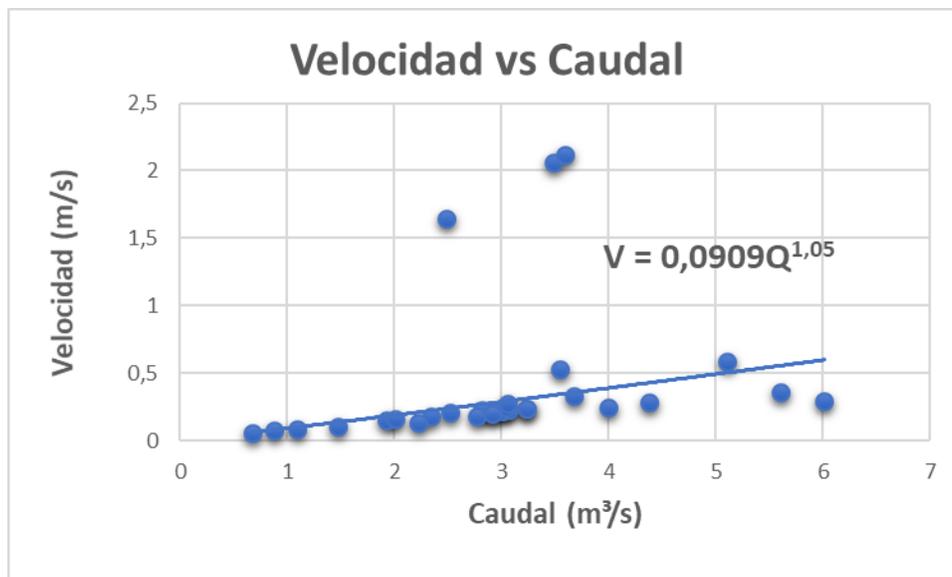
Figura 23. Curva hidráulica Profundidad. Estación Makro Autopista Sur



Fuente: Autores

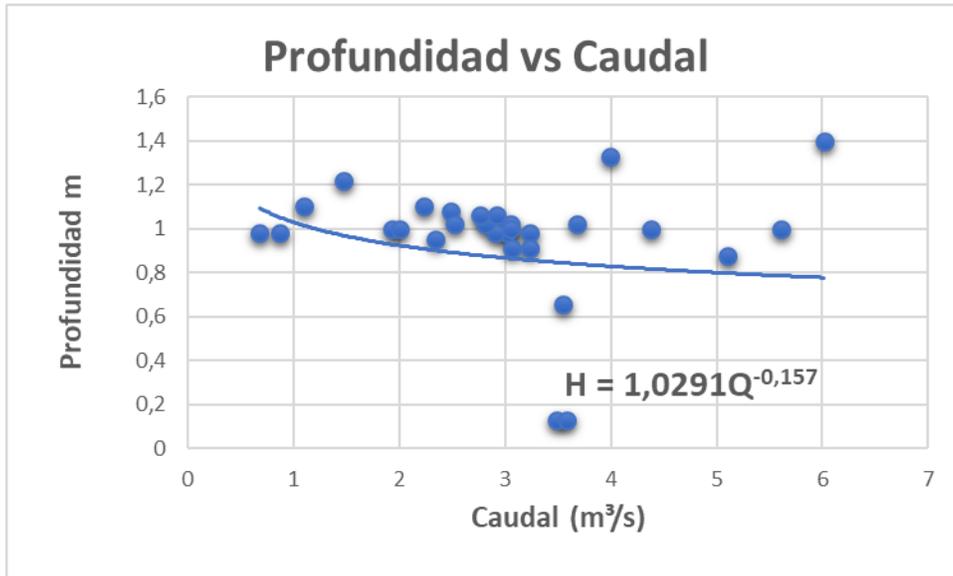
Los resultados de la estación Transversal 86 se indican en Anexos 6. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 24 y la Figura 25.

Figura 24. Curva hidráulica Velocidad. Estación Transversal 86



Fuente: Autores

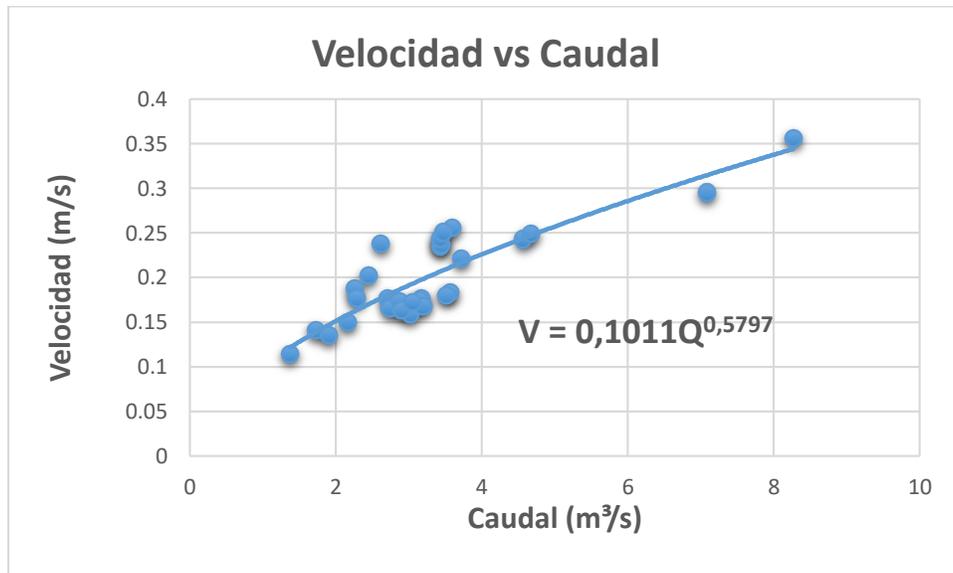
Figura 25. Curva hidráulica Profundidad. Estación Transversal 86



Fuente: Autores

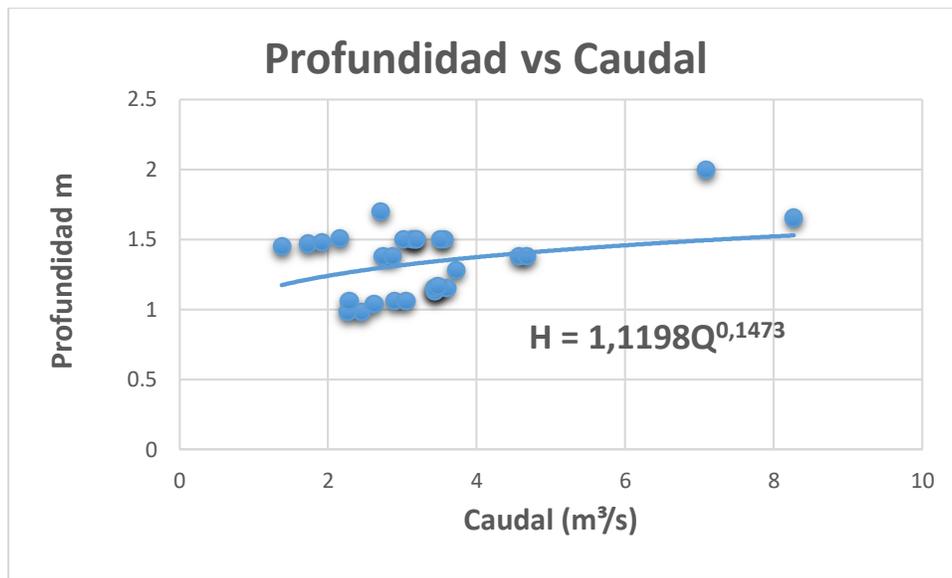
Los resultados de la estación Puente Independencia se indican en Anexos 7. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 26 y la Figura 27.

Figura 26. Curva hidráulica Velocidad. Estación Puente Independencia



Fuente: Autores

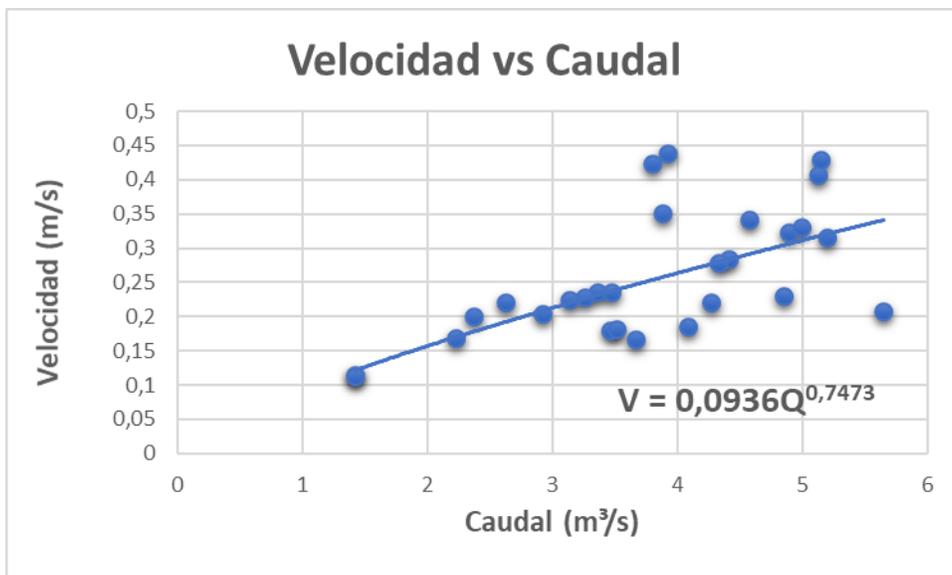
Figura 27. Curva hidráulica Profundidad. Estación Puente Independencia



Fuente: Autores

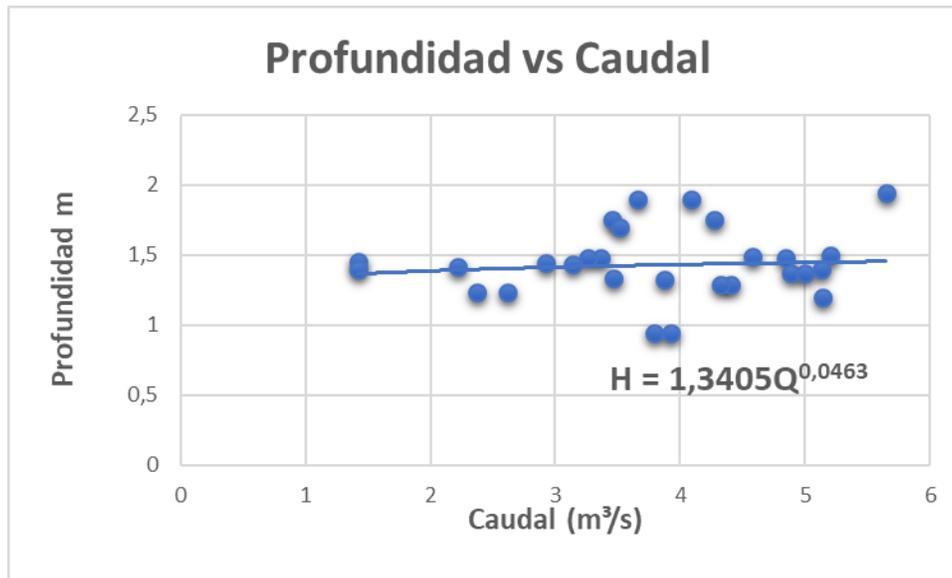
Los resultados de la estación Isla Ponto San José se indican en Anexos 10. Las ecuaciones del comportamiento hidráulico en la Figura 28 y la Figura 29.

Figura 28. Curva hidráulica Velocidad. Estación Isla Ponto San José



Fuente: Autores

Figura 29. Curva hidráulica Profundidad. Estación Isla Ponto San José



Fuente: Autores

Calibración del modelo

Para obtener el perfil del OD calculado asemejando a las condiciones reales del río, se ajustan las constantes de desoxigenación y oxigenación, por medio de interacciones que logren el perfil que represente el mismo estado del OD medido.

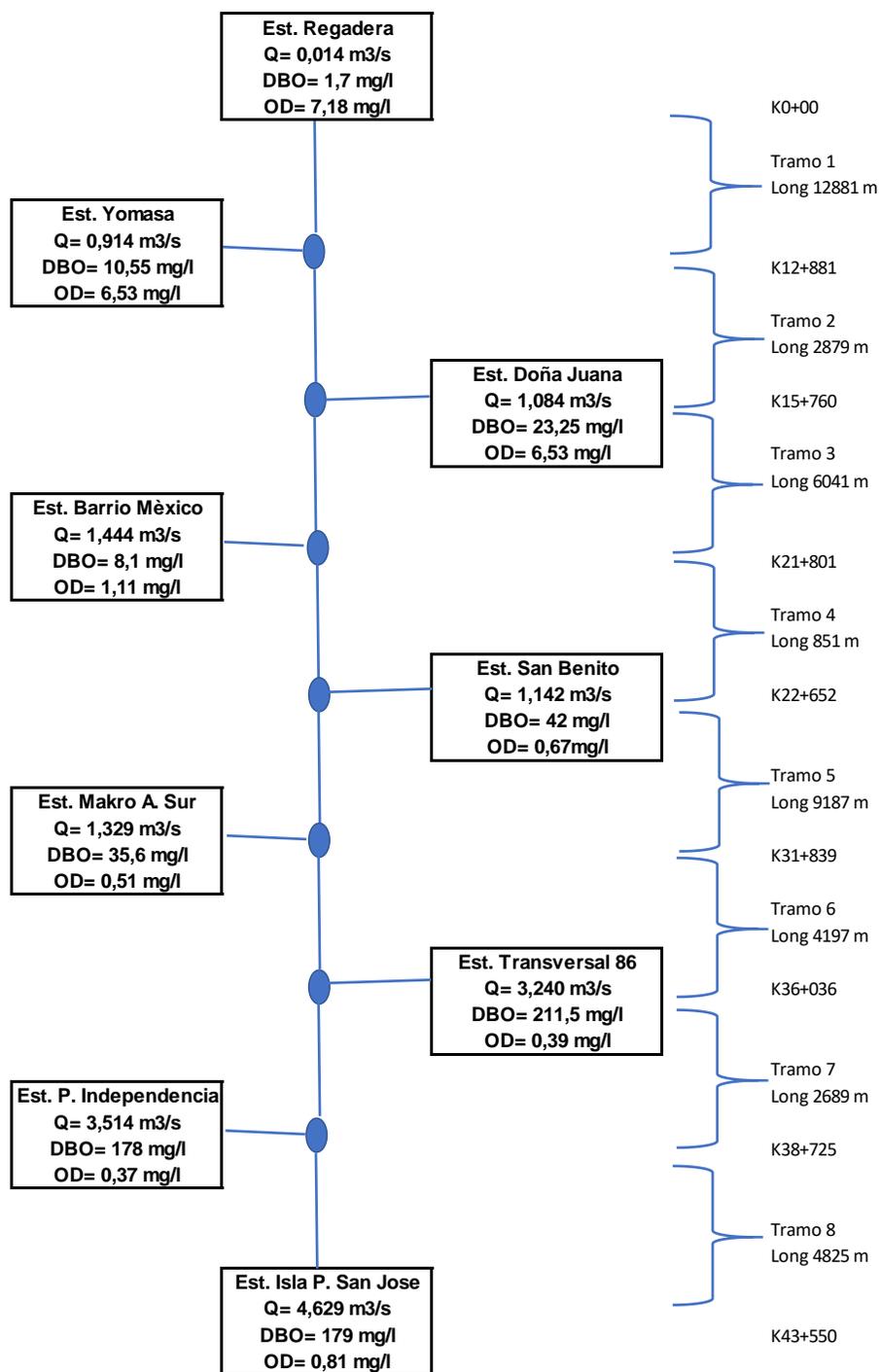
En la Figura 30 se definen los tramos correspondientes para la calibración del modelo con sus respectivas variables, el cual se ingresan en la ecuación 3, donde se obtiene el perfil OD calculado.

En la Tabla 9, los resultados de la velocidad y profundidad se obtienen reemplazando los caudales de la *Tabla 8* en las ecuaciones de las curvas hidráulicas, encontradas de la Figura 12 a la Figura 29. De igual forma el ODs (oxígeno disuelto de saturación) se logra, mediante la ecuación 5, reemplazando los datos de temperatura de la

Figura 8. Mapa de la Cuenca del río Tunjuelo

y posteriormente la ecuación 6.

Figura 30. Perfil de referencia río Tunjuelo



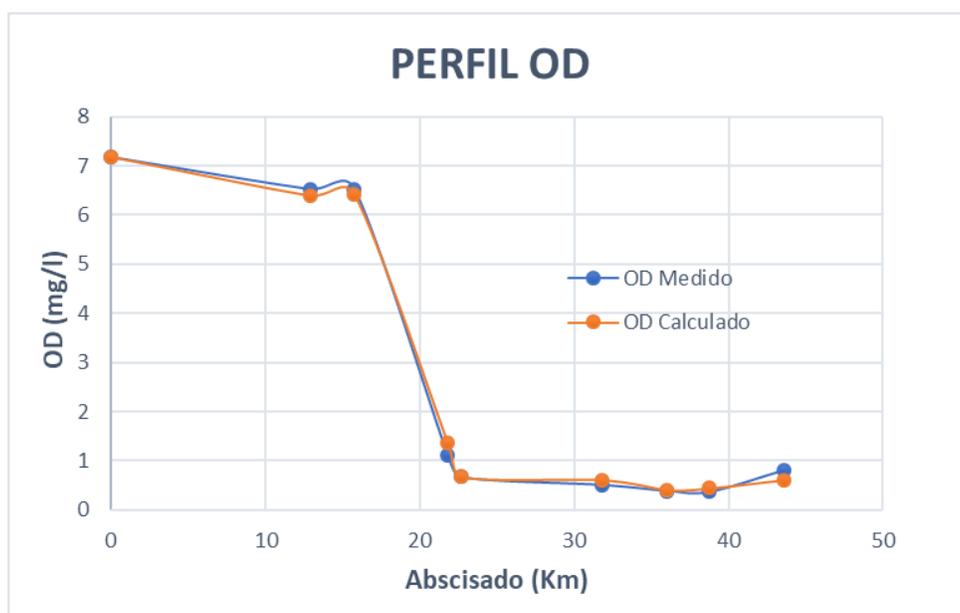
Fuentes: Autores

Tabla 9. Datos de calibración del modelo

DATOS	tramo 1		tramo 2		tramo 3		tramo 4	
	Regadera	Yomasa	Yomasa	D juana	D juana	B mèxico	B mèxico	S benito
DBO (mg/l)	1,7		10,55		23,25		8,1	
K1 (d-1)	1		0,5		2,5		3	
K2 (d-1)	0,5		7		5		1,5	
H (m)	0,20		0,6		0,60		0,61	
Ods (mg/l)	6,9		7,11		7,12		7,15	
vel (m/s)	0,06		0,15		0,20		0,23	
Distancia (m)	12881		2879		6041		851	
t(d)	2,4		0,22		0,35		0,04	
Do (mg/l)	0,00	0,71	0,71	0,71	0,71	5,78	5,78	6,36
OD (mg/l)	7,18	6,40	6,40	6,41	6,41	1,37	1,37	0,68
DATOS	tramo 5		tramo 6		tramo 7		tramo 8	
	S benito	MK sur	MK sur	TV 86	TV 86	P inden	P inden	I ponto S J
DBO (mg/l)	42		35,6		211,5		178	
K1 (d-1)	1		1,5		0,1		0,2	
K2 (d-1)	4,6		6,5		3,5		5,5	
H (m)	0,63		0,72		0,86		1,34	
Ods (mg/l)	7,04		7,01		6,87		6,91	
vel (m/s)	0,20		0,21		0,31		0,21	
Distancia (m)	9187		4197		2689		4825	
t(d)	0,53		0,23		0,10		0,27	
Do (mg/l)	6,36	6,40	6,40	6,60	6,60	6,42	6,42	6,30
OD (mg/l)	0,68	0,61	0,61	0,41	0,41	0,44	0,44	0,61

Fuente: Autores

Figura 31. Curva SAG



Fuente: Autores

Para la calibración en el programa QUAL2K, se requiere toda la información recopilada y calculada anteriormente. Adicionalmente se requiere hacer unos ajustes en el abscisado, materia orgánica y las constantes de oxigenación y desoxigenación.

Figura 32. Datos de la cabecera. Estación Regadera

Rio tunjuelo (3/20/2020)		Open Old File		Run Fortran										
Headwater Data:		Note: * required field												
ID	Number of Headwaters*	1												
No. 1	Reach No.*	Headwater Name	Flow*	Elevation	Weir				Rating Curves					
			Rate (m ³ /s)	(m)	Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Velocity		Depth			
	1	Mainstem headwat	0,014	2944,000					1,2500	0,9000	2,4921	0,865	1,2224	0,429
Headwater Water Quality		Units	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.	6:00 a. m.	7:00 a. m.	8:00 a. m.	9:00 a. m.		
		Temperature	C	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50		
		Conductivity	umhos											
		Inorganic Solids	mgD/L											
		Dissolved Oxygen	mg/L	7,13	7,13	7,13	7,13	7,13	7,13	7,13	7,13	7,13		
		CBODslow	mgO2/L											
		CBODfast	mgO2/L	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70		
		Organic Nitrogen	ugN/L											
		NH4-Nitrogen	ugN/L											
		NO3-Nitrogen	ugN/L											
		Organic Phosphorus	ugP/L											
		Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L											
		Phytoplankton	ugA/L											
		Detritus (POM)	mgD/L											
		Pathogen	cfu/100 mL											
		Alkalinity	mgCaCO3/L											
		pH	s.u.											
No. 2	Reach No.*	Headwater Name	Flow*	Elevation	Weir				Rating Curves					
			Rate (m ³ /s)	(m)	Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Velocity		Depth			
Headwater Water Quality		Units	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.	6:00 a. m.	7:00 a. m.	8:00 a. m.	9:00 a. m.		

Fuente: Autores

En la Figura 32 en la pestaña Headwater se introducen los datos de la cabecera del río, es decir los datos de la estación Regadera. Los datos hidráulicos se insertan en el régimen hidráulico que se utilizó al igual los datos de elevación y su caudal. Mientras que los datos ambientales se introducen a diferentes horas.

En la pestaña Reach define las condiciones hidráulicas y geográficas de cada tramo del río. Debido a la extensa información que se introducen en la pestaña, se simplifica en las siguientes figuras.

Figura 33. Datos en la pestaña Reach

QUAL2K Stream Water Quality Model Rio tunjuelo (3/20/2020) Reach Data:						
		Run				
		Fortra				
Reach for diel plot	1					
Element for diel plot	1	Location		Element	Elevation	
Reach	Downstream	Upstream	Downstream	Number	Upstream	Downstream
Label	end of reach label	(km)	(km)	>=1	(m)	(m)
Tramo 1		43,55	30,669	2	2944,000	2616,000
Tramo 2		30,669	27,79	2	2616,000	2588,000
Tramo 3		27,79	21,749	2	2588,000	2561,000
Tramo 4		21,749	20,898	2	2561,000	2560,000
Tramo 5		20,898	11,711	2	2560,000	2553,000
Tramo 6		11,711	7,514	2	2553,000	2548,000
Tramo 7		7,514	4,825	2	2548,000	2547,000
Tramo 8		4,825	0	2	2547,000	2544,000

Fuente: Autores

En la Figura 33 se introducen los datos de elevación de cada tramo aguas arriba y aguas abajo. El programa toma el abscisado al revés, por lo que en el punto 0 km está ubicada la estación Isla Ponto San José y el punto ubicado a 43.55 km está la estación Regadera.

Figura 34. Datos en la pestaña Reach

QUAL2K Stream Water Quality Model Rio tunjuelo (3/20/2020) Reach Data:								
Reach for diel plot	1							Hyc
Element for diel plot	1	Downstream						
Reach	Downstream	Latitude			Longitude			
Label	end of reach label	Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	
Tramo 1		4,00	30	11	74,00	7	37,5	
Tramo 2		4,00	31	32	74,00	7	36,2	
Tramo 3		4,00	33	34	74,00	8	2,8	
Tramo 4		4,00	33	49	74,00	8	17,5	
Tramo 5		4,00	35	59	74,00	9	8	
Tramo 6		4,00	36	45	74,00	10	47,5	
Tramo 7		4,00	36	48	74,00	11	14,8	
Tramo 8		4,00	36	58	74,00	13	2,2	

Fuente: Autores

En la Figura 34 Se introducen los datos de latitud y longitud, de aguas debajo de cada tramo, en grados minutos y segundos.

Figura 35. Datos en la pestaña Reach

QUAL2K					
Stream Water Quality Model					
Rio tunjuelo (3/20/2020)					
Reach Data:					
Reach for diel plot	1				
Element for diel plot	1	Rating Curves			
Reach	Downstream	Velocity		Depth	
Label	end of reach label	Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent
Tramo 1		0,1545	0,444	0,6283	0,449
Tramo 2		0,1910	0,404	0,5848	0,405
Tramo 3		0,1586	0,994	0,6086	-0,014
Tramo 4		0,1823	0,811	0,6298	-0,014
Tramo 5		0,1680	0,855	0,7041	0,060
Tramo 6		0,0909	1,050	1,0291	-0,157
Tramo 7		0,1011	0,580	1,1198	0,147
Tramo 8		0,0936	0,747	1,3405	0,046

Fuente: Autores

Por último en la pestaña Reach, se introduce los datos del régimen hidráulico encontrados de la Figura 12 a la Figura 29.

Debido a que en cada estación aumenta y disminuye los parámetros de calidad de agua y su caudal, y debido a que no se posee información de descargas puntuales, se utiliza la pestaña Diffuse sources.

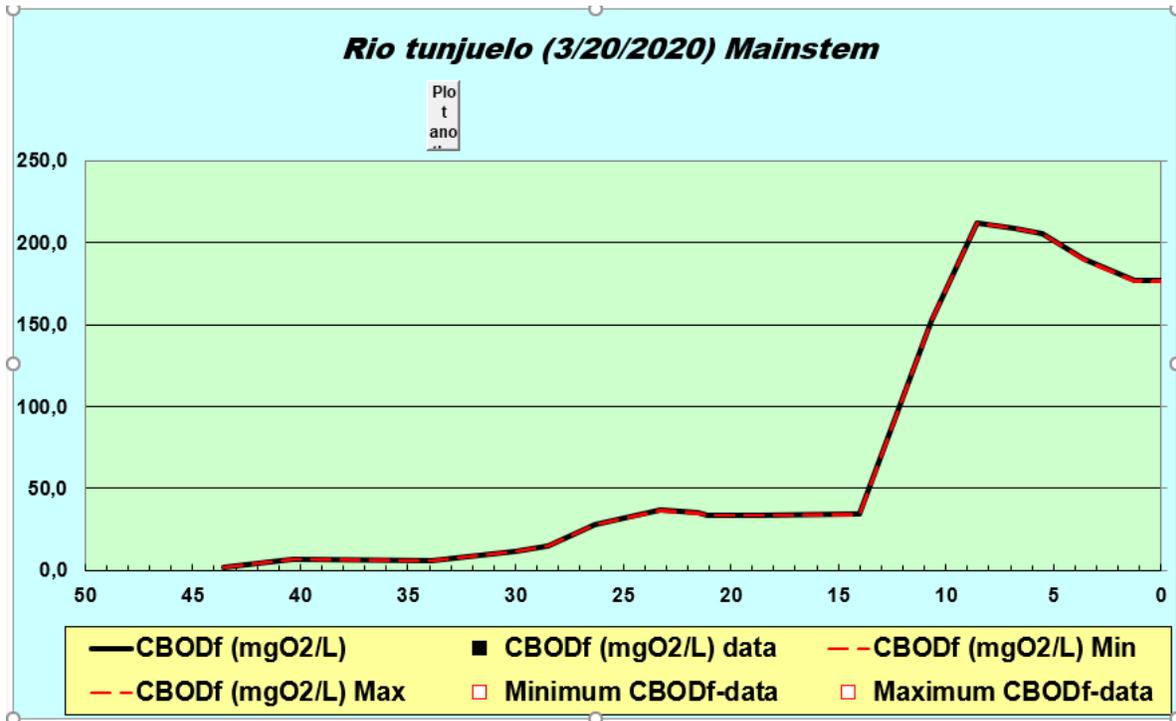
Figura 36. Aporte de entrada de caudal y DBO5

QUAL2K Stream Water Quality Model Rio tunjuelo (3/20/2020) Diffuse Source Data:							
				<input type="button" value="Open Old File"/>		<input type="button" value="Run Fortran"/>	
Name	Headwater ID*	Location		Diffuse	Diffuse	Temp C	CBOD fast mgO2/L
		Up km	Down km	Abstraction m3/s	Inflow m3/s		
Tramo 1	1	43,550	30,669		0,9000	16,64	11,0000
Tramo 2	1	30,669	27,790		0,1660	14,80	120,0000
Tramo 3	1	27,790	21,749		0,3600	14,80	130,0000
Tramo 4	1	21,749	20,898	0,3020		15,80	
Tramo 5	1	20,898	11,711		0,8170	15,50	50,00
Tramo 6	1	11,711	7,514		1,9110	16,80	400,00
Tramo 7	1	7,514	4,825		0,2740	16,50	150,00
Tramo 8	1	4,825	0,000		1,1150	16,80	150,00

Fuente: Autores

Como se ve en la Figura 36, se introducen los datos de aporte de caudal en cada tramo a diferencia del tramo 4 que tiene una extracción, esto se logra por la diferencia de caudales de una estación a otra. En cuanto a la materia orgánica para tener un valor aproximado se puede usar la ecuación 7, sin embargo, como no es una carga puntual se hace interacciones para que se asemeje a las condiciones reales como se ve en la Figura 37.

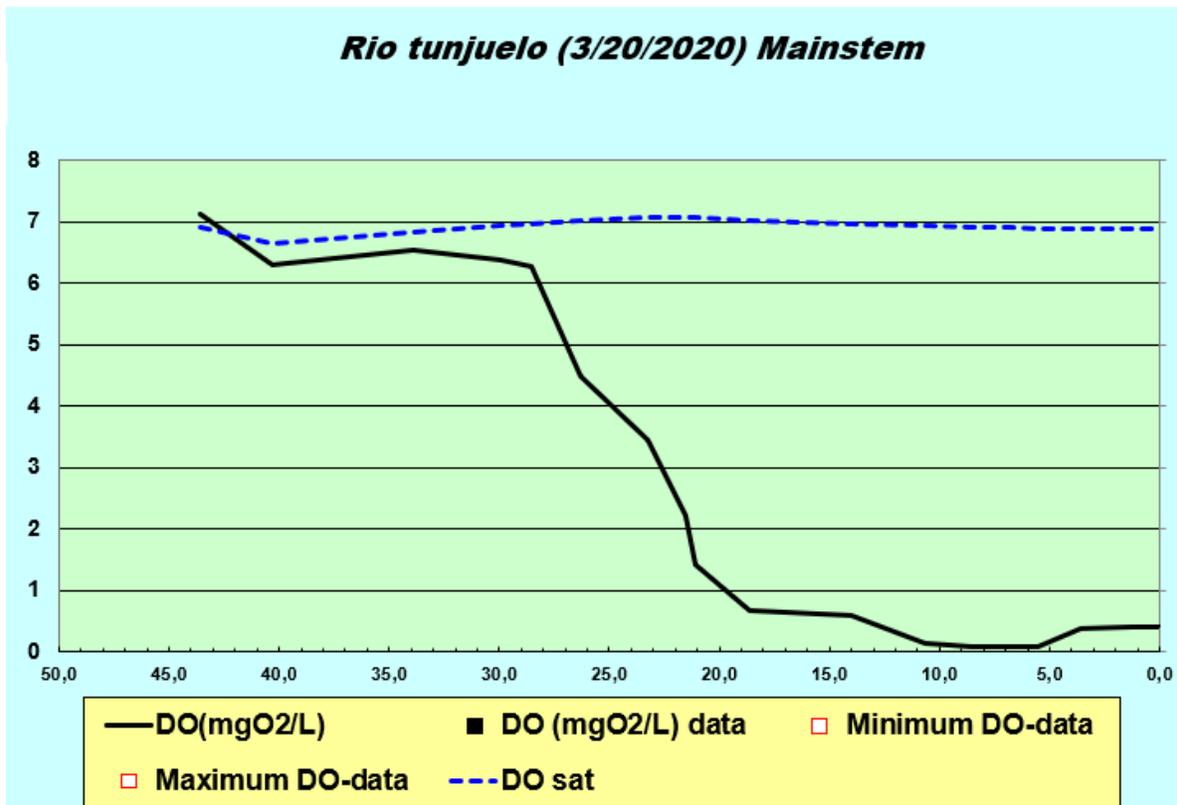
Figura 37. Curva DBO calibrada



Fuente: Autores

Al tener la curva calibrada de materia orgánica, se procede ajustar las constantes de oxigenación y desoxigenación, de tal manera que la curva de OD presente las condiciones actuales. Como se evidencia en la Figura 38.

Figura 38. Curva OD calibrada



Fuente: Autores

Para obtener la curva de OD calibrada, las constantes de oxigenación y desoxigenación son las que se representan en la Figura 39.

Figura 39. K1 y K2

QUAL2K			
Stream Water Quality Model			Run F
Rio tunjuelo (3/20/2020)			
Reach Rates and Velocities:			
			Fast CBOD
Reach	Reach	Prescribed	Oxidation
Number	Label	Reaeration	Rate
		/d	/d
1	Tramo 1	48,000	1,0000
2	Tramo 2	100,000	5,0000
3	Tramo 3	7,000	1,0000
4	Tramo 4	5,000	4,0000
5	Tramo 5	3,000	2,0000
6	Tramo 6	3,000	2,0000
7	Tramo 7	3,000	2,0000
8	Tramo 8	17,000	3,0000

▶	QUAL2K	Headwater	Downstream	Reach	Reach Rates	Air Temperature	Dew Point Temperature
---	--------	-----------	------------	-------	-------------	-----------------	-----------------------

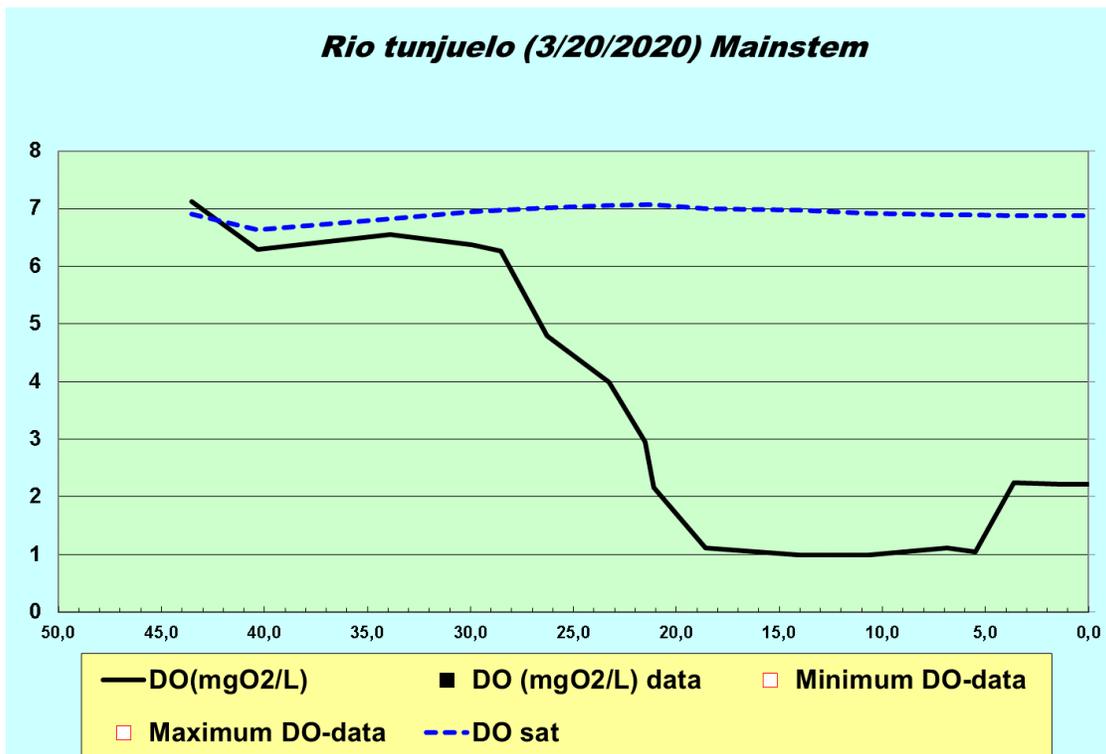
Fuente: Autores

RESULTADOS

Escenario 1

En la se presenta el perfil modelado de oxígeno disuelto, cumpliendo los objetivos de calidad respecto a las concentraciones de OD de la resolución SDA 3162 de 2015, a excepción de las estaciones que conforman la fuente del tramo 4, debido a que se consideran que el valor exigido, no aporta a mejorar la calidad de agua del río Tunjuelo, por lo que se opta a que se cumpla un mínimo de 1 mg/l.

Figura 40. Escenario 1 perfil OD

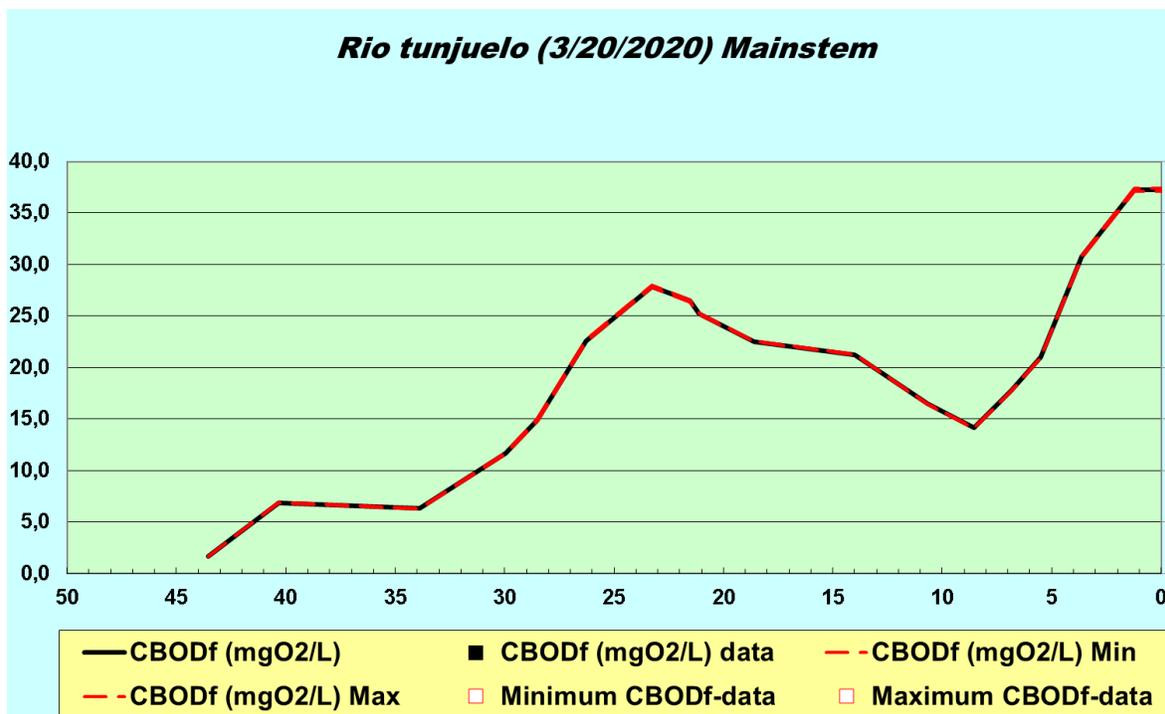


Fuente: Autores

Ya que las estaciones Regadera, Yomasa y Doña Juana superan las concentraciones de oxígeno disuelto exigidos por la resolución, no se modifican las condiciones en los tramos 1 y 2, a partir de este punto las condiciones del río presenta un déficit de oxígeno, mostrando una declinación en la curva, por otro lado, las estaciones Barrio México y San Benito para que cumplan una concentración de 2 mg/l, presenta una remoción de un 30% de la materia orgánica (DBO5) que le llega al tramo 3, ya que la carga contaminante que le llega a este tramo, paso de 130 a 90 mg/l, mejorando las condiciones en estas dos estaciones, puesto que Barrio México presentar una concentración de OD de casi 3 mg/l y San Benito llega al límite del valor exigido con 2,16 mg/l; respecto a las estaciones restantes se

analiza que son las más críticas, a causa de que la remoción de la materia orgánica en el tramo 6 fue bastante alta, debido a que este tramo es el mayor aportante de carga contaminante con 400 mg/l, que pasa a 10 mg/l teniendo una remoción de 97.5% tan solo para que las estaciones de Transversal 86 y Puente Independencia obtenga una concentración de OD de 1 mg/l, al igual para que todas las estaciones cumplan con el valor propuesto, el tramo 5 genera una remoción de 50 a 30 mg/l. No obstante, se puede observar que a partir de la estación Puente Independencia el río comienza a tener una recuperación sin necesidad de hacer una remoción en los últimos 2 tramos, ya que la estación Isla Ponto San José exhibe un OD de 2,2 mg/l.

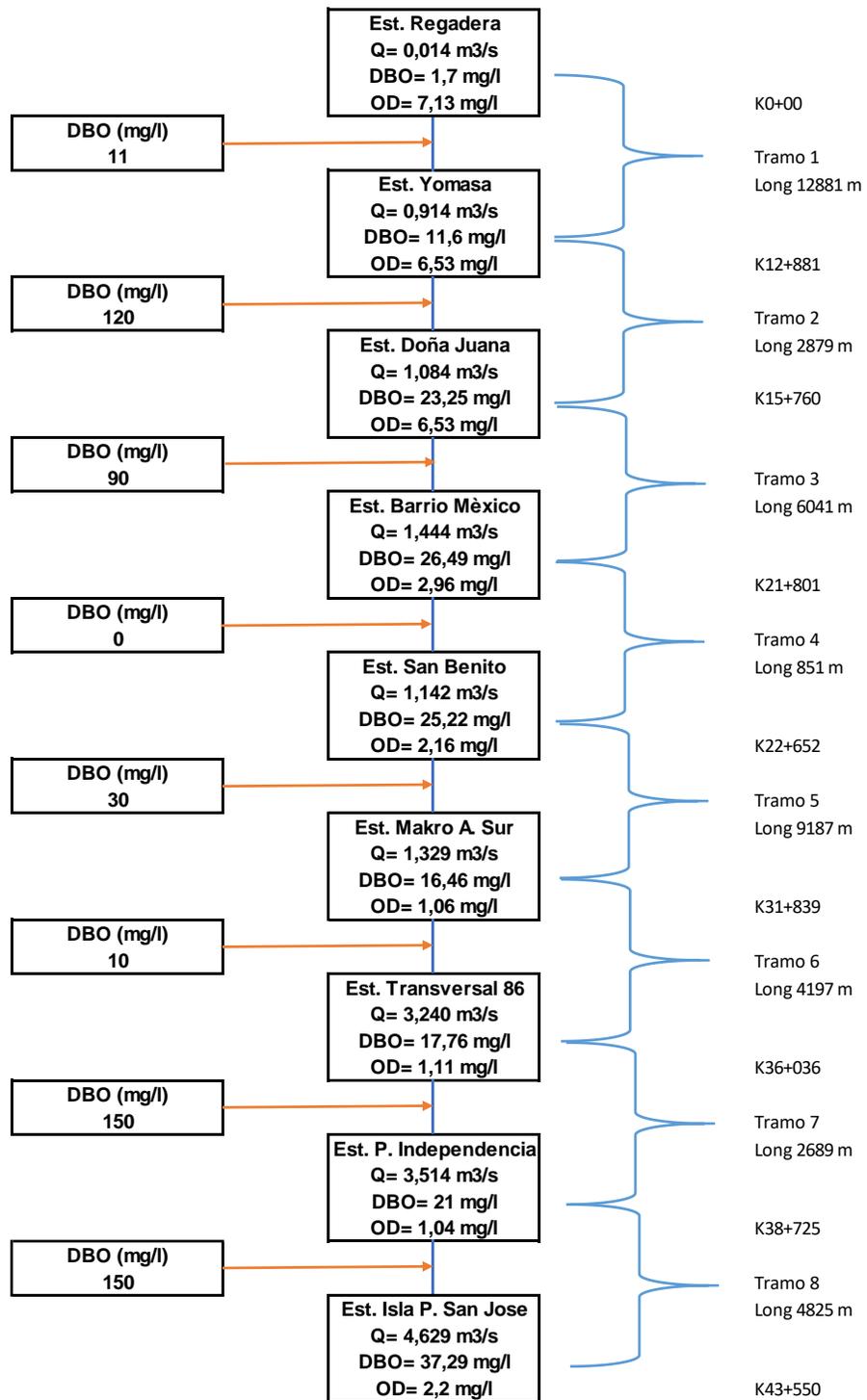
Figura 41. Escenario 1 perfil DBO5



Fuente: Propia

Después de haber logrado la modelación de la curva de oxígeno, se presenta en la Figura 41 el comportamiento de la DBO5, donde observa que se genera un pico en el tramo 3. Esto se debe a que no fue drástica la remoción de los aportantes de la materia orgánica en el tramo 3, al contrario de lo que fue en los tramos 5 y 6 donde se analiza que la capacidad para biodegradar estos agentes a partir de finalizar el tramo 2 no es tan eficiente. La concentración más alta de la carga contaminante se encuentra al final del río con 37.29 mg/l en consecuencia de las cargas aportantes de los últimos 2 tramos que no se modificaron para cumplir los objetivos de calidad, siendo así se presentan en la Figura 42 las condiciones presentadas para el escenario 1.

Figura 42. Escenario 1 perfil de referencia

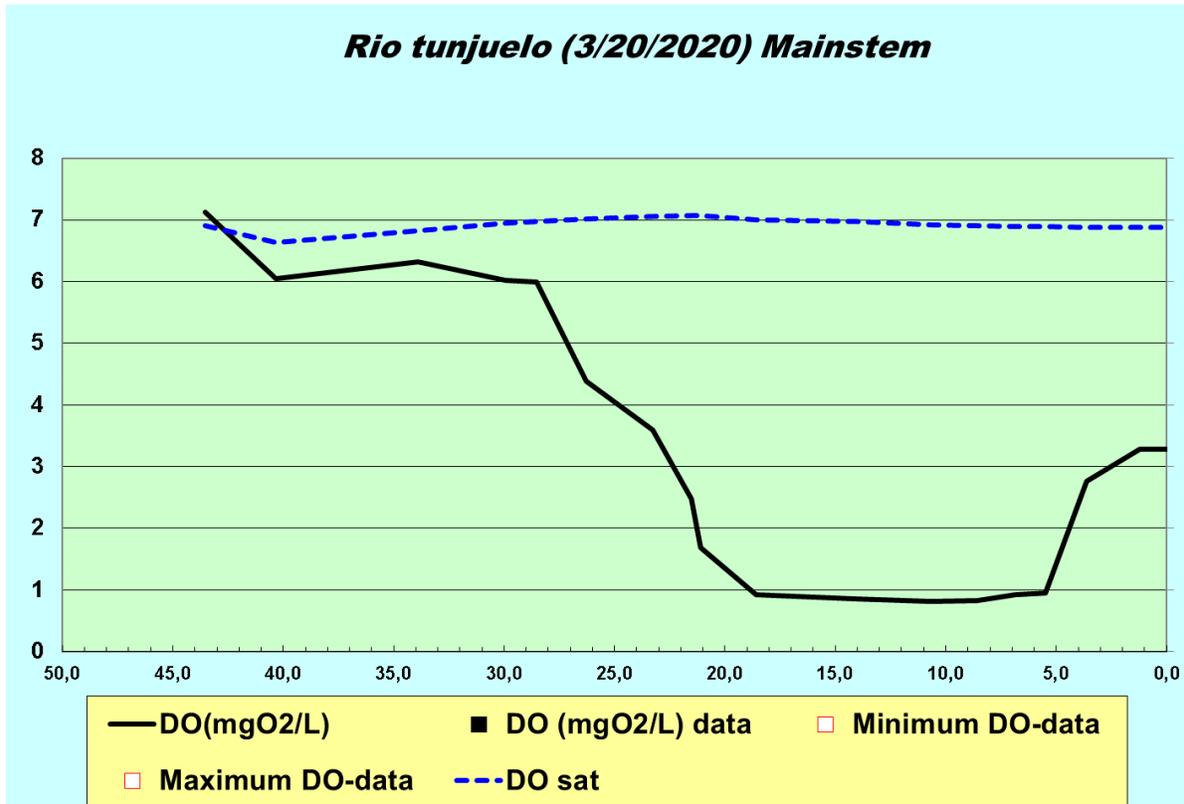


Fuente: Autores

Escenario 2

En la Figura 43 se presenta el perfil modelado de oxígeno disuelto cumpliendo los objetivos de calidad respecto a las concentraciones de la DBO5 de la resolución SDA 3162 de 2015

Figura 43. Escenario 2 perfil OD

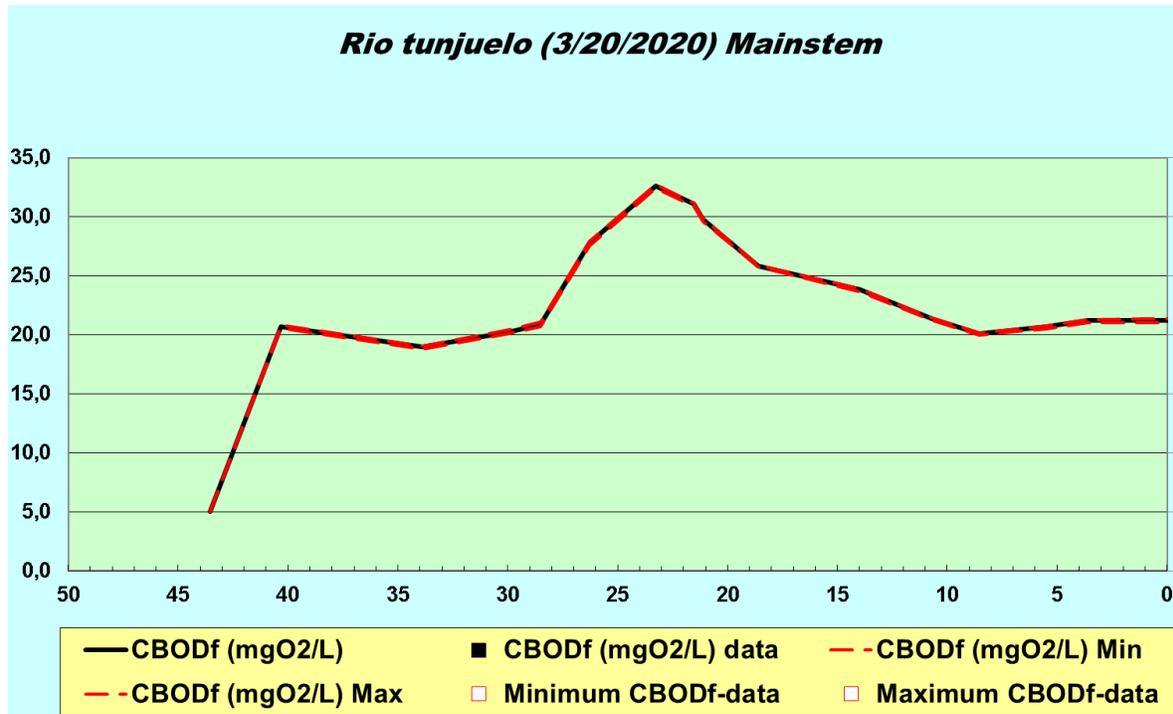


Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 43 la mayoría de los tramos no mejoran sus condiciones en comparación al escenario 1, debido que, para cumplir los objetivos de calidad en cuanto a las concentraciones de la DBO5, las cargas contaminantes aumento en los tramos iniciales. En el tramo 1 se aumentó 3 veces más de la carga inicial ya que de 11 pasa 33 mg/l, en el tramo 2 sigue teniendo un aporte de 120 mg/l disminuyendo las concentraciones de OD en la segunda y tercera estación con 6,01 y 5.99 mg/l, concentraciones que permiten que el río presente un estado saludable hasta este punto, puesto que a partir de este punto la declinación de la curva se mantiene, pero con concentraciones de OD más bajas, ya que en el tramo 3 tiene un aporte total de 95 mg/l, empeorando las concentraciones del oxígeno disuelto en las estaciones Barrio México y San Benito con 2.47 y 1.68 mg/l casi 1 mg/l menos que en el escenario 1, mientras que el tramo 5 realiza la misma remoción que en el escenario 1 el tramo 6 también redujo una concentración significativa pasando de 400 a 20 mg/l, sin embargo al realizar este cambio, las

concentraciones de OD en las últimas estaciones no son favorables ya que no superan el 1 mg/l, a excepción de la última estación que reporta un OD de 3,28 mg/l mejorando de modo relevante las condiciones de descarga, en virtud a que las cargas contaminantes aportadas en los últimos dos tramos se redujo a 60 mg/l teniendo una remoción del 60%. Todas estas modificaciones en los aportantes de la materia orgánica en cada tramo se realizan con el fin de obtener la curva de la DBO5, que se puede observar en la Figura 44.

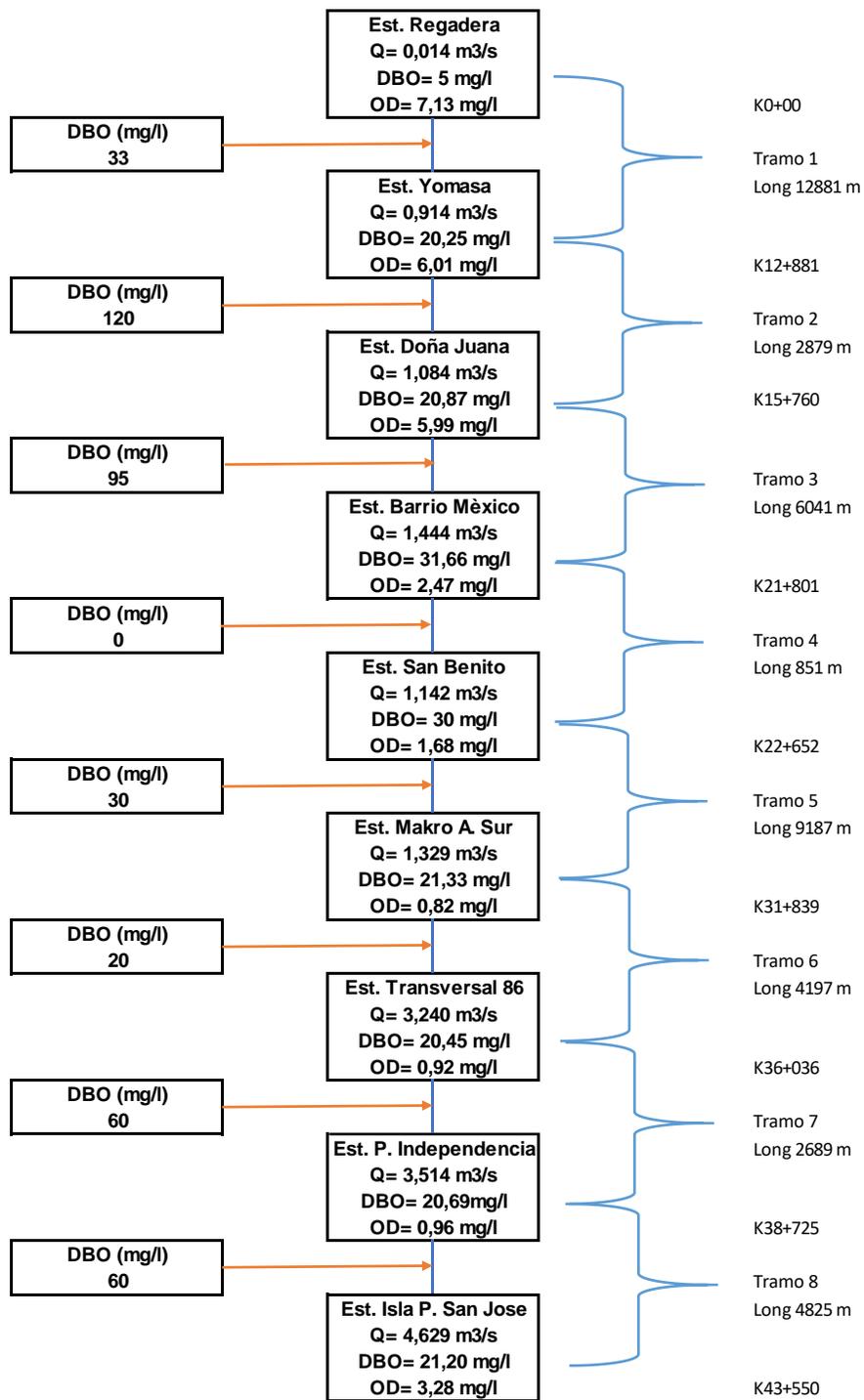
Figura 44. Escenario 2 perfil DBO5



Fuente: Autores

Cumpliendo con los valores exigidos de la DBO5 por la resolución, se muestra la curva del comportamiento de la materia orgánica, por lo que se puede observar la concentración más alta se encuentra entre las estaciones Doña Juana y San Benito, al igual la mayor parte en el recorrido del río se ubica con una concentración de 20 mg/l, concentraciones que no permiten un estado favorable en la cuenca baja del río. En la Figura 45 se presentan las condiciones del escenario 2.

Figura 45. Escenario 2 perfil de referencia

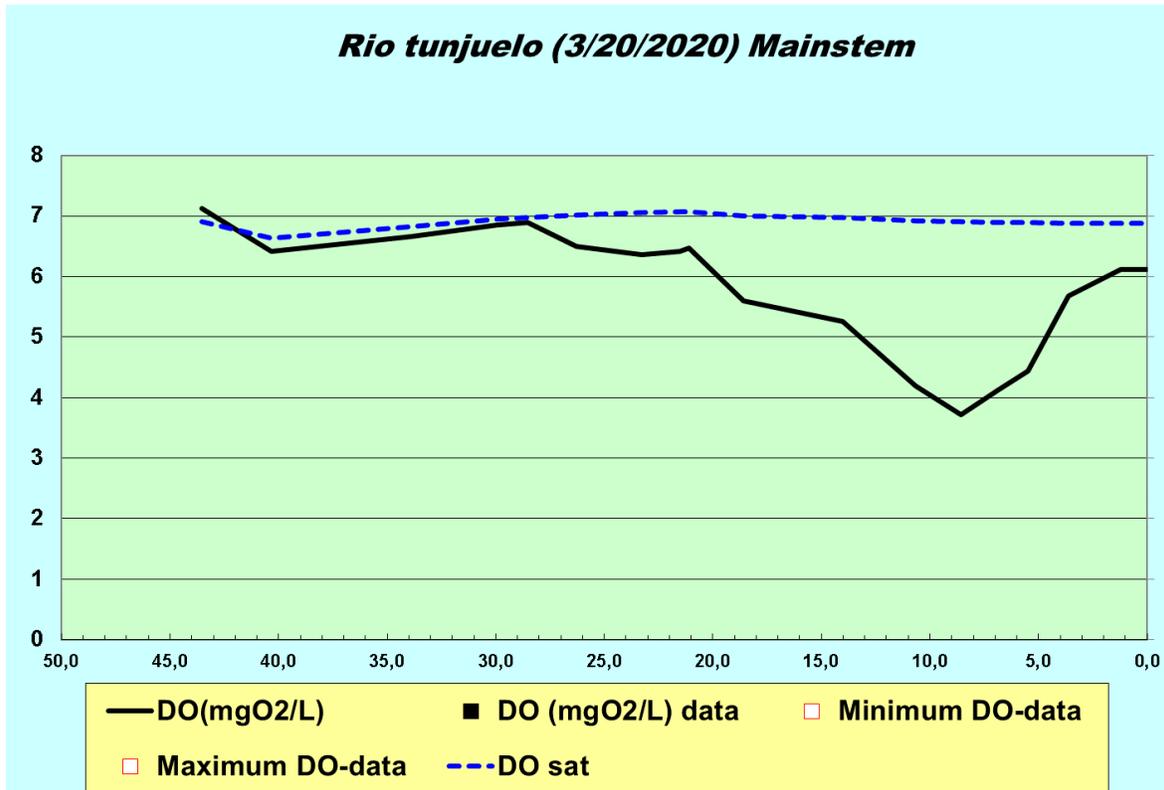


Fuente: Autores

Escenario 3 condiciones actuales sin cargas contaminantes

En la Figura 46 se presenta el perfil modelado de oxígeno disuelto, sin cargas contaminantes, es decir el comportamiento del río sin ninguna carga antrópica.

Figura 46. Escenario 3 perfil OD

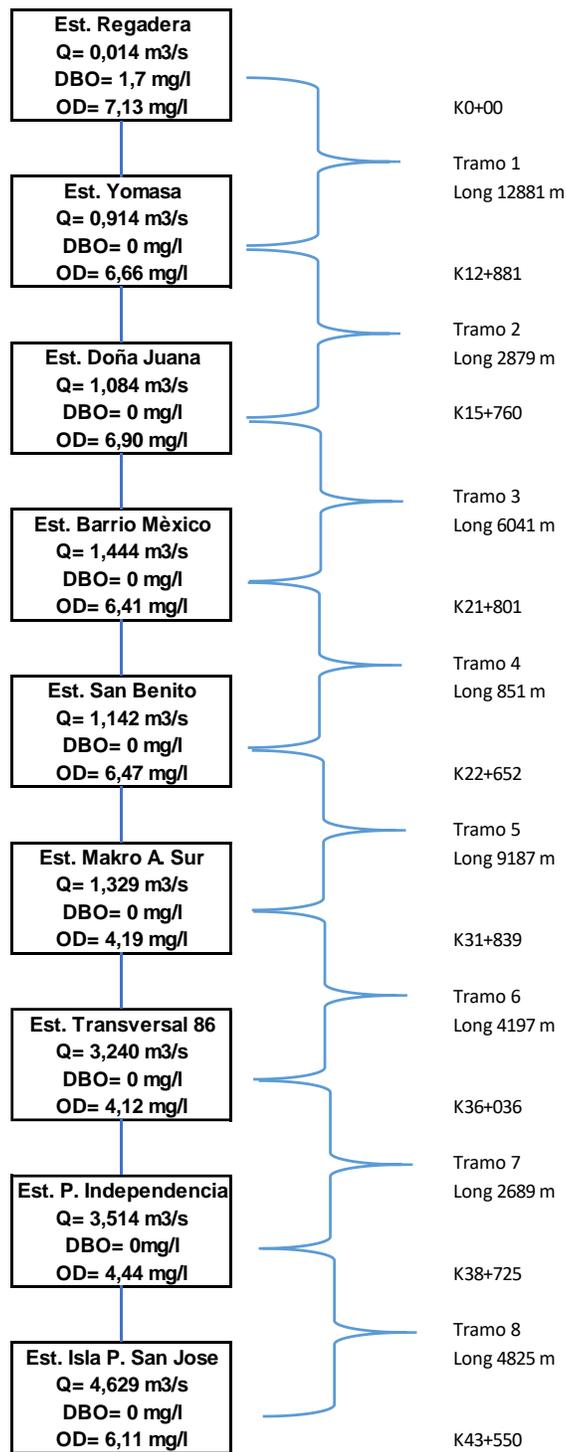


Fuente: Autores

Este escenario permite ver el comportamiento del río sin ser sometido a cargas antrópicas, presentando un estado favorable, con concentraciones de oxígeno disuelto considerables, el cual en el tramo 1 está cerca dentro del rango de oxígeno de saturación al igual que el tramo 2, mientras que en el tramo 3 y 4 se alejan del oxígeno de saturación, mantienen concentraciones por encima de 6 mg/l. Las estaciones que se presentan por encima de esta concentración son Regadera, Yomasa, Doña Juana, Barrio México y San Benito, después de este punto de monitoreo las concentraciones restantes disminuyen a un rango de 4 mg/l excepto Isla Pontón San José que reporta una concentración de OD de 6,11, también se puede analizar que el punto crítico del río se encuentra en el tramo 6 cerca de la estación TV 86, pero del mismo modo a partir de este punto comienza la recuperación del río Tunjuelo permitiendo volver aproximadamente a las condiciones iniciales.

En cuanto al perfil de la DBO5 no se presenta, ya que este escenario simula que no tiene cargas contaminantes, en pocas palabras es 0 mg/l en el recorrido del tramo evaluado del río.

Figura 47. Escenario 3 perfil de referencia



Fuente: Autores

CONCLUSIONES

- El río Tunjuelo presenta condiciones óptimas y saludables en los dos primeros tramos; después de la estación Doña Juana el oxígeno disuelto llega a valores por debajo de 1 mg/l, lo que indica un cuerpo de agua altamente contaminado. Esto se debe al gran número de vertimientos con cargas contaminante que le llegan a lo largo de su recorrido y a la poca reaeración que tiene el río en la cuenca media y baja.
- Los objetivos de la calidad de la Resolución 3162 de 2015, son difíciles de alcanzar, dado que se debe tener una gran remoción en cada tramo, lo que implica el cierre de la gran mayoría de vertimientos que descargan en la cuenca o el tratamiento primario que se debe aplicar.
- Las constantes de oxigenación en los dos primeros tramos reportan valores altos. Esto corresponde a que las láminas de agua son bajas y la variación de las pendientes son altas, lo que involucra que aplique la reaeración atmosférica en la cuenca alta del río, manteniendo una buena oxigenación.
- En la primera modelación se alcanza a satisfacer los requerimientos de la SDA en cuanto a los objetivos de calidad, pero sin lograr mejorar las condiciones respecto a calidad de agua en la cuenca media y baja, puesto que tener valores de OD por debajo de 3 o 4 mg/l no garantiza un ecosistema equilibrado y la posibilidad presencial de vida animal y vegetal es casi nula.
- En la segunda modelación corrobora que el tramo más crítico es el sexto debido a que no hubo una mejoría en las condiciones presentadas, además de que la remoción de la carga contaminante fue de más del 90 %.
- Se puede hablar de tramos dependientes e independientes, es decir la afectación de un tramo va involucrada a otro, como es el caso del tramo 3 donde las cargas contaminantes que le llegan, deterioran las condiciones de oxígeno disuelto hasta el tramo 6 generando una consecuencia secuencial, así mismo los tramos restantes, por sus condiciones hidráulicas la afectación depende de sí mismos.
- Como se evidencio en el escenario 3, aunque en el tramo 6 cerca de la estación TV 86 se encuentra el punto más crítico, el río comienza a tener una mejoría, aumentando las concentraciones de oxígeno disuelto, dependiendo de qué tan alta es la carga contaminante que llega a los dos últimos tramos presentando autodepuración únicamente en este caso.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere hacer la modelaciones de cada tramo con los datos de monitoreo constante de los puntos de vertimiento que descargan en el río, para así poder conocer el grado de afectación que tiene cada uno.
- Se debe tener un mayor control en las descargas de los vertimientos debido a que el crecimiento descontrolado de la contaminación ha incidido en el deterioro marcado del río. Presentando este comportamiento no solo en los últimos tramos, sino que también en la cuenca alta del río.
- Realizar el estudio de factibilidad en la cuenca media y baja del cierre total de los vertimientos para observar el comportamiento de la autodepuración del río.
- Para posteriores trabajos de investigación involucrar más parámetros de calidad del agua para un análisis más aproximado.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Prim, Luis Echarri.** Tema 11. Contaminación del agua. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. 2005.
2. **Valencia, Manuela.** Las persistentes amenazas al río Tunjuelo. [En línea] EL ESPECTADOR, 27 de 09 de 2018. <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/las-persistentes-amenazas-al-rio-tunjuelo-articulo-814828>.
3. **Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente : Empresa de Acueducto y. Calidad del sistema hídrico de Bogotá.** Bogotá : Editorial Pontificia Universidad, 2008. 978-958-716-124-3.
4. **Manuel Salvador Rodríguez Susa, Lina Sabrina.** *Calidad del recurso hídrico de Bogotá (2012-2013)*. Bogotá : Uniandes, 2014. pág. 231. 978-958-774-047-9.
5. **Ossa, Juan Manuel Castaño.** Modelación de la calidad del agua del rio Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá. [En línea] Universidad Nacional de Colombia , 2015. <http://bdigital.unal.edu.co/52643/1/1088000081.2015.pdf>.
6. **ANGIE ESTEFANIA DIAZ LEON, LINA PAOLA SOTO CORTES.** PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ (RCHB) PARA LOS RÍOS FUCHA Y TUNJUELO EN LA CIUDAD DE BOGOTA D.C. [En línea] UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL, 2016. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/3125/Diazangie2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
7. **VILLANUEVA, EVER ZABALETA.** EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL RÍO GRANDE – DISTRITO CELENDÍN. [En línea] UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, 2016. http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1762/TESIS%20_%20EVER%20ZABALETA%20VILLANUEVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
8. **Rubio Giraldo A. M., Amézquita Bautista, L. M. & Martínez Torres, E. J.** Determinación de la capacidad de asimilación del vertimiento de la PTAR del municipio de Tenjo Cundinamarca en la quebrada Churuguaco mediante el modelo QUAL2KW. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Especialización en Recursos Hídricos., 2017. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14631>.
9. **Reyes Ojeda, C. F. & Ruiz Bravo, L. E.** Diagnóstico de la calidad del agua mediante cálculo de un ICA y modelación de un tramo del río Tunjuelo en el sector de Bosa Libertador. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil., 2017. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15510>.
10. **González, Gabriela del Carmen Carrera.** “MODELACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO Y MATERIA ORGÁNICA Y SU INFLUENCIA EN LA DISTRIBUCIÓN Y DIVERSIDAD DE INDICADORES BENTÓNICOS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO EN EL TRAMO AMAGUAÑA – GUANGOPOLO”. [En línea]

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE, 2011. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/3702/T-ESPE-031368.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

11. **Amarilla, Roberto.** MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL CONTENIDO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL BRAZO AÑA CUÁ, AGUAS ABAJO DE LA REPRESA DE YACYRETÁ. [En línea] UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, Maestría en Ecohidrología, 10 de Noviembre de 2017. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/63748/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

12. **PARRA, VALERIA ANDREA CAJAS.** “ESTIMACIÓN DE VALORES DE CONTAMINACIÓN DIFUSA PARA EL RÍO TOMBAMBA EN ZONAS PERIFÉRICAS Y URBANAS – PRIMERA APROXIMACIÓN”. [En línea] UNIVERSIDAD DE CUENCA, FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL, 2015. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23122/1/TESIS.pdf>.

13. **HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO.** APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA. [En línea] Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química, 2015. <http://bdigital.unal.edu.co/51032/1/1053781847.2015.pdf>.

14. **Pramod K Pandey.** Contamination of water resources by pathogenic bacteria. [En línea] Department of Biological and Agricultural Engineering & Zachry Department of Civil Engineering, Texas A & M University, College Station, Texas, USA, 2014. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4077002/>.

15. **Suaréz, J.** Modelos de Calidad de Agua. [En línea] Universidade da Coruña, Febrero de 2008. [file:///C:/Users/Asus/Downloads/MCA_Tema_5__MODELOS_DE_CALIDAD_DE_AGUAS_EN_RIOS%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Asus/Downloads/MCA_Tema_5__MODELOS_DE_CALIDAD_DE_AGUAS_EN_RIOS%20(1).pdf).

16. **Sawyer, C.N. and McCarty.** Chemistry for Environmental Engineering (3rd ed),. [En línea] McGrawHill Book Company, New York, 1978. https://www.whitman.edu/chemistry/edusolns_software/DO_Spanish.pdf.

17. **CÁRDENAS, NATALIA SÁNCHEZ.** ESTIMACIÓN DE CONSTANTES DE DESOXIGENACIÓN CARBONÁCEA EN EL RÍO TEUSACÁ . [En línea] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES ,FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL, 2015. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17675/u714053.pdf?sequence=1..>

18. **Ramirez, Carlos Alberto Sierra.** Calidad del Agua Evaluación y Diagnostico. [En línea] 2011. <https://es.slideshare.net/overluismarzolahernandez/calidad-del-agua-evaluacin-y-diagnostico-carlos-alberto-sierra-ramires>.

19. **MEDINA, LUIS ALEJANDRO ORDUZ.** DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA TASA DE REAIREACIÓN DE LOS RÍOS MOLINOS, TORCA, ARZOBISPO Y DE LA QUEBRADA LA VIEJA, EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE . [En línea] UNIVERSIDAD SANTO TOMAS,FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL, 2016. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2853/Orduzluis2016.pdf?sequence=6>.

20. **Goyenola, Guillermo.** Guía para la utilización de las Valijas Viajeras MAPSA. [En línea] Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos, Junio de 2004. http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf.
21. **Sierra, Augusto Ortegón.** DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE k DE LA BOTELLA WINKLER PARA ENSAYOS DE dboc. [En línea] 29 de 04 de 2015. https://www.researchgate.net/profile/David_Ortegon_Sierra/publication/275964396_Determinacion_de_la_Constante_k_de_la_botella_Winkler_para_ensayos_de_DBOC_-Version_PDF-/links/554c20810cf29752ee7eda78/Determinacion-de-la-Constante-k-de-la-botella-Winkler-p.
22. **Ramos, David Sánchez.** Introducción a la Ingeniería Sanitaria y Ambiental. [En línea] Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real, Universidad de Castilla la Mancha , 2006. http://blog.uclm.es/davidsanchezramos/files/2016/05/10_Contaminaci%C3%B3n_agua_v2015_resumen.pdf.
23. **ALZATE, FELIPE SANTAMARÍA.** ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL RÍO UBATÉ POR EL MODELO QUAL2K. [En línea] ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL , 2013. <https://es.slideshare.net/alfonsoherrero566/analisis-simplificado-de-oxigeno-disuelto-en-el-rio-ubate-por-el-modelo-qual2-k>.
24. **CÁRDENAS, NATALIA SÁNCHEZ.** ESTIMACIÓN DE CONSTANTES DE DESOXIGENACIÓN CARBONÁCEA EN EL RÍO TEUSACÁ . [En línea] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES ,FACULTAD DE INGENIERÍA,DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL, 2015. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17675/u714053.pdf?sequence=1>.
25. **Amarilla, Ing. Roberto.** MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL CONTENIDO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL BRAZO AÑA CUÁ, AGUAS ABAJO DE LA REPRESA DE YACYRETÁ. [En línea] UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, Maestría en Ecohidrología, 10 de Noviembre de 2020. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/63748/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
26. **Escobar Pintor, J. A., & Moreno Dueñas, N.** Determinación de los coeficientes de oxigenación y desoxigenación para la curva de comportamiento de oxígeno disuelto en el Río Fucha. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 2016. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/6805/4/Determinaci%C3%B3n%20de%20los%20Coeficientes%20de%20oxigenaci%C3%B3n%20y%20desoxigenaci%C3%B3n%20para%20la%20curva%20de%20comportamiento.pdf>.
27. **E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton, editors.** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition. [En línea] 2017. <https://yabesh.ir/wp-content/uploads/2018/02/Standard-Methods-23rd-Perv.pdf>.
28. **HUERTAS, MAYRA ANDREA CASTRO.** APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA. [En línea]

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química , 2015. <http://bdigital.unal.edu.co/51032/1/1053781847.2015.pdf>.

29. **CORPONARIÑO**. MODELO DE SIMULACION DE CALIDAD DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA QUEBRADA MIRAFLORES. [En línea]
<http://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp5.pdf>.

30. **Escobar Pintor, J. A., & Moreno Dueñas, N.** Determinación de los coeficientes de oxigenación y desoxigenación para la curva de comportamiento de oxígeno disuelto en el Río Fucha. [En línea] Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil., 2016. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/6805>.

31. **MARÍA JOHANNA CASTAÑO PACHÓN, LAURA MARCELA URREGO MUÑOZ**. PROBLEMÁTICAS SOCIOAMBIENTALES EN LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO: una posibilidad en la enseñanza y el aprendizaje de la geografía. [En línea] 2015. [file:///C:/Users/Asus/Downloads/Dialnet-ProblematicasSocioambientalesEnLaCuencaDelRioTunju-5489975%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Asus/Downloads/Dialnet-ProblematicasSocioambientalesEnLaCuencaDelRioTunju-5489975%20(1).pdf).

32. **Duarte Silva, Cristian Camilo, Pico Pinto, Gerardo Sebastián y Estupiñán Pinto, Rafael Antonio**. Determinación de la capacidad de autodepuración en un tramo del río Fonce en San Gil con base en el balance de oxígeno disuelto. [En línea] 2014. <http://publicaciones.unisangil.edu.co/index.php/revista-matices-tecnologicos/article/view/257>.

33. **New Jersey. Department of environmental protection**. A North Jersey Homeowner's Guide to Radioactivity in Drinking Water: Uranium. [En línea] April de 2004. <https://sosradon.org/files/sosradon/resources/New%20Jersey%20Radon%20in%20Water.pdf>.

ANEXOS



**SECRETARÍA DE
AMBIENTE**

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE Folios 4 Anexos: 0
 Proc. # 4713780 Radicado # 2020EE46452 Fecha: 2020-02-27
 Tercero: 1015461874 - Jean Paul Eduardo Garcia Vasquez
 Dep.: SUBDIRECCIÓN DE RECURSO HÍDRICO Y DEL SUELO
 Tipo Doc.: Oficio de salida Clase Doc.: Salida

Bogotá D.C.

Señores
JEAN PAUL EDUARDO GARCÍA VÁSQUEZ
 C.C. 1.015.461.874 de Bogotá D.C.
JUAN SEBASTIÁN MORENO BARRETO
 C.C. 1.018.494.196 de Bogotá D.C
 Dirección: Calle 72 No. 27 - 11
 Correo Electrónico: jpgarcia@ucatolica.edu.co ; jsmoreno02@ucatolica.edu.co
 Ciudad

Referencia: Respuesta definitiva a Derecho de Petición
 Radicado SDA No. 2020ER27676 de 06/02/2020

Respetados Estudiantes,

En atención al radicado de la referencia, mediante el cual solicita información relacionada con caudales mínimos, velocidades y altura laminar (profundidad), así como datos de Oxígeno Disuelto, DBO (materia orgánica) y Temperatura en el periodo del 2016 a 2019, del Río Tunjuelo, la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo informa lo siguiente:

La Secretaría Distrital de Ambiente – SDA opera la Red de Calidad Hídrica de Bogotá - RCHB, a partir de la cual se realizan monitoreos periódicos de la cantidad y calidad del recurso hídrico, lo cual ha permitido la recolección de información para establecer el estado y la dinámica en la calidad del recurso hídrico superficial de la ciudad en diferentes periodos del año (lluvioso y seco), la actualización de la línea base mediante la cual se definen los lineamientos de control, determinación de los usos de los cuerpos hídricos, cumplimiento de los objetivos de calidad, implementación del instrumento económico de tasa retributiva, reporte de índices de calidad del agua y el establecimiento de tramos críticos o áreas aferentes a los mismos donde la SDA debe enfocar el trabajo para disminuir la contaminación y generar procesos de recuperación de la calidad del recurso hídrico.

La RCHB comprende una serie de estaciones de monitoreo del recurso hídrico superficial, distribuidas en los ríos principales de la ciudad. Específicamente en el Río Tunjuelo se cuenta con diez (10) estaciones, las cuales se presentan georreferenciadas en la **Tabla 1** y **Figura 1**.

Tabla 1. Estaciones de monitoreo Río Tunjuelo

FUENTE HÍDRICA	ESTACION DE MONITOREO	LATITUD	LONGITUD
Río Tunjuelo (10 Estaciones)	TU-Regader	4°24'21,3186	74°08'39,2522
	TU-UAN	4°28'59,0680	74°07'18,0651
	TU-Yomasa	4°30'11,0312	74°07'37,5400
	TU-DJuana	4°31'31,9600	74°07'36,1797
	TU-Mexico	4°33'33,5939	74°08'02,8301
	TU-SBenito	4°33'49,247	74°08'17,50
	TU-MakroS	4°35'59,10	74°09'08,04
	TU-Tv86	4°36'44,6954	74°10'47,5222
	TU-Ptelinde	4°36'48,16	74°11'14,79
	TU-IslaPon	4°36'58,00	74°13'02,229

Secretaría Distrital de Ambien
 Av. Caracas N° 54-38
 PBX: 3778899 / Fax: 3778930
www.ambientebogota.gov.co
 Bogotá, D.C., Colombia



Anexos 1. Solicitud datos SDA

Fuente: Autores

ESTACIÓN REGADERA					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m³/s)	V Media (m/s)	H(m)
2.7	0.03	8.2787	0.008	0.1022059	0.03
1.07	0.25	11.7419	0.012	0.04389491	0.25
2.5	0.04	8.7433	0.009	0.08743339	0.04
2.5	0.03	9.9972	0.010	0.13329646	0.03
2.5	0.02	5.1489	0.005	0.10297774	0.02
0.35	0.1	3.2131	0.003	0.09180374	0.1
2.8	0.02	4.7642	0.005	0.085075	0.02
1.2	0.18	7.4832	0.007	0.03464444	0.18
11.4	0.94	10.2000	0.010	0.00095185	0.94
11.4	0.94	9.2400	0.009	0.00086226	0.94
1	0.26	10.8300	0.011	0.04165385	0.26
1	0.26	12.4280	0.012	0.0478	0.26
1	0.2	6.4000	0.006	0.032	0.2
1	0.2	6.2800	0.006	0.0314	0.2
1	0.25	7.2000	0.007	0.0288	0.25
1	0.25	6.5000	0.007	0.026	0.25
1	0.285	5.5000	0.006	0.01929825	0.285
1	0.285	5.1000	0.005	0.01789474	0.285
0.98	0.25	7.3000	0.007	0.02979592	0.25
0.98	0.25	8.5200	0.009	0.03477551	0.25
3.4	0.404	15.5800	0.016	0.01134246	0.404
0.8	0.17	26.4400	0.026	0.19441176	0.17
0.8	0.25	14.5440	0.015	0.07272	0.25
0.5	0.18	15.5000	0.016	0.17222222	0.18
0.5	0.18	15.1800	0.015	0.16866667	0.18
0.7	0.22	25.9000	0.026	0.16818182	0.22
0.74	0.28	38.0000	0.038	0.18339768	0.28
0.74	0.28	40.0000	0.040	0.19305019	0.28
0.74	0.28	39.0000	0.039	0.18822394	0.28
0.74	0.28	40.0000	0.040	0.19305019	0.28
0.74	0.28	40.0000	0.040	0.19305019	0.28
0.7	0.23	33.9000	0.034	0.21055901	0.23

Anexos 2. Estación Regadera

Fuente: Autores

ESTACIÓN YOMASA					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m ³ /s)	V Media (m/s)	H(m)
11	0.48	567.2579	0.56725786	0.1074352	0.48
11	0.45	550.6370	0.550637	0.1112398	0.45
11	0.32	588.3682	0.58836819	0.16715005	0.32
10	0.45	624.1654	0.6241654	0.13870342	0.45
11	0.42	233.1897	0.23318974	0.05047397	0.42
11	0.48	288.9807	0.28898068	0.05473119	0.48
10	0.42	655.0378	0.6550378	0.15596138	0.42
10.8	1.1	1996.0000	1.996	0.16801347	1.1
10.8	1.1	1958.8000	1.9588	0.16488215	1.1
10.5	0.64	1088.6000	1.0886	0.16199405	0.64
10.5	0.64	1092.3580	1.092358	0.16255327	0.64
10.4	0.75	1540.7000	1.5407	0.19752564	0.75
10.4	0.75	1523.3440	1.523344	0.19530051	0.75
10.2	0.78	1461.1600	1.46116	0.1836551	0.78
10.2	0.78	1276.7240	1.276724	0.1604731	0.78
10.2	0.78	1362.6400	1.36264	0.171272	0.78
10.2	0.78	1454.4660	1.454466	0.18281373	0.78
10	0.78	873.0000	0.873	0.11192308	0.78
10	0.78	925.4000	0.9254	0.11864103	0.78
10	0.72	849.0000	0.849	0.11791667	0.72
10	0.72	847.2000	0.8472	0.11766667	0.72
10.4	0.78	1294.7700	1.29477	0.15961169	0.78
10.4	0.78	1359.2860	1.359286	0.16756484	0.78
10	0.8	1020.0000	1.02	0.1275	0.8
10	0.8	978.6000	0.9786	0.122325	0.8
10	0.72	824.0000	0.824	0.11444444	0.72
10	0.72	814.0000	0.814	0.11305556	0.72
10	0.74	849.0000	0.849	0.11472973	0.74
10	0.74	876.8000	0.8768	0.11848649	0.74
10	0.8	819.0000	0.819	0.102375	0.8
10	0.8	890.8000	0.8908	0.11135	0.8
10	0.8	969.0000	0.969	0.121125	0.8
10	0.8	880.2000	0.8802	0.110025	0.8
10	0.8	974.0000	0.974	0.12175	0.8
10	0.8	960.2000	0.9602	0.120025	0.8
9.9	0.9	899.0000	0.899	0.10089787	0.9
9.9	0.9	885.2000	0.8852	0.09934905	0.9
9.9	0.73	651.0000	0.651	0.09007887	0.73
9.9	0.73	685.0000	0.685	0.09478345	0.73
9.9	0.68	559.0000	0.559	0.08303624	0.68
9.9	0.68	576.2000	0.5762	0.08559121	0.68
9.9	0.63	552.0000	0.552	0.08850409	0.63
9.9	0.63	600.0000	0.6	0.0962001	0.63

9.8	0.62	1872.9200	1.87292	0.30824885	0.62
9.8	0.62	1385.2500	1.38525	0.22798716	0.62
14	0.47	1529.9000	1.5299	0.2325076	0.47
9	0.392	1103.0600	1.10306	0.31265873	0.392
12.0	0.42	878.0000	0.878	0.17420635	0.42
12.0	0.38	786.0000	0.786	0.17236842	0.38
12.0	0.30	1121.0000	1.121	0.31138889	0.3
12.0	0.36	851.0000	0.851	0.19699074	0.36
12.0	0.32	1049.0000	1.049	0.27317708	0.32
12	0.356	937.0000	0.937	0.21933521	0.356
9.5	0.25	441.2000	0.4412	0.18576842	0.25
9.5	0.25	475.8600	0.47586	0.20036211	0.25
10	0.41	679.8000	0.6798	0.16580488	0.41
10	0.41	707.4800	0.70748	0.1725561	0.41
8.5	0.36	385.1000	0.3851	0.12584967	0.36
7.60	0.38	357.0000	0.357	0.12361496	0.38
7.60	0.36	396.0000	0.396	0.14473684	0.36
7.60	0.38	413.0000	0.413	0.14300554	0.38
7.60	0.38	399.0000	0.399	0.13815789	0.38
7.60	0.38	381.0000	0.381	0.13192521	0.38
9.7	0.43	893.6000	0.8936	0.21424119	0.43

Anexos 3. Estación Yomasa

Fuente: Autores

ESTACIÓN DOÑA JUANA					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m³/s)	V Media (m/s)	H(m)
9	0.55	482.7209	0.48272088	0.09751937	0.55
7	0.55	1029.6776	1.02967755	0.26744871	0.55
5.8	0.35	211.7899	0.21178994	0.10433002	0.35
6	0.43	895.5365	0.89553645	0.34710715	0.43
10	0.86	1089.6063	1.0896063	0.12669841	0.86
5.5	0.76	480.3826	0.4803826	0.11492407	0.76
9.7	0.87	1619.0000	1.619	0.19184738	0.87
9.7	0.87	1857.6000	1.8576	0.22012087	0.87
9.3	0.63	1322.5900	1.32259	0.22573647	0.63
9.3	0.63	1175.5660	1.175566	0.20064277	0.63
9.3	0.76	1129.0000	1.129	0.15973401	0.76
9.3	0.76	1547.7500	1.54775	0.21897991	0.76
9.3	0.62	1423.9100	1.42391	0.24694936	0.62
9.3	0.62	1407.7980	1.407798	0.24415505	0.62
9.3	0.58	1160.2200	1.16022	0.21509455	0.58
9.3	0.58	1201.0360	1.201036	0.22266148	0.58
9.3	0.65	872.8400	0.87284	0.14439041	0.65
9.3	0.65	1017.3240	1.017324	0.16829181	0.65
9.3	0.58	1097.8200	1.09782	0.20352614	0.58
9.3	0.62	1250.7400	1.25074	0.21691641	0.62
9.3	0.62	1105.8220	1.105822	0.19178321	0.62
9.3	0.58	1222.5200	1.22252	0.22664442	0.58
9.3	0.58	1030.4540	1.030454	0.19103708	0.58
9.3	0.58	1107.0600	1.10706	0.20523915	0.58
9.3	0.58	1076.3020	1.076302	0.19953689	0.58
9.3	0.58	1041.8400	1.04184	0.19314794	0.58
9.3	0.58	1178.8820	1.178882	0.21855432	0.58
9.3	0.58	1251.1000	1.2511	0.2319429	0.58
9.3	0.58	1092.1960	1.092196	0.2024835	0.58
9.3	0.58	1239.4900	1.23949	0.22979051	0.58
9.3	0.58	1120.1460	1.120146	0.20766518	0.58
9.3	0.58	1304.0700	1.30407	0.24176307	0.58
9.3	0.58	1205.2760	1.205276	0.22344753	0.58
9.14	0.66	883.0000	0.883	0.14637623	0.66
9.14	0.66	851.0000	0.851	0.14107155	0.66
8.4	0.53	710.0000	0.71	0.15947889	0.53
8.4	0.53	699.0000	0.699	0.15700809	0.53
7.7	0.44	621.6000	0.6216	0.18347107	0.44

7.7	0.44	632.7600	0.63276	0.18676505	0.44
7.8	0.38	679.4000	0.6794	0.22921727	0.38
7.8	0.38	631.7600	0.63176	0.2131444	0.38
10.8	0.73	1292.8000	1.2928	0.16397768	0.73
7.70	0.636	1032.6600	1.03266	0.21086743	0.636
8	0.704	1185.0800	1.18508	0.21041903	0.704
7	0.46	421.8000	0.4218	0.13099379	0.46
7	0.46	410.3200	0.41032	0.12742857	0.46
7.6	0.48	421.8000	0.4218	0.115625	0.48
7.6	0.48	382.6000	0.3826	0.10487939	0.48
9.4	0.52	579.2000	0.5792	0.11849427	0.52
9.4	0.52	563.8000	0.5638	0.1153437	0.52
11	0.55	981.5000	0.9815	0.1622314	0.55
11	0.55	936.7000	0.9367	0.15482645	0.55
8.4	0.28	507.0000	0.507	0.21556122	0.28
8.4	0.30	464.0000	0.464	0.18412698	0.3
8.4	0.33	408.0000	0.408	0.14718615	0.33
8.4	0.32	405.0000	0.405	0.15066964	0.32
8.4	0.38	493.0000	0.493	0.15444862	0.38
8.1	0.48	573.0000	0.573	0.14737654	0.48

Anexos 4. Estación Doña Juana

Fuente: Autores

ESTACIÓN SAN BENITO					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m³/s)	V media(m/s)	H(m)
8.2	0.81	658.7898	0.65878975	0.09918545	0.81
6.8	0.7	378.0138	0.37801384	0.07941467	0.7
7	0.7	172.8834	0.1728834	0.03528233	0.7
7.5	0.7	558.5103	0.55851028	0.10638291	0.7
9.4	0.92	806.4550	0.806455	0.09325335	0.92
7	0.68	350.3994	0.3503994	0.07361332	0.68
9	0.76	1130.3524	1.1303524	0.1652562	0.76
9.2	0.79	2491.4000	2.4914	0.34279031	0.79
9.2	0.79	2281.1800	2.28118	0.31386626	0.79
9.3	0.82	1634.8500	1.63485	0.21437844	0.82
9.3	0.82	1624.0920	1.624092	0.21296774	0.82
10.6	1.5	1628.6667	1.62866667	0.10243187	1.5
8	0.59	988.5000	0.9885	0.20942797	0.59
8	0.59	1019.9400	1.01994	0.21608898	0.59
9.1	0.68	1018.0000	1.018	0.16451196	0.68
9.1	0.68	1060.0000	1.06	0.17129929	0.68
8.1	0.61	1113.0000	1.113	0.22525804	0.61
8.1	0.61	1138.2000	1.1382	0.23035823	0.61
17.5	0.28	2080.6000	2.0806	0.42461224	0.28
8.545	0.815	1596.2000	1.5962	0.22920159	0.815
8.420	0.810	1515.6667	1.51566667	0.222232	0.81
8.5	0.37	990.1000	0.9901	0.31481717	0.37
8.5	0.37	979.6400	0.97964	0.31149126	0.37
7.5	0.7	778.3000	0.7783	0.14824762	0.7
7.5	0.7	796.9400	0.79694	0.1517981	0.7
8.5	0.48	1080.0000	1.08	0.26470588	0.48
8.5	0.48	1058.0400	1.05804	0.25932353	0.48
10.5	0.46	1616.8000	1.6168	0.3347412	0.46
10.5	0.46	1465.4200	1.46542	0.30339959	0.46
10	0.48	880.6000	0.8806	0.18345833	0.48
8	0.41	854.4000	0.8544	0.2604878	0.41

Anexos 5. Estación San Benito

Fuente: Autores

ESTACIÓN TV 86					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m³/s)	V Media (m/s)	H(m)
14.5	1.4	6013.2913	6.01329128	0.29622125	1.4
11.5	1.22	1468.6115	1.4686115	0.10467651	1.22
11.5	1.1	1094.3580	1.09435798	0.08651051	1.1
11.2	1.0	676.9790	0.67697904	0.06167812	0.98
13.8	0.95	2342.2364	2.3422364	0.17866029	0.95
15.2	1.1	2225.4810	2.22548104	0.13310293	1.1
11.3	0.98	871.4543	0.87145425	0.07869372	0.98
12	1.33	3991.8950	3.991895	0.25011873	1.33
15.4	1	5607.5000	5.6075	0.36412338	1
15.4	1	4377.4000	4.3774	0.28424675	1
14.1	0.98	3011.0000	3.011	0.21790418	0.98
14.1	0.98	2908.0000	2.908	0.21045014	0.98
13	0.13	3487.5500	3.48755	2.06363905	0.13
13	0.13	3586.3920	3.586392	2.12212544	0.13
1.4	1.08	2482.7500	2.48275	1.64203042	1.08
14	0.98	3235.0000	3.235	0.23578717	0.98
15	0.91	3062.9000	3.0629	0.22438828	0.91
15	0.91	3231.8400	3.23184	0.23676484	0.91
9.955	0.875	5107.0000	5.107	0.58629547	0.875
10.26	0.655	3546.6000	3.5466	0.5277443	0.655
12.54	1	1926.0000	1.926	0.15358852	1
12.54	1	2004.6000	2.0046	0.15985646	1
12.30	1.02	2815.0000	2.815	0.2243743	1.02
12.3	1.02	3045.0000	3.045	0.24270684	1.02
14.11	1.06	2914.0000	2.914	0.19483038	1.06
14.11	1.06	2765.0000	2.765	0.18486822	1.06
11.17	1	3055.0000	3.055	0.27350045	1
12	1.02	2522.0000	2.522	0.20604575	1.02
10.78	1.02	3678.0000	3.678	0.33449744	1.02

Anexos 6. Estación TV 86

Fuente: Autores

ESTACIÓN P INDEPENDENCIA					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m³/s)	V Media (m/s)	H(m)
8.3	1.47	1726.2809	1.72628088	0.14148684	1.47
8.3	1.45	1377.5944	1.3775944	0.11446568	1.45
9.5	1.48	1908.5714	1.90857138	0.13574476	1.48
9	1.7	2708.3729	2.7083729	0.17701784	1.7
12	2	7084.3430	7.084343	0.29518096	2
9.5	1.51	2159.8674	2.1598674	0.15056587	1.51
13	1.5	3570.6300	3.57063	0.18310923	1.5
13	1.5	3510.5733	3.51057333	0.1800294	1.5
13.6	1.38	4566.0500	4.56605	0.24328911	1.38
13.6	1.38	4678.1225	4.6781225	0.24926058	1.38
12	1.5	3172.6000	3.1726	0.17625556	1.5
12	1.5	3141.6400	3.14164	0.17453556	1.5
12.3	0.98	2445.0000	2.445	0.20283723	0.98
12.3	0.98	2260.8000	2.2608	0.187556	0.98
12.7	1.5	3017.1000	3.0171	0.15837795	1.5
12.7	1.5	3192.8400	3.19284	0.16760315	1.5
12	1.38	2738.0000	2.738	0.16533816	1.38
12	1.38	2869.7500	2.86975	0.17329408	1.38
14.035	1.655	8270.2000	8.2702	0.35604558	1.655
13.11	1.28	3716.8000	3.7168	0.22149123	1.28
16.7	1.06	2895.0000	2.895	0.16354084	1.06
16.7	1.06	3046.2000	3.0462	0.17208225	1.06
12.91	1.13	3431.0000	3.431	0.23518847	1.13
12.91	1.13	3450.2000	3.4502	0.2365046	1.13
12.23	1.15	3426.0000	3.426	0.24359202	1.15
12.23	1.15	3599.4000	3.5994	0.25592094	1.15
12.21	1.06	2281.0000	2.281	0.1762397	1.06
10.56	1.04	2617.0000	2.617	0.23829036	1.04
11.84	1.17	3472.0000	3.472	0.25063525	1.17

Anexos 7. Estación P. Independencia

Fuente: Autores

Estación Barrio México					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m³/s)	V Media (m/s)	H(m)
8	0.66	596.9710	0.596971	0.11306269	0.66
9	0.52	1825.1327	1.8251327	0.38998562	0.52
8.3	0.55	893.9786	0.89397855	0.1958332	0.55
8.8	0.49	717.0683	0.71706834	0.166296	0.49
11.55	0.88	720.9827	0.72098274	0.07093494	0.88
9.6	0.62	682.6778	0.68267775	0.1146972	0.62
10.07	0.75	1906.1975	1.9061975	0.25239292	0.75
10.9	0.73	1178.7800	1.17878	0.14814377	0.73
10.9	0.73	1199.3140	1.199314	0.15072439	0.73
10.1	0.59	1579.7000	1.5797	0.26509481	0.59
10.1	0.59	1688.3160	1.688316	0.28332203	0.59
10.1	0.59	1613.3833	1.61338333	0.27074733	0.59
10.4	0.58	1744.1300	1.74413	0.28914622	0.58
10.4	0.58	1617.5567	1.61755667	0.26816258	0.58
10.4	0.59	1942.3500	1.94235	0.31654987	0.59
10.4	0.59	1833.5040	1.833504	0.29881095	0.59
10.2	0.59	1417.3500	1.41735	0.23551844	0.59
10.2	0.59	1610.6760	1.610676	0.26764307	0.59
10.15	0.56	1437.5100	1.43751	0.25290464	0.56
10.15	0.56	1458.6020	1.458602	0.25661541	0.56
10.15	0.56	1559.5300	1.55953	0.27437192	0.56
10.15	0.56	1469.3360	1.469336	0.25850387	0.56
10.15	0.56	1587.0200	1.58702	0.2792083	0.56
10.15	0.56	1574.3240	1.574324	0.27697467	0.56
10.15	0.62	1734.2900	1.73429	0.27559034	0.62
10.15	0.62	1628.5560	1.628556	0.2587885	0.62
10.15	0.62	1741.6200	1.74162	0.27675512	0.62
10.15	0.62	1723.4940	1.723494	0.27387478	0.62
10.15	0.62	1633.0600	1.63306	0.25950421	0.62
10.15	0.62	1721.5820	1.721582	0.27357095	0.62
10.15	0.63	1712.3900	1.71239	0.26779107	0.63
10.15	0.63	1659.2660	1.659266	0.25948331	0.63
15	1.2	764.2000	0.7642	0.04245556	1.2
15	1.2	760.2400	0.76024	0.04223556	1.2
10.4	0.58	701.4000	0.7014	0.11627984	0.58

10.4	0.58	619.5400	0.61954	0.10270889	0.58
10.3	0.59	767.8000	0.7678	0.12634524	0.59
10.3	0.59	700.6200	0.70062	0.11529044	0.59
15	0.47	1961.0200	1.96102	0.27815887	0.47
11.855	0.715	1139.2000	1.1392	0.13439787	0.715
10.805	0.720	1248.2000	1.2482	0.16044527	0.72
10	0.55	582.6000	0.5826	0.10592727	0.55
10	0.55	557.1600	0.55716	0.10130182	0.55
10	0.56	714.5000	0.7145	0.12758929	0.56
10	0.56	727.8400	0.72784	0.12997143	0.56
12	0.54	986.4000	0.9864	0.15222222	0.54
12	0.54	959.3400	0.95934	0.1480463	0.54
10.1	0.60	507.0000	0.507	0.08366337	0.6
10.1	0.52	603.0000	0.603	0.1148134	0.52
10.1	0.60	604.0000	0.604	0.09966997	0.6
10.1	0.52	610.0000	0.61	0.11614623	0.52
10.1	0.58	674.0000	0.674	0.11505633	0.58
9	0.46	561.2000	0.5612	0.13555556	0.46

Anexos 8. Estación Barrio México

Fuente: Autores

ESTACIÓN MAKRO SUR					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m ³ /s)	V Media (m/s)	H(m)
8	0.83	389.5699	0.38956991	0.05867017	0.83
8	0.82	219.3675	0.21936752	0.03344017	0.82
8.3	0.7	678.1095	0.67810945	0.11671419	0.7
8.3	0.93	697.3421	0.69734212	0.09034099	0.93
9	0.83	549.7922	0.54979223	0.07360003	0.83
8	0.8	206.8858	0.2068858	0.03232591	0.8
9.3	1.5	3294.0000	3.294	0.23612903	1.5
9.3	1.5	3370.2000	3.3702	0.2415914	1.5
9	0.88	1246.1000	1.2461	0.15733586	0.88
9	0.88	1327.4600	1.32746	0.16760859	0.88
9.1	0.75	1131.0000	1.131	0.16571429	0.75
9.1	0.75	1114.8000	1.1148	0.16334066	0.75
8.5	0.87	1141.0000	1.141	0.15429344	0.87
8.5	0.87	1122.4000	1.1224	0.15177823	0.87
8.6	0.78	1340.0000	1.34	0.19976148	0.78
8.6	0.78	1345.8000	1.3458	0.20062612	0.78
8.5	0.82	1082.0000	1.082	0.15523673	0.82
8.5	0.82	1153.6000	1.1536	0.16550933	0.82
9.655	0.470	2244.4000	2.2444	0.49459546	0.47
12.5	0.34	1845.8020	1.845802	0.43430635	0.34
9.875	0.730	2785.2000	2.7852	0.38636379	0.73
7.595	0.53	1115.8000	1.1158	0.27719329	0.53
7.6	0.34	974.0000	0.974	0.37693498	0.34
7.6	0.34	999.8600	0.99986	0.38694272	0.34
7.63	0.66	916.0000	0.916	0.18189761	0.66
7.63	0.66	924.2000	0.9242	0.18352595	0.66
7.04	0.76	1064.0000	1.064	0.19886364	0.76
7.04	0.76	1116.4000	1.1164	0.2086573	0.76
7.89	0.48	692.0000	0.692	0.18272074	0.48
8	0.38	1022.5000	1.0225	0.33634868	0.38
9.06	0.7	1368.0000	1.368	0.21570482	0.7

Anexos 9. Estación Makro Sur

Fuente: Autores

ESTACIÓN ISLA PONTON SAN JOSÉ					
Base (m)	H (m)	Q (L)	Q(m³/s)	V Media (m/s)	H(m)
9	1.4	5122.8246	5.12282463	0.40657338	1.4
8.5	1.45	1422.1680	1.42216802	0.11538889	1.45
9	1.4	1422.1439	1.4221439	0.11286856	1.4
9	1.49	4573.0645	4.57306446	0.34101898	1.49
11	1.50	5196.7728	5.19677283	0.31495593	1.5
10	1.2	5142.9717	5.14297173	0.42858098	1.2
9.3	1.41	2224.2523	2.22425225	0.16962192	1.41
11.6	1.9	4084.7700	4.08477	0.18533439	1.9
11.6	1.9	3663.3300	3.66333	0.16621279	1.9
9.6	1.48	3362.7000	3.3627	0.23667652	1.48
9.6	1.48	3258.2600	3.25826	0.22932573	1.48
9.6	1.23	2372.6000	2.3726	0.20093157	1.23
9.6	1.23	2618.2000	2.6182	0.22173103	1.23
11	1.75	3457.0000	3.457	0.17958442	1.75
11	1.75	4269.2000	4.2692	0.22177662	1.75
9.5	0.94	3919.0000	3.919	0.43885778	0.94
9.5	0.94	3792.6000	3.7926	0.42470325	0.94
11.4	1.7	3510.7500	3.51075	0.18115325	1.7
14.25	1.48	4846.8000	4.8468	0.22981508	1.48
14.01	1.94	5645.6000	5.6456	0.20771614	1.94
12.04	1.29	4408.0000	4.408	0.28380849	1.29
12.04	1.29	4326.0000	4.326	0.27852893	1.29
11.02	1.37	4884.0000	4.884	0.32349941	1.37
11.02	1.37	4992.4000	4.9924	0.33067945	1.37
9.92	1.44	2922.0000	2.922	0.20455309	1.44
9.74	1.43	3133.0000	3.133	0.22493933	1.43
8.37	1.32	3875.0000	3.875	0.35072952	1.32
11.09	1.33	3469.0000	3.469	0.23519122	1.33

Anexos 10. Estación Isla Ponton San José

Fuente: Autores

