



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE CÁLCULO DE UN ICA Y
MODELACIÓN DE UN TRAMO DEL RIO TUNJUELO EN EL SECTOR DE BOSA
LIBERTADOR

CRISTIAN FERNANDO REYES OJEDA
LUIS EDUARDO RUIZ BRAVO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.
2017

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE CÁLCULO DE UN ICA Y
MODELACIÓN DE UN TRAMO DEL RIO TUNJUELO EN EL SECTOR DE BOSA
LIBERTADOR

CRISTIAN FERNANDO REYES OJEDA
LUIS EDUARDO RUIZ BRAVO

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingenieros civiles

Director

ING. DIEGO ALEJANDRO PULGARÍN MONTOYA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.
2017



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

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

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:

Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas



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.

Nota de aceptación:

Director:

Jurado:

Jurado:

DEDICATORIA

Primero que todo agradezco a Dios por darme la paciencia y la sabiduría en este proceso de aprendizaje durante mi carrera, y ante todo agradecerle por el buen proceso en el trabajo de grado. Dedicar este gran logro a mis padres, quienes han estado a mi lado en cada reto que debo enfrentar, quienes se han esforzado para brindarme beneficios como un título profesional, han procurado siempre mi bienestar y felicidad y son el motor principal de mi camino de vida, igualmente tengo presente a mis tíos que son los que me inculcaron los valores de que trabajar duro es un beneficio importante para el éxito personal, a mi familia que con sus apoyo distante siempre estuvieron presentes para nunca decaer y tener su cariño incondicional.

En gran medida este logro es para dios quien sembró en mi esta hermosa vocación por la ingeniería, junto con mi familia quienes han sido pilares fundamentales en mi formación como persona y que fueron el sustento y la motivación para mi desarrollo como profesional a mi compañero de proyecto y amigo Luis Eduardo Ruiz quien fue un soporte para el desarrollo del proyecto y mi compañero Jonathan Ortiz quien nos apoyó en parte de las laboras de campo.

RESUMEN

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 intermitente, todo esto como antesala a la caracterización de 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). Aquí 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.

Palabras Claves: Calidad de Agua, Modelamiento, Río Tunjuelo, Qual2K, HEC-RAS.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
2. ANTECEDENTES	15
2.1 CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO 2011-2012.....	15
2.2 PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO BOGOTÁ.....	15
2.3 MODELACIÓN INTEGRADA DEL SISTEMA DE DRENAJE-PTAR-RIO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, ESCENARIOS DE CONTROL REGIONAL	16
2.4 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL IMPACTO AMBIENTAL POR CONTAMINACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN AGUA, SUELO Y SEDIMENTO EN CUATRO PUNTOS DE LA SUB-CUENCA DEL RIO TUNJUELO	16
2.5 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TUNJUELO EN DOS ESCENARIOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE SANEAMIENTO DE BOGOTÁ.....	17
3. JUSTIFICACIÓN	18
4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
4.1 FORMULACIÓN.....	19
4.2 PLANTEAMIENTO.....	19
5. MARCO DE REFERENCIA	20
5.1 MARCO TEÓRICO.....	20
5.1.1 Alcantarillado	20
5.1.2 Cuerpo receptor.....	20
5.1.3 Flujo critico	21
5.1.4 Flujo permanente.....	21
5.1.5 Flujo uniforme.....	21
5.1.6 Advección	22
5.1.7 Difusión.....	22
5.1.8 Dispersión.....	23
5.2 MARCO CONCEPTUAL	24
5.2.1 Modelación integrada	24
5.2.2 Calidad del agua.....	24
5.3 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	25
5.3.1 Modelación mediante QUAL2K.....	25
5.3.1 Modelación mediante HEC-RAS.....	25
5.4 MARCO LEGAL	26

6.	OBJETIVOS	27
6.1	GENERAL.....	27
6.2	ESPECÍFICOS.....	27
7.	ALCANCES Y LIMITACIONES	28
7.1	ALCANCES.....	28
7.2	LIMITACIONES.....	28
8.	PROPUESTA METODOLÓGICA	29
8.1	FASE PRELIMINAR.....	29
8.2	FASE DE CARACTERIZACIÓN E INSPECCIÓN DE CAMPO.....	29
8.2.1	Ubicación de las secciones de muestreo.....	30
8.3	FASE EXPERIMENTAL.....	30
8.4	FASE DE MODELACIÓN.....	31
8.5	FASE DE DIAGNOSTICO.....	31
9.	DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA ZONA Y TRAMO DE ESTUDIO	33
9.1	NORMATIVA DE LA CALIDAD HÍDRICA QUE APLICA EN EL RIO TUNJUELO.....	37
9.1.1	Resolución 631 2015 (por la cual se reglamenta los mites permisibles en cuanto vertimientos y calidad).....	37
9.1.2	Decreto 3930 de 2010 (permiso para el vertimiento al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados).....	37
9.1.3	Acuerdo 043 del 2006 CAR (objetivos de calidad del agua para la cuenca del rio Bogotá a lograr en el año 2020).....	41
10.	CARACTERIZACIÓN E INSPECCIÓN DE CAMPO EN EL TRAMO DE ESTUDIO	42
10.1	BATIMETRÍA CONVENCIONAL DEL TRAMO SELECCIONADO.....	44
10.1.1	Perfil longitudinal.....	46
10.1.2	Corte transversal.....	46
10.2	AFORO DE CAUDAL Y MUESTREO.....	50
11.	LABORATORIO Y PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL	52
11.1	ESTADO ACTUAL RESPECTO A LOS FACTORES MEDIDOS EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL TRAMO DEL RIO TUNJUELO.....	52
11.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE DESCARGA PARA LOS PARÁMETROS MEDIDOS EN EL TRAMO DEL RIO TUNJUELO.....	54
12.	MODELACIÓN DE LA CONDICIONES PARA EL TRAMO DEL RIO TUNJUELO	56
12.1	DATOS Y MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS.....	56

12.1.1	Curvas de capacidad hidráulica	59
12.1.2	Tiempos de viaje en las secciones de modelación.....	61
12.2	MODELACIÓN DE CALIDAD MEDIANTE QUAL2K.....	64
12.2.1	Parámetros de alimentación del modelo	66
12.3	CALIBRACIÓN HIDRÁULICA DEL MODELO.....	67
12.4	Calibración por constantes cinética	68
12.5	Condiciones meteorológicas para la alimentación del modelo.....	69
12.6	Ejecución del modelo de calidad.....	69
12.7	Simulación de ambiente de control	73
13.	DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AGUA E IMPLEMENTACIÓN DEL ICA	77
13.1	Construcción de los indicadores para los parámetros y cálculo del ICA	79
14.	CONCLUSIONES.....	82
15.	RECOMENDACIONES	84
16.	BIBLIOGRAFÍA.....	85

TABLA DE IMÁGENES

Imagen n° 1 Proceso de advección.....	22
Imagen n° 2 Fenómeno de difusión advección	23
Imagen n° 3 Fenómeno de difusión dentro de una sección de tubería advección (Sierra Ramírez, 2011).....	23
Imagen n° 4 Hidrología localidad de Bosa	33
Imagen n° 5 Identificación del vertimiento de aguas residuales (producción propia)	42
Imagen n° 6 Identificación de punto de conexión errada (producción propia)	43
Imagen n° 7 representación del perfil de elevación de terreno sobre el eje de un kilómetro del río tunéelo	46
imagen n° 8 perfil de elevación batimétrica y procedimiento de medida	47
imagen n° 9 representación de topografía de la zona de estudio mediante herramienta SIG	48
Imagen n° 10 Trazo del eje y abscisado del río Tunjuelo mediante el software civiCAD	49
Imagen n° 11 Registro fotográfico del aforo de caudal.....	50
Imagen n° 12 Registro de los procedimientos de laboratorio	55
Imagen n° 13 Alimentación de las condiciones de flujo para el modelo hidráulico en HEC-RAS	57
imagen n° 14 Toma de los niveles de inundación en las secciones con el modelo corrido	57
Imagen n° 15 altura de la lámina de agua interpretada por el modelo hidráulico..	58
Imagen n° 16 Condiciones profundidad y velocidad simuladas por HEC-RAS	59
Imagen n° 17 Tiempos de viaje calculados por HEC-RAS (producción propia)	61
Imagen n° 18 Corrida del modelo hidráulico para el tramo de estudio (producción propia)	63
Imagen n° 19 Interfaz del modelo QUAL2K para el río Tunjuelo	66
Imagen n° 20 Alimentación de las constates hidráulicas.....	68
Imagen n° 21 Constantes cinéticas calibradas en la interface QUAL2K	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n° 1 marco legal considerado para modelos de calidad del agua	26
Tabla n° 2 Referenciarían de los puntos de muestreo	30
Tabla n° 3 Cantidad de agua vertida en la zona de la cuenca baja del rio Tunjuelo (Bogotá. Secretaria Distrital De Ambiente, 2007).....	35
Tabla n° 4 Problemáticas sociales asociadas a la afectación de la calidad del rio Tunjuelo	36
Tabla n° 5 Valores permisibles según el decreto 3930 para cargas menor a 625 Kg/día.....	38
Tabla n° 6 Valores permisibles según el decreto 3930 para cargas menor a 3000 Kg/día.....	39
Tabla n° 7 Valores proyectados admisibles según el acuerdo 43 CAR Cundinamarca.....	41
Tabla n° 8 Registros del aforo de caudal	50
Tabla n° 9 Factores de calidad medidos con el equipo multiparámetro para el estado actual.....	53
Tabla n° 10 Factores de calidad medidos mediante proceso experimental para el estado actual.....	53
Tabla n° 11 Factores de calidad medidos con el equipo multiparámetro para la caracterización	54
Tabla n° 12 Factores de calidad medidos mediante proceso experimental para la caracterización	55
Tabla n° 13 Curvas de calibración hidráulica para las cuatro secciones modeladas	67
Tabla n° 14 Tabla de constantes cinéticas identificadas para la clase de modelo para el rio Tunjuelo.....	68
Tabla n° 15 Ventajas y desventajas de los ICA.....	77
Tabla n° 16 Rangos para las medidas de DQO para cálculo del indicador.....	79
Tabla n° 17 Relaciones funcionales para el parámetro de PH	80
Tabla n° 18 Descriptores para presentar el aplicativo del ICA (Orjuela Luz Consuelo, 2010).....	80
Tabla n° 19 Ilustración de los indicadores y valor del ICA calculado para las condiciones actuales.....	81
Tabla n° 20 Ilustración de los indicadores y valor del ICA calculado para las condiciones actuales.....	81

TABLA DE GRAFICAS

Grafica n° 1 curvas de capacidad de profundidad para las secciones de modelación.....	60
Grafica n° 2 curvas de capacidad de velocidad para las secciones de modelación (producción propia)	60
Grafica n° 3 Modelo de flujo grafica	Grafica n° 4 Modelo de velocidad media
70	70
Grafica n° 5 Modelo de oxigeno suspendidos totales.....	Grafica n° 6 Modelo de solidos suspendidos totales.....
70	70
Grafica n° 7 Modelo de DBO5	Grafica n° 8 Modelo de DQO
70	70
Grafica n° 9 Modelo de temperatura	Grafica n° 10 Modelo de PH
71	71
Grafica n° 11 Modelo de conductividad.....	71
Grafica n° 12 Modelo de caudal ambiente	Grafica n° 13 Modelo de velocidad ambiente
73	73
Grafica n° 14 Modelo de OD ambiente.....	Grafica n° 15 Modelo de SST ambiente.....
74	74
Grafica n° 16 Modelo de DBO5 ambiente	Grafica n° 17 Modelo de DQO ambiente
74	74
Grafica n° 18 Modelo de temperatura ambiente	Grafica n° 19 Modelo de PH ambiente.....
74	74
Grafica n° 20 Modelo de conductividad ambiente	75
Grafica n° 21 concentración de oxígeno disuelto	Grafica n° 22 concentración de DQO
78	78
Grafica n° 23 concentración SST	Grafica n° 24 concentración de PH
78	78

TABLA DE ESQUEMAS

Esquema n° 1 Diagrama de flujo del proceso metodológico (elaboración propia)	32
esquema n° 2 Representación gráfica de la delimitación espacial en el tramo objeto del estudio (producción propia)	45
Esquema n° 3 Metodología para el muestreo de aguas en el cauce del río Tunjuelo	51
Esquema n° 4 Representación conceptual de la caracterización hidráulica y de los parámetros de calidad en el tramo de estudio (producción propia)	62

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el manejo integral de los recursos hídricos es de vital importancia para cualquier tipo de población teniendo en cuenta que el agua es fundamental para el desarrollo económico y social de la misma, para el caso de la localidad séptima de Bosa uno de los principales recursos es el río Tunjuelo. La conurbación urbana como parte del crecimiento de la población en la parte sur occidente de la ciudad durante los últimos años trajo consigo graves afectaciones tanto ambientales como estructurales en el cauce del río, esto debido a los laxos controles sobre los vertimientos de materiales y aguas residuales a lo largo de su recorrido. La importancia de contar con información respecto a la calidad del agua y cada uno de los factores que componen una fuente hídrica para su conservación y aprovechamiento ha permitido que la ingeniería junto con la ciencia desarrollaran diversos métodos que nos permitan realizar una evaluación acertada del estado actual de los cuerpos de agua que nos rodean, las técnicas tradicionales implican la medición directa y toma de muestras en los afluentes de agua, estos datos son ordenados y en ambientes controlados siguiendo una serie de normas técnicas se realiza una cuantificación de las condiciones encontradas mediante pruebas de laboratorio, por otro lado el desarrollo tecnológico en este siglo ha traído consigo herramientas de modelación integrada que nos permiten entender las interacciones entre los factores que componen las estructuras hídricas simulando distintos ambientes de operación de dicha estructura, sin la necesidad de realizar algún tipo de intervención compleja en él, de esta manera podemos tener argumentos válidos para realizar un adecuado diagnóstico del estado de la calidad de estos cuerpos de agua convirtiéndose en herramientas para la toma de decisiones en la gestión y manejo de los recursos hídricos.

Entidades gubernamentales como la corporación autónoma regional de Cundinamarca, la alcaldía local o la secretaria de ambiente son los encargados de regular los vertimientos que llegan al cauce del río Tunjuelo sin embargo estas medidas como se mencionó anteriormente son muy laxas sumadas a la carencia de infraestructura adecuada para la protección de los ríos urbanos y también a su ya habitual falta de mantenimiento o ineficiencia de las mismas, por tal motivo para este proyecto se contempló establecer una simulación de calidad del agua para condiciones actuales en un tramo de la cuenca del río Tunjuelo definiendo cada una de las características del mismo y de esta manera realizar un diagnóstico en la zona considerada.

2. ANTECEDENTES

2.1 CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO 2011-2012

Revista publicada por la alcaldía mayor de Bogotá y la universidad de los andes donde se realiza un clasificación y un estudio del estado para diferentes fuentes hídricas de la ciudad de Bogotá y los vertimientos de drenajes que llegan a cada una de ellas tomando como periodo de estudio un año, mostrando las intervenciones realizadas por parte del distrito e ilustrando una guía de concientización sobre la adopción de las fuentes de agua de Bogotá como un recurso por cuidar de parte de los ciudadanos¹.

2.2 PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO BOGOTÁ

Documento técnico publicado por la corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR) donde se consigna un detallado estudio de los factores componente de la cuenca del rio Bogotá planeando un uso y una intervención, de manera que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio en explotación de la cuenca².

¹ **Castaño Ossa, Juan Manuel. 2015.** repositorio de la universidad nacional. *repositorio de la universidad nacional*. [En línea] 2015. [Citado el: 20 de marzo de 2017.]

² **consorcio planeacion ecologica LTDA- ecoforest LTDA. 2007.** alcaldia de bogota. *alcaldia de bogota*. [En línea] 2007. [Citado el: 09 de marzo de 2017.]
http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/adminverblobawa?tabla=T_NORMA_ARCHIVO&p_NORMFIL_ID=305&f_NORMFIL_FILE=X&inputfileext=NORMFIL_FILENAME.

2.3 MODELACIÓN INTEGRADA DEL SISTEMA DE DRENAJE-PTAR-RIO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, ESCENARIOS DE CONTROL REGIONAL

Describe el desarrollo conceptual e implementación de un modelo integrado del sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá, así como la simulación de siete escenarios de control regional del agua combinada de la ciudad. El modelo fue desarrollado por componentes usando información secundaria recopilada a partir de un análisis detallado de la literatura y estudios existentes. Los escenarios simulados reflejan la necesidad de aplicar un tratamiento avanzado en las PTAR Salitre y Canoas, incluyendo desinfección y remoción de nutrientes. Adicionalmente, se observa que el programa de saneamiento propuesto para la ciudad de Bogotá es insuficiente para obtener una calidad del agua compatible con los estándares asociados a los usos del agua del río en su cuenca media³.

2.4 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL IMPACTO AMBIENTAL POR CONTAMINACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN AGUA, SUELO Y SEDIMENTO EN CUATRO PUNTOS DE LA SUB-CUENCA DEL RIO TUNJUELO

La investigación busca realizar una actualización de datos con el fin de efectuar una evaluación Preliminar del impacto ambiental causado por la contaminación de Plomo y Cadmio hallados en agua, suelo y sedimentos en 4 puntos de la sub-cuenca del río Tunjuelo producto de la gran cantidad de industrias que contribuyen a la presencia de estos metales, esto deteriora el medio ambiente ubicado en zonas cercanas a esta sub-cuenca, por lo que surge la necesidad de evaluar inicialmente cómo se ve afectada la calidad del ecosistema⁴.

³ **Gonzales Parra, Juan Diego. 2011.** repositorio institucional universidad nacional de colombia. *repositorio institucional universidad nacional de colombia*. [En línea] 2011. [Citado el: 09 de marzo de 2017.] <http://www.bdigital.unal.edu.co/4389/1/juandiegogonzalezparra.2011.pdf>.

⁴ **Rodriguez Pinilla Lina Maria, Ciera Vargas Dayana Fernanda. 2011.** repositorio institucional unisalle. *repositorio institucional unisalle*. [En línea] 2011. [Citado el: 09 de marzo de 2017.] <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/14003>.

2.5 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TUNJUELO EN DOS ESCENARIOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE SANEAMIENTO DE BOGOTÁ

En esta investigación se realiza un proceso de modelación en la cuenca de una forma más general respecto a esta a la investigación planteada, se hizo uso de estaciones de monitoreo de calidad y sujetos al plan de saneamiento de Bogotá se simularon las condiciones para dos propuestas del plan de saneamiento sin considerar una valoración o el diagnóstico numérico de los parámetros medidos⁵.

⁵ **Castañó Ossa, Juan Manuel.** 2015. repositorio de la universidad nacional. *repositorio de la universidad nacional*. [En línea] 2015. [Citado el: 20 de marzo de 2017.]

3. JUSTIFICACIÓN

La elaboración del presente proyecto parte de la necesidad realizar un análisis de las condiciones de un tramo del río Tunjuelo debido a la observación que ha podido realizar uno de los autores de las problemáticas que tiene desde hace mucho tiempo esta fuente hídrica y a la cual visiblemente no se le ha puesto la debida atención. En París durante la década de 1920 las condiciones hidráulicas y de calidad del agua en el río Sena se había degradado debido a los vertimientos industriales, una situación común en otros ríos europeos, pero en este caso un factor agravante era también la recepción de las aguas residuales domésticas, dejando a la fuente hídrica en un lamentable estado, fue solo hasta 1960 que las entidades correspondientes del gobierno francés consideraron las deplorables condiciones en las que se encontraba el río y los problemas de salud pública y sanitaria con los que se enfrentarían de mantenerse en esta situación, de esta manera se planteó la mejora de los sistema de drenaje urbano y la modernización de sus plantas de tratamiento de agua residual, actualmente el cauce del río Sena es navegable y cuenta más de 30 especies de peces. De esta manera tomando como referente este tipo de intervenciones a nivel internacional y tenido como criterio los estudios previstos a realizar en laboratorio y los modelos integrados a desarrollar junto con ellos, pretendemos realizar el diagnóstico y análisis de las condiciones actuales del tramo seleccionado para dejar un precedente de calidad del agua en la localidad de Bosa.

En la actualidad y a nivel colombiano los análisis de modelación calidad de agua y los indicadores numéricos son temas de estudio que se están desarrollando, pero pese a ello es condicionada la cantidad de información disponible debido a que este tipo de procesos de diagnóstico son desarrollados en su mayoría por países extranjeros haciendo una especial mención en las herramientas desarrolladas en los estados unidos, pese a esto la toma de decisiones correctivas frente a la información suministrada por esta clase de modelos es un criterio ingenieril bastante acertado para la propuesta de soluciones frente a los problemas objeto de la simulaciones hechas. Parte de las afectaciones presentes en el río objeto de del análisis es la alta carga de materia orgánica y metales pesados producto de los problemas descritos en esta investigación y referenciados por los estudios realizados por algunas entidades como la alcaldía de Bogotá o la universidad nacional, el sector de Bosa por ser parte de la cuenca baja del río es una zona donde se ha podido visualizar con más recurrencia la problemática a tratar por lo que se hace necesario dar un argumento técnico eficiente para buscar una mejora de esta problemática.

4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

4.1 FORMULACIÓN

¿Cómo la calidad del agua en el río Tunjuelo a lo largo del tramo seleccionado se ve afectada por la capacidad que tiene para recibir los vertimientos que llegan a él?

4.2 PLANTEAMIENTO

Hacer uso del decreto 3930 de 2010 y la resolución 631 del 2015 mediante la cual se regulo de una forma técnica los estándares para el vertimiento en fuentes de agua superficial junto con los parámetros necesarios para hacer una modelación del mismo, logrando así establecer un sistema de control que permitiera asegurar unos índices mínimos de calidad del agua en Colombia. Inicialmente estos estándares fueron formulados para propósitos de clasificación de acuerdo con diferentes usos, así como para la interpretación de las variables involucradas en procesos de control y monitoreo. El río Tunjuelo hace parte de la cuenca del río Bogotá y en la actualidad es reconocido básicamente por los altos niveles de contaminación que presenta su cauce lo cual se traduce en un daño y un desaprovechamiento de un recurso que podría ser bastante útil tanto para la localidad como para la ciudad en general, todo esto va de la mano con las problemáticas locales derivadas de la misma contaminación del río afectando así a gran parte de la población cercana al sector, la cuenca del río Tunjuelo está bajo la jurisdicción de la corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR) y la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EABB) quienes de alguna manera tratan de controlar las descargas de aguas ilegales mediante multas o sanciones operativas a las industrias cercanas al cauce, sin embargo las deposiciones domésticas, los problemas de contaminación acústica o las emisiones producto de las ya mencionadas industrias son factores que en cierta medida facilitan el deterioro de las condiciones ambientales del río.⁶

⁶ Bogotá. **Secretaría Distrital De Ambiente. 2007.** observatorio ambiental de bogota. *observatorio ambiental de bogota*. [En línea] 01 de 09 de 2007. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/ES/diagnostico-pomca-tunjuelito>.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO TEÓRICO

En esta sección pretendemos mostrar algunas de las afirmaciones teóricas mostradas por varios autores y que nos definen factores de gran importancia dentro del proyecto.

5.1.1 Alcantarillado

Un sistema de alcantarillado consiste en una serie de tuberías y obras complementarias necesarias para recibir y evacuar las aguas residuales de la población y la escorrentía superficial producida por la lluvia, este sub-sistema es el primer conducto que compone el sistema de drenaje, se pueden clasificar en convencionales y no convencionales. En general los alcantarillados convencionales son ampliamente utilizados y con unas normas bastante estandarizadas de construcción, son sistemas con tuberías de un gran diámetro que permiten una gran flexibilidad en la operación esto como consecuencia de la incertidumbre en los parámetros que definen el caudal de circulación en el sistema⁷.

Para Bogotá por ser una ciudad bastante densificada este tipo de sistemas es el más propio para el drenaje de aguas en la ciudad y por tanto será el sistema que considerar este proyecto.

5.1.2 Cuerpo receptor

Habiendo pasado o no por el sub- sistema de la PTAR las aguas son descargadas en cuerpos hídricos como lagos, océano o ríos, en nuestro caso este tipo de adhesiones al cuerpo del río generan un impacto negativo en su calidad del agua por lo que se hace necesario orientar la operación de los sistemas de drenaje y los vertimientos a reducir en mayor medida las afectaciones que se le pueda realizar al cuerpo de agua por estos procesos, es apreciable como como en Colombia es de especial atención la concepción de los dos primeros componentes del sistema de drenaje (alcantarillado y PTAR) pero no se le presta ningún tipo de intervención directa al cuerpo hídrico una vez realizados los procesos correspondientes a los dos sub-sistemas ya mencionados⁸.

⁷, **Lopez. Ricardo Alfredo 1995.** elementos de diseño para acueducto y alcantarillado. [aut. libro] Ricardo Alfredo Lopez Cualla CuallaQ. *elementos de diseño para acueducto y alcantarillado*. Bogota : escuela de ingeniería julio garavito, 1995, págs. 341-342.

⁸ **Lizarazo Becerra Jenny Milena, Orjuela Gutiérrez Martha Isabel. 2013.** repositorio institucional universidad nacional. *repositorio institucional universidad nacional*. [En línea] 2013. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>.

5.1.3 Flujo critico

Esta condición de movimiento se alcanza cuando en un canal superficial la velocidad de flujo iguala la velocidad de onda producto de un cambio en el canal. Para este estado flujo la energía específica es mínima para un caudal determinado y su número de froude es igual a 1, por otro lado cuando las condiciones del canal permiten que la velocidad de onda sea mayor a la de flujo el agua tiende a suspenderse en alguna perturbación del canal a lo que se le conoce como flujo subcrítico y su número de froude es menor a uno (**F<1**), mientras que si el número de froude es mayor a uno (**F>1**) el estado de flujo se considera super critico por lo que con estos factores se crea una onda estacionaria sobre la alteración en el lecho del canal⁹.

5.1.4 Flujo permanente

Esta condición de flujo se desarrolla en el momento en el que los escenarios del movimiento y las características del fluido no se modifican respecto al tiempo¹⁰.

$$\frac{\delta p}{\delta t} = 0; \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0; \frac{\delta V}{\delta t} = 0; \frac{\delta Z}{\delta t} = 0; \frac{\delta T}{\delta t} = 0$$

- P= presión
- ρ =densidad
- V= velocidad media
- Z= posición de referencia
- T= temperatura

5.1.5 Flujo uniforme

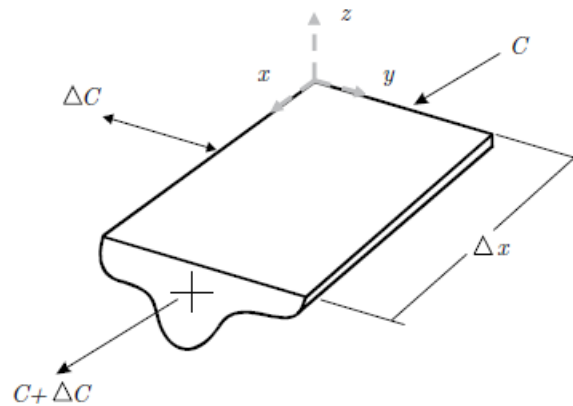
Esta condición de flujo se presenta cuando la velocidad es igual o similar conforme al espacio¹¹.

^{9,10,11} **Chow, Ven Te. 1994. hidráulica de canales abiertos.** Bogota : McGRAW W-HILL INTERAMERICANA S.A, 1994

5.1.6 Advección

El fenómeno de advección consiste en la forma por la cual una sustancia (las cargas contaminantes) en un cuerpo de agua es transportada producto del impulso del caudal y el esfuerzo cortante generado por la corriente del río¹².

Imagen n° 1 Proceso de advección



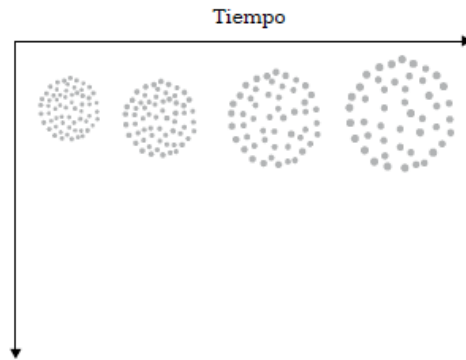
Fuente Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

5.1.7 Difusión

El transporte de masa producto del movimiento de las corrientes de agua es lo que se conoce como el fenómeno difusivo, producto de él la masa de las cargas contaminantes se va diluyendo en la corriente de agua a medida que pasa el tiempo¹³.

^{12,13} Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

Imagen n° 2 Fenómeno de difusión advección

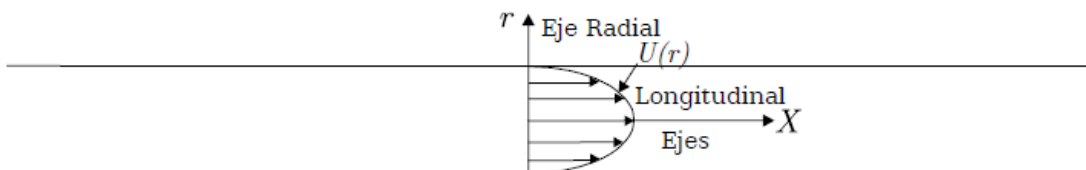


Fuente: Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

5.1.8 Dispersión

Este último fenómeno de transporte en el agua se caracteriza por esparcir las cargas contaminantes en la corriente hídrica producto de los cambios de velocidad en diferentes puntos del cuerpo de agua, en este caso no se genera ningún tipo de modificación química a la carga dispersada¹⁴.

Imagen n° 3 Fenómeno de difusión dentro de una sección de tubería advección (Sierra Ramírez, 2011)



Fuente Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

¹⁴Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

5.2.1 Modelación integrada

La simulación de las interacciones en una fuente hídrica una vez realizados los vertimientos de material y aguas residuales es algo compleja, por lo que con los avances tecnológicos y las investigaciones al respecto se han podido desarrollar modelos de diversa complejidad que pueden representar adecuadamente el desarrollo y el comportamiento de los fenómenos de descarga (QUAL2K Y HEC-RAS). “Los modelos de calidad del agua son representaciones matemáticas de los procesos que afectan a los indicadores hídricos del agua, los componentes pueden ser material sólido o disuelto, por ejemplo, los sedimentos en suspensión o el oxígeno disuelto”¹⁵.

5.2.2 Calidad del agua

La calidad de cualquier masa de agua, superficial o subterránea depende tanto de factores naturales como de la acción humana, de una forma técnica la calidad del agua vendría determinada naturalmente por la erosión del substrato mineral, los procesos atmosféricos de evapotranspiración y sedimentación de lodos y sales, la lixiviación natural de la materia orgánica y los nutrientes del suelo por los factores hidrológicos, y los procesos biológicos en el medio acuático que pueden alterar la composición física y química del agua. Por lo general, la calidad del agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de con unas directrices de calidad del agua o estándares¹⁶

Para esta investigación fueron considerados los factores manejados por el IDEAM donde se realizará un análisis de (demanda química de oxígeno, PH, turbiedad, oxígeno disuelto, salinidad, etc.)

¹⁵ **flownet. 2015.** flownet. *flownet*. [En línea] 2015. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://www.flownet.co/servicios/desarrollo-de-modelos-matematicos-para-la-gestion-del-agua/modelos-de-calidad-del-agua>.

¹⁶ **ONU. 2014.** pagina de las naciones unidas. *ONU*. [En línea] 22 de 10 de 2014. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>.

5.3 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

5.3.1 Modelación mediante QUAL2K

Una modelación de calidad del agua se desarrolla como una herramienta que permita representar adecuadamente el comportamiento de los componentes hidráulicos, hidrológicos y los parámetros que nos miden el objeto del modelo que para este caso es la calidad del agua del cauce seleccionado. El modelo QUAL2K es una versión extendida del modelo QUAL2E el cual es de libre acceso publicado por la EPA - Environmental Protection Agency, este modelo QUAL2K se encuentra implementado en el lenguaje Visual Basic y opera con el programa Excel de Microsoft Office¹⁷.

5.3.1 Modelación mediante HEC-RAS

Un modelo hidráulico es un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, mediante la entrada de cierta información se procesa y se presenta de una forma adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería. HEC-RAS es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 4 tipos de análisis en ríos: modelización de flujo en régimen permanente, modelización de flujo en régimen no permanente, modelización del transporte de sedimentos y análisis de calidad de aguas, la herramienta incluye un módulo de advección – Dispersión, contando adicionalmente con la capacidad de modelar la temperatura del agua, utiliza el esquema numérico explícito QUICKEST–ULTIMATE para solucionar la ecuación unidimensional de advección – Dispersión usando un volumen de control con aplicación completa del cálculo de la energía¹⁸.

¹⁷Chapra Steve, Pelletier Greg y Tao Hua. 2008. College of Engineering. *College of Engineering*. [En línea] 16 de diciembre de 2008. [Citado el: 11 de abril de 2017.] http://www.ecs.umass.edu/cee/reckhow/courses/577/Qual2/Q2KDocv2_11b8%20v211.pdf.

¹⁸ Lluén Chero, Willy Eduardo. 2015. universidad de cordoba españa. *universidad de cordoba españa*. [En línea] 2015. [Citado el: 11 de abril de 2017.] <http://www.uco.es/jia2015/ponencias/a/a009.pdf>.

5.4 MARCO LEGAL

Tabla n° 1 marco legal considerado para modelos de calidad del agua

LEY	DESCRIPCIÓN
LEY 99 DE 1993	Numeral 12 del artículo 5, numeral 18 del artículo 31, 33(- creación y transformación de las corporaciones autónomas regionales. la administración del medio ambiente y los recursos naturales renovables estará en todo el territorio nacional a cargo de corporaciones autónomas regionales.)
RESOLUCIÓN 3930	Que corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario. Así mismo, regular entre otros aspectos, la clasificación de las aguas, señalar las que deben ser objeto de protección y control especial, fija su destinación y posibilidades de aprovechamiento, estableciendo la calidad de las mismas y ejerciendo control sobre los vertimientos que se introduzcan en las aguas superficiales o subterráneas
RESOLUCION 631 DE 2015	Por la cual se reglamenta los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones
RESOLUCION 1076 DE 2015	Expedido por el presidente de la República y su objetivo es compilar y racionalizar las normas de carácter reglamentario que rigen el sector Ambiente.
ACUERDO 043 CAR	Por el cual se establecen los objetivos de calidad para el año 2020

Fuente: Elaboración propia

6. OBJETIVOS

6.1 GENERAL

Realizar una modelación hidráulica y de calidad del agua en un tramo del río Tunjuelo, analizando los cambios respecto a un ambiente simulado de vertimientos óptimos planteados por la normatividad vigente frente a las condiciones iniciales en dicho tramo como herramienta para realizar un diagnóstico numérico.

6.2 ESPECÍFICOS

- Realizar una caracterización de los componentes hidráulicos que actualmente se encuentran en el tramo de estudio del río Tunjuelo.
- Monitorear la calidad del agua en un tramo del río Tunjuelo, comparando los resultados obtenidos con los objetivos de calidad presentados por la autoridad competente en el tramo de estudio.
- Construir un modelo hidráulico y de calidad del agua mediante los softwares seleccionados, Implementando un ambiente supuesto en el cual los vertimientos que se presentan en el tramo de estudio cumplen con los valores límites exigidos en la normatividad ambiental vigente.
- Hacer una calibración del modelo hidráulico y de calidad del agua de forma que se ajusten a las condiciones medidas en campo
- evaluar el índice de calidad del agua (ICA) para las condiciones actuales y para un escenario en el cual los vertimientos cumplen con la normatividad vigente.

7. ALCANCES Y LIMITACIONES

7.1 ALCANCES

la relevancia de la presente investigación está en la evaluación de las actuales condiciones de calidad del agua de una de las fuentes hídricas más representativas de la ciudad de Bogotá y de la localidad de Bosa, el proyecto abarca un diagnóstico para las condiciones de conducción y vertimiento de aguas en un tramo del cauce del río Tunjuelo ya que la gran variedad de inconvenientes descritos en este proyecto han generado una gran daño en la calidad y la estructura del cuerpo de agua, por tanto los habitantes del sector colindante al cauce del río y de la localidad en general se han visto afectados directa o indirectamente por las problemáticas presentes en el sector (propagación de plagas, Malos olores, riesgos de inundación, etc.), mediante el proyecto pretendemos hacer un aporte y una actualización de los componentes hídricos del área de estudio y que la información aquí generada sea considerada en un futuro para la solución de los problemas anteriormente mencionados.

7.2 LIMITACIONES

- Debido a la extensión del cauce del río y las dificultades para trasladarnos a lo largo del cauce es complejo hacer un análisis minucioso de toda la zona
- Cuestiones de seguridad en la zona de estudio
- Condiciones climáticas que puedan afectar las medidas y el muestro en el cauce del río
- Falta de equipos completos para medir y cuantificar la mayor cantidad de características posibles en el tramo de estudio

8. PROPUESTA METODOLÓGICA

El proceso metodológico usado para la realización de este proyecto es cuantitativo y experimental donde se parte de observaciones detalladas para poder identificar rasgos, propiedades y características de la problemática propia del proyecto, estos procesos cuantitativos nos plantean realizar una serie de procedimientos técnicos de medida e interpretación experimental para evaluar las causas y los efectos de las variables involucradas y de esta manera estructurar una conclusión que nos permita plantear alternativas para solucionar el problema objeto de este proyecto.

8.1 FASE PRELIMINAR

En primera instancia se realiza una recopilación informativa y bibliográfica como referente metodológico para el proyecto, suministrándonos los conceptos y las afirmaciones teóricas necesarias para dar inicio a su elaboración, dentro de la información recolectada se encontraron proyectos realizados por entidades estatales como la secretaria distrital del hábitat, la corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR) y la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá junto con publicación realizadas por la universidad nacional de Colombia, la universidad de la Salle y la universidad de los andes donde se hacían una interpretación de la problemática de las fuentes hídricas locales y de la fuente objeto de esta investigación (el río Tunjuelo), de igual manera se obtuvo información respecto a las normativas actuales para la medición de los índices de calidad del agua, de esta forma se definen los niveles máximos permisibles que se podrán encontrar en la corriente del río junto con los procedimientos prácticos y de modelación de software a implementar para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

8.2 FASE DE CARACTERIZACIÓN E INSPECCIÓN DE CAMPO

En esta fase se plante realizar un reconocimiento a la zona objeto del proyecto estableciendo en ella los puntos de control donde se realizan las medidas pertinentes y un registro de los aspectos que componen el tramo de río en los puntos seleccionados, de esta manera se ejecuta una medida y muestreo de las variables para su posterior análisis en la fase siguiente.

8.2.1 Ubicación de las secciones de muestreo

Respecto a las consideraciones para la selección de estos puntos se tiene en cuenta las medidas topográficas del terreno, donde mediante el uso de herramientas SIG se realiza un modelo de la zona y del tramo seleccionado, de esta manera se subdivide el tramo en varias secciones las que son abscisadas teniendo en cuenta la ubicación de los puntos de vertimiento que son causales de parte del problema que se está considerando.

Tabla n° 2 Referenciación de los puntos de muestreo

SECCION	C. ESTES (UTM)	C. NORTES (UTM)	DESCRIPCION DEL PUNTO
BN	590100.00	519933.00	placa de georreferenciación ubicada cerca al CAI Argelia
K0+000	590263.44	510026.00	aguas arriba del puente transversal 86
K0+100	590157.55	510015.60	costado sur del puente transversal 86
K0+200	590086.83	509948.87	entrada a la sección de análisis
K0+300	590000.31	509908.95	sección de control
K0+400	589931.37	509971.66	primer vertimiento de aguas residuales
K0+500	589844.15	510017.78	sección de control
K0+600	589751.09	510050.72	segundo vertimiento por conexión errada
K0+700	589655.36	510076.20	sección de control
K0+800	589607.54	510136.41	sección de control
K0+900	589668.46	510174.38	sección de control
K1+000	589650.90	510213.58	salida del tramo y sección de análisis

Fuente: Elaboración propia

8.3 FASE EXPERIMENTAL

La determinación cuantitativa de los factores determinados en las fases anteriores es el proceso que se contempla en esta fase, mediante diferentes ensayos de laboratorio buscamos determinar las condiciones de los muestreos realizados en la zona de estudio (solidos totales, PH, demanda química de oxígeno, cantidad de oxígeno disuelto, conductividad, temperatura, etc.)

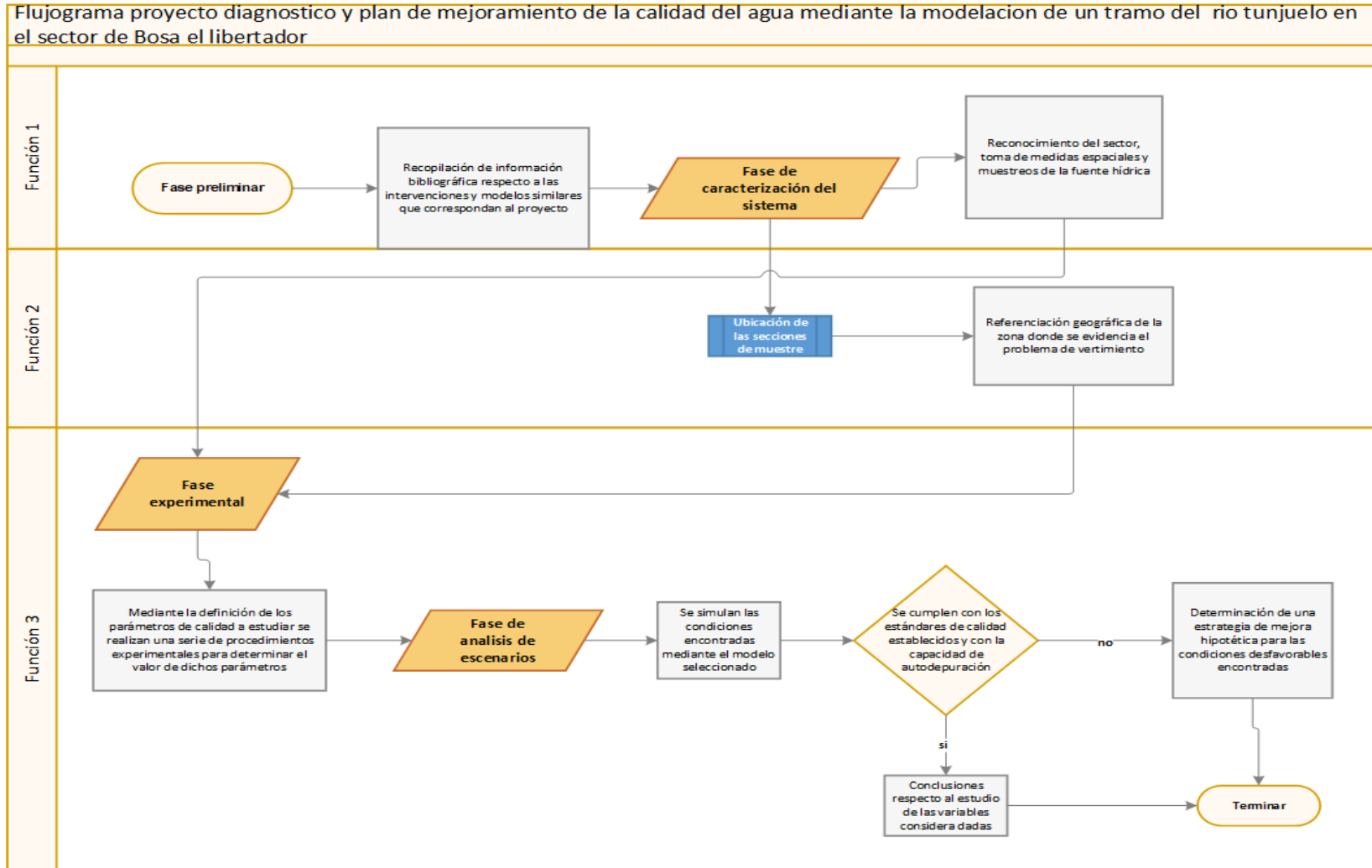
8.4 FASE DE MODELACIÓN

Habiendo realizado los ensayos de laboratorio para los datos obtenidos, se definirá el planteamiento conceptual de un ambiente de descarga ideal junto con las condiciones actuales en la sección del río mediante una modelación simulada por el software seleccionado y haciendo su respectiva calibración, el modelo se ejecuta con la recolección de los datos medidos en campo, de esta manera hacemos una descripción del sistema y de algunas variables ya analizadas mediante los métodos de laboratorio.

8.5 FASE DE DIAGNOSTICO

Una vez realizado la caracterización de los componentes hidráulicos del tramo objeto del análisis mediante los dos métodos implementados de modelación se procede a realizar un diagnóstico numérico y análisis de los mismo teniendo en cuenta los estándares regulados nacionalmente por la normatividad.

Esquema n° 1 Diagrama de flujo del proceso metodológico (elaboración propia)



Fuente: Elaboración propia

9. DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA ZONA Y TRAMO DE ESTUDIO

La cuenca baja del río Tunjuelo, sector donde se localiza el tramo de estudio, comprende dos zonas principales; el sector (**cantarrana-la fiscalá**) donde el afluente cuenta con pendientes de hasta el 1% y tiene la disposición para majear grandes caudales y la zona (**la fiscalá-la Tolosa-bosa-río Bogotá**) donde se encuentran pendientes mucho menores lo que implica una baja capacidad de autodepuración y arrastre de sedimentos, es acá donde se ha optado por realizar el estudio objeto de este proyecto ya que no solo la existencia de las bajas pendientes es un factor que deteriore las prestaciones ambientales e hidráulicas del río sino que aquí debido a su paso por el sector urbano es donde se empiezan a presentarse las descargas y vertimientos de agua residuales en el afluente.

El río Tunjuelo en la actualidad es el río más grande que recorre la ciudad de Bogotá y es de gran importancia para la historia de la ciudad ya que de su cauce fue abastecido el primer acueducto con el que conto la capital del país, el río Tunjuelo ingresa a bosa por la autopista sur atravesando el perímetro urbano en un recorrido aproximado de 14 km.

Imagen n° 4 Hidrología localidad de Bosa



Fuente: Bogotá. Secretaria Distrital De Ambiente. 2007. **observatorio ambiental de bogota. observatorio ambiental de bogota.** [En línea] 01 de 09 de 2007. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/ES/diagnostico-pomca-tunjuelito>.

Los habitantes que se alojan en los sectores circundantes de la fuente hídrica en sus mayorías son de condiciones socioeconómicas entre medianas y bajas, el proceso de conurbación ha sido parte de la progresiva afectación del río, con el paso del tiempo ha provocado el deterioro de la cobertura vegetal propia de la cuenca la cual contribuía a los procesos de infiltración y siendo esto una medida propia de mitigación a las posibles inundaciones de los sectores cerca del río y filtro de parte de las cargas contaminantes.

Bajo jurisdicción de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá se formuló el plan de saneamiento, manejo de vertimientos y recuperación hidráulica del río Tunjuelo donde se proyectó la construcción de una serie de estructuras que permitieran el mejoramiento de las condiciones en las que se realizan las deposiciones de aguas residuales al cuerpo del río, debido a la ineficiencia de los sistemas principales y secundarios que ya existían a lo largo de toda la cuenca. El interceptor en la parte baja de la cuenca del río Tunjuelo es una de estas estructuras contempladas en el PSMV, para la zona de Bosa esta estructura facilitaría el proceso de drenaje de aguas servidas mediante la construcción de conducciones con diámetros de entre 2.45 a 2.7 metros junto con todas las obras complementarias para el adecuado funcionamiento de esta estructura¹⁹.

Las redes que se encuentran en el sector seleccionado son de un sistema de alcantarillado separado que desemboca directamente en río, la UPZ Bosa central es el sector donde se ha localizado la problemática objeto del proyecto, este sector se encuentra en el centro-sur de la localidad y abarca un área aproximada de 715 Ha limitado al norte y al oriente con la ronda del río Tunjuelo y al sur – occidente con el municipio de Soacha, allí se encuentran pendientes entre los 0% a 1% lo que fue evidenciado en el reconocimiento zonal, se encontró un terreno de características planas pero con leves inclinaciones que tiende a la ronda del río, con temperaturas que varían entre los 9,6° a 19.5°C, en su gran mayoría este sector tiene un uso de suelo residencial con algunas zonas de actividades industriales y comerciales junto con sub-sectores rurales donde se realiza el cultivo de algunos tipos de hortaliza²⁰.

¹⁹ **empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá. 2007.** empresa de acueducto y alcantarillado de bogota . [En línea] 2007. [Citado el: 10 de agosto de 2017.] <http://eacennnt09.acueducto.com.co:8085/?sGet&DI9fTH1WXw1xA3FplhZVV0x6Sw1xfAQBXAABCW4CH3MAfHcBXggDAGgFHAgAfRJSAI1BcUsOS1FELBJBO1VDS0ZcQQ0AfQAES1ZYVEpdT11VcHZ0I3V3cWx6YBUCfXV8L3I0dntyYxUCfXB0IRUDCH9gYmYVf3FBCVZtMDE4LzMvMDBNNDDEM>.

²⁰ **Bogotá. Secretaría Distrital De Ambiente. 2007.** observatorio ambiental de bogota. *observatorio ambiental de bogota*. [En línea] 01 de 09 de 2007. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/ES/diagnostico-pomca-tunjuelito>.

El vertimiento de las aguas en la actualidad esta sectorizado en cuatro zonas de la cuenca del rio donde en el plan de saneamiento y manejo de vertimientos reconoce 52 puntos de descarga de aguas en todas las cuatro zonas, pero tomando en consideración que sector donde se realiza el proyecto hace parte de la cuenca baja del rio se referencia en la siguiente tabla los aportes y cantidad de puntos presentes en esta zona, la cual es donde se presentan la mayor cantidad de vertimientos en toda la cuenca del rio.

Tabla n° 3 Cantidad de agua vertida en la zona de la cuenca baja del rio Tunjuelo (Bogotá. Secretaria Distrital De Ambiente, 2007)

zona	numero de descargas	volumen por mes (m3/mes)
cuenca baja (autopista sur hasta la desembocadura)	36	4.971,045

Fuente: Elaboración propia

Los vertimientos podemos identificarlos como uno de los principales factores que afectan la calidad de vida de la comunidad de Bosa, en este contexto se están produciendo problemas de salubridad producto de la emisión de olores cuando se realizan las descargas de agua y las plagas que conllevan estas emisiones, traduciéndose posteriormente en la propagación de afecciones respiratorias o enfermedades de contagio producto del problema de plagas en la ronda del rio. Sin embargo, este no es el único factor que influencia el deterioro de la cuenca y la comunidad ya que según el plan ambiental local de Bosa²¹ se han podido reconocer problemáticas de tipo social que también tienen una repercusión ambiental directa sobre la estructura del rio Tunjuelo, esto nos permite afirmar que dentro de la propia comunidad hay un descornamiento generalizado en cuanto al cuidado y manejo ambiental se refiere junto con una falta de pertenencia por el territorio en el cual habitan las personas de la localidad, puesto que no se evidencia ningún tipo de iniciativa ciudadana formal que se apropie de alguna manera para plantear acciones que contribuyan desde la vida cotidiana de los habitantes del sector a la mitigación de los daños ya evidenciados del rio Tunjuelo. En la siguiente tabla podemos observar algunos de las problemáticas sociales que afectan junto con los vertimientos el cauce del rio.

²¹ **Bogotá. Secretaria Distrital De Ambiente. 2007.** observatorio ambiental de bogota. *observatorio ambiental de bogota*. [En línea] 01 de 09 de 2007. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/ES/diagnostico-pomca-tunjuelito>.

Tabla n° 4 Problemáticas sociales asociadas a la afectación de la calidad del río Tunjuelo

problemática	descripción
generación de ruido	Altos niveles de ruido generado por el tráfico automotor y las actividades industriales principalmente sobre la Autopista Sur. Igualmente, se presenta actividades de perifoneo y utilización de equipos de sonido en las zonas comerciales de las UPZ Bosa Central y El Porvenir y del barrio San Pablo-Bosa.
Disposición inadecuada de residuos sólidos	Disposición de residuos orgánicos sobre la ronda del río Tunjuelo desde el Cementerio El Apogeo hasta la desembocadura con el río Bogotá.
contaminación del aire	Asociada a emisiones del sector industrial (industrias transformadoras de plásticos en los barrios Betania, Bosa-Brasil y Brasilia) y al tráfico vehicular (Autopista Sur y Centro de la localidad).
Afectación del sistema agua/ronda/ZMPA	La evacuación de aguas lluvias y aguas negras se realiza de forma combinada por los vallados existentes en algunos sectores aguas arriba de la UPZ Bosa centro afectando los niveles del río Tunjuelo. Como se trata de una zona baja, hay momentos en que los canales retienen por largos periodos las aguas residuales en vez de evacuarlas, originando problemas ambientales de origen físico, químico y bacteriológico.
Afectación del suelo	Rellenos en la zona de Contaminación con metales pesados de suelos cultivados en la zona de San Bernardino
ocupación urbana inadecuada	los asentamientos en la ronda del río por urbanizaciones ilegales o "cambuches" es una problemática representativa con la identificación de 135 de este tipo de ocupaciones

Fuente: Bogotá. Secretaría Distrital De Ambiente. 2007. **observatorio ambiental de bogota. observatorio ambiental de bogota. [En línea] 01 de 09 de 2007. [Citado el: 14 de 03 de 2017.]**
<http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/ES/diagnostico-pomca-tunjuelito>.

De forma directa la corriente del río recibe agentes contaminantes en tres formas de causa hídrica que son: las descargas de aguas domésticas, los vertimientos industriales y escorrentía superficial ya sea por sistema de alcantarillado o de forma natural por el terreno, es común determinar las medidas de contaminante que ingresan a la corriente de agua en términos de la cantidad por unidad de tiempo o de área²², teniendo en cuenta esto el PSMV estima las descargas diarias totales a la cuenca del río mayores a **212.6 toneladas de DBO5**²³.

²² **Bogotá. Secretaría Distrital De Ambiente. 2007. observatorio ambiental de bogota. observatorio ambiental de bogota. [En línea] 01 de 09 de 2007. [Citado el: 14 de 03 de 2017.]** <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/ES/diagnostico-pomca-tunjuelito>

²³ **empresa de acueducto y alcantarillado de Bogota. 2007. empresa de acueducto y alcantarillado de bogota . [En línea] 2007. [Citado el: 10 de agosto de 2017.]**
<http://eacennnt09.acueducto.com.co:8085/?sGet&DI9fTH1WXw1xA3FpIhZVV0x6Sw1xfAQBXAABCW4CH3MAfHcBXggDAGgFHAgaFrJSAI1BcUsOS1FELBJBO1VDS0ZcQQ0AfQAES1ZYVEpdT11VcHZ013V3cWx6YBUCfXV8L3I0dntyYxUCfXB0IRUDCH9gYmYVf3FBCVZiMDE4LzMvMDBNNDDEM>

9.1 NORMATIVA DE LA CALIDAD HÍDRICA QUE APLICA EN EL RIO TUNJUELO

Según Sierra Ramírez²⁴ la manera para saber qué tan apta es la calidad del agua es mediante la medida de ciertos parámetros de origen físico, químico y microbiológico, los cuales son bastante diversos en cantidad por tal motivo se refiere en esta investigación a los parámetros que son regulados por las entidades estatales y los cuales son los principales a tener en cuenta para hacer un diagnóstico óptimo de las condiciones de calidad en las fuentes hídricas junto con sus límites permisibles.

9.1.1 Resolución 631 2015 (por la cual se reglamenta los mites permisibles en cuanto vertimientos y calidad)

Por el cual el ministerio del medio ambiente estable las regulaciones relacionadas con el uso del recurso hídrico, la clasificación u ordenamiento y los vertimientos al mismo. Vigente a partir de 17 de marzo de 2015 busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales de agua dulce y al sistema de alcantarillado público, para de esta forma aportar al mejoramiento de la calidad del agua y trabajar en la recuperación ambiental de las arterias fluviales del país. En su capítulo 5 artículo 8 estable tanto los parámetros y los valores límites permisibles para las descargas.

9.1.2 Decreto 3930 de 2010 (permiso para el vertimiento al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados)

Por medio del cual se reglamenta los usos del agua y se establecen los parámetros requeridos para realizar las simulaciones respecto a los parámetros de calidad en cuerpos de agua superficiales, expedido y publicado por la ANLA los factores para tener en cuenta propuestos por el decreto y los cuales están al alcance de este proyecto son: Demanda bioquímica de oxígeno a cinco (5) días, Demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos, potencial del ion hidronio, H⁺, temperatura, Oxígeno disuelto y el caudal.

²⁴Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

Tabla n° 5 Valores permisibles según el decreto 3930 para cargas menor a 625 Kg/día

PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS - ARD DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES.	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS - ARD Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD-ARND) DE LOS PRESTADORES DE SERVICIO PUBLICO A CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES, CON UNA CARGA MENOR O IGUAL A 625,00 Kg/día DBOs
Generalidades			
PH	Unidades de pH.	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)3	mg/L O2	200,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2	-	90,00
Solidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	90,00
Solidos sedimentables (SSED)	mL/L	5,0	5,0
Grasas y Aceites.	mg/L	20,00	20,00
Sustancias Activas de Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Compuesto de Fosforo			
Orto fosfatos (P-PO4(3))	mg/L	-	Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO3)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO2)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	-	Análisis y Reporte

Fuente: **ministerio de medio ambiente. 2015.** minambiente. *minambiente* . [En línea] 7 de marzo de 2015. [Citado el: 26 de agosto de 2017.] <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>.

Tabla n° 6 Valores permisibles según el decreto 3930 para cargas menor a 3000 Kg/día

PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS - ARD Y AGUAS RESIDUALES NO DOMESTICAS - ARND DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PUBLICO DE ALCANTARILLADO, CON UNA CARGA MAYOR A 625,00 Kg/día Y MENOR O IGUAL A 3.000,00 Kg/día DBO5	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS - ARD Y AGUAS RESIDUALES NO DOMESTICAS - ARND DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PUBLICO DE ALCANTARILLADO, CON UNA CARGA MAYOR A 3.000,00 Kg/día DBO5
Generalidades			
PH	Unidades de pH.	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO) ³	mg/L O ₂	180,00	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	90,00	70,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	90,00	70,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mL/L	5,0	5,0
Grasas y Aceites.	mg/L	20,00	10,00
Compuestos Semi-volátiles Fenólicos	mg/L	-	Análisis y Reporte
Fenoles Totales	mg/L	-	Análisis y Reporte
Sustancias Activas de Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos Aromáticos Poli cíclicos (HAP)	mg/L	-	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Absorbibles (AOX)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Compuesto de Fosforo			
Orto fosfatos (P-PO ₄ (3))	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Nitrógeno Amoniaco (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
iones			
Cianuro Total (CN ₂)	mg/L	0,50	Análisis y Reporte
Cloruros (Cl)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfatos (SO ₄ (2))	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfuros (S ₂)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Metales y Metaloides			
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,02	0,02
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L	-	Análisis y Reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,50	0,50
Otros Parámetros para Análisis y Reporte			
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m (-1)	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Fuente: **ministerio de medio ambiente. 2015.** minambiente. *minambiente* . [En línea] 7 de marzo de 2015. [Citado el: 26 de agosto de 2017.] <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>.

9.1.3 Acuerdo 043 del 2006 CAR (objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020)

Mediante este establecen metas, programas, proyectos y actividades necesarias para realizar un avance en el saneamiento y tratamiento de los vertimientos, incluyendo la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales descargadas en cuerpos de agua superficiales, más exactamente en la cuenca del río Bogotá con una proyección de calidad al año 2020. La CAR identifica al río Tunjuelo como una de las sub-cuencas del río Bogotá y por tanto aplica este criterio de proyección de parámetros de calidad para los objetivos de este proyecto, de esta manera y según el acuerdo se pudo establecer que la cuenca de río Tunjuelo hace parte de la clasificación IV la cual tiene un objeto de uso agrícola y pecuario restringido dentro del perímetro urbano por el cual circula la corriente del río.

Tabla n° 7 Valores proyectados admisibles según el acuerdo 43 CAR Cundinamarca

variables fisicoquímicas	unidades	uso agrícola	uso pecuario	uso recreativo	objetivo de cáida clase IV (2020) CAR
arsénico	mg/L	0.100	0.200	-	-
cadmio	mg/L	0.010	0.050	-	-
cobre	NPM/100 ml	0.200	0.500	-	-
coliformes totales	NPM/100 ml	5,000.000	-	5,000.000	20,000.000
coliformes fecales	mg/L	1,000.000	-	-	-
cromo+6	mg/L	0.100	1.000	-	0.100
cromo	mg/L	-	-	-	-
DBO5	mg/L	-	-	-	50.000
manganeso	mg/L	0.200	-	-	0.200
mercurio	mg/L	-	0.010	-	0.010
OD	mg/L	-	-	-	5.000
PH	mg/L	4.5-9.0	-	5.0-9.9	4.5-9.0
plomo	mg/L	5.000	0.100	-	0.100
SAAM	mg/L	-	-	-	0.500
SST	mg/L	-	-	-	40.000
zinc	mg/L	2.000	25.000	-	2.000

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca . 2006. *observatorio ambiental de Bogotá. observatorio ambiental de Bogotá.* [En línea] 17 de octubre de 2006. [Citado el: 20 de agosto de 2017.] <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/acuerdo-no-43-del-17-de-octubre-de-2006>.

10. CARACTERIZACIÓN E INSPECCIÓN DE CAMPO EN EL TRAMO DE ESTUDIO

El sector objeto del estudio fue seleccionado debido a las problemáticas ya evidencias en este documento y las cuales durante varios años uno de los autores ha podido observar directamente, el tramo de estudio está delimitado en un kilómetro del cauce del río que atraviesa el sector urbano del barrio Bosa Argelia perteneciente a la UPZ Bosa centro, las condiciones evidencias muestran un claro deterioro de la vegetación nativa de la cuenca y un terreno semi-llano con una pronunciación de pendiente al acercarse a la ronda del río por el costado oriental, mientras ocurre el caso contrario en el costado occidental donde la pendiente del terrón al acercarse a la ronda tiende a decrecer, cerca de la zona mojada se pudo percibir también una grave problemática de plagas producto de la presencia de roedores debido a los desechos. En cuanto a la problemática hídrica y de calidad se comprenden dos sectores a lo largo del kilómetro de la seccion seleccionada, el primero de ellos ubicado en la abscisa k0+400 es una vertimiento directo y continuo de aguas residuales que comprende descargas realizadas por el barrio Argelia mediante una estructura de alcantarillado que transporta hasta un poso de inspección el cual deposita las aguas negras por una compuerta instalada en la ronda del río, es por esto que en este sitio se ha localizado una de las abscisas, puntos de muestreo y análisis del proyecto.

Imagen n° 5 Identificación del vertimiento de aguas residuales (producción propia)



Fuente: Elaboración propia

El segundo punto de monitoreo se encuentra ubicado doscientos metros aguas abajo del punto de vertimiento ya mencionado por tanto corresponde a la abscisa k0+600, aquí es donde podemos encontrar una conexión errada que descarga aguas servidas de un origen desconocido, se pudo observar que el vertimiento no es continuo, las aguas tienen un periodo intermitente en el cual llegan al cauce del río por una tubería anclada en la ronda del cauce, este es el segundo punto seleccionado para hacer el muestro ya que desconocemos las implicación que estos aportes tengan en los índices de calidad del agua en este sector del río estando tan cerca de otro punto de vertimiento.

Imagen n° 6 Identificación de punto de conexión errada (producción propia)



Fuente: Elaboración propia

10.1 BATIMETRÍA CONVENCIONAL DEL TRAMO SELECCIONADO

Para la construcción de los modelos y detallar los factores que conforman la zona de estudio se hacía necesario establecer las condiciones topográficas del espacio y el terreno circundante al tramo seleccionado junto con las medidas batimétricas presentes en el eje del río en el momento de realizar el estudio. La batimetría la podemos considerar como el levantamiento topográfico de un cuerpo hídrico con la intención de conocer sus características morfológicas tanto superficiales (largo, ancho, forma, etc.) como bajo la superficie del agua (profundidad, espesor de los sedimentos, topografía del fondo, etc.) por lo que también se podría decir que la batimetría es un levantamiento hidro-topográfico. Dada las condiciones y las limitantes que nos presta el proyecto se elige realizar un levantamiento batimétrico convencional el cual consiste en la implementación de instrumentos análogos de medición de alturas y distancias, en esencia se hizo uso de un nivel y una mira topográfica. Este método prevalece a pesar de los avances tecnológicos que han permitido tener plataformas mucho más rápidas y precisas, en virtud que pueden ser empleados casi en cualquier lugar y bajo cualquier circunstancia topográfica y climática teniendo en cuenta también el factor económico que es algo determinante en estas instancias²⁵.

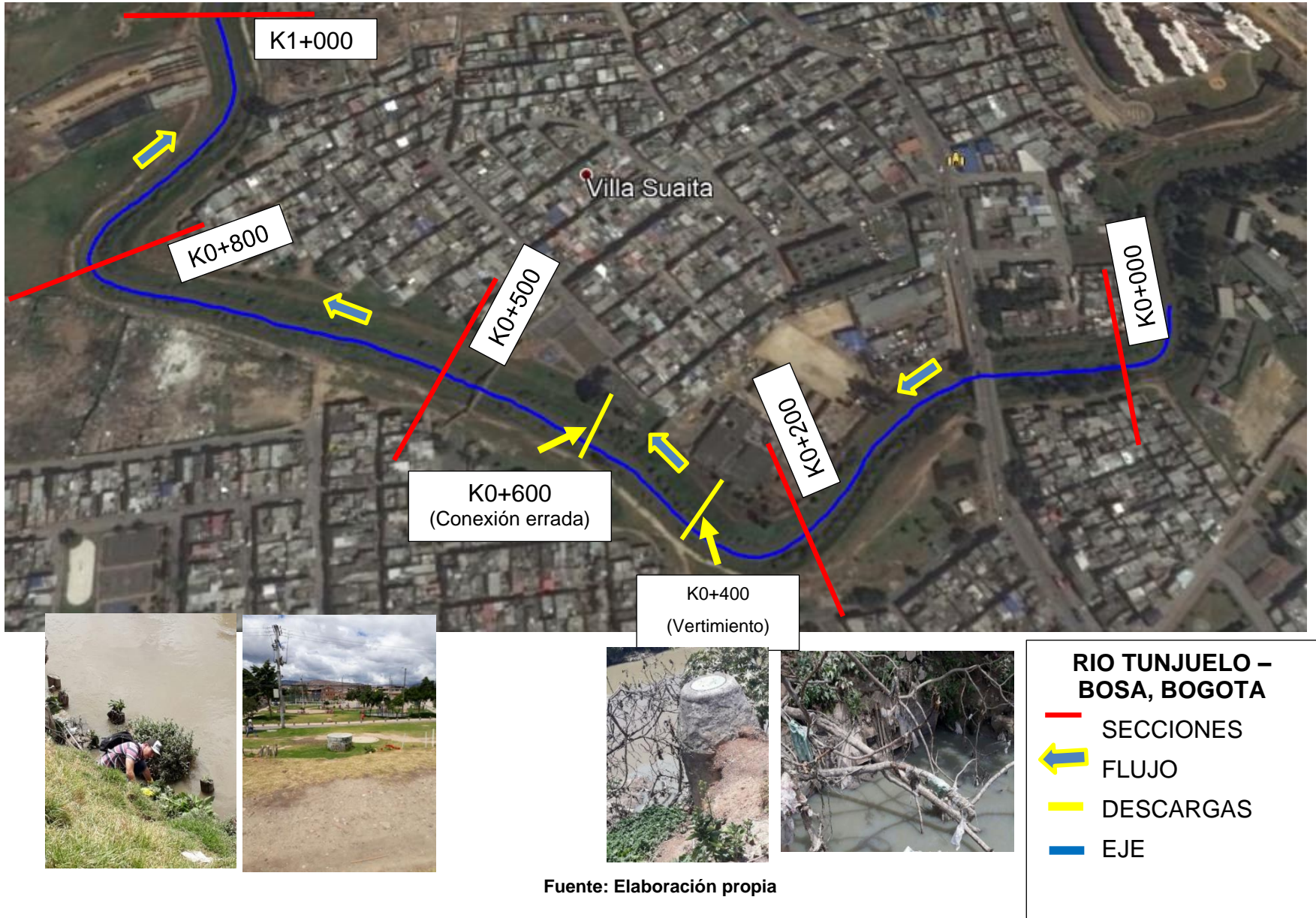
La metodología para el levantamiento hidro-topográfico se divide en dos fases:

- ❖ La ubicación de las posiciones donde se efectúa.
- ❖ Sondeos (medición de profundidades) desde la superficie hasta el fondo del cuerpo de agua objeto de estudio

Este proceso de sondeo fue realizado mediante levantamiento sucesivo de secciones rectas transversales cada metro a lo ancho de la ronda del río la cual fue definida por medida con cinta métrica y a criterio de los autores del proyecto arrojando un ancho de **25m**. La parte sumergida de cada perfil se define por lecturas de altura mediante el uso del nivel y la mira proceso el cual también se realizó en la parte seca pero que comprende también parte de la ronda del cauce. Usando siempre las mismas bases de referencia, los mismos perfiles se pueden levantar sucesivamente en el tiempo para proseguir el desarrollo progresivo de las secciones definidas para el tramo de estudio.

²⁵ Solano Rodríguez Emir STEvens, Paez Vargas Cristian Andres, Aguilar Ruiz. Jose Manuel 2016. repositorio universidad distrital. *repositorio universidad distrital*. [En línea] marzo de 2016. [Citado el: 10 de octubre de 2017.] file:///C:/Users/usuario/Downloads/SolanoRodriguezEmirStevens2016%20(1).pdf

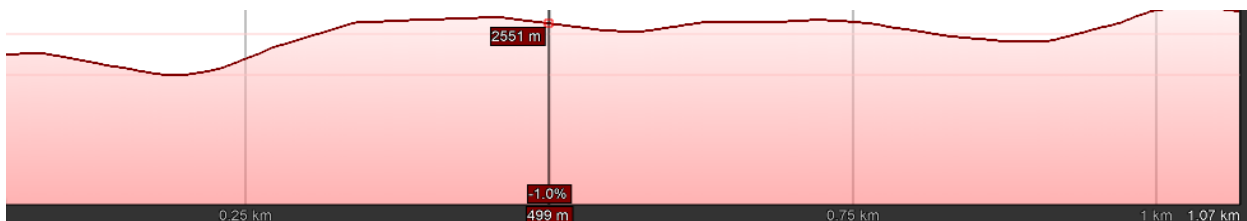
esquema n° 2 Representación gráfica de la delimitación espacial en el tramo objeto del estudio (producción propia)



10.1.1 Perfil longitudinal

Corresponde a la gráfica que relaciona la altura con la distancia longitudinal del cauce principal del tramo de un kilómetro del río Tunjuelo donde se identificaron las dos fuentes de descarga y generan afectación a la calidad del recurso en el sector, desde su abscisa inicial aguas arriba del puente de la transversal 86 a una elevación máxima de 2552 metros sobre el nivel del mar hasta el corte final del tramo aguas abajo del puente peatonal que comunica los barrios de Bosa la paz con Palestina a una elevación mínima de 2547 m.s.n.m. Permite establecer las pendientes de la corriente superficial en su recorrido a lo largo del tramo las cuales pudieron registrarse entre 1.2% y 0.2% de inclinación las cuales serán tenidas en cuenta para el proceso de modelación hidráulica del cauce.

Imagen n° 7 representación del perfil de elevación de terreno sobre el eje de un kilómetro del río tunéelo



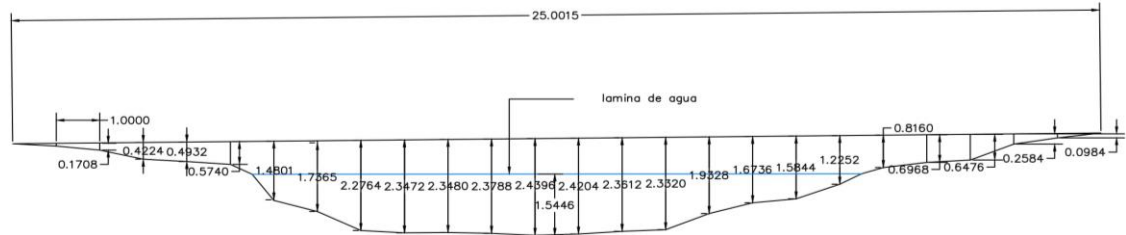
Fuente: Elaboración propia

10.1.2 Corte transversal

Corresponde al gráfico de las secciones transversales o anchos típicos del cauce principal seleccionado del río Tunjuelo en las estaciones o puntos donde se efectuaron los muestreos de las descargas de agua que se realizan en dichos puntos con el fin de reconocer la morfología del cauce y su incidencia en las problemáticas de calidad.

imagen n° 8 perfil de elevación batimétrica y procedimiento de medida

abscisa k0+200 para muestreo
y aforo de caudal

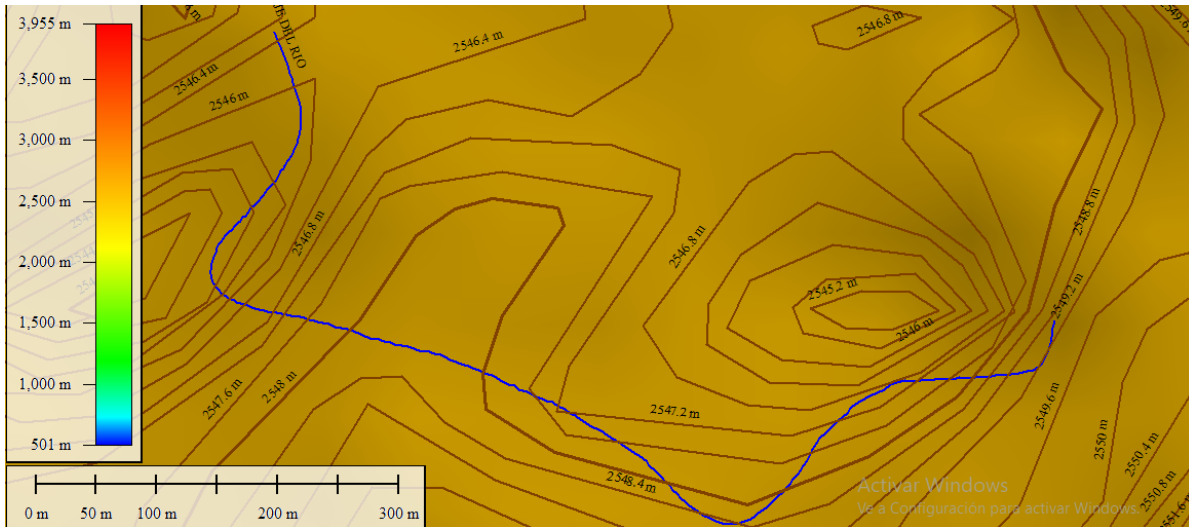


Fuente: Elaboración propia

Una vez levantados los datos del terreno en la ronda del río se tiene la información necesaria para georeferenciar estos puntos mediante el uso de un software que nos permita hacer una interpretación gráfica de los datos medidos, para ello se implementó GlobalMapper que es una aplicación que nos da la posibilidad de acceder directamente a varias fuentes en línea de imágenes, mapas topográficos, y datos DEM/DSM, estos datos incluyen el acceso a las imágenes de color de alta resolución de DigitalGlobe para el mundo entero que tienen marca de agua para su uso gratuito, también tiene la capacidad de acceder fácilmente a fuentes de datos WMS que incorpora en el acceso a los datos de elevación e imágenes de color para el mundo entero y para ver la elevación y datos vectoriales en 2D y 3D²⁶, con la superposición de cualquier dato cargado sobre ellas, haciendo uso de esta herramienta SIG se realizó un modelo de elevación del terreno circundante a la ronda de la fuente hídrica graficando las curvas de nivel de la zona y el eje del río, esto nos permite manipular los datos para configurar parte del modelo hidráulico.

²⁶ soluciones integrales geomatica ingeniería geoespacial. 2016. geosoluciones. geosoluciones. [En línea] 2016. [Citado el: 25 de septiembre de 2017.] <http://www.geosoluciones.cl/global-mapper/>.

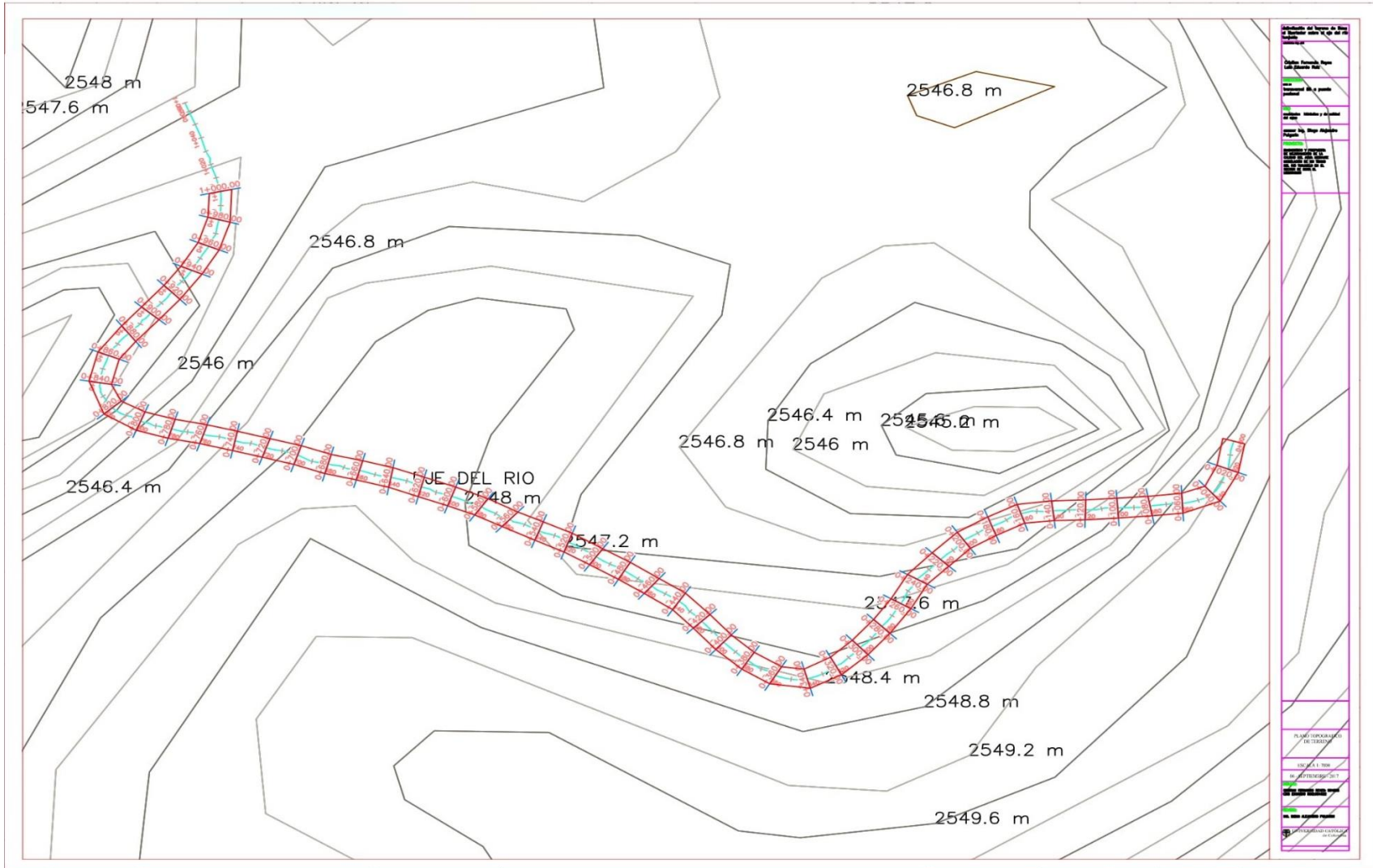
imagen n° 9 representación de topografía de la zona de estudio mediante herramienta SIG



Fuente: Elaboración propia

Con la construcción del terreno y el eje de río trazado el software globalmapper nos permite importar este modelo para manipularlo nuevamente en la herramienta de diseño y dibujo AutoCAD civil 3D, aquí usamos las aplicaciones del software propias para el diseño geométrico por las cuales se les dio al eje del río los atributos medidos en campo teniendo en cuenta que este siempre debe estar sujetos a las coordenadas referenciadas durante el levantamiento de los datos. La ruta del escurrimiento superficial y la dirección de flujo del cauce junto con el abscisado de la sección de estudio y la asignación de los perfiles batimétricos necesario para el desarrollo del modelo hidráulico fueron los parámetros que se adicionaron al modelo por este medio, toda esta información es agrupada como un conjunto de datos organizados que contiene información representada en capas digitales con atributos agrupados en tablas de datos alfanuméricos que corresponde a la abstracción del mundo real correspondiente a la zona de interés, las herramienta para el diseño geométrico de AutoCAD civil 3D se basan en los principios de interpolación de la información existente por medio estadístico y en algunos caso la extrapolación de datos para la generación de una superficie con todas las propiedades asignadas, esto con miras a la definición de aspectos tales como el coeficiente de rugosidad y el tipo de flujo que alimentara a el siguiente modelo.

Imagen n° 10 Trazo del eje y abscisado del rio Tunjuelo mediante el software civiCAD



Fuente: Elaboración propia

10.2 AFORO DE CAUDAL Y MUESTREO

La medida del caudal del cauce en el tramo de interés se realizó por medio de un molinete, la metodología de aforo consistió en la toma de la medida de la lámina de agua mediante el uso de una mira topográfica la cual nos arrojó una altura de **1.60 m**, medida la cual permite realizar la calibración del modelo hidráulico, posterior a esto se sumerge el molinete mediante una soga y un anclaje al lecho del río de forma tal que el extremo donde se encuentre el molinete se encuentre sobre el eje principal del río y a una altura de 2/3 de la lámina de agua medida, echo esto podemos registrar la velocidad que nos arroja la pantalla digital del molinete en su otro extremo, medida que es registrada por el aparato en unidades de pulgada por segundo (**0.8708 in/s para la abscisa k0+200**), este proceso fue realizado para las cuatro secciones caracterizadas del tramo de estudio las cuales están determinados como: entrada al sistema, punto de vertimiento, punto de conexión errada y salida del sistema. Una vez hechas las conversiones de unidades necesarias y haciendo uso de las secciones transversales ya graficadas se terminan los caudales aforados en los puntos.

Tabla n° 8 Registros del aforo de caudal

aforo	
sección	Q (m3/s)
K0+200	0.626
k0+400	0.6573
k0+600	0.6855
K1+000	0.7245

Fuente: Elaboración propia

Imagen n° 11 Registro fotográfico del aforo de caudal



Fuente: Elaboración propia

El muestreo de los puntos de análisis se llevó a cabo mediante los parámetros establecidos por la secretaria de hábitat y el IDEAM ²⁷, donde se describen los requerimientos, instrucciones y cuidados que se deben tener en cuenta para la toma de muestras de aguas residuales industriales o domésticas para análisis en el Laboratorio.

Esquema n° 3 Metodología para el muestreo de aguas en el cauce del río Tunjuelo



implementos: Botellas plasticas y de vidrio, guantes plasticos, nevera de icopor



se organizan y rotulan los instrumentos de acuerdo al punto donde se realiza el muestreo. la muestra sera de tipo instantaneo debido a las condiciones en las cuales se realizan las descargas de agua



se procede a tomar la muestra de forma que se llegue a un volumen aproximado de un litro, tomadonlas en la ronda del cause, en la entrada y salida del sistema y para el punto de vermiento y la conexion errada en la zona de descarga entre la ronda y zona mojada del rio



se refrigeran las muestras para coservación de las condicones iniciales durante un perido de un dia para el inicio de la fase experimental

Fuente: Elaboración propia

²⁷ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2007. IDEAM. IDEAM. [En línea] 10 de septiembre de 2007. [Citado el: 30 de agosto de 2017.]

11. LABORATORIO Y PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL

En esta instancia y habiendo obtenido la información y las muestras necesarias del terreno y el cauce se realizaron las pruebas de laboratorio pertinentes para este proyecto las cuales tuvieron lugar el día 30 de agosto de 2017, dentro de los análisis se realizaron pruebas de evaluación fisicoquímica que nos aporte las medidas de los niveles de los contaminantes y calidad de las muestras tomadas, teniendo en cuenta las disposiciones hechas en las normativas de calidad ya referenciadas y la disposición de los equipos y reactivos necesarios con los que cuenta el laboratorio de química y plantas de tratamiento de la universidad católica de Colombia se determinaron los valores correspondientes a : Demanda bioquímica de oxígeno, Demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos, potencial del ion hidronio H+, temperatura y oxígeno disuelto junto con otros factores que nos permitía medir el equipo multiparámetro. Mediante los siguientes sub-capítulos se registran los resultados encontrados para los factores anteriormente mencionados.

11.1 ESTADO ACTUAL RESPECTO A LOS FACTORES MEDIDOS EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL TRAMO DEL RIO TUNJUELO

Respecto a la valoración hecha de las muestras en los tramos **K0+200** y **K1+000** podemos decir que son propios del cauce natural del río por este motivo es justo comparar los resultados de las muestras ya que representan y la variación de los factores de calidad antes y después de la presencia de la carga contaminante en flujo del cuerpo de agua y verificar las magnitudes presentes respecto a las citas jurídicas reguladas por el acuerdo 043 de 2006 expedido por la corporación autónoma regional de Cundinamarca debido a que son valores que están proyectados alcance el cauce de río para el año 2020 de esta manera tenemos un acercamiento actual de la condición en la que se encuentra.

Tabla n° 9 Factores de calidad medidos con el equipo multiparámetro para el estado actual

MUESTRA 1 (K0+200)		Acuerd. 043-2006 -CAR	cumple
CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	480	-	-
RESISTENCIA ($\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$)	2.1	-	-
SOLIDOS EN SUSPENSIÓN (mg/L)	254	$x < 40 \text{ mg/L}$	NO
SALINIDAD	0.2	-	-
T° (°C)	19.9	-	-
PH	7.11	Unidades ($4.5 \leq X \leq 9.0$)	SI
OXIGENO (mg/L-O ₂)	0.6	$> 4 \text{ (mg/L)}$	NO
% OXIGENO (O ₂)	9%	-	-
MUESTRA 1 (K0+200)		Acuerd. 043-2006 -CAR	cumple
CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	509	-	-
RESISTENCIA ($\Omega \cdot \text{cm}$)	1963	-	-
SOLIDOS EN SUSPENSIÓN (mg/L)	271	$x < 40 \text{ mg/L}$	NO
SALINIDAD	0.2	-	-
T° (°C)	20.2	-	-
PH	5.95	Unidades ($4.5 \leq X \leq 9.0$)	SI
OXIGENO (mg/L-O ₂)	0.7	$> 4 \text{ (mg/L)}$	NO
% OXIGENO (O ₂)	11%	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla n° 10 Factores de calidad medidos mediante proceso experimental para el estado actual

SST					
seccion	W. Papel (g)	W. Papel (g)	W. Papel (g)	Acuerd. 043-2006 -CAR	cumple
M1 (K0+200)	0.418	0.412	0.442	$X < \text{SST} - 0.04 \text{ mg/L}$	NO
M4 (K1+000)	0.418	0.39	0.575		NO
color en unidades de Platino cobalto (mg/L)					
seccion	C. verdad	C. Aparente	Acuerd. 043-2006 -CAR		cumple
M1 (K0+200)	421	549	no refiere		
M4 (K1+000)	606	653			
turbiedad					
seccion	unidad	medida	Acuerd. 043-2006 -CAR		cumple
M1 (K0+200)	NTU	49	no refiere		
M4 (K1+000)	NTU	38.8			
DQO					
seccion	unidad	medida	Acuerd. 043-2006 -CAR		cumple
M1 (K0+200)	mg O ₂ /l	183.97	no refiere		NO
M4 (K1+000)	mg O ₂ /l	314.66			NO
DBO					
seccion	unidad	medida	Acuerd. 043-2006 -CAR		cumple
M1 (K0+200)	mg O ₂ /l	85.39	X < DBO - 50 mg/L		NO
M4 (K1+000)	mg O ₂ /l	103.74			NO

Fuente: Elaboración propia

11.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE DESCARGA PARA LOS PARÁMETROS MEDIDOS EN EL TRAMO DEL RIO TUNJUELO

En los abscisados **k0+400** y **k0+600** es donde se ha localizado los dos puntos de entrada de aguas contaminadas al cuerpo del río, por tanto es de vital importancia conocer la cantidad de aporte individuales que realiza cada uno de estos puntos al aumento del flujo y factores que influyan en las condiciones ambientales de tramo de estudio en paralelo con los datos de las muestras analizadas anteriormente el seguimiento se realizara mediante la cita jurídica del acuerdo 631 de 2015 el cual especifica los ambientes y valores de calidad para deposición de aguas residuales según su tipo.

Tabla n° 11 Factores de calidad medidos con el equipo multiparámetrico para la caracterización

MUESTRA 2 (K0+400)		Resolucion. 0631-2015	cumple
CONDUCTIVIDAD (µs/cm)	1295	-	-
RESISTENCIA (Ω*cm)	770	-	-
SOLIDOS EN SUSPENSIÓN (mg/L)	695	x < 90 mg/L	NO
SALINIDAD	0.6	-	-
T° (°C)	20.2	-	-
PH	6.89	Unidades (6.0 ≤ X ≤ 9.0)	SI
OXIGENO (mg/L-O2)	0.6	> 4 (mg/L)	NO
% OXIGENO (O2)	9%	-	-
MUESTRA 3 (K0+600)		Resolucion. 0631-2015	cumple
CONDUCTIVIDAD (µs/cm)	516	-	-
RESISTENCIA (Ω*cm)	1932	-	-
SOLIDOS EN SUSPENSIÓN (mg/L)	276	x < 90 mg/L	NO
SALINIDAD	0.3	-	-
T° (°C)	20	-	-
PH	6.27	Unidades (6.0 ≤ X ≤ 9.0)	SI
OXIGENO (mg/L-O2)	0.6	> 4 (mg/L)	NO
% OXIGENO (O2)	9%	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla n° 12 Factores de calidad medidos mediante proceso experimental para la caracterización

SST					
seccion	W. Papel (g)	W. Papel (g)	W. Papel (g)	Resolucion. 0631-2015	cumple
M2 (K0+400)	0.418	0.391	0.404	X < SST - 0.09 mg/L	NO
M3 (K0+600)	0.418	0.394	0.412		NO
color en unidades de Platino cobalto (mg/L)					
seccion	C. verdad	C. Aparente	Resolucion. 0631-2015		cumple
M2 (K0+400)	2171	2401	no refiere		
M3 (K0+600)	505	683			
turbiedad					
seccion	unidad	medida	Resolucion. 0631-2015		cumple
M2 (K0+400)	NTU	238	no refiere		
M3 (K0+600)	NTU	48.1			
DQO					
seccion	unidad	medida	Resolucion. 0631-2015		cumple
M2 (K0+400)	mg O2/l	467.7	no refiere		NO
M3 (K0+600)	mg O2/l	442.2			NO
DBO					
seccion	unidad	medida	Resolucion. 0631-2015		cumple
M2 (K0+400)	mg O2/l	235.39	X < DBO - 50 mg/L		NO
M3 (K0+600)	mg O2/l	193.37			NO

Fuente: Elaboración propia

Imagen n° 12 Registro de los procedimientos de laboratorio



Fuente: Elaboración propia

12. MODELACIÓN DE LA CONDICIONES PARA EL TRAMO DEL RIO TUNJUELO

12.1 DATOS Y MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS

Como parte del proceso para realizar la modelación de las condiciones de calidad y paso posterior a la creación de los modelos de terreno y ensayos de laboratorio es necesario contar con la herramienta que nos permita manejar condiciones hidráulicas encontradas en el tramo del río Tunjuelo, la importancia de esto radica en que estas factores son las que nos permiten establecer las condiciones de flujo del río por las cuales podemos identificar la velocidad y junto con esta los tiempos de viaje con los que opera el cauce moviendo a través de él los contaminantes producto del vertimiento y la conexión errada identificada en este sector, con esto podemos hacer una interpretación de la forma en la cual estos residuos contaminantes se sedimentan o son desintegrados por reacciones propias de los procesos fisicoquímicos que se desarrollan en el cauce del río siendo esto clave para la evaluación de las propiedades auto depurativas del cuerpo de agua. El sistema de modelamiento para lograr este objetivo fue el software HEC-RAS, el cual es un aplicación de uso público que es facilitado por el centro de ingeniería hidrológica del cuerpo de ingenieros de los estados unidos, HEC-RAS desarrolla simulaciones hidráulicas de regímenes permanentes y no permanentes para una distribución de canales abiertos, para este caso el río objeto de estudio, esto lo logra mediante una interpretación plana de la ecuación de energía de los fluidos de Bernoulli y la de velocidad de Manning realizando una serie de iteraciones ²⁸.

$$z_2 + y_2 + \frac{\gamma_2 v_2^2}{2g} = z_1 + y_1 + \frac{\gamma_1 v_1^2}{2g} + h_e$$

La definición de las condiciones geométricas se realizó mediante el modelo de terreno desarrollado anteriormente dándole características de pendiente mediante el perfil longitudinal y propiedades de área mediante el levantamiento batimétrico, estas condiciones permite percibir cambios en la velocidad promedio y las profundidades de flujo para el modelo hidráulico, estos dos factores son los que nos permiten elaborar las curvas de capacidad las cuales cumplen la función de calibrar las condiciones hidráulicas posteriormente en el modelo de calidad, estas funciones son de tendencia potencial y se ajustan a la forma $y = ax^b$.

²⁸ us army corps of engineers. 2016. us army corps of engineers. *us army corps of engineers*. [En línea] febrero de 2016. [Citado el: 02 de octubre de 2017.] <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Imagen n° 13 Alimentación de las condiciones de flujo para el modelo hidráulico en HEC-RAS

Steady Flow Data - Flow 05

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): 1 Reach Boundary Conditions ... Apply Data

Locations of Flow Data Changes

River: rio tunjuelo Add Multiple...

Reach: EJE River Sta.: 1000 Add A Flow Change Location

Flow Change Location		Profile Names and Flow Rates	
River	Reach	RS	PF 1
1	rio tunjuelo	EJE	1000
2	rio tunjuelo	EJE	600
3	rio tunjuelo	EJE	400
4	rio tunjuelo	EJE	200

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
92.844	100	105.42

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.4	0.35	0.4

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
5.5	19.5

Cont/Exp Coefficient (Steady)	
Contraction	Expansion

Fuente: Elaboración propia

imagen n° 14 Toma de los niveles de inundación en las secciones con el modelo corrido

Cross Section Data - geometria tunjuelo

Exit Edit Options Plot Help

River: rio tunjuelo Apply Data

Reach: EJE River Sta.: 1000

Description

Del Row	Ins Row	Station	Elevation
1	0	2548.65	
2	1	2548.57	
3	2	2548.41	
4	3	2548.3	
5	4	2547.96	
6	5	2547.83	
7	5.5	2547.49	
8	6	2547.21	
9	7	2547.01	
10	8	2546.85	
11	9	2546.53	
12	10	2546.2	
13	11	2546.16	
14	12	2546.11	
15	13	2546.09	
16	14	2546.03	
17	15	2546.01	
18	16	2546.03	
19	17	2546.11	
20	18	2546.27	
21	19	2546.9	
22	19.5	2547.48	
23	20	2547.9	
24	21	2548.09	
25	22	2548.19	
26	23	2548.44	
27	24	2548.58	
28	25	2548.62	
29			
30			
31			

Downstream Reach Lengths

LOB	Channel	ROB
92.844	100	105.42

Manning's n Values

LOB	Channel	ROB
0.4	0.35	0.4

Main Channel Bank Stations

Left Bank	Right Bank
5.5	19.5

Cont/Exp Coefficient (Steady)

Contraction	Expansion
0.1	0.3

Plot Terrain

Legend

- WS PF 1
- 0.0 m/s
- 0.2 m/s
- 0.4 m/s
- 0.6 m/s
- 0.8 m/s
- 1.0 m/s
- Ground
- Bank Sta

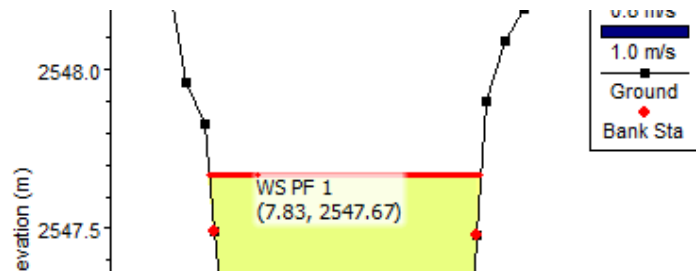
Activar Windows
Ve a Configuración para activar Windows.

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el proceso de modelación HEC-RAS representa las condiciones de flujo permanente definidas para la sección, sin embargo el software solicita junto con ellas algunos factores propios de la geometría que no están delimitados en el modelo de terreno del cauce como lo son las llanuras de inundación en las partes laterales del eje del río estas tres secciones deben ser caracterizadas mediante la determinación de su coeficiente de Manning y la distancia medida aguas abajo de la sección siguiente, esto hace parte del algoritmo que ayuda al aplicativo a determinar los coeficientes de velocidad para el transporte de los contaminantes.

La condición de certeza del modelo mediante la imágenes presentadas da a entender que hay una ligera desviación en los datos medidos de campo respecto a la geometría de la simulación y las condiciones de flujo, es perceptible que hay una ligera variación en la zona de mojada del cauce del río, esto se puede explicar en la cronología y la forma en la cual se realizó el proceso de aforo teniendo en cuenta que en el momento de realizar este proceso también se llevó a cabo la verificación de la medida de la lámina de agua la cual nos arrojó una altura de 1.60m mientras que el modelo nos arroja una altura de 1,67m lo cual es un rango de incertidumbre adecuado para las medidas de campo.

Imagen n° 15 altura de la lámina de agua interpretada por el modelo hidráulico



Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que el propio aplicativo de HEC-RAS cuenta con un módulo para la simulación de condiciones de calidad del agua el cual es desarrollado mediante un esquema numérico que resuelve por medio de un algoritmo la ecuación de advección y dispersión de materia, sin embargo este tipo de modelación tiene en cuenta variables orgánicas las cuales no son sugeridas por el decreto 3930 que es la normativa sobre la que se está realizando este proyecto y por tal motivo no fue tenido en cuenta para la simulación de calidad.

12.1.1 Curvas de capacidad hidráulica

El proceso para la construcción de las curvas de calibración potenciales se realizó modificando las condiciones de flujo en un rango tal que el cauce tuviera un mínimo de caudal hasta que el flujo fuese capaz de sobrepasar la capacidad de inundación en cada una de las secciones del tramo de estudio, así conocemos los puntos para realizar las gráficas de tendencia de la velocidad media y la profundidad para las cuales nos arrojó los siguientes resultados:

Imagen n° 16 Condiciones profundidad y velocidad simuladas por HEC-RAS

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

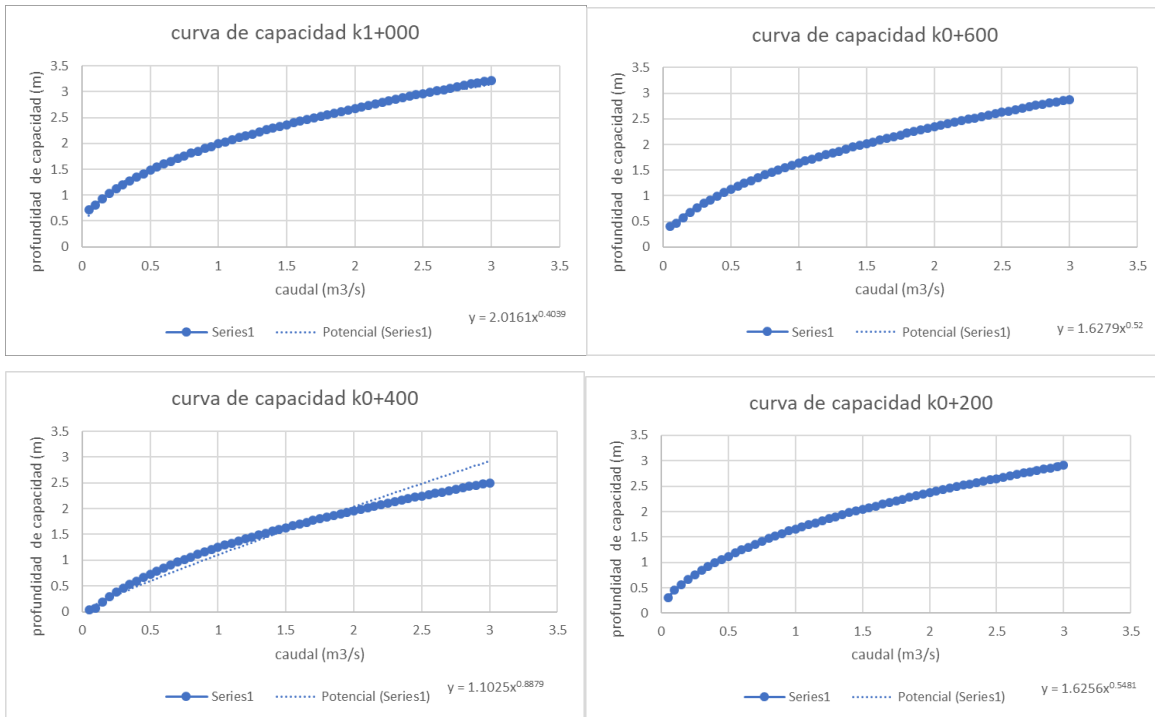
HEC-RAS Plan: Plan 01 River: rio tunjuelo Reach: EJE Reload Da

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
EJE	200	PF 1	0.05	2546.14	2546.44		2546.44	0.000753	0.03	1.74	7.77	0.02
EJE	200	PF 2	0.10	2546.14	2546.59		2546.59	0.000610	0.03	2.91	8.43	0.02
EJE	200	PF 3	0.15	2546.14	2546.70		2546.70	0.000558	0.04	3.92	8.97	0.02
EJE	200	PF 4	0.20	2546.14	2546.80		2546.80	0.000535	0.04	4.86	9.65	0.02
EJE	200	PF 5	0.25	2546.14	2546.90		2546.90	0.000516	0.04	5.77	10.31	0.02
EJE	200	PF 6	0.30	2546.14	2546.98		2546.98	0.000504	0.05	6.66	11.04	0.02
EJE	200	PF 7	0.35	2546.14	2547.06		2547.06	0.000502	0.05	7.56	11.99	0.02
EJE	200	PF 8	0.40	2546.14	2547.13		2547.13	0.000470	0.05	8.44	12.27	0.02
EJE	200	PF 9	0.45	2546.14	2547.20		2547.20	0.000445	0.05	9.29	12.51	0.02
EJE	200	PF 10	0.50	2546.14	2547.26		2547.26	0.000426	0.05	10.11	12.73	0.02
EJE	200	PF 11	0.55	2546.14	2547.33		2547.33	0.000410	0.05	10.91	12.95	0.02
EJE	200	PF 12	0.60	2546.14	2547.39		2547.39	0.000397	0.05	11.70	13.16	0.02
EJE	200	PF 13	0.65	2546.14	2547.44		2547.44	0.000385	0.05	12.47	13.35	0.02
EJE	200	PF 14	0.70	2546.14	2547.50		2547.50	0.000374	0.05	13.23	13.50	0.02
EJE	200	PF 15	0.75	2546.14	2547.55		2547.55	0.000364	0.05	13.96	13.64	0.02
EJE	200	PF 16	0.80	2546.14	2547.61		2547.61	0.000356	0.05	14.69	13.79	0.02
EJE	200	PF 17	0.85	2546.14	2547.66		2547.66	0.000348	0.06	15.41	13.92	0.02
EJE	200	PF 18	0.90	2546.14	2547.71		2547.71	0.000339	0.06	16.11	14.12	0.02
EJE	200	PF 19	0.95	2546.14	2547.76		2547.76	0.000332	0.06	16.76	14.35	0.02
EJE	200	PF 20	1.00	2546.14	2547.80		2547.80	0.000326	0.06	17.40	14.58	0.02
EJE	200	PF 21	1.05	2546.14	2547.84		2547.84	0.000322	0.06	18.01	14.79	0.02
EJE	200	PF 22	1.10	2546.14	2547.88		2547.88	0.000317	0.06	18.64	15.16	0.02
EJE	200	PF 23	1.15	2546.14	2547.92		2547.92	0.000313	0.06	19.27	15.55	0.02
EJE	200	PF 24	1.20	2546.14	2547.96		2547.96	0.000309	0.06	19.90	16.35	0.02
EJE	200	PF 25	1.25	2546.14	2548.00		2548.00	0.000306	0.06	20.55	17.40	0.02
EJE	200	PF 26	1.30	2546.14	2548.04		2548.04	0.000302	0.06	21.24	18.67	0.02
EJE	200	PF 27	1.35	2546.14	2548.08		2548.08	0.000299	0.06	21.96	19.17	0.02
EJE	200	PF 28	1.40	2546.14	2548.12		2548.12	0.000295	0.06	22.67	19.43	0.02
EJE	200	PF 29	1.45	2546.14	2548.15		2548.15	0.000292	0.06	23.37	19.67	0.02
EJE	200	PF 30	1.50	2546.14	2548.19		2548.19	0.000289	0.06	24.06	19.91	0.02
EJE	200	PF 31	1.55	2546.14	2548.22		2548.22	0.000287	0.07	24.75	20.15	0.02
EJE	200	PF 32	1.60	2546.14	2548.25		2548.26	0.000284	0.07	25.44	20.38	0.02
EJE	200	PF 33	1.65	2546.14	2548.29		2548.29	0.000282	0.07	26.11	20.60	0.02
EJE	200	PF 34	1.70	2546.14	2548.32		2548.32	0.000279	0.07	26.80	21.00	0.02
EJE	200	PF 35	1.75	2546.14	2548.35		2548.35	0.000277	0.07	27.49	21.41	0.02
EJE	200	PF 36	1.80	2546.14	2548.38		2548.39	0.000275	0.07	28.18	21.80	0.02

Average velocity of flow in main channel.

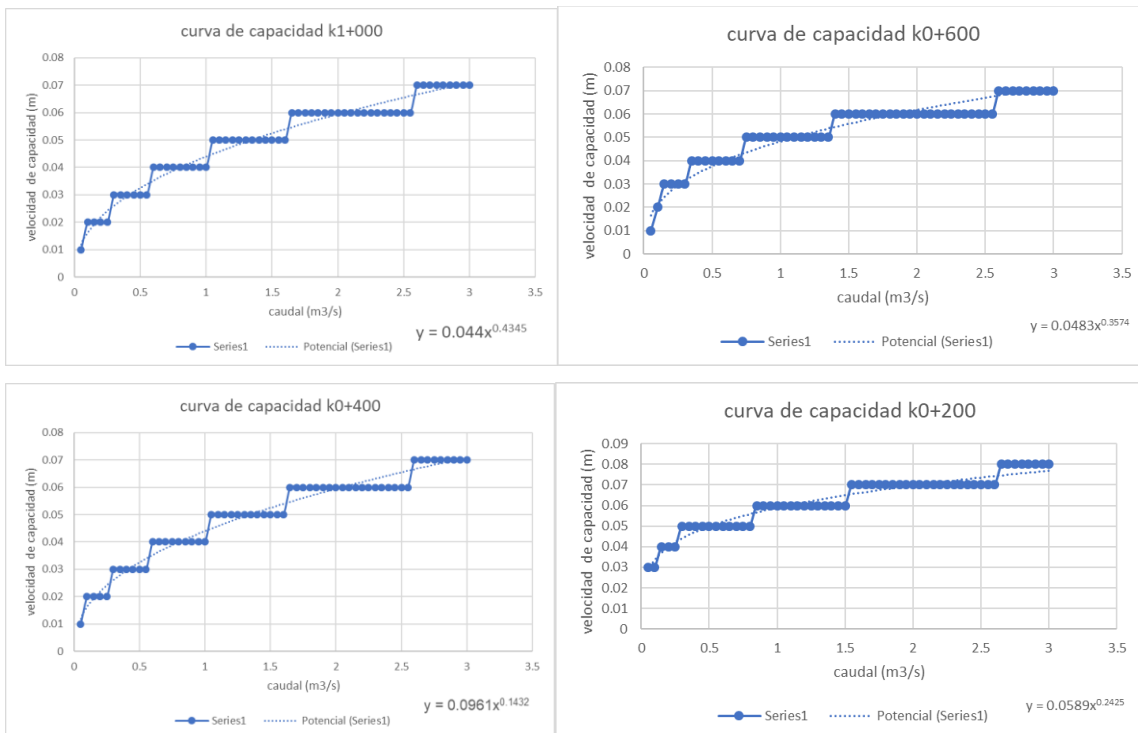
Fuente: Elaboración propia

Grafica n° 1 curvas de capacidad de profundidad para las secciones de modelación



Fuente: Elaboración propia

Grafica n° 2 curvas de capacidad de velocidad para las secciones de modelación (producción propia)

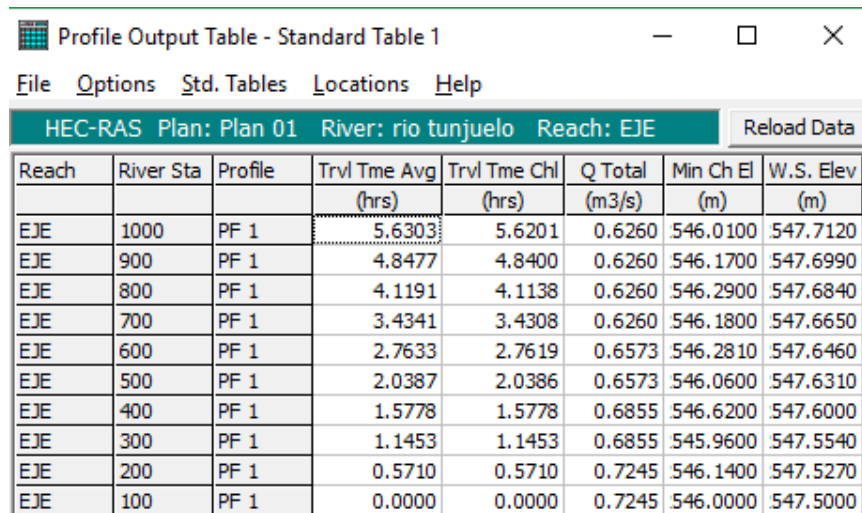


Fuente: Elaboración propia

12.1.2 Tiempos de viaje en las secciones de modelación

Al haberse construido las curvas de calibración y completado la simulación hidráulica nos queda por hacer una estimación de los tiempos de viaje de la carga contaminante en los puntos de aporte de agua residual sobre los cuales se realizó parte del modelo en cuestión, para ello hicimos uso de las pendientes y longitudes del corte a lo largo del cauce que fueron ilustradas en el modelo de terreno junto con los caudales aforados, la herramienta hace uso de una ponderación acumulando los tiempos de cada subsección basándose en la velocidad promedio del canal principal.

Imagen n° 17 Tiempos de viaje calculados por HEC-RAS (producción propia)



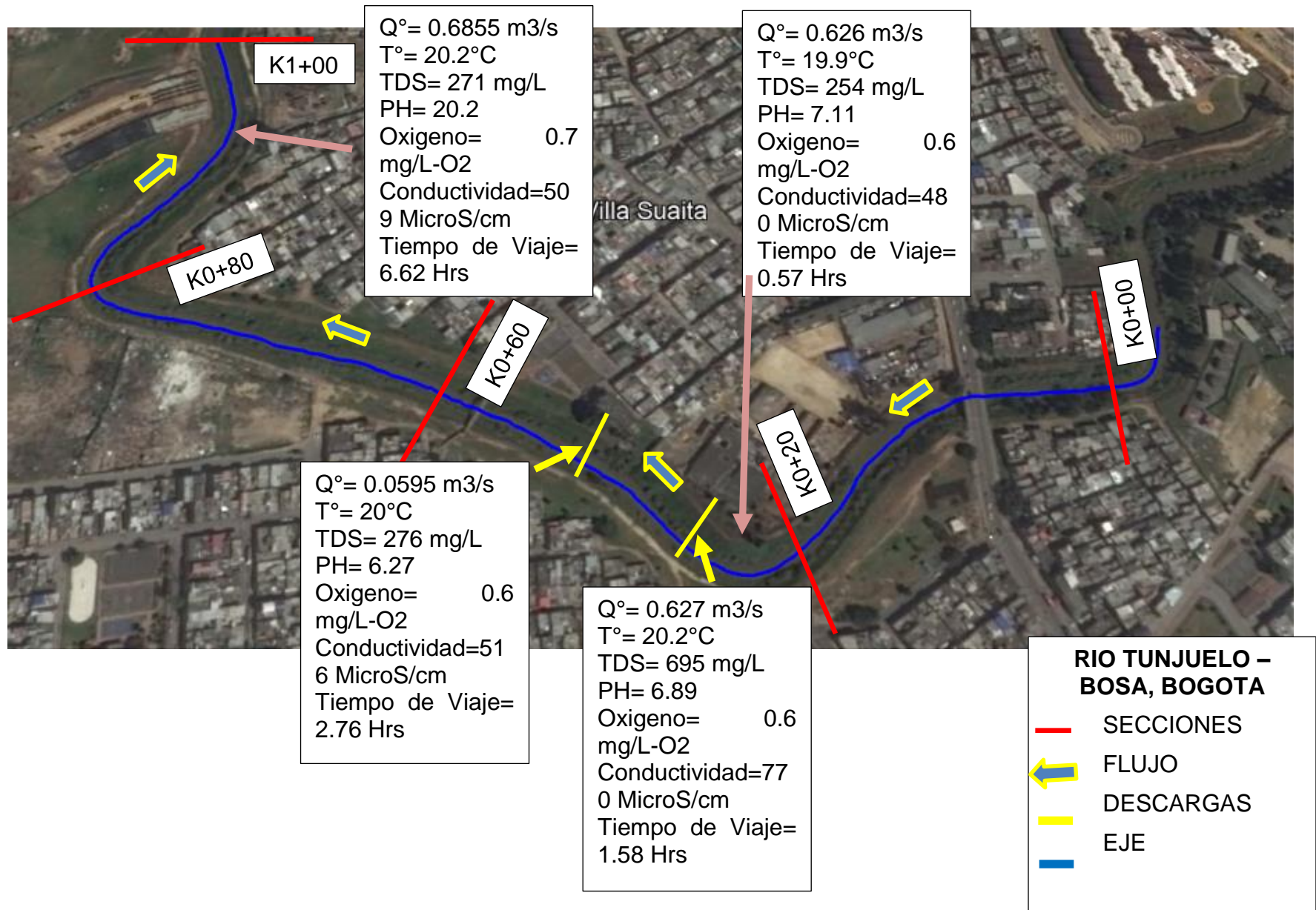
HEC-RAS Plan: Plan 01 River: rio tunjuelo Reach: EJE							
Reach	River Sta	Profile	Trvl Tme Avg (hrs)	Trvl Tme Chl (hrs)	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)
EJE	1000	PF 1	5.6303	5.6201	0.6260	546.0100	547.7120
EJE	900	PF 1	4.8477	4.8400	0.6260	546.1700	547.6990
EJE	800	PF 1	4.1191	4.1138	0.6260	546.2900	547.6840
EJE	700	PF 1	3.4341	3.4308	0.6260	546.1800	547.6650
EJE	600	PF 1	2.7633	2.7619	0.6573	546.2810	547.6460
EJE	500	PF 1	2.0387	2.0386	0.6573	546.0600	547.6310
EJE	400	PF 1	1.5778	1.5778	0.6855	546.6200	547.6000
EJE	300	PF 1	1.1453	1.1453	0.6855	545.9600	547.5540
EJE	200	PF 1	0.5710	0.5710	0.7245	546.1400	547.5270
EJE	100	PF 1	0.0000	0.0000	0.7245	546.0000	547.5000

Fuente: Elaboración propia

Por defecto para este paso de la estimación de los tiempos de viaje HEC-RAS realiza una serie de 20 iteraciones para cada una de las abscisas de la sección del río hasta ajustar la respuesta a una solución acorde para las condiciones de flujo modeladas, sin embargo el software en su algoritmo realiza una comparación entre la velocidad crítica con el menor error en las iteraciones interpretando que las pendientes longitudinales del cauce son casi despreciables, de esta forma cuando se mencionaba que el software hace un análisis plano de las ecuaciones se refiere a una interpretación unidimensional por la cual la herramienta maneja únicamente la componente de la velocidad que va la dirección del flujo descartando manejar las otras dos componentes vectoriales de la velocidad de flujo²⁹.

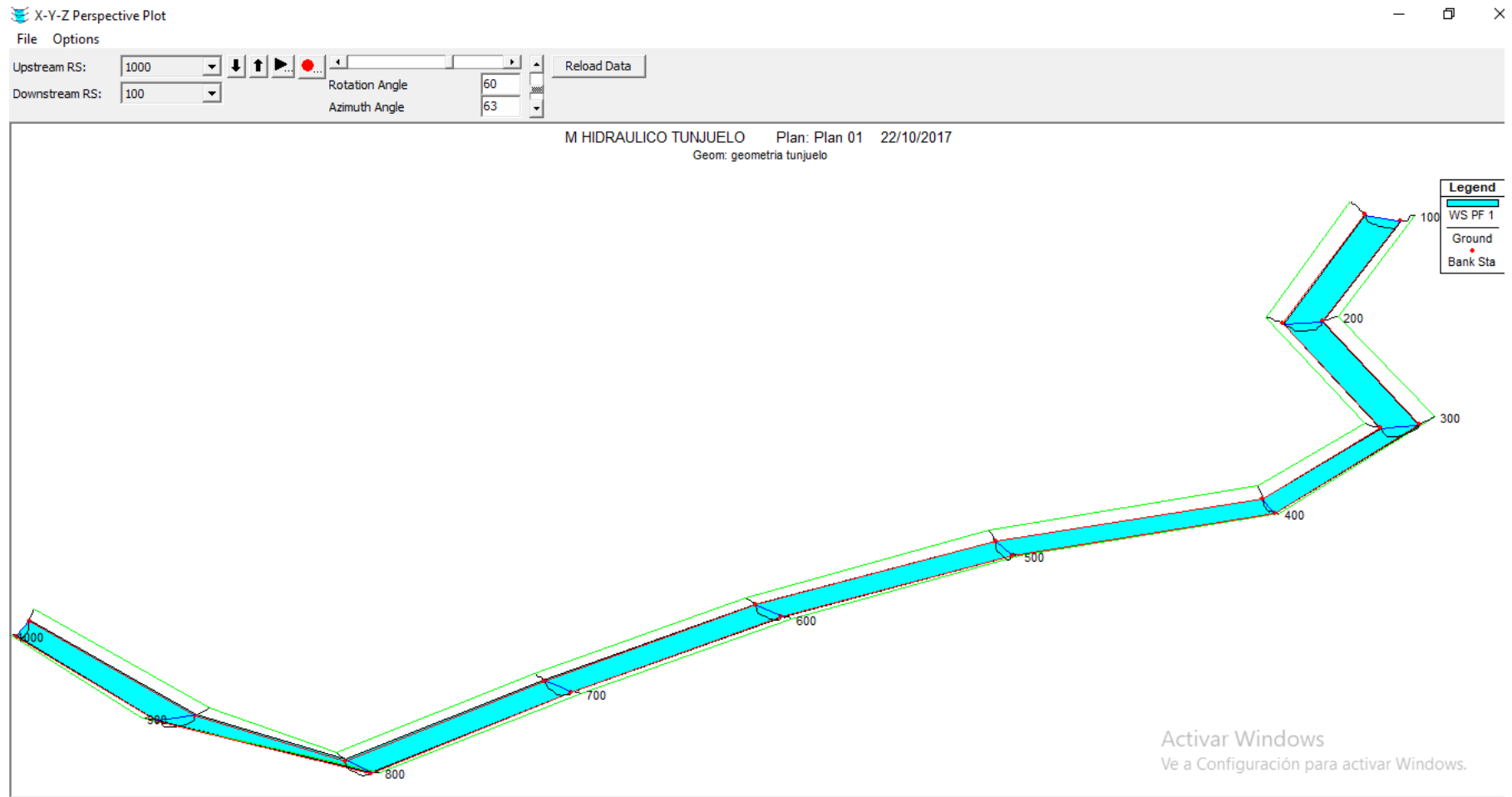
²⁹ us army corps of engineers. 2016. us army corps of engineers. us army corps of engineers. [En línea] febrero de 2016. [Citado el: 02 de octubre de 2017.] <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Esquema n° 4 Representación conceptual de la caracterización hidráulica y de los parámetros de calidad en el tramo de estudio (producción propia)



Fuente: Elaboración propia

Imagen n° 18 Corrida del modelo hidráulico para el tramo de estudio (producción propia)



Fuente: Elaboración propia

12.2 MODELACIÓN DE CALIDAD MEDIANTE QUAL2K

El objeto del proceso de modelación de calidad es aportar un criterio que nos permita evaluar las capacidades auto depurativas del río y junto con ella las condiciones actuales del cauce frente a las normativas referenciadas en esta investigación para proponer decisiones u observaciones acordes a las conclusiones de la modelación que permitan gestionar de una manera adecuada los procesos de descarga o el manejo ambiental del cauce hídrico, la forma en la que se mueven los contaminantes a través de la corrientes es de una manera dinámica, este tipo de fenómenos en la actualidad se han podido estudiar de una manera más detallada y a nivel colombiano encontramos un referente bibliográfico muy importante para esta investigación el cual es la publicación del ingeniero Carlos Alberto Ramírez Sierra³⁰ en esta obra se detalla cada uno de los procesos y variables involucradas en el transporte de cargas contaminantes en el agua. En la actualidad y como parte del desarrollo tecnológico en el campo de la ingeniería se han producido una gran variedad de aplicativos computacionales basados en los modelos matemáticos de los fenómenos estudiados por esta disciplina como los que se han empleado a lo largo de esta investigación y para la valoración los parámetros calidad se usara una herramienta tecnológica más, QUAL2K es un aplicativo computacional para la simulación de las condiciones de calidad en cuerpos de agua superficial, el software fue desarrollado por el ingeniero Steven C. Chapra para la agencia de protección ambiental de estados unidos, se basa de igual forma que HEC-RAS en una interpretación plana de las componentes vectoriales para el movimiento de los contaminantes teniendo solo en cuenta aquellas que vayan en la dirección del flujo sin limitar la cantidad de vertimientos los cuales se deseen modelar y ajustándose a la ecuación de advección-dispersión³¹.

$$V \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial (A_c E \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial (A_c U C)}{\partial x} dx + KV \frac{dc}{dt} + s$$

- V : es el volumen de agua contenido en el segmento
- c : concentración del determinante de calidad del agua analizado
- A_c : el área de la sección transversal del segmento
- E : coeficiente de dispersión longitudinal
- U : velocidad media del flujo

³⁰ Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

³¹ Castro Huertas, Mayra Andrea. 2015. *APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA*. manizales : s.n., 2015.

- K : tasa cinética de primer o segundo orden
- s : sumideros externos

Todo esto montado en la interface de un libro de Excel. El modelo se usó debido a la facilidad con la que contempla los parámetros contaminantes más convencionales y que han sido determinados en uno de los capítulos de este proyecto ajustándose a la normatividad propuesta a seguir ³².

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- PH
- Conductividad
- Oxígeno disuelto (OD)

En total el modelo nos permite la simulación de 18 variables involucradas en el transporte de cargas contaminantes, sin embargo, para este proyecto se consideraron los parámetros ya mencionados ya que nos dan una noción cercana a las facultades de asimilación con las que cuenta la corriente del río Tunjuelo. La esquematización para realizar el modelo consistió en definir las características geométricas e hidráulicas de la sección de estudio esto nos permite establecer las fronteras que utilizara el modelo para la simulación de calidad, de esta manera haciendo uso del modelo de terreno apreciamos que el vertimiento y la conexión errada están ubicados en las abscisas **k0+400** y **k0+600** respectivamente, estas serán las fronteras internas del modelo, las fronteras externas serán definidas por los dos puntos de monitoreo que fueron ubicados en las abscisas **k0+200** la cual corresponde a la entrada del sistema (headwater) y **k1+000** la que es la salida del sistema, esto con el propósito de tener una longitud adecuada para percibir el fenómeno de transporte de los contaminantes durante su recorrido a lo largo de la sección, acá el modelo considera la forma en la que la corriente realiza los procesos propios de re-aireación durante el movimiento del agua en el cauce, además QUAL2K al considerar cada uno de los tramos con los que es alimentado el modelo, realiza un balance de componentes hidráulicos, de temperatura y de masa para ajustarse a las condiciones de flujo permanente para las que se está realizando la modelación.


³²Chapra Steve, Pelletier Greg y Tao Hua 2008. College of Engineering. *College of Engineering*. [En línea] 16 de diciembre de 2008. [Citado el: 11 de abril de 2017.] http://www.ecs.umass.edu/cee/reckhow/courses/577/Qual2/Q2KDocv2_11b8%20v211.pdf.

12.2.1 Parámetros de alimentación del modelo

El libro sobre el cual está montado el software cuenta con una serie de hojas de cálculo donde se discriminan cada una de las condiciones que hacen parte del modelo y una hoja principal donde se realiza una breve descripción del proyecto a modelar, básicamente la distribución se ciñe por un código de color para las hojas de cálculo, las celdas azules corresponden a las variables de diseño y los valores de los parámetros que deben ser ingresados por el usuario, las celdas amarillas son los datos medidos en campo, estos datos posteriormente se muestran en las gráficas generadas por el modelo, las celdas verdes corresponden a los resultados del modelo y por ultimo las celdas de color oscuro se usan para títulos o nomenclatura las cuales no deben cambiarse ya que hace parte del algoritmo propio de modelación³³.

Imagen n° 19 Interfaz del modelo QUAL2K para el rio Tunjuelo

QUAL2K FORTRAN
Stream Water Quality Model
Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier
Version 2.12b1



System ID:	
River name	RIO TUNJUELO
Saved file name	RIO
Directory where file saved	C:\PROGRAMA
Month	10
Day	22
Year	2017
Local time hours to UTC	5
Daylight savings time	Yes
Calculation:	
Calculation step	0.1 hours
Final time	2 day
Solution method (integration)	Euler
Solution method (pH)	Brent
Time zone	Ural Mountains, Russia
Program determined calc step	0.093750 hours
Time of last calculation	0.13 minutes
Time of sunrise	11:41 AM
Time of solar noon	5:44 PM
Time of sunset	11:47 PM
Photoperiod	12.11 hours

Open Old File

Run Fortran

Fuente: Elaboración propia

Cuando QUAL2K haya sido alimentado con todos los parámetros se hace uso del botón "run fortran" el cual correrá el algoritmo programado para el libro de Excel y como resultado arrojará los modelos en una serie de graficas asociadas a los parámetros de las hojas mencionadas anteriormente, de esta manera se podrá hacer una comparación entre las curvas de los datos de laboratorio con las estimaciones realizadas por el modelo.

³³Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

Como ya se han definido las condiciones de frontera con el modelo de terreno, se cuentan con los datos de calidad medidos experimentalmente, y se realizó la simulación hidráulica correspondiente al tramo de estudio se puede dar inicio al proceso de alimentación del modelo, para definir los valores de los parámetros de calidad, cabe hacer la aclaración que QUAL2K segrega de dos formas el parámetro correspondiente a la demanda de oxígeno llamándolas “BODfast” la cual corresponde a la cantidad de di-oxígeno para degradar materia orgánica más rápidamente y “BOD slow” corresponde a la cantidad de di-oxígeno para degradar materia orgánica más difícil de digerir por los agentes bacterianos, conforme a las medidas que se tomaron en laboratorio y puesto a que estos parámetros tienen un tiempo de ocurrencia mayor a los 20 días y por cuestión de presupuesto, las medidas se proporcionan a los parámetros de DBO5 Y DQO para la corrida del modelo ³⁴.

12.3 CALIBRACIÓN HIDRÁULICA DEL MODELO

En esta instancia hacemos uso del modelo hidráulico de HEC-RAS realizado en el subcapítulo 12.1 donde se construyeron las curvas de capacidad para las secciones de estudio, aquí se ajustan los factores correspondientes a la velocidad media de flujo, el tipo de flujo, la profundidad, el ancho de la zona mojada, la ronda del río y los tiempos de viaje en relación con el proceso de transporte e influencia de los parámetros de calidad descritos anteriormente, esto le permite evaluar al modelo un periodo para la degradación de los contaminantes y como la morfología del terreno influye en las propiedades del tramo para oxigenar estos contaminantes y contribuir a este proceso de degradación, a continuación se mencionan las 8 curvas potenciales para la calibración que corresponde a la profundidad y velocidad media junto a la sección correspondiente ³⁵.

Tabla n° 13 Curvas de calibración hidráulica para las cuatro secciones modeladas

abscisa	curva potencial de profundidad	curva potencial de velocidad
k1+000	$y = 2.0161x^{0.4039}$	$y = 0.044x^{0.4345}$
k0+600	$y = 1.6279x^{0.52}$	$y = 0.0483x^{0.3574}$
k0+400	$y = 1.1025x^{0.8879}$	$y = 0.0961x^{0.1432}$
k0+200	$y = 1.6256x^{0.5481}$	$y = 0.0589x^{0.2425}$

Fuente: Elaboración propia

³⁴Castro Huertas, Mayra Andrea. 2015. APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA. manizales : s.n., 2015.

³⁵ Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. calidad del agua evaluacion y diagnostico. medellin : ediciones de la U, 2011.

Imagen n° 20 Alimentación de las constates hidráulicas

QUAL2K Stream Water Quality Model RIO TUNJUELO (10/22/2017) Reach Data:																
Open Old File Run Fortran																
Reach for diel plot	Element for diel plot	Reach Number	Headwater Reach	Reach length (km)	Downstream Latitude	Downstream Longitude	Upstream (km)	Downstream (km)	Element Number	Hydraulic Model (Weir Overrides Manning Formula; Rating Curves)						
Label	Downstream end of reach label									Width (m)	adam	bdam	Velocity Coefficient	Exponent	Depth Coefficient	Exponent
TRAMO 1		1	Yes	400.00	0.00	0.00	1000.000	600.000	>=1	10	1.2500	0.9000	0.0440	0.434	2.0600	0.548
TRAMO 2		2		200.00	0.00	0.00	600.000	400.000	10	1.2500	0.9000	0.0480	0.357	1.6300	0.888	
TRAMO 3		3		200.00	0.00	0.00	400.000	200.000	10	1.2500	0.9000	0.0961	0.143	1.1000	0.590	
TRAMO 4		4		200.00	0.00	0.00	200.000	0.000	10	1.2500	0.9000	0.0590	0.243	1.6300	0.404	

Fuente: Elaboración propia

12.4 Calibración por constates cinética

para la identificación de estos valores se tuvo en cuenta los factores de calidad que se pudieron analizar en el laboratorio, puesto que nuestra simulación es un modelo convencional y básico limitado por el tiempo y la cantidad de factores medidos, estos valores fueron tomados del manual de usuario del software³⁶ y de la obra escrita por Mayra Andrea Castro Huertas donde se realiza una clasificación que relaciona una gran cantidad de variables que hace parte del proceso de transporte en los fenómenos de advección-dispersión³⁷, por cuanto el modelo tiene estas constantes ya definidas en su instalación pero estas pueden ser ajustadas para acomodar de una mejor manera las condiciones de simulación según lo crea conveniente la persona que este alimentando el modelo, lo que se evidencio en este proceso es que algunas de esta no tenían la necesidad ser modificadas.

Tabla n° 14 Tabla de constantes cinéticas identificadas para la clase de modelo para el rio Tunjuelo

constante	abreviación	unidades	rango de calibración
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d	0 – 2
Tasa de Re aireación, descrita por la ecuación de Re aireación	Ka	1/d	por defecto del software
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación DBO- DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d	0 – 5

Fuente: Castro Huertas, Mayra Andrea. 2015. *APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA*. manizales : s.n., 2015.

³⁶Chapra Steve, Pelletier Greg y Tao Hua 2008. College of Engineering. *College of Engineering*. [En línea] 16 de diciembre de 2008. [Citado el: 11 de abril de 2017.] http://www.ecs.umass.edu/cee/reckhow/courses/577/Qual2/Q2KDocv2_11b8%20v211.pdf.

³⁷ Castro Huertas, Mayra Andrea. 2015. *APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA*. manizales : s.n., 2015.

Imagen n° 21 Constantes cinéticas calibradas en la interface QUAL2K

Parameter	Value	Units	Symbol
Stoichiometry:			
Carbon	40	gC	μC
Nitrogen	7.2	gN	μN
Phosphorus	1	gP	μP
Dry weight	100	gD	μD
Chlorophyll	1	gA	μA
Inorganic suspended solids:			
Settling velocity	2	m/d	v_s
Oxygen:			
Reaeration model	O'Connor-Dobbins		
User reaeration coefficient α	3.93		α
User reaeration coefficient β	0.5		β
User reaeration coefficient γ	1.5		γ
Temp correction	1.024		θ_r
Reaeration wind effect	None		
O ₂ for carbon oxidation	2.69	gO ₂ /gC	r_{oc}
O ₂ for NH ₄ nitrification	4.57	gO ₂ /gN	r_{on}
Oxygen inhib model CBOD oxidation	Exponential		
Oxygen inhib parameter CBOD oxidation	0.60	LmgO ₂	K_{ocf}
Oxygen inhib model nitrification	Exponential		
Oxygen inhib parameter nitrification	0.60	LmgO ₂	K_{onn}
Oxygen enhance model denitrification	Exponential		
Oxygen enhance parameter denitrification	0.60	LmgO ₂	K_{den}
Oxygen inhib model phyto resp	Exponential		
Oxygen inhib parameter phyto resp	0.60	LmgO ₂	K_{pp}
Oxygen enhance model bot alg resp	Exponential		
Oxygen enhance parameter bot alg resp	0.60	LmgO ₂	K_{ba}
Slow CBOD:			
Hydrolysis rate	0.42	1/d	k_{bc}
Temp correction	1.07		θ_{bc}
Oxidation rate	0.42	1/d	k_{bs}
Temp correction	1.07		θ_{bs}
Fast CBOD:			
Oxidation rate	0.084	1/d	k_{fs}
Temp correction	1.07		θ_{fs}

Fuente: Elaboración propia

12.5 Condiciones meteorológicas para la alimentación del modelo

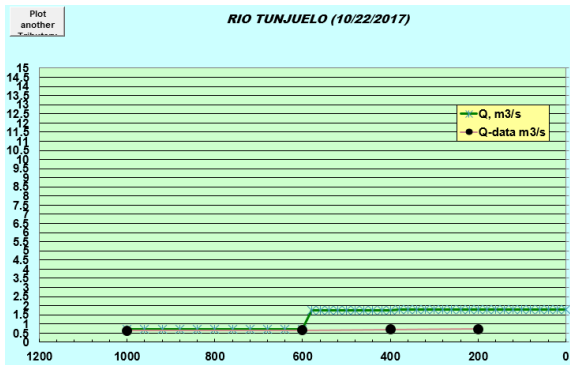
La simulación de temperatura del agua que realiza el software requiere el ingreso de datos climáticos propios de la zona de estudio que tienen una influencia directa en modelo de calidad, para el tramo del río Tunjuelo se referenciaron medidas de radiación solar, velocidad del viento, temperatura, sombra y porcentaje de nubosidad extraídos del instituto hidrología meteorología y estudios ambientales de Colombia (IDEAM) los cuales se encuentran la sección de anexos.

12.6 Ejecución del modelo de calidad

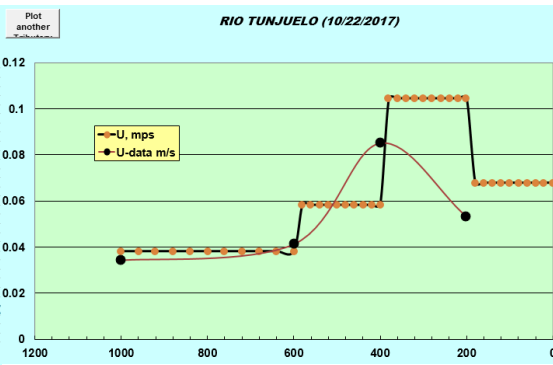
En este subcapítulo prestamos los resultados producto de la implementación del software QUAL2K ya habiéndose corrido, una vez ingresados todos los factores medidos y que el modelo nos solicita, la información es suministrada mediante las gráficas electrónicas propias de la interface de Excel con un formato de identificación para cada uno de los parámetros que permite simular el software, por tanto solo se tienen en cuenta las etiquetas correspondiente a los factores que hicieron parte de las visitas de campo y los ensayos de laboratorio, cada una de las gráficas provee información del factor de campo y el factor modelado en el eje (Y) y de las abscisas a lo largo del tramo en el eje (X).³⁸

³⁸ Ramirez, Carlos Alberto Sierra. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011

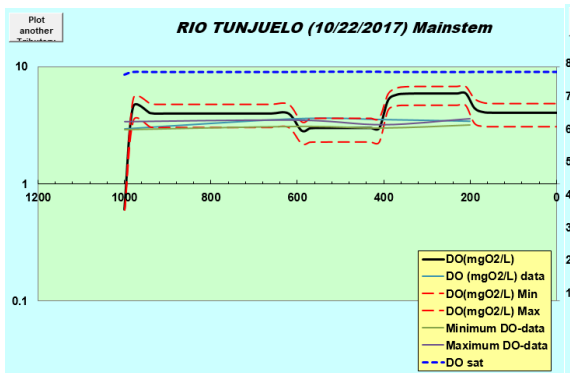
Grafica n° 3 Modelo de flujo grafica



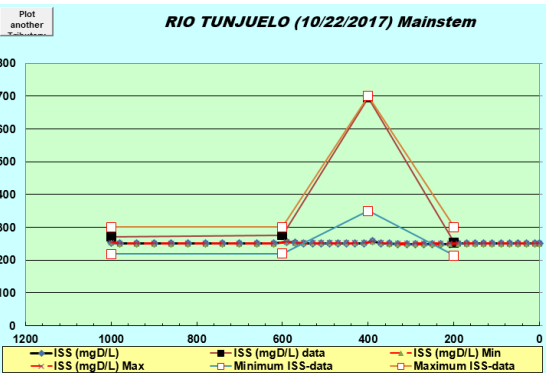
Grafica n° 4 Modelo de velocidad media



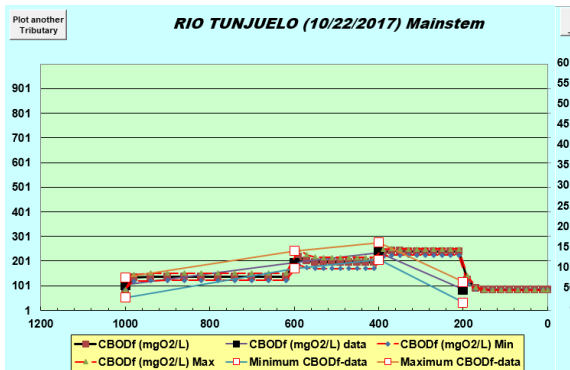
Grafica n° 5 Modelo de oxigeno



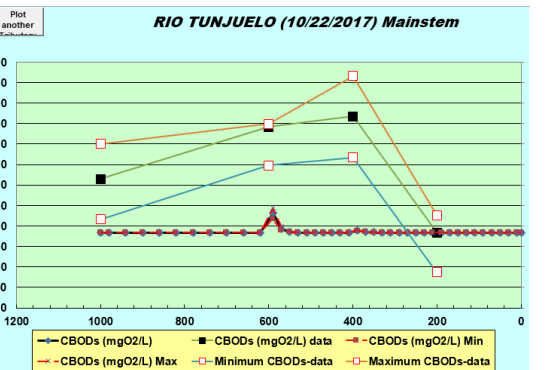
Grafica n° 6 Modelo de solidos suspendidos totales



Grafica n° 7 Modelo de DBO5

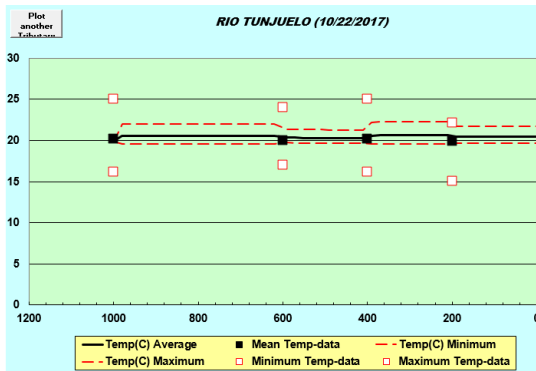


Grafica n° 8 Modelo de DQO

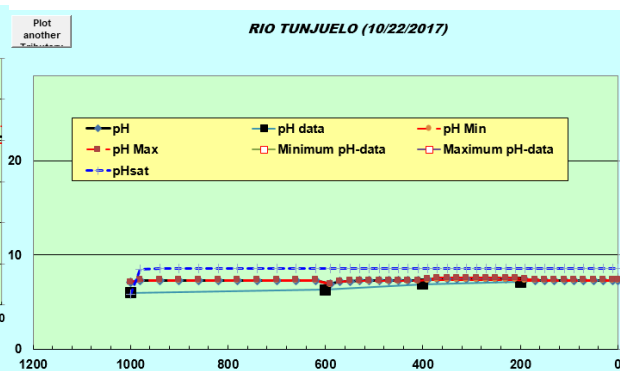


Fuente: gráficos de elaboración propia

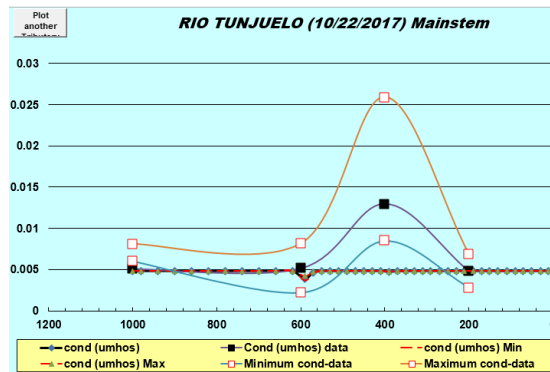
Grafica n° 9 Modelo de temperatura



Grafica n° 10 Modelo de PH



Grafica n° 11 Modelo de conductividad



Fuente: gráficos de elaboración propia

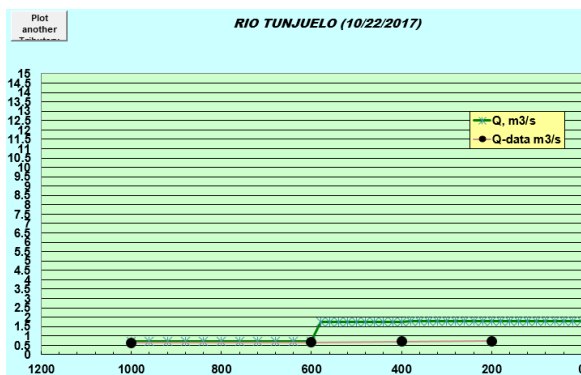
- **Para el parámetro de caudal:** En el flujo simulado por el modelo se alimentaron los datos correspondientes a cada uno de los puntos de control monitoreados (**k0+200, k0+400, k0+600 y k1+000**), apreciamos como los datos simulados se ajustan las condiciones reales encontradas en el campo percibiendo un aumento en el flujo en el punto donde se realiza la descarga del vertimiento que allí se ha encontrado, sin embargo los aportes que realiza la conexión errada el modelo los asume como mínimos y casi despreciables por la tendencia de flujo que nos muestra la gráfica. Para los datos alimentados se percibe un desajuste respecto a los modelados ya que el flujo lo considera constante en toda la sección de estudio.
- **Parámetro de velocidad:** respecto a las condiciones de velocidad para las abscisas el modelo nos enseña una tendencia creciente a partir de la abscisa del vertimiento hasta llegar al punto de la descarga donde la velocidad tiende a decrecer, los datos alimentados tienden a seguir el mismo comportamiento y esto lo podemos explicar por las condiciones batimétricas de los abscisado ya que en las visitas de campo era apreciable como el ancho de la zona mojada aguas abajo aumentaba.

- **Parámetro de oxígeno disuelto:** acá percibimos como los datos de alimentación y los modelados siguen un mismo comportamiento únicamente donde se realiza el vertimiento se presenta una baja en las cantidades de oxígeno disuelto en el agua del río.
- **Parámetro sólidos suspendidos totales(SST):** la magnitud de este parámetro en los datos de alimentación se encontró en un rango de (400-600 mg) por cuestiones de calibración el modelo conserva una concentración de sólidos promedio a lo largo del tramo de análisis.
- **Parámetro de DBO5:** la demanda bioquímica de oxígeno en los muestreos nos arroja una carga de una magnitud considerable para los datos de alimentación en el segmento donde se encuentra el vertimiento junto con la conexión errada, en los datos del modelo y los datos de alimentación se muestra un incremento en este parámetro hasta el último punto de descarga a partir de este se genera una dispersión de estos valores para el modelo y los datos de laboratorio.
- **Parámetro de DQO:** según el modelo lo agentes bacterianos necesitan unas consideraciones promedio con un pico para la degradación de materia orgánica, mientras que los valores de alimentación tienen una variación considerable a lo largo de los abscisados respecto a los datos arrojados del modelo.
- **Modelo de temperatura:** sobre la temperatura tanto el modelo como los datos de alimentación nos dan un rango medio acorde a las medidas de campo hechas.
- **Modelo de PH:** la acidez del agua no muestra algún tiempo de variación respecto al modelo donde se ubica un valor cercano al neutro, pero con tendencia ácida mientras que los datos de alimentación tienen un valor en la entrada del sistema neutro que converge con los valores del modelo a la salida del sistema.
- **Modelo de conductividad:** los valores del modelo y los datos de alimentación tienen la misma tendencia en tres de los cuatro puntos del abscisado excepto en la zona donde se encuentra la conexión errada que descarga en la ronda del río.

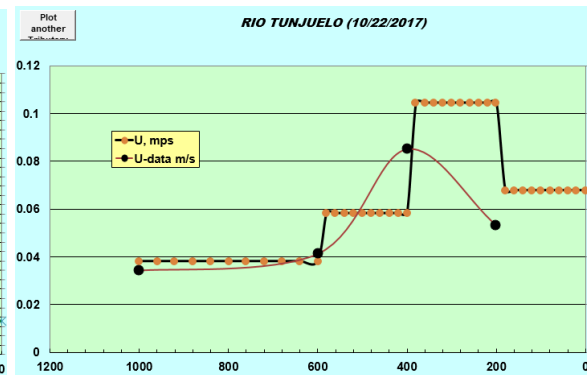
12.7 Simulación de ambiente de control

QUAL2K tiene la facultad describir distintas interpretaciones de la calidad del fuente hídrica mediante la modificación de algunos parámetros respecto al modelo inicial, el ejercicio de comparación de los ambientes de calidad en una condición optima respecto a los datos modelados actualmente nos permite valorar como debería ser el comportamiento de los parámetros medidos para alcanzar una condición adecuada de calidad ³⁹, por tal motivo se planifica en esta parte ver como sería la operación del tramo si instalara algún tipo de tratamiento que mejorase las condiciones con las que el agua es descargada en los dos puntos encontrados en la zona de estudio, las problemáticas propias de esta descarga a parte de las condiciones de calidad es la generación de malos olores y la implementación del ambiente de simulación tendrá una influencia en las problemáticas que se desprenden de los vertimientos existentes. Para ello se ajustaron los valores de los parámetros en el modelo inicial de calidad para las dos fronteras hidrogemétricas internas donde se encuentran los puntos que descargan las aguas residuales, estos valores están ajustados a los límites permisibles para vertimientos expedidos en la resolución 631 de 2015 por el ministerio de medio ambiente los cuales fueron referenciados en este documento, a continuación se presentan los resultado de la modelación bajo el ambiente de simulación anteriormente descrito:

Grafica n° 12 Modelo de caudal ambiente

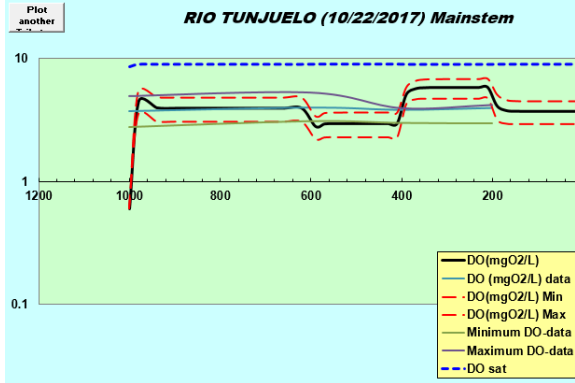


Grafica n° 13 Modelo de velocidad ambiente

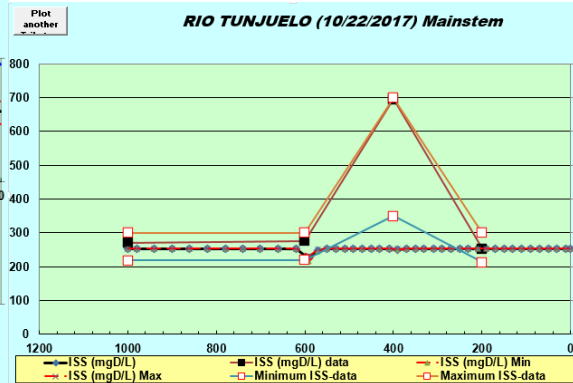


³⁹ Huertas, Mayra Andrea Castro. 2015. APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA. manizales : s.n., 2015.

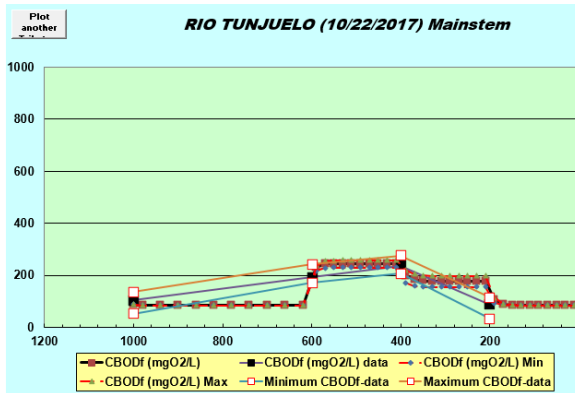
Grafica n° 14 Modelo de OD ambiente



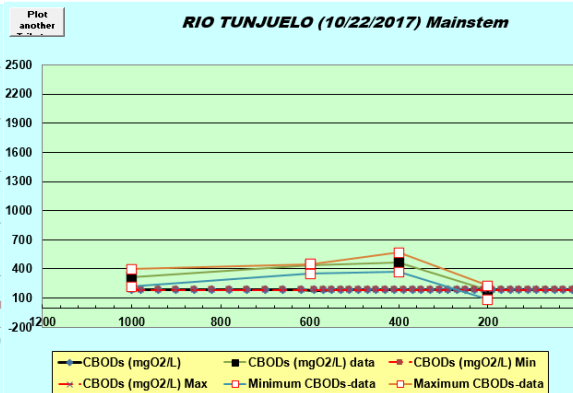
Grafica n° 15 Modelo de SST ambiente



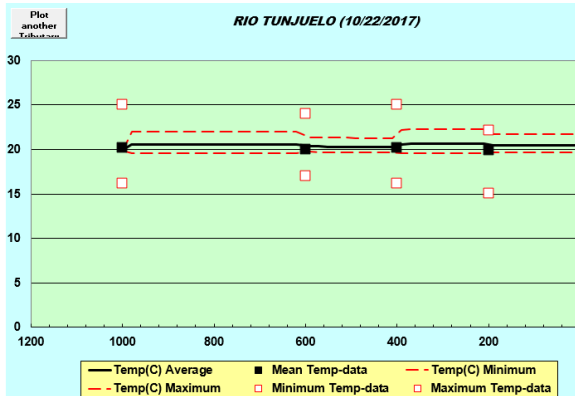
Grafica n° 16 Modelo de DBO5 ambiente



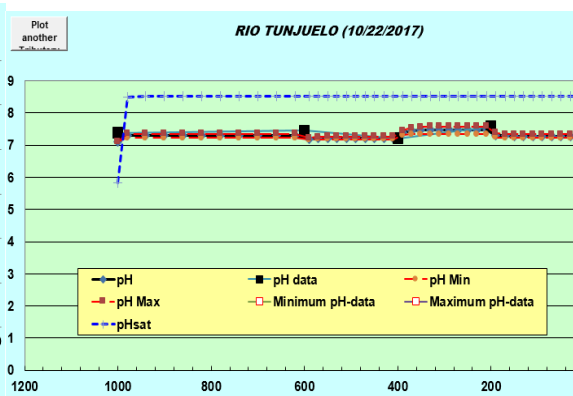
Grafica n° 17 Modelo de DQO ambiente



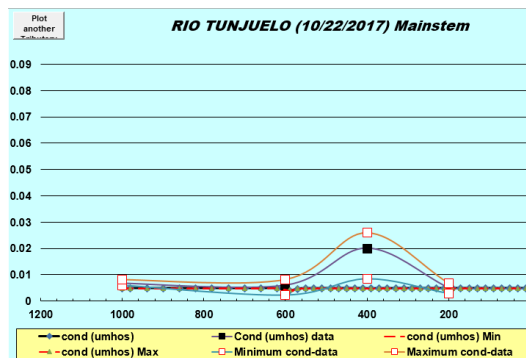
Grafica n° 18 Modelo de temperatura ambiente



Grafica n° 19 Modelo de PH ambiente



Grafica n° 20 Modelo de conductividad ambiente



Fuente: gráficos de elaboración propia

- **Para el parámetro de caudal:** para el flujo simulado por el modelo se alimentaron los datos correspondientes a cada uno de los puntos de control monitoreados (**k0+200, k0+400, k0+600 y k1+000**), apreciamos como los datos simulados se ajustan las condiciones reales encontradas en el campo percibiendo que las condiciones de flujo no se desajustan del modelo para las condiciones actuales.
- **Parámetro de velocidad:** en las condiciones de velocidad no se perciben variación respecto al modelo de condiciones actuales ya que el caudal va ligado al flujo.
- **Parámetro de oxígeno disuelto:** en este punto podemos observar el aumento de las concentraciones de oxígeno con una tendencia que converge con la del modelo al salir del sistema modelado.
- **Parámetro solidos suspendidos totales(SST):** para el ambiente el pico simulado por el software es negativo mostrando una disminución en la cantidad de carga de solidos que se mueven a través del sector de estudio, pero particularmente los datos de alimentación tienen el mismo comportamiento de estos mismos datos en el modelo de condiciones actuales.

- **Parámetro de DBO5:** para la simulación del ambiente es apreciable como las concentraciones de este parámetro aumentan en el vertimiento directo, pero caso contrario a las condiciones actuales los valores en la abscisa de la conexión errada disminuyen para los datos modelados y los de alimentación.
- **Parámetro de DQO:** el parámetro se ajusta y converge en los mismos puntos respecto al modelo de condiciones actuales.
- **Modelo de temperatura:** sobre la temperatura tanto el modelo como los datos de alimentación nos dan un rango medio acorde a las medidas de campo hechas y no se desajustan de del modelo de condiciones actuales.
- **Modelo de PH:** para las condiciones de acides el ambiente nos presente una variación de PH cambiando y moviéndose entre un valor neutro y básico.
- **Modelo de conductividad:** la relación de la propiedad del agua para conducir electricidad a través de ella no varía en el ambiente de simulación respecto a la modelación de las condiciones actuales.

13. DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AGUA E IMPLEMENTACIÓN DEL ICA

Los procesos modelativos y la campaña de monitoreo realizada al sector han permitido a los autores estar en contacto directo con la zona donde se ha realizado la investigación y parte de su comunidad, la importancia de estas actividades realizadas radica en la detección, registro y actualización de los cambios en el recurso hídrico, de esta manera es posible dejar una herramienta en este proyecto para una futura toma de decisión frente a la problemática tratada para el mejoramiento de la gestión de una fuente de agua tan importante para la comunidad de Bosa como lo es el río Tunjuelo. La valoración que pódeme realizar respecto a los procesos realizados a lo largo de este proyecto se realizara mediante la implementación de un índice de calidad del agua (ICA), para el año 2010 se realizó el estudio nacional del agua donde se analizaron temas de integralidad, ciclos y procesos de agua en el territorio nacional, parte de este análisis se enfocó específicamente en la calidad del agua de cuerpos superficiales ⁴⁰, para esto el estudio nos habla o considera una medida adicional mediante un número y un patrón que según las cargas contaminantes registre las condiciones del río en una escala, esta medida descrita es el índice de calidad del agua o (ICA) el cual es una herramienta que ha sido seleccionada para hacer la última valoración de río Tunjuelo puesto que sintetiza la información suministrada por los modelos que se han realizado a lo largo de este proyecto, puesto que estas medidas en su inicios fueron adoptadas para hacer una clasificación y a nivel mundial existen gran variedad de modelos que hace uso de una igual variedad de parámetros de análisis, se optó por implementar el estándar propuesto por el IDEAM y el estudio nacional del agua, por cuestiones de limitación se realizala implementación de cuatro variables de medición para la estimación del ICA.

Tabla n° 15 Ventajas y desventajas de los ICA

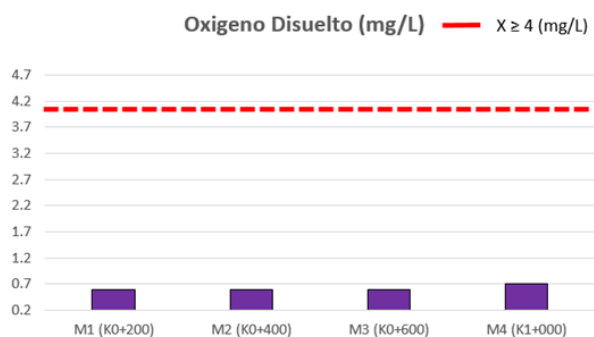
ventajas	limitaciones
Permite mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua.	Proporcionan un resumen de los datos.
Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio.	No proporcionan información completa sobre la calidad del agua.
Permiten a los usuarios una fácil interpretación de los datos	No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua
Permiten priorizar para evaluaciones de calidad del agua más detalladas	Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación.
Ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión.	Se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal.

Fuente: Patricia Torres, Camilo Hernán Cruz; revista de ingeniería de la universidad de Medellín, 2009

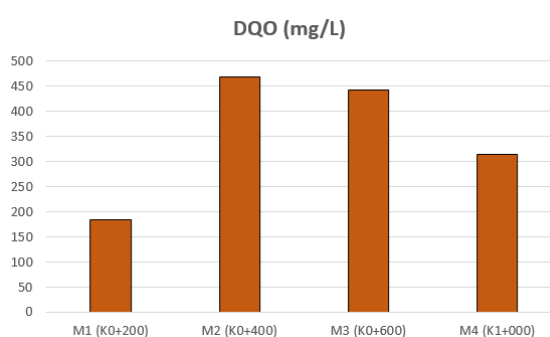
⁴⁰ Orjuela Luz Consuelo, Saldarriaga Gabriel, García Martha, Wilches Hernando. 2010. *estudio nacional de agua, capítulo 6 calidad del agua superficial en Colombia*. Bogota : instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia, 2010.

Según cita Luz Consuelo Orjuela⁴¹ en el estudio nacional del agua para la construcción del ICA se usan los parámetros de carga contaminante más representativos, los cuales fueron medidos y modelados a lo largo de esta investigación para las condiciones actuales del tramo de estudio del río Tunjuelo y para un ambiente de simulación que supone unas condiciones ideales de vertimientos en los puntos de descarga presentes en el tramo, por tanto nos sugieren contar con las medidas de: DQO, SST, OD, PH y conductividad eléctrica. A continuación, se grafican las concentraciones de los parámetros para la estimación ICA correspondiente al estado actual del tramo de estudio y tomados del modelo de calidad.

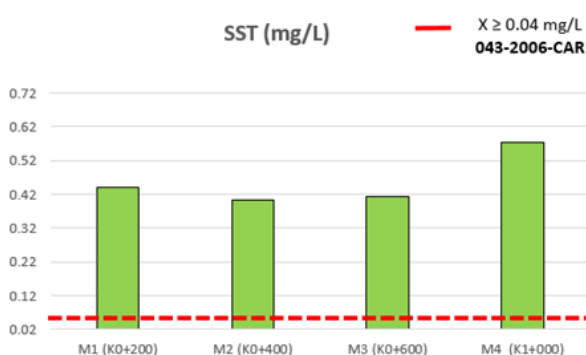
Grafica n° 21 concentración de oxígeno disuelto



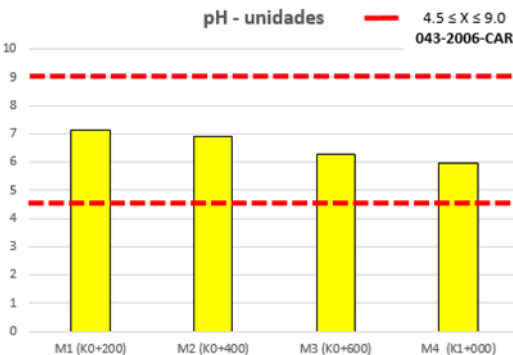
Grafica n° 22 concentración de DQO



Grafica n° 23 concentración SST



Grafica n° 24 concentración de PH



Fuente: Elaboración propia

⁴¹Orjuela Luz Consuelo, Saldarriaga Gabriel, García Martha, Wilches Hernando. 2010. estudio nacional de agua, capítulo 6 calidad del agua superficial en Colombia. Bogota : instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia, 2010.

13.1 Construcción de los indicadores para los parámetros y cálculo del ICA

La construcción se trata de discriminar las 5 variables consideradas en una expresión simplificada de una sumatoria a la cual se le realiza una ponderación, para esto según el estudio nacional del agua ⁴²se establecen las relaciones funcionales correspondientes para el cálculo de los indicadores correspondientes a cada parámetro en un rango 0.00 a 1.00. A continuación, se enmarcan las relaciones para las variables consideradas:

- **oxígeno disuelto**

Si el porcentaje de saturación de oxígeno es menor o igual a 100%

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * PS_{OD})$$

Si el porcentaje de saturación de oxígeno es mayor igual a 100%

$$I_{OD} = 1 - (0.01 * PS_{OD} - 1)$$

- **demanda química de oxígeno**

Para la cual se realiza una interpolación aritmética respecto a las tablas indicadas.

$$I_{DQO} = 0.556 - 2.2910^{-4} DQO$$

Tabla n° 16 Rangos para las medidas de DQO para cálculo del indicador

DQO	I _{DQO}
0	0.91
20	0.91
20.0001	0.71
25	0.71
25.0001	0.51
40	0.51
40.0001	0.26
80	0.26
80.0001	0.125
2000	0.125

Formula	I _{DQO}
Si DQO <= 20	0.91
Si 20 < DQO <= 25	0.71
Si 25 < DQO <= 40	0.51
Si 40 < DQO <= 80	0.26
Si DQO > 80	0.125

⁴² Orjuela Luz Consuelo, Saldarriaga Gabriel, García Martha, Wilches Hernando. 2010. estudio nacional de agua, capítulo 6 calidad del agua superficial en Colombia. Bogota : instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia, 2010.

- **conductividad**

Si CE es menor que 0 $I_{CE} = 0$

Si CE es mayor que 0 $I_{CE} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \log_{10} CE)}$

- **PH**

Para este parámetro el estudio nacional de agua nos define las siguientes condiciones.

Tabla n° 17 Relaciones funcionales para el parámetro de PH

Condición	Ecuación de calculo
Si pH < 4	$I_{pH} = 0.1$
Si 4 <= pH <= 7	$I_{pH} = 0.02628419 * e^{(pH * 0.520025)}$
Si 7 < pH <= 8	$I_{pH} = 1$
Si 8 < pH <= 11	$I_{pH} = 1 * e^{[(pH-8) - 0.5187742]}$
Si pH > 11	$I_{pH} = 0.1$

Finalmente se toman los indicadores y se calcula el valor numérico que será clasificado según un patrón de color para la siguiente expresión:

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n W_i I_{ikjt}$$

Tabla n° 18 Descriptores para presentar el aplicativo del ICA (Orjuela Luz Consuelo, 2010)

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 - 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 - 0,50	Mala	Naranja
0,51 - 0,70	Regular	Amarillo
0,71 - 0,90	Aceptable	Verde
0,91 - 1,00	Buena	Azul

El oxígeno disuelto y la demanda química de oxígeno son parámetros que comprende la capacidad que tiene el río de re-aireación lo que implica un procesos oxidativo y degenerativo de la carga contaminante, los valores aceptables de oxígeno en los cuerpos de agua superficial ronda el orden del 70%, notoriamente para las condiciones de simulación los valores no alcanzaron este tope ni en las condiciones actuales. Respecto a los valores de acides estos se vieron afectados por los vertimientos, aunque estos también se ven afectada por las condiciones minerales del tramo de estudio. La temperatura del cuerpo de agua se ve afectada más por cuestiones climatológicas de la zona y por último la conductividad se genera por la presencia de las sales formadas en la corriente o que pueden venir propiamente de los vertimientos ⁴³. Según la ecuación que presenta el IDEAM el índice se calcula para cada una de las secciones modeladas, sin embargo, para hacer una valoración general del tramo se tomó un promedio que nos mostrara el índice correspondiente al tramo, en las siguientes tablas se muestran los valores del índice de calidad del agua estimados para las condiciones actuales y el ambiente de simulación de vertimientos óptimo:

Tabla n° 19 Ilustración de los indicadores y valor del ICA calculado para las condiciones actuales

Variable	Símbolo	Unidad de medida	Ponderación	Valor del indicador
Oxígeno Disuelto	OD	% Saturación	0.2	0.09
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	0.2	0.125
Conductividad Eléctrica	CE	mS/cm	0.2	0.99
pH	pH	Unidades de pH	0.2	1
Calificación del ICA				0.44
Señal de alerta				mala

Tabla n° 20 Ilustración de los indicadores y valor del ICA calculado para las condiciones actuales

Variable	Símbolo	Unidad de medida	Ponderación	Valor del indicador
Oxígeno Disuelto	OD	% Saturación	0.25	0.38
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	0.25	0.51
Conductividad Eléctrica	CE	mS/cm	0.25	0.99
pH	pH	Unidades de pH	0.25	1
Calificación del ICA				0.5651
Señal de alerta				regular

⁴³ Orjuela Luz Consuelo, Saldarriaga Gabriel, García Martha, Wilches Hernando. 2010. estudio nacional de agua, capítulo 6 calidad del agua superficial en Colombia. Bogota : instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia, 2010.

14. CONCLUSIONES

Se realizó una calibración de la modelación hidráulica mediante la toma de la medida de la lámina de agua la cual nos dio una dispersión del orden de magnitud 0.07 m respecto al modelo hidráulico corrido, esta es una desviación aceptable y por ende el modelo corresponde a las condiciones de campo.

Aunque ninguno de los cuatro puntos de control y muestreo se excede en el rango de PH permitido para un cuerpo de agua superficial, tanto para el afluente como para los puntos de vertimientos, esta condición fue el único parámetro que durante los análisis de laboratorio se ajustó a las dos normas usadas para esta investigación (acuerdo 043 de 2006 de la CAR y resolución 631 de 2015 del ministerio de medio ambiente).

Durante el proceso de modelación en el ambiente de simulación y en las condiciones actuales fue evidente que para el tramo analizado era necesario discretizar aún más las secciones para que el proceso de calibración de las constantes cinéticas fuese óptimo y así los valores de alimentación se ajustaran los del modelo.

En el análisis de las condiciones encontradas se pudo observar que los parámetros se delimitaron en la zona de influencia donde estos generaban un impacto en el cauce por lo que hubiese sido deseable el identificar con una prolongación en la sección del tramo de estudio aguas abajo la longitud de mezcla de los parámetros medidos.

En los resultados de la modelación se pudo evidenciar como el tramo donde se encuentran las dos descargas presenta una condición crítica en cuanto a las condiciones de calidad sin embargo en el planteamiento del ambiente de simulación de las dos descargas se podría justificar la implantación de algún tipo de tratamiento físico que ayude a la oxidación ya que al cumplir con los ordenamientos de la normativa el río empieza a recuperar sus condiciones a partir del punto de conexión errada.

Se encontró que la sensibilidad para la calibración del parámetro de la DQO en el uso del modelo no fue la suficiente para asemejar condiciones reales respecto a los datos de alimentación.

Para la implementación de índice de calidad del agua se hizo sujeto a la metodología planteada por el estudio nacional del agua de 2010 realizado por el IDEAM, la aplicación de modelo numérico para determinar la realidad del afluente es algo complejo, puesto que se hizo una evaluación del tramo de estudio y por tanto las condiciones solo comprenden el área de influencia del tramo y no para toda la localidad en general.

Puntualmente la consideración que podemos hacer numéricamente del río con el ICA es que se encuentra actualmente en una condición mala con un indicador naranja de 0.44 en un rango de 0.00 a 1.00.

La evaluación del ICA para el tramo nos muestra una condición bastante mala para el cuerpo receptor, aunque no llega a ser al extremo crítica, mientras que en el ambiente de simulación el ICA nos muestra una mejora en el rango de calidad y pese a ello no se llega a unas condiciones óptimas de calidad, sino que se alcanzan valores regulares.

Los parámetros con mayor influencia sobre el índice de calidad del agua del río son la cantidad de oxígeno disuelto, la conductividad y los altos valores de la DQO (BOD SLOW). La influencia de los otros dos parámetros que pertenecen a la formulación del ICA tienen una afectación menor en la calidad del tramo.

Producto del arrastre aguas arriba del tramo también es evidente que hay una afectación en el índice de calidad implementado puesto que se desconoce la dispersión de contaminantes con las que llega a la entrada del sistema aquí modelado.

15. RECOMENDACIONES

Para un desarrollo más adecuado de este tipo de proyectos es aconsejable ampliar el rango de parámetros de calidad medidos para tener un espectro de cobertura más amplio respecto a las variables que afectan la calidad.

Ya que el proyecto fue desarrollado para la localidad de Bosa es necesario que la administración propia de la zona y la comunidad presten un interés mayor por los temas relacionados con este proyecto.

Se podrían mejorar la evaluación de calidad realizando las campañas de monitoreo discretizándolas según los periodos de precipitación y tiempo seco en el sector.

16. BIBLIOGRAFÍA

Bogotá. Secretaría Distrital De Ambiente. 2007. observatorio ambiental de bogota. *observatorio ambiental de bogota*. [En línea] 01 de 09 de 2007. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/con-la-comunidad/ES/diagnostico-pomca-tunjuelito>.

Cardona, Gustavo Adolfo Agredo. 2007. repositorio instucional universidad nacional. *repositorio instucional universidad nacional*. [En línea] 2007. [Citado el: 15 de 03 de 2017.] <http://www.bdigital.unal.edu.co/10843/1/gustavoadolfoagredocardona.2007.pdf>.

Castaño Ossa, Juan Manuel. 2015. repositorio de la universdiad nacional. *repositorio de la universdiad nacional*. [En línea] 2015. [Citado el: 20 de marzo de 2017.]

Castro Huertas, Mayra Andrea. 2015. *APLICACIÓN DEL QUAL2Kw EN LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO GUACAICA, DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA*. manizales : s.n., 2015.

Chapra Steve, Pelletier Greg y Tao Hua. 2008. College of Engineering. *College of Engineering*. [En línea] 16 de diciembre de 2008. [Citado el: 11 de abril de 2017.] http://www.ecs.umass.edu/cee/reckhow/courses/577/Qual2/Q2KDocv2_11b8%20v211.pdf.

Chow, Ven Te. 1994. *hidraulica de canales abiertos*. Bogota : McGRAW W-HILL INTERAMERICANA S.A, 1994.

consorcio planeacion ecologica LTDA- ecoforest LTDA. 2007. alcaldia de bogota. *alcaldia de bogota*. [En línea] 2007. [Citado el: 09 de marzo de 2017.] http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/adminverblobawa?tabla=T_NORMA_ARCHIVO&p_NORMFIL_ID=305&f_NORMFIL_FILE=X&inputfileext=NORMFIL_FILENAME.

Corporacion Autonoma Regional de Cundinamarca . 2006. observatorio ambiental de Bogota. *observatorio ambiental de Bogota*. [En línea] 17 de octubre de 2006. [Citado el: 20 de agosto de 2017.] <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/acuerdo-no-43-del-17-de-octubre-de-2006>.

empresa de acueducto y alcantarillado de Bogota. 2007. empresa de acueducto y alcantarillado de bogota . [En línea] 2007. [Citado el: 10 de agosto de 2017.] <http://eacennnt09.acueducto.com.co:8085/?sGet&DI9fTH1WXw1xA3FpIhZVV0x6Sw1xfAQBXAABCW4CH3MAfHcBXggDAGgFHAgAfRJSAl1BcUsOS1FELBJBO1VDS0ZcQQ0AfQAES1ZYVEpdT1VcHZ0I3V3cWx6YBUCfXV8L3I0dntyYxUCfXB0IRUDCH9gYmYVf3FBCVZtMDE4LzMvMDBNNDEM>.

flownet. 2015. flownet. *flownet*. [En línea] 2015. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://www.flownet.co/servicios/desarrollo-de-modelos-matematicos-para-la-gestion-del-agua/modelos-de-calidad-del-agua>.

Gaitan Quintero, Adriana del Pilar. 2009. repositorio universidad industrial de santander. *repositorio universidad industrial de santander*. [En línea] 2009. [Citado el: 17 de mayo de 2017.] <http://studylib.es/doc/4757727/referentes-internacionales-sobre-restauraci%C3%B3n-y-mejora-de....>

Gonzales Parra, Juan Diego. 2011. repositorio institucional universidad nacional de colombia. *repositorio institucional universidad nacional de colombia*. [En línea] 2011. [Citado el: 09 de marzo de 2017.] <http://www.bdigital.unal.edu.co/4389/1/juandiegogonzalezparra.2011.pdf>.

- IDEAM. 2014.** IDEAM. *IDEAM*. [En línea] 2014. [Citado el: 12 de marzo de 2017.] <http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2007.** IDEAM. *IDEAM*. [En línea] 10 de septiembre de 2007. [Citado el: 30 de agosto de 2017.] http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428.
- Lizarazo Becerra Jenny Milena, Orjuela Gutiérrez Martha Isabel. 2013.** repositorio institucional universidad nacional. *repositorio institucional universidad nacional*. [En línea] 2013. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>.
- Lluén Chero, Willy Eduardo. 2015.** universidad de cordoba españa. *uviversidad de cordoba españa*. [En línea] 2015. [Citado el: 11 de abril de 2017.] <http://www.uco.es/jia2015/ponencias/a/a009.pdf>.
- Lopez Cualla, Ricardo Alfredo. 1995.** elementos de diseño para acueducto y alcantarillado. [aut. libro] Ricardo Alfredo Lopez CuallaQ. *elementos de diseño para acueducto y alcantarillado*. Bogota : escuela de ingeniería julio garavito, 1995, págs. 341-342.
- marbello.** artemisa. [En línea] http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/11_resalto.pdf.
- millarium. 2008.** millarium. [En línea] 2008. [http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp#Hazen-Williams_\(1905\)](http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp#Hazen-Williams_(1905)).
- ministerio de medio ambiente. 2015.** minambiente. *minambiente*. [En línea] 7 de marzo de 2015. [Citado el: 26 de agosto de 2017.] <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>.
- ministerio del medio ambiente. 2002.** alcaldia de bogota. *alcaldia de bogota*. [En línea] 06 de agosto de 2002. [Citado el: 09 de marzo de 2017.] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=5534>.
- ONU. 2014.** pagina de las naciones unidas. *ONU*. [En línea] 22 de 10 de 2014. [Citado el: 14 de 03 de 2017.] <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>.
- Orjuela Luz Consuelo, Saldarriaga Gabriel, García Martha, Wilches Hernando. 2010.** *estudio nacional de agua, capítulo 6 calidad del agua superficial en Colombia*. Bogota : instituto de hidrologia, meteorologia y estudios ambintales de Colombia, 2010.
- Patricia Torres, Camilo Hernán Cruz; revista de ingeniería de la universidad de Medellin.* **Patricia Torres, Camilo Hernán Cruz. 2009.** Medellin : revista de ingeniería de la universidad de Medellin, 2009.
- Rodriguez Pinilla Lina Maria, Cierra Vargas Dayana Fernanda. 2011.** repositorio institucional unisalle. *repositorio institucional unisalle*. [En línea] 2011. [Citado el: 09 de marzo de 2017.] <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/14003>.
- Rodriguez Susa, Manuel Salvador. 2012.** secretaria distrital de ambiente. *secretaria distrital de ambiente*. [En línea] 2012. [Citado el: 9 de marzo de 2017.] <http://ambientebogota.gov.co/web/publicaciones-sda/calidad-del-recurso-hidrico-de-bogota-2011-2012>.

secretaria de medio ambiente. 2007. diagnostico POMCA tunjuelo. *observatorio ambiental de Bogota* . [En línea] 1 de septiembre de 2007. [Citado el: 18 de septiembre de 2017.] <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/diagnostico-pomca-tunjuelito>.

Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. *calidad del agua evaluacion y diagnostico*. medellin : ediciones de la U, 2011.

Solano Rodriguez Emir STEvens, Paez Vargas Cristian Andres , Aguilar Ruiz Jose Manuel. 2016. repositorio universidad distrital. *repositorio universidad distrital*. [En línea] marzo de 2016. [Citado el: 10 de octubre de 2017.] [file:///C:/Users/usuario/Downloads/SolanoRodriguezEmirStevens2016%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/usuario/Downloads/SolanoRodriguezEmirStevens2016%20(1).pdf).

soluciones integrales geomatica ingenieria geoespacial. 2016. geosoluciones. *geosoluciones*. [En línea] 2016. [Citado el: 25 de septiembre de 2017.] <http://www.geosoluciones.cl/global-mapper/>.

us army corps of engineers. 2016. us army corps of engineers. *us army corps of engineers*. [En línea] febrero de 2016. [Citado el: 02 de octubre de 2017.] <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.

ANEXOS

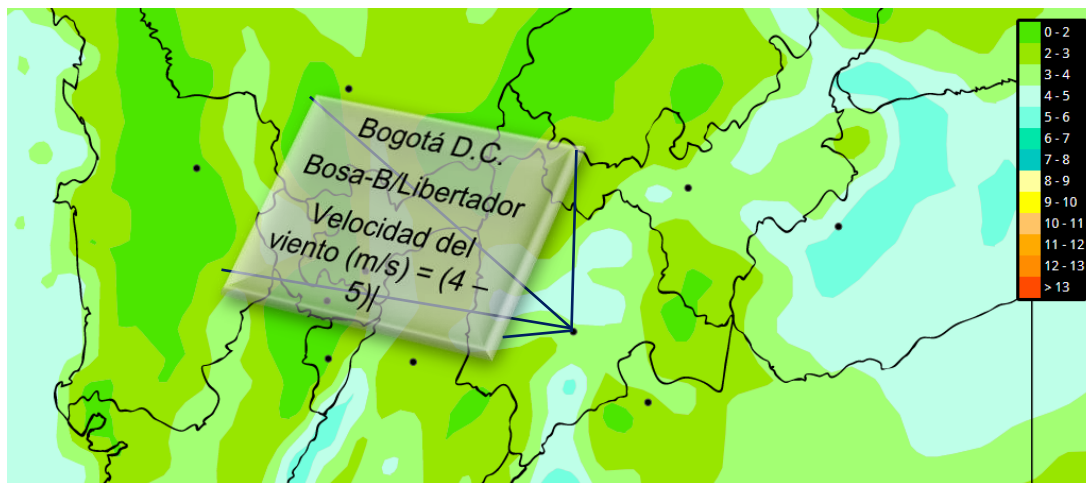
Anexo 1. Tablas para condiciones batimetricas para su implementacion en el software (*HEC-RAS*). **Fuente:** Autores

k1+000		k0+900		k0+800		k0+700	
corte (m)	altura (m)	corte (m)	altura (m)	corte (m)	altura (m)	corte (m)	altura (m)
0	2548.65	0	2548.54	0	2548.43	0	2548.14
1	2548.57	1	2548.47	1	2548.32	1	2548.11
2	2548.41	2	2548.16	2	2548.2	2	2548.08
3	2548.3	3	2548.09	3	2548.11	3	2548.04
4	2547.96	4	2547.9	4	2547.97	4	2547.91
5	2547.83	5	2547.88	5	2547.81	5	2547.83
5.5	2547.7	5.5	2547.68	5.5	2547.5	5.5	2547.6
6	2547.21	6	2547.44	6	2547.23	6	2547.18
7	2547.01	7	2547.42	7	2547.08	7	2547.02
8	2546.85	8	2546.4	8	2546.84	8	2546.84
9	2546.53	9	2546.4	9	2546.61	9	2546.62
10	2546.4	10	2546.32	10	2546.37	10	2546.41
11	2546.36	11	2546.24	11	2546.33	11	2546.32
12	2546.31	12	2546.18	12	2546.3	12	2546.3
13	2546.29	13	2546.19	13	2546.3	13	2546.28
14	2546.3	14	2546.18	14	2546.33	14	2546.28
15	2546.31	15	2546.17	15	2546.32	15	2546.33
16	2546.3	16	2546.2	16	2546.3	16	2546.44
17	2546.31	17	2546.29	17	2546.29	17	2546.51
18	2546.67	18	2546.56	18	2546.46	18	2546.74
19	2546.9	19	2546.85	19	2546.77	19	2547.3
19.5	2547.68	19.5	2547.68	19.5	2547.48	19.5	2547.55
20	2547.9	20	2547.81	20	2547.76	20	2547.67
21	2548.09	21	2547.92	21	2547.8	21	2547.75
22	2548.19	22	2548.05	22	2547.85	22	2547.79
23	2548.44	23	2548.13	23	2547.91	23	2547.81
24	2548.58	24	2548.37	24	2548.03	24	2547.95
25	2548.62	25	2548.48	25	2548.16	25	2547.99

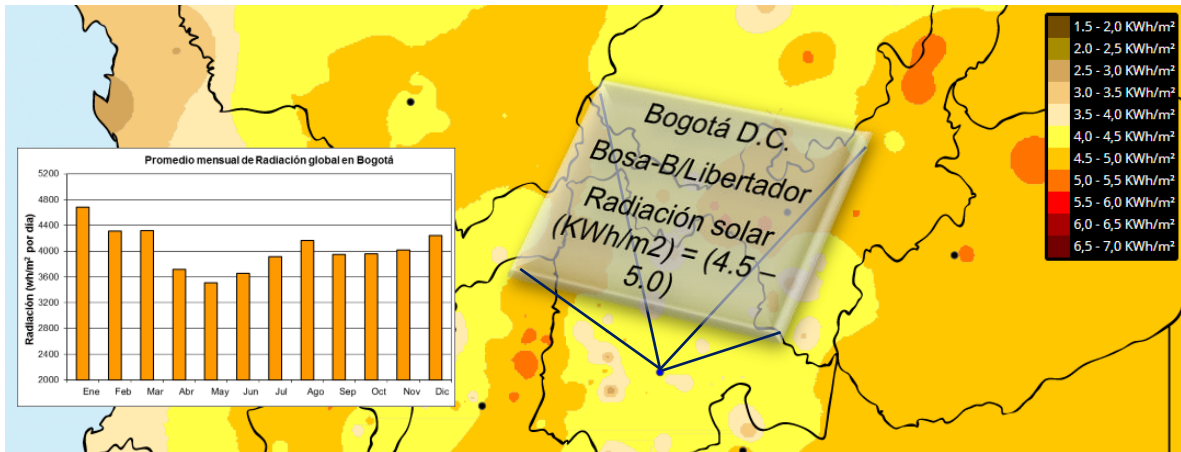
k0 + 500		k0 + 400		k0 + 300		k0 + 200		k0 + 100	
corte (m)	altura (m)	corte (m)	altura (m)	corte (m)	altura (m)	corte (m)	altura (m)	corte (m)	altura (m)
0	2547.54	0	2547.7	0	2547.75	0	2547.45	0	2548.23
1	2547.44	1	2547.4	1	2547.65	1	2547.39	1	2548.1
2	2547.31	2	2547.35	2	2547.33	2	2547.29	2	2548.09
3	2547.2	3	2547.16	3	2547.14	3	2547.06	3	2547
4	2547.19	4	2547.05	4	2546.93	4	2547	4	2546.869
5	2547.17	5	2547	5	2546.9	5	2546.93	5	2546.82
5.5	2547.08	5.5	2546.99	5.5	2546.75	5.5	2546.68	5.5	2546.63
6	2546.87	6	2546.92	6	2546.2	6	2546.02	6	2546.2
7	2546.66	7	2546.65	7	2545.83	7	2545.74	7	2545.525
8	2546.32	8	2546.65	8	2545.6	8	2545.26	8	2545.122
9	2546.18	9	2546.45	9	2545.53	9	2545.2	9	2545.02
10	2546.09	10	2546.32	10	2545.34	10	2545.21	10	2545.1
11	2546.07	11	2545.9	11	2545.18	11	2545.19	11	2545.02
12	2546.08	12	2545.78	12	2545.02	12	2545.14	12	2545
13	2546.08	13	2545.65	13	2544.96	13	2545.17	13	2545.04
14	2546.07	14	2545.66	14	2544.98	14	2545.24	14	2545.02
15	2546.06	15	2545.65	15	2545.02	15	2545.28	15	2545.23
16	2546.1	16	2545.62	16	2545	16	2545.69	16	2545.27
17	2546.09	17	2545.63	17	2545.14	17	2545.96	17	2545.27
18	2546.21	18	2545.95	18	2545.68	18	2546.06	18	2545.381
19	2546.44	19	2546.58	19	2546.29	19	2546.43	19	2546.09
19.5	2547.1	19.5	2547.03	19.5	2546.76	19.5	2546.7	19.5	2546.68
20	2547.17	20	2547.1	20	2546.97	20	2546.85	20	2546.95
21	2547.25	21	2547.15	21	2547.04	21	2546.98	21	2547.23
22	2547.3	22	2547.43	22	2547.09	22	2547.04	22	2547.6
23	2547.36	23	2547.65	23	2547.39	23	2547.44	23	2548.05
24	2547.46	24	2547.73	24	2547.46	24	2547.6	24	2548.13
25	2547.53	25	2547.83	25	2547.77	25	2547.72	25	2548.57

Anexo 2: Datos de calibracion software QUAL2K; Velocidad del viento, Radiacion solar, Brillo solar, Sombra y Temperatura. **Fuente:** Atlas Interactivo/ IDEAM “Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales” – 2013.

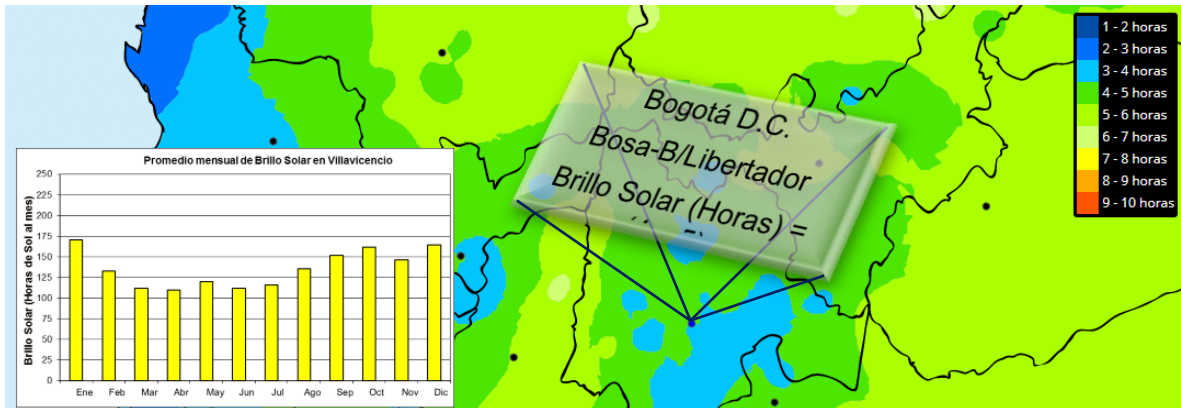
Velocidad del viento (Wind Speed)



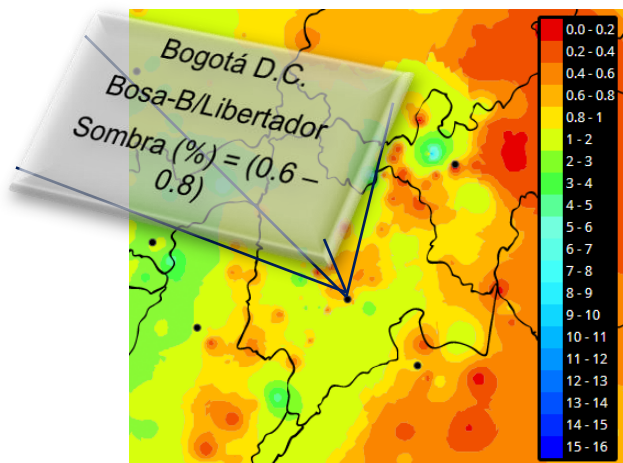
Radiación Solar



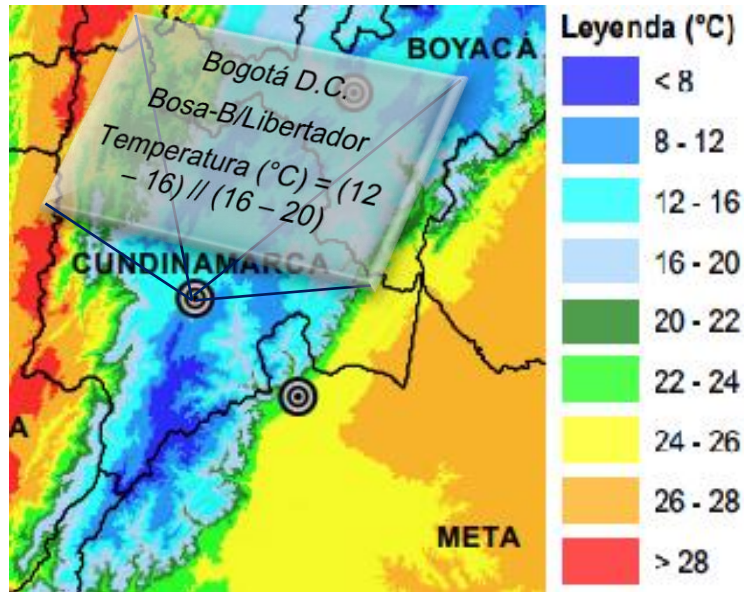
Brillo Solar



Sombra



Temperatura



Anexo 3: Registro de Documentación Análisis de Laboratorio Universidad Católica de Colombia. **Fuente:** Autores.



