

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
RIO AZUL, MUNICIPIO DE PIJAO DEPARTAMENTO DEL QUINDIO**

**ENMARCADO EN EL PROYECTO
“PENSEMOS EN EL FUTURO, AHORREMOS AGUA”**

Presentado a:

**LINA MARIA GALLEGO ECHEVERRY
Profesional Especializado
Subdirección de Gestión Ambiental
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDÍO**

Preparó:

**JOHANA PÉREZ CARREÑO
Ingeniera Civil
Especialista en Ingeniería Hidráulica y Ambiental**



Armenia, Septiembre de 2015

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 ALCANCE	4
1.4 MARCO NORMATIVO.....	5
2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	8
2.1 LOCALIZACIÓN.....	8
2.1.1 <i>Algunos aspectos morfológicos.....</i>	<i>9</i>
2.2 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL	9
2.3 DEMANDA HÍDRICA	10
2.4 CALIDAD DEL AGUA	10
3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2K	14
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	14
3.2 METODOLOGÍA	15
4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO.....	17
4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR.....	17
4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE	21
4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS	22
4.4 CONDICIONES DE BORDE.....	23
4.4.1 <i>Condiciones de borde externas</i>	<i>23</i>
4.4.2 <i>Condiciones de borde internas.....</i>	<i>24</i>
4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN	24
4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO.....	25
4.6.1 <i>Resultados de la modelación del componente hidráulico.....</i>	<i>26</i>
5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD.....	28
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO.....	28
5.1.1 <i>Observaciones Generales de los reportes de calidad.....</i>	<i>29</i>
5.1.2 <i>Cumplimiento Resolución 0631 de 2015, vertimiento Truchas ACUAZUL</i>	<i>32</i>
5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN	32
5.2.1 <i>Constante de decaimiento de la DBO (Kd)</i>	<i>32</i>
5.2.2 <i>Constante de decaimiento de los coliformes (Kb)</i>	<i>34</i>
5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD	35
6. VERIFICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	39
7. CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD PARA EL RIO AZUL	43
8. CONCLUSIONES.....	46
9. BIBLIOGRAFIA	47

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. NORMA PARA VERTIMIENTOS A UN CUERPO DE AGUA PARA USUARIOS NUEVOS	5
TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA DESTINACIÓN DEL RECURSO	6
TABLA 3. VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA VERTIMIENTOS PUNTUALES, RESOLUCIÓN 0631 DE 2015	6
TABLA 4. OBJETIVOS DE CALIDAD RIO LEJOS, CRQ	7
TABLA 5. LOCALIZACIÓN RIO AZUL.....	8
TABLA 6. ALGUNOS ASPECTOS MORFOLÓGICOS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA, RIO AZUL.....	9
TABLA 7. HISTÓRICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL CAUCE PRINCIPAL DEL RIO AZUL.....	11
TABLA 8. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS A MODELAR SOBRE EL RIO AZUL.....	17
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR DENTRO DEL RIO AZUL	19
TABLA 10. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 27 DE MAYO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE.....	21
TABLA 11. TIEMPOS DE VIAJE DE LA MASA DE AGUA PARA EL DÍA 27 DE MAYO DE 2015.....	22
TABLA 12. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 28 DE JULIO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO Y MUESTREO.....	22
TABLA 13. CONDICIONES DE BORDE INTERNAS EN LA MALLA DE MODELACIÓN, RIO AZUL	24
TABLA 14. RED ESQUEMATIZADA PARA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA – RIO AZUL	25
TABLA 15. FUENTES DIFUSAS INCLUIDAS COMO PARTE DEL BALANCE HÍDRICO DENTRO DEL RIO AZUL.....	25
TABLA 16. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EN LA CALIBRACIÓN HIDRÁULICA.....	26
TABLA 17. DATOS DE CALIDAD RIO AZUL (CRQ) – CAMPAÑA DE MUESTREO 28/07/2015.....	28
TABLA 19. CUMPLIMIENTO RESOLUCIÓN 0631 DE 2015, VERTIMIENTO TRUCHAS ACUAZUL.....	32
TABLA 18. CALIBRACIÓN DE LAS DESCARGAS DIFUSAS	36
TABLA 19. CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN	36

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO AZUL - DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO.....	8
FIGURA 2. CORRIENTES IDENTIFICADAS –UNIDAD DE DRENAJE RIO LEJOS	9
FIGURA 3. VARIACIÓN DEL PROMEDIO DE CAUDALES MENSUALES MULTIANUALES, RIO AZUL	10
FIGURA 4. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD A TRAVÉS DE LOS AÑOS SOBRE LA CUENCA BAJA DEL RIO AZUL ...	12
FIGURA 5. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD A TRAVÉS DE LOS AÑOS SOBRE LA CUENCA BAJA DEL RIO AZUL ...	13
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA	15
FIGURA 7. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, RIO AZUL	18
FIGURA 8. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES, RIO AZUL	23
FIGURA 9. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: CAUDAL – SIMULADO VS OBSERVADO.....	26
FIGURA 10. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: VELOCIDAD – SIMULADO VS OBSERVADO....	27
FIGURA 11. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: PROFUNDIDAD DEL AGUA – SIMULADO VS OBSERVADO.....	27
FIGURA 12. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO AZUL.....	36
FIGURA 13. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO AZUL.....	37
FIGURA 14. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO AZUL.....	38
FIGURA 15. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE TEMPERATURA Y PH	39
FIGURA 16. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE DBO ₅ , OD Y SST.....	40
FIGURA 17. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE CF Y CAUDAL	41
FIGURA 18. PERFIL LONGITUDINAL DBO ₅ AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ	43
FIGURA 19. PERFIL LONGITUDINAL OD, PH Y SST AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ ...	44
FIGURA 20. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS CF, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DEL DECRETO 1594/84 PARA SU DESTINACIÓN AL CONSUMO HUMANO Y OTROS USOS.....	45

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La normativa ambiental que reglamenta la formulación de planes de saneamiento y manejo de vertimientos y los procesos de licenciamiento ambiental reconocen la importancia de conocer la capacidad de autodepuración de ríos y corrientes, lagos o humedales e identificar los impactos en el uso y calidad del agua que generan los vertimientos de agua residual doméstica y/o industrial en las fuentes receptoras. Es por ello, que los modelos de transporte de contaminantes y de calidad del agua permiten conocer la capacidad de autodepuración por dilución, dispersión longitudinal y procesos de transferencia y/o reacción físico-químicas y biológicas en las fuentes receptoras, dimensionándolas y seleccionando soluciones estructurales (ejemplo, plantas de tratamiento) y no estructurales (ejemplo, tecnologías de producción más limpias) requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua en la fuente receptora bajo diferentes niveles de contaminación y/o tratamiento. Para esto, se requiere seguir una metodología rigurosa en la implementación y aplicación de los modelos de calidad del agua para que puedan ser utilizados efectivamente como herramientas útiles en la toma de decisiones de saneamiento y manejo de vertimientos.

El presente estudio de modelación denominado “Modelación de la Calidad del agua del río Azul”, es realizado mediante la aplicación del software QUAL2K elaborado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el cual siguiendo una serie de pasos involucrados dentro de sus lineamientos, establece una aproximación de una realidad existente y futura de los parámetros hidráulicos y de calidad de la fuente hídrica a analizar, considerando este los diferentes vertimientos de aguas residuales originadas por sus distintos usos a lo largo de la corriente principal.

En cumplimiento con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, la Corporación Autónoma Regional del Quindío viene adelantando estudios de modelación de la calidad del agua en las principales fuentes hídricas del departamento del Quindío. Durante los años 2013, 2014 y 2015 se ha monitoreado un tramo representativo del río Azul en el municipio de Pijao, evidenciando así su comportamiento a través del tiempo, lo que constituye una herramienta de

planificación que permite en la actualidad y a futuro, identificar y preservar el recurso hídrico.

1.2 OBJETIVOS

General

- Realizar la modelación de la calidad del agua en río Azul, en un tramo cercano a los 663 metros, cuenca Baja.

Específicos

- Determinar la capacidad de autodepuración de la corriente modelada e identificar los impactos en el uso y calidad del agua que generan los vertimientos de agua residual en las fuentes receptoras.
- Elaborar escenarios de saneamiento partiendo de información existente.

1.3 ALCANCE

El estudio considera el muestreo en dos puntos sobre el río Azul. En la vereda El Verdal del municipio de Pijao, inicia el tramo de estudio antes de la captación de agua para la empresa de truchas ACUAZUL LTDA y finaliza a 663.3 metros aguas abajo del punto anterior, en el puente localizado sobre el río Azul a 1.5 kilómetros antes de la confluencia con el río Lejos.

El tramo seleccionado de 663.3 metros¹ sobre el río Azul, obedece a la inspección de campo realizada sobre esta fuente hídrica donde el mayor impacto que podría afectar la calidad de sus aguas, sería el asociado al vertimiento producido por la industria de truchas ACUAZUL LTDA. Las actividades desarrolladas dentro de la elaboración del presente estudio son las siguientes:

Trabajo de campo,

¹ SIG Quindío.

- Determinación de tiempos de viaje
- Campañas de aforo y muestreos de agua

Trabajo de oficina,

- Obtención y ajuste de registros hidrométricos
- Análisis Hidrológico de la fuente a modelar
- Procesamiento de la información físico-química y bacteriológica
- Selección del Modelo de Simulación a implementar
- Calibración del modelo
- Escenarios de saneamiento utilizando el modelo ya calibrado

1.4 MARCO NORMATIVO

En Colombia los usos del agua y residuos líquidos están reglamentados mediante los decretos 1594 de 1984 y 3930 de 2010, en donde se establecen las normas de vertimiento a un cuerpo de agua.

Tabla 1. Norma para vertimientos a un cuerpo de agua para usuarios nuevos

PARÁMETRO	DECRETO 1594 / 84
pH (min-max)	5.0 – 9.0
Temperatura	$\leq 40^{\circ}\text{C}$
DBO ₅	Remoción en carga $\geq 80\%$
Sólidos Suspendidos	Remoción en carga $\geq 80\%$
Grasas y/o Aceites	Remoción en carga $\geq 80\%$

De igual forma, el Decreto 1594 de 1984 establece los criterios de calidad admisibles para los diferentes usos del agua. Entre estos se encuentra el uso agrícola, pecuario, recreativo y de consumo humano.

Tabla 2. Criterios de calidad para la destinación del recurso

Parámetro	Expresado como	Consumo Humano y doméstico(1)	Uso Agrícola	Uso Recreativo(2)
pH	Unidades	5 – 9	4.5 – 9.0	5.0 – 9.0
Oxígeno Disuelto (3)	mg O ₂ /L	-	-	6.1
Cloruros	mg/L	250	-	-
Tensoactivos	mg/L	0.5	-	0.5
Grasas y/o Aceites	mg/L	Ausente	-	Ausente
Coliformes Totales	NMP/100ml	20000	< 5000	1000
Coliformes Fecales	NMP/100ml	2000	< 1000	200

(1) Para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional

(2) Contacto primario

(3) 70% de la concentración de saturación

El Decreto 3930 del 2010, establece los parámetros mínimos que deben ser utilizados en los modelos de simulación aplicables en la ordenación del recurso hídrico, los cuales se presentan a continuación:

- DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a cinco (5) días.
- DQO: Demanda química de oxígeno.
- SST: Sólidos Suspendidos Totales.
- pH: Potencial del Ion hidronio, H⁺
- T: Temperatura.
- OD: Oxígeno disuelto.
- Q: Caudal.
- Datos Hidrobiológicos.
- Coliformes Totales y Fecales.

La Resolución 0631 de 2015, establece en su Capítulo VI los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas para las actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a los del Capítulo V hacia los cuerpos de aguas superficiales, a cumplirse a partir del 01 de enero del 2016.

Tabla 3. Valores límites máximos permisibles para vertimientos puntuales, Resolución 0631 de 2015

SST (mg/l)	DBO ₅ (mg/l O ₂)	DQO (mg/l O ₂)	pH (unidades)
< 50	< 50	< 150	Entre 6-9

Así mismo, la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, “Por medio de la cual se establecen objetivos de calidad para las fuentes hídricas del departamento del Quindío” resuelve en su Artículo Primero cada uno de los objetivos de calidad de los diferentes cuerpos de agua en el departamento a ser alcanzados antes del año 2017. Al no existir objetivos de calidad específicos para la fuente a modelar, se tomarán los establecidos para el río Lejos, el cual recibe las aguas del río Azul luego del casco urbano del municipio de Pijao.

Tabla 4. Objetivos de calidad río Lejos, CRQ

TRAMO DEL RIO	PARÁMETRO DE CALIDAD	OBJETIVO DE CALIDAD ESPERADA PARA EL AÑO 2017
Tramo Comprendido desde el casco urbano hasta la desembocadura con el río Barragán.	Oxígeno disuelto (mg/l O ₂)	Mayor a 7.0
	DBO (mg/l O ₂)	Menor a 5.0
	SST (mg/l)	Menor a 50
	pH (unidades)	Mayor a 6.5 y menor a 9

2.1.1 Algunos aspectos morfológicos

Tabla 6. Algunos aspectos morfológicos de la unidad hidrográfica, rio Azul

Área superficial de drenaje	70.24	Km ²
Longitud del cauce principal	13.35	Km
Perímetro	39.11	Km

Fuente: SIG Quindío

2.2 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

El rio Azul es el principal tributario del rio Lejos y este tributa al rio Barragán a 1.8 kilómetros luego de su confluencia con el rio Azul.

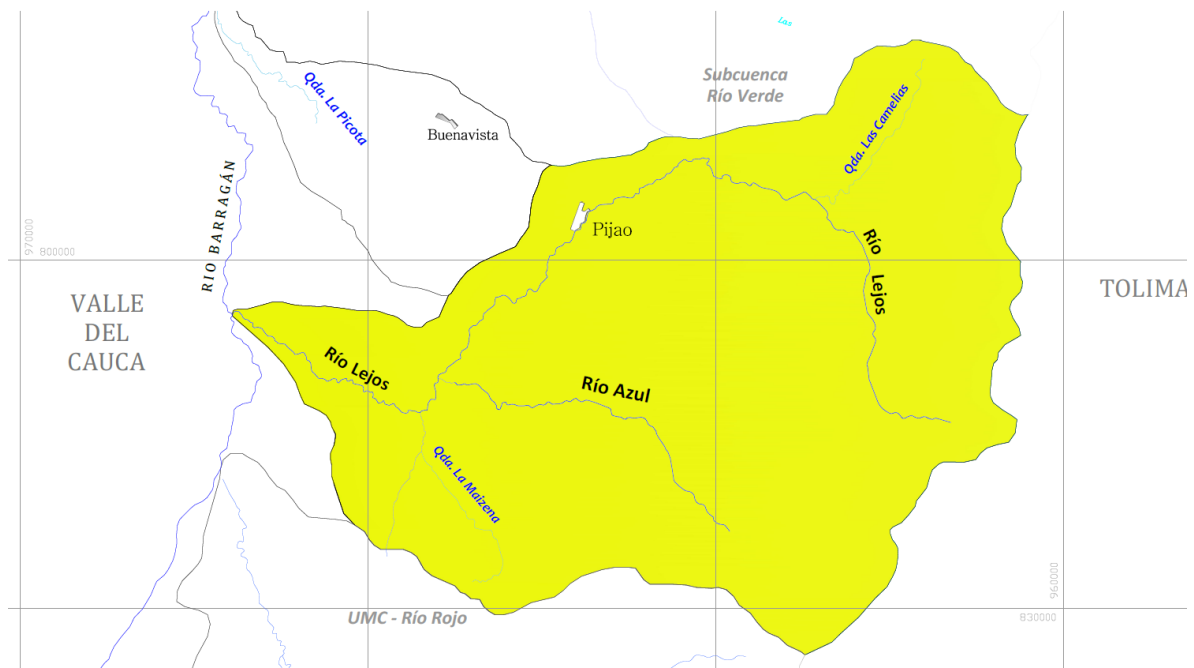


Figura 2. Corrientes identificadas –unidad de drenaje Rio Lejos

El rio Azul posee una oferta hídrica cercana a los 2.5 m³/s, con un mínimo de 0.920 m³/s y máximo de 4.33 m³/s, para los meses de agosto y noviembre respectivamente.

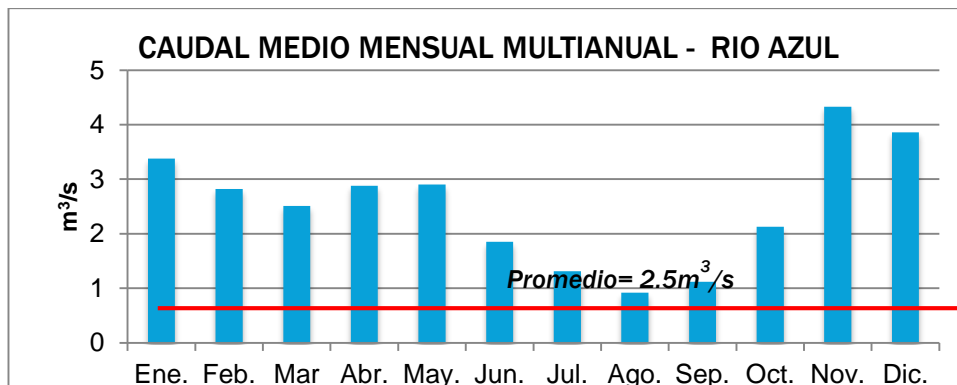


Figura 3. Variación del promedio de caudales mensuales multianuales, rio Azul

Fuente: Línea base, CRQ, 2011.

2.3 DEMANDA HÍDRICA

El uso de agua que más se destaca es el de la industria piscícola, específicamente para la truchera ACUAZUL LTDA; el día 28 de julio de 2015 se encontraba captando 55 lt/s, el cual se considera como uso no consuntivo, ya que devuelve al río la totalidad del agua captada en un tramo cercano a los 260 metros aguas abajo.

Fotografía 1. Truchas ACUAZUL LTDA



2.4 CALIDAD DEL AGUA

En la Tabla 7 se presenta el consolidado de los resultados de las campañas de monitoreo de calidad del agua realizadas por la CRQ en los años 2013, 2014 y 2015 sobre el cauce principal del rio Azul.

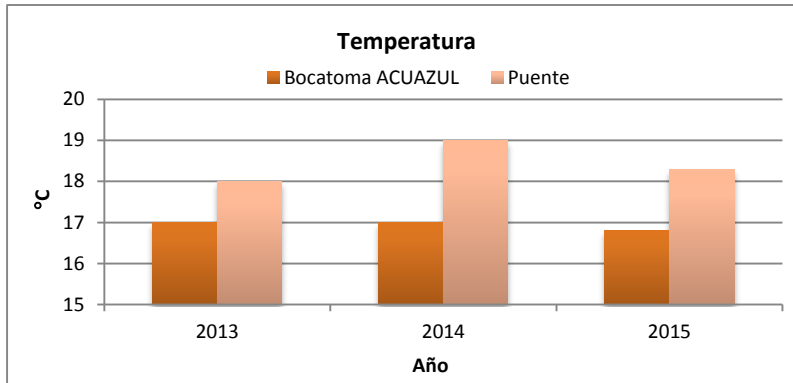
Tabla 7. Históricos de calidad del agua en el cauce principal del rio Azul

Corriente	Año	ESTACION	LONGITUD (m)	Caudal (m ³ /s)	T (°C)	pH (unidades)	DBO (mg/l O ₂)	DQO (mg/l O ₂)	SST (mg/l)	OD (mg/l O ₂)	CT (NMP/100ml)	CF (NMP/100ml)
Rio Azul	2013	Bocatoma ACUAZUL	0.0	0.388	17	8.48	<5.7	12	12.5	7.96	2.00E+02	2.00E+02
		Puente	588	0.476	18	8.45	<5.7	14.7	8	7.66	3.50E+04	3.50E+04
	2014	Bocatoma ACUAZUL		0.901	17	8.30	0.71	2.8	16.9	8.3	7.80E+02	1.80E+02
		Puente		0.996	19	8.38	0.54	0.4	21.5	8.1	7.80E+02	2.00E+02
	2015	Bocatoma ACUAZUL		0.777	16.8	8.32	0.53	3.02	4.1	8.64	2.20E+03	2.20E+03
		Puente		1.078	18.3	8.42	0.89	6.42	5.4	8.72	1.70E+03	1.30E+03

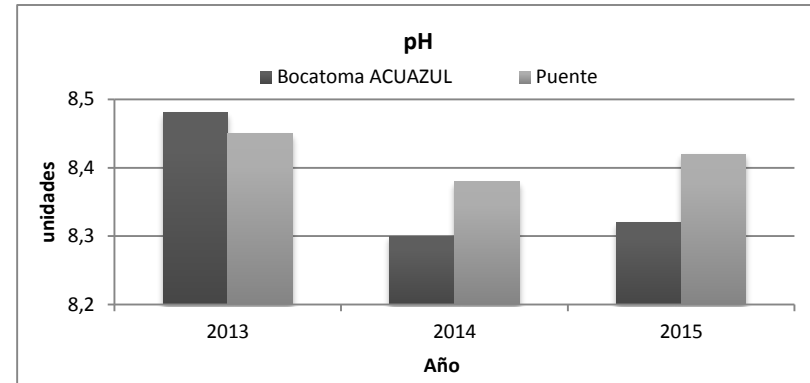
Fuente: registros CRQ.

En la Figura 4 se identifican las variaciones de la calidad de agua correspondientes a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Oxígeno Disuelto (OD), Coliformes Totales y Fecales (CT y CF), Sólidos Suspendidos Totales (SST), pH, temperatura del agua y caudal. Estas variaciones exponen el comportamiento temporal sobre las estaciones “Bocatoma ACUAZUL” y “Puente” localizadas aguas arriba y abajo del vertimiento de la truchera, (cuenca Baja).

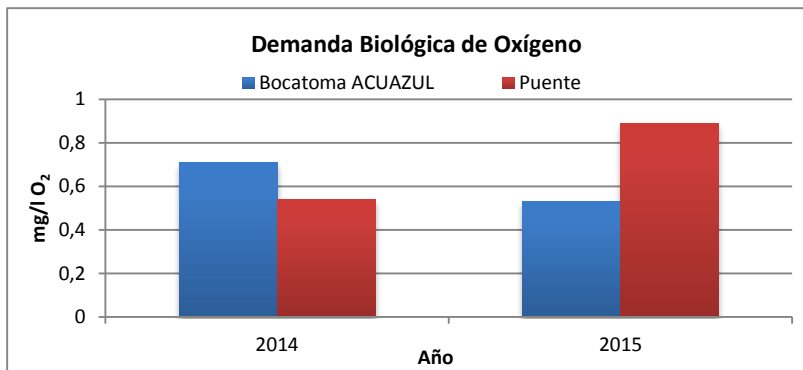
Figura 4. Variación de los parámetros de calidad a través de los años sobre la cuenca baja del río Azul



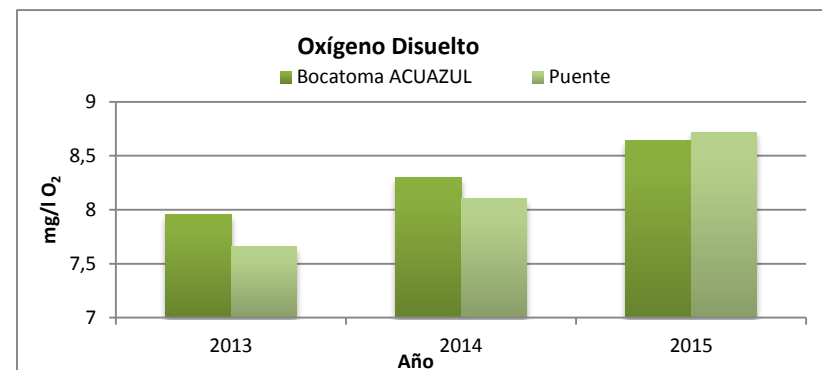
En promedio las temperaturas del agua en las estaciones Bocatoma ACUAZUL y Puente (620 metros de diferencia entre estaciones) no presentan variaciones significativas, sólo para la estación Puente, se tiene un aumento de 1 °C en relación con el año 2013.



En todo momento los valores se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84 (5-9 unidades). Sobre este tramo se tiene un promedio de 8.4 unidades entre los años de registro. Estos se consideran aceptables para la mayoría de la fauna acuática. Aunque se observan diferencias muy leves entre las estaciones inicial y final, se tiene que para el año 2013 el pH disminuye y por el contrario, para los años 2014 y 2015, esta relación es inversa.

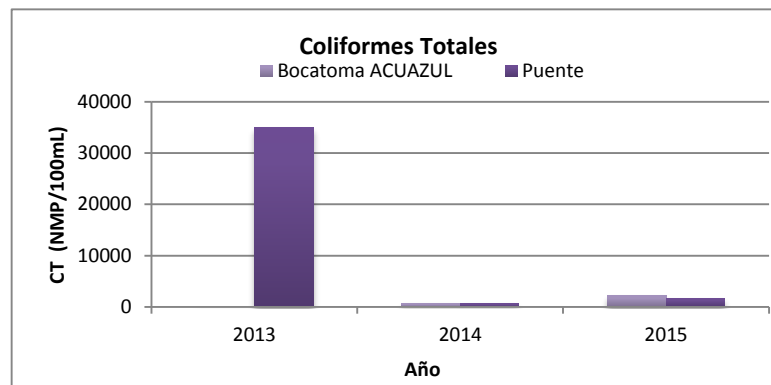
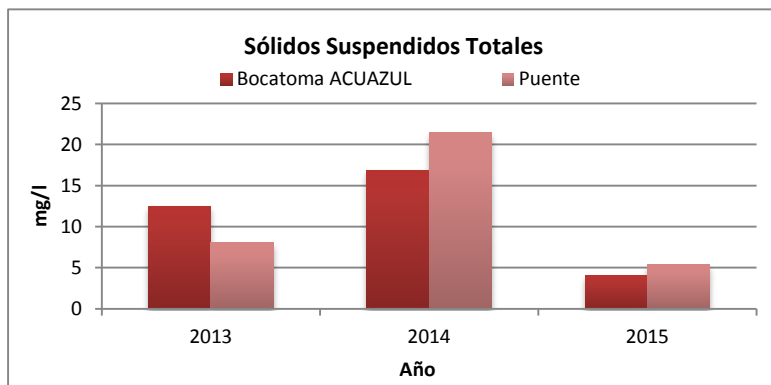


Los valores de DBO para el año 2013 fueron menores a 5.7 mg/l O₂. Para el último año (2015) se presenta una reducción del 25% sobre la estación Bocatoma, mejorando las condiciones de calidad en la misma. Por el contrario el año 2015 presenta un aumento del 20% en la estación Puente debido al leve incremento de la actividad piscícola respecto al año anterior.

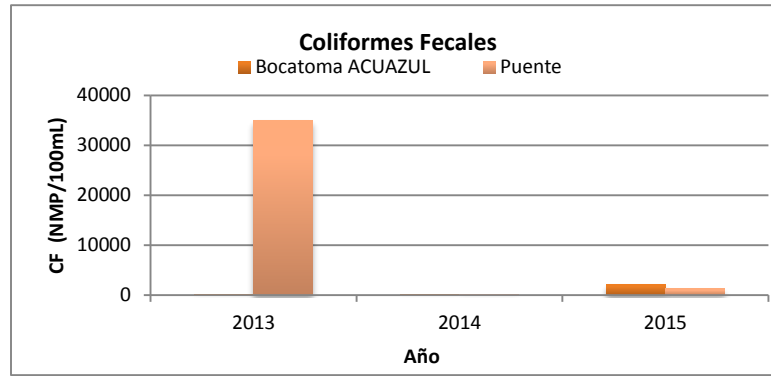


Se observa una mejora en la calidad del agua a través de los años, donde se ve incrementado este parámetro un 8% y 12% en las estaciones Bocatoma y Puente respecto al año 2013.

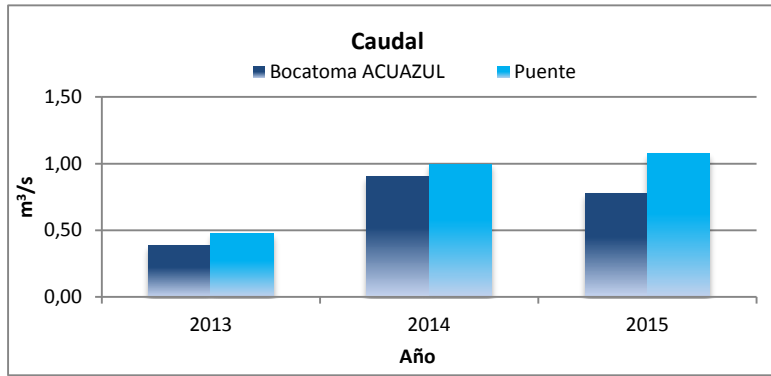
Figura 5. Variación de los parámetros de calidad a través de los años sobre la cuenca baja del rio Azul



Para el año 2015 se presentan los valores más bajos de SST (4.75 mg/l en promedio). Esta concentración de SST se ve en aumento para el año 2014 (cerca de un 46%), debido a la ocurrencia de lluvias días antes a la toma de muestras y aforo, producto del arrastre de partículas hacia la fuente hídrica a través de la escorrentía superficial.



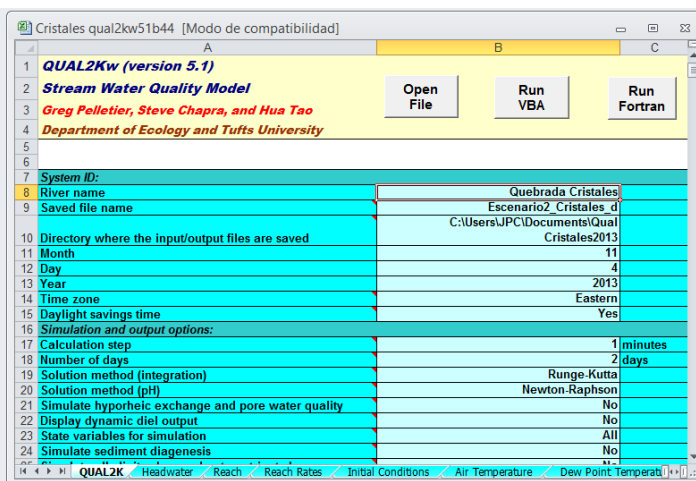
Se evidencia mayor concentración de este parámetro en el año 2013 sobre la estación Puente, luego de recibir el vertimiento producido por la industria piscícola. Para el último año de muestreo sobre este punto, se ven reducidos los Coliformes Totales y Fecales un 99% respecto al año 2013.



Los mayores caudales se presentaron en los muestreos de los años 2014 y 2015, donde días antes se presentaron precipitaciones en la zona aumentando así los niveles de caudal. El aforo del año 2013 fue realizado en el mes de septiembre, mes de pocas precipitaciones y caudales bajos.

3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL Qual2K

El modelo dinámico unidimensional Qual2k, simula la calidad del agua en ríos y arroyos de bajo caudal, asume zonas anóxicas y tramos longitudinalmente heterogéneos, maneja tributarios, fuentes puntuales y difusas. La EPA, (U.S. Environmental Protection Agency), lo aprobó en el 2007, se realizaron una serie de simulaciones en el arroyo “Southampton” Condado de Montgomery y Bucks, en Pennsylvania, USA en el 2008 (Capacasa, J.; 1998). En Colombia, fue validado en el río Bogotá, (IDEAM, 2010).



3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

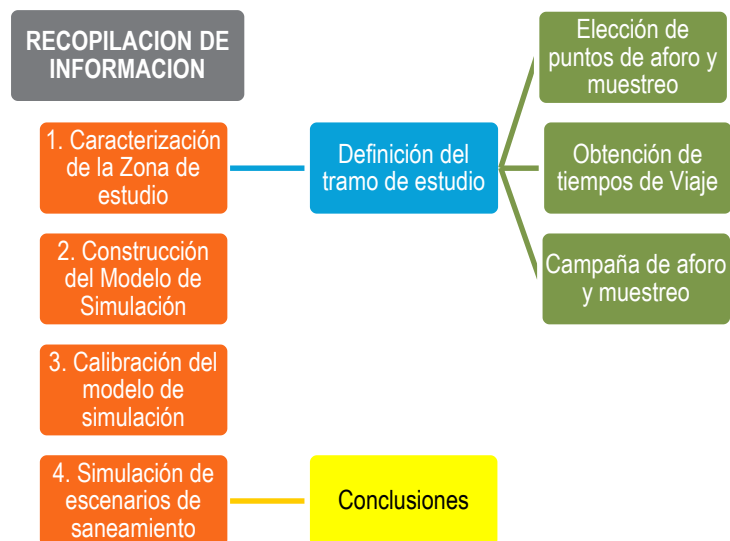
El modelo presenta características útiles para la simulación de los ríos y quebradas de montaña (cauces con pendiente longitudinal mayor al 1.0 %, Parraga 2004.) propios de nuestra región. A continuación se detallan algunas de sus cualidades:

- Modelación en una sola dimensión (1D), en estado estacionario y con flujo no uniforme.
- Simula el cauce bien mezclado lateral y verticalmente.
- Simula el ingreso de fuentes puntuales y difusas.
- Simula las concesiones de agua como salidas puntuales y difusas.
- Simula la diagénesis y el flujo hiporreico.
- Permite la discretización espacial con tramos de diferentes longitudes.
- Simula las dos formas de oxidación de la materia orgánica carbonosa: rápida (DBOC₅) y lenta (DBOC₂₀ o DBOC_{ultima}).
- Simula la anoxia.
- Simula las bacterias (Coliformes totales o fecales)

3.2 METODOLOGÍA

La Figura 6, representa esquemáticamente la metodología aplicada para la modelación de la calidad del agua para una corriente hídrica.

Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología empleada



Inicialmente se realizó la recopilación de información cartográfica con el fin de localizar la corriente principal junto a sus tributarios. A su vez, se evaluaron las diferentes estaciones a monitorear seleccionadas de acuerdo a su importancia geográfica y usos actuales (concesiones y vertimientos). Posteriormente, se georreferenciaron los puntos o secciones ya escogidos, para así determinar los tiempos de viaje de la masa de agua, cuyo fin es establecer un horario en la toma de muestras de calidad y cantidad sobre el tramo objeto de evaluación.

Definido el tramo, las secciones y los valores fisicoquímicos e hidrológicos a modelar, se construye el modelo de simulación teniéndose como objetivo, la identificación del comportamiento de los parámetros a modelar mediante el software QUAL2K. Para el presente estudio, se realizó una campaña de aforo y muestreo el día 28 de Julio de 2015, esperando que esta información simule el comportamiento usual de la corriente hídrica bajo condiciones de caudales medios a bajos, sin presencia de lluvias que modifiquen el estado del líquido en su trayectoria.

Luego de ingresar los datos que requiere el modelo, se realiza el proceso de calibración, donde se pretende aproximar los valores modelados con los valores reales tomados en la fuente hídrica, siendo esta la parte más importante en la implementación de esta herramienta. Por último se efectúa la simulación de escenarios de saneamiento en relación con los objetivos de calidad esperados para el año 2017 (Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, CRQ).

4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO

El tramo de estudio, tiene una longitud de aproximadamente 663.3 metros y está ubicado en su totalidad en la zona rural del municipio de Pijao, en la vereda El Verdal.

A continuación se presentan las coordenadas de los puntos a modelar conformados por 3 secciones transversales sobre la fuente principal y 2 vertimientos, identificados estos últimos como el retorno del agua captada para la conservación y reproducción de peces, truchas y la quebrada N.N que tributa al río Azul 60.4 metros aguas debajo de la estación Puente (ver Figura 7).

Tabla 8. Localización de puntos a modelar sobre el río Azul

SECCION No.	ESTACION	CODIGO	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m)	COORDENADAS		
					Latitud	Longitud	A.S.N.M
1	Bocatoma Truchas ACUAZUL LTDA	A1	K00+000	0	4° 17' 12.3"	75° 43' 27.15"	1520
2	Después Bocatoma ACUAZUL LTDA	A2	K00+075	74.6	4° 17' 12"	75° 43' 29"	1510
3	Vertimiento Truchas	V1	K00+263	188.7	4° 17' 06"	75° 43' 29.69"	1500
4	Puente	A3	K00+580	316.7	4° 17' 13.4"	75° 43' 37"	1480
5	Quebrada N.N	V2	K00+644	63.8	4° 17' 13"	75° 43' 38"	1480
6	Desembocadura	A4	K00+663	19.5	4° 17' 14"	75° 43' 39"	1470

A: Estación sobre el río Azul

V: Vertimiento

a.s.n.m.: altura sobre el nivel del mar

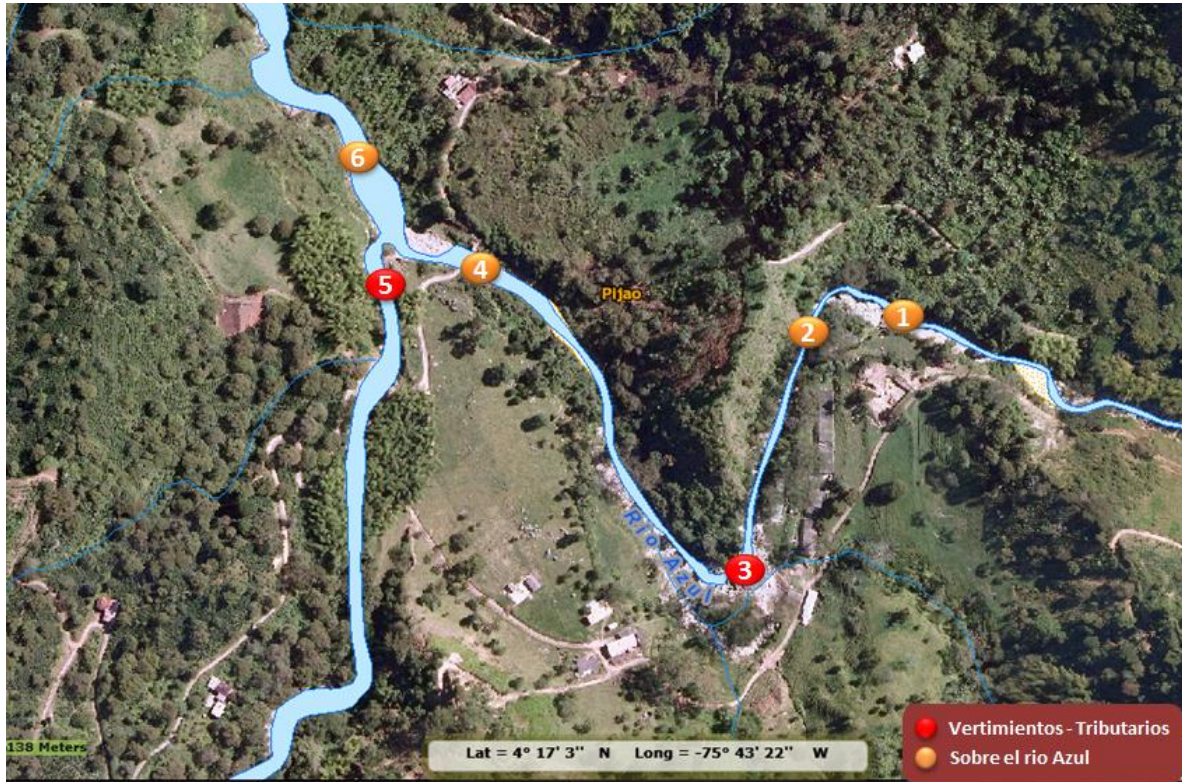
Las diferentes secciones transversales del río se fijaron en función de:

- a. Accesibilidad
- b. Seguridad del personal
- c. Condiciones hidráulicas

4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR


A continuación se presenta un resumen de las principales características que componen las estaciones de aforo y muestreo.




Figura 7. Localización de puntos de aforo y muestreo, río Azul



Fuente: SIGQuindío

Tabla 9. Características generales de las estaciones a modelar dentro del rio Azul

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p>A1 Bocatoma ACUAZUL</p>	<p>Vereda El Verdal</p>	<p>Rio en aparente buenas condiciones, rodeado por bosque.</p>	
<p>A2 Después bocatoma ACUAZUL</p>	<p>Vereda El Verdal, acceso predios ACUAZUL LTDA</p>	<p>Rio en aparente buenas condiciones, rodeado por bosque.</p>	
<p>V1 Vertimiento Truchas</p>	<p>Vereda El Verdal, predio truchas ACUAZUL LTDA</p>	<p>Vertimiento de agua proveniente de la truchera.</p>	

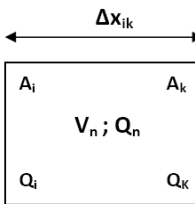
ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p>A3 Puente</p>	<p>Vereda El Verdal, vía truchas ACUAZUL LTDA</p>	<p>Rio en aparente buenas condiciones rodeado de bosque.</p>	
<p>V2 Quebrada N.N</p>	<p>Vereda El Verdal, vía truchas ACUAZUL LTDA</p>	<p>Quebrada en aparente buenas condiciones con presencia de algas.</p>	
<p>A4 Desembocadura</p>	<p>Vereda El Verdal, vía truchas ACUAZUL LTDA</p>	<p>Rio en aparente buenas condiciones.</p>	

4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE

Se requiere la obtención de los tiempos de viaje en los diferentes puntos dentro del río Azul para así conocer cuánto tiempo tarda la masa de agua en trasladarse de una estación a otra, lo cual permite, en la medida de lo posible, tomar las muestras de agua de la misma masa de forma homogénea, además de poder realizar una óptima planificación del muestreo.

A continuación se explica la metodología utilizada para la obtención de los tiempos de viaje según el modelo matemático Qual2k (Chapra y Pelletier 2003) y su resultado.

El tiempo de viaje (T_n) de una corriente hídrica es igual a la sumatoria de los tiempos de residencia (t_n) de cada tramo discretizado, es decir:

$$T_n = \sum_{1}^n t_n$$


Dónde:

$$t_n = \frac{\text{Volumen}_n}{\text{Caudal}_n} \quad \text{Volumen}_n = \frac{(\text{Area}_i + \text{Area}_k) \div 2}{\Delta x_{i,k}} \quad \text{Caudal}_n = \frac{(\text{Caudal}_i + \text{Caudal}_k)}{2}$$

Tabla 10. Variables hidrométricas obtenidas el 27 de mayo de 2015 durante la jornada de aforo para la obtención de los tiempos de viaje

Punto	Abscisa	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m ²)	Profundidad Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m ³ /s)
A1	K00+000	Bocatoma Truchas ACUAZUL LTDA	0.727	1.000	0.200	5.000	0.727
A2	K00+580	Puente	0.890	0.870	0.185	4.700	0.773

Tabla 11. Tiempos de viaje de la masa de agua para el día 27 de mayo de 2015

ESTACIÓN	A(m ²)	Δx (m)	Q (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Q medio (m ³ /s)	T viaje (seg)	T viaje (min)	ΣT viaje (hora)	Horas parciales
Bocatoma ACUAZUL	1.00	0.00	0.73	0	0.73	0	0	0	0
Puente	0.87	600.00	0.77	560.85	0.75	747.39	12.46	0.21	0.21

4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS

El método de aforo para la obtención de los tiempos de viaje y la toma de muestras de agua, fue seleccionado de acuerdo con lo establecido por el IDEAM en su “Guía para el monitoreo de cuerpos de agua, 1999”. El tipo de aforo implementado fue por vadeo; se seleccionaron un mínimo de 11 secciones verticales dentro de cada sección transversal elegida (punto de monitoreo); la velocidad de flujo se obtuvo por medio de un molinete de eje horizontal.

Tabla 12. Variables hidrométricas obtenidas el 28 de julio de 2015 durante la jornada de aforo y muestreo

Punto	Abscisa	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m ²)	Profundidad Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m ³ /s)
A1	K00+000	Antes bocatoma Truchas ACUAZUL LTDA*					0.777
A2	K00+075	Después bocatoma ACUAZUL LTDA	0.758	0.952	0.257	3.700	0.722
V1	K00+263	Vertimiento Truchas ACUAZUL LTDA	1.613	0.167	0.185	0.900	0.269
A3	K00+580	Puente	1.006	1.071	0.249	4.300	1.078
V2	K00+644	Quebrada N.N	0.805	0.281	0.216	1.300	0.226
A4	K00+663	Desembocadura**					1.304

*Suma del caudal de la estación A2 + caudal del canal que transporta el agua captada hacia la truchera

**Suma de los caudales del V2+A3

- Caudal de muestreo

Con el fin de conocer el tipo de caudal (máximo, medio o bajo) obtenido el día del muestreo, se determinó a partir de la Curva de Duración de Caudales, elaborada dentro del informe: Línea Base CRQ, 2011. Esta representa un análisis de frecuencias de caudales que permite emplearse para referenciar el estado del recurso hídrico en cuanto a cantidad en condiciones de caudales máximos, medios, bajos y de sequía.

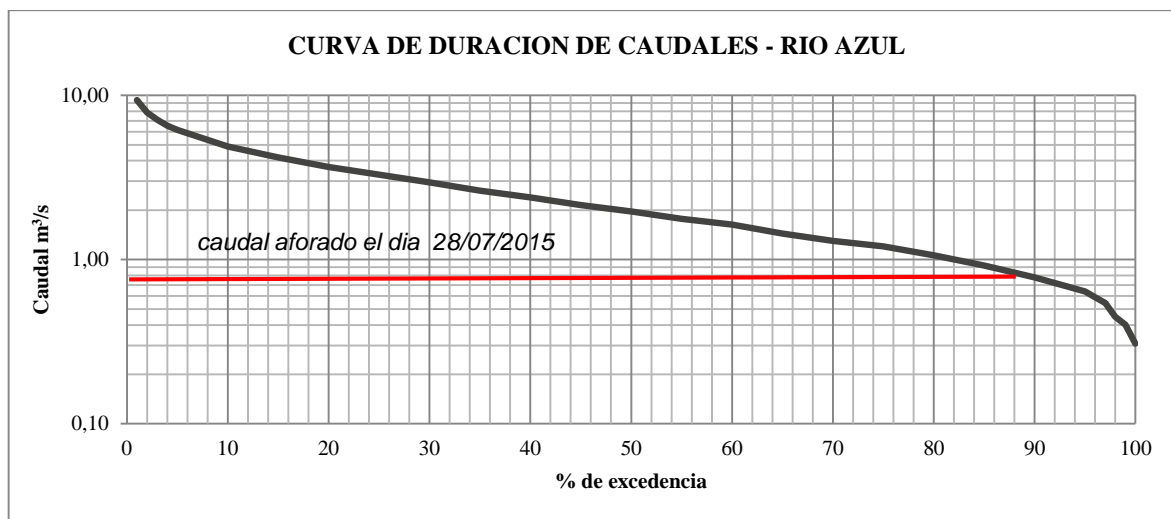


Figura 8. Curva de Duración de Caudales, río Azul

Fuente: Línea Base, CRQ 2011.

El valor del caudal arrojado el día del muestreo (28 de julio de 2015) en la estación Puente - Desembocadura fue de **1.078 m³/s**, equivalente a un 74% de probabilidad de excedencia considerado como caudal medio a bajo. El valor del caudal calculado para esta fecha obedece a la presencia de precipitaciones es en la zona días antes de la toma de muestras. Es de recordar que en la región se presentaba el fenómeno climatológico del Niño lo cual las precipitaciones en la zona obedecieron a un evento atípico relacionado con la presencia de una tormenta en el Caribe, el cual generó lluvias en la zona de hasta 28.8 mm registrados en la estación climatológica El Tapir (municipio de Pijao).

4.4 CONDICIONES DE BORDE

4.4.1 Condiciones de borde externas

Las condiciones de borde externas corresponden a las fronteras o límites del tramo a modelar de cualquier corriente hídrica principal (Bocatoma ACUAZUL y Desembocadura). La localización de las fronteras abiertas del modelo y la definición de las condiciones hidrodinámicas y de calidad del agua a imponer en dichos límites, son denominadas como condiciones de frontera. Estas constituyen en uno de los aspectos más relevantes dentro del proceso de implementación del modelo matemático.

4.4.2 Condiciones de borde internas

Las condiciones de borde internas de una corriente hídrica a modelar, corresponden a los diferentes afluentes y derivaciones existentes a lo largo del cauce principal, como son: Captación de agua, vertimiento ACUAZUL LTDA y afluentes naturales. En la Tabla 13 se presenta las condiciones de borde internas incluidas en la modelación matemática.

- Vertimientos de aguas residuales.

Se refiere a la descarga directa de las aguas servidas de la industria de truchas ACUAZUL. Este tipo de vertimiento directo es incluido en la modelación como descargas laterales; posee caudales bajos, y su influencia en las características hidráulicas son bajas mientras que su impacto podría ser alto en las características de calidad de la fuente receptora.

- Concesiones de agua

Existe una captación de agua, la cual es utilizada para la preservación y reproducción de peces (truchas) de la industria piscícola ACUAZUL.

- Fuentes de agua naturales (Tributarios)

Para el tramo de estudio, se cuenta con una quebrada tributaria al río Azul proveniente de la vereda La Maizena.

Tabla 13. Condiciones de borde internas en la malla de modelación, río Azul

PUNTO	ESTACION	CODIGO	ABSCISA	CAUDAL	CONDICION
			(Km)	(m ³ /s)	
	Bocatoma Truchas ACUAZUL LTDA	A1	K00+000	0.777	Estación
1	Concesión	C1	K00+020	0.055	
2	Vertimiento Truchas	V1	K00+263	0.269	
3	Quebrada N.N	V2	K00+644	0.226	
	Desembocadura	A4	K00+663	1.304	Estación

4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN

El grid o malla de modelación, quedó conformada por 7 secciones transversales, donde 5 corresponden a las secciones localizadas en las salidas de campo como estaciones de aforo y de toma de muestras de agua. En la siguiente tabla se representa la malla de modelación para el río Azul, donde se especifican las distancias entre las secciones a implementar.

Con base en los diferentes análisis efectuados, la red esquematizada para el río Azul para fines de la modelación numérica, queda definida de la siguiente manera, (ver Tabla 14): 4 estaciones transversales, 2 condiciones de borde externas (estación Bocatoma ACUAZUL y estación Desembocadura) y 3 fronteras internas (Concesión, retorno del agua: Truchas ACUAZUL y quebrada N.N).

Tabla 14. Red esquematizada para modelación de calidad del agua – río Azul

A1	k 0.000	0	1	k 0.000	Bocatoma ACUAZUL
CON1	K 0.020		2	K 0.075	Después Bocatoma ACUAZUL
V1	K 0.263	2	3	K 0.580	Puente
V2	K 0.644		4	K 0.663	Desembocadura
A4	k 0.663	3			

4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO

Se hizo indispensable incorporar al modelo fuentes difusas de agua necesarias para el balance de caudales no aforados en campo, es decir, es necesario introducir estos valores de caudal ya que se presenta varios retornos de agua luego de la estructura de captación de agua para la truchera.

Tabla 15. Fuentes Difusas incluidas como parte del balance hídrico dentro del río Azul

Fuente Difusa		Localización entre la abscisa (m)		Diffuse Abstraction	Diffuse Inflow
				m ³ /s	
Fuente Difusa 1	D1	100	500	-	0.09

4.6.1 Resultados de la modelación del componente hidráulico

Un modelo es una representación discreta y simplificada de una situación continua y compleja de un flujo real. Los diferentes tramos de una fuente hídrica o un canal son representados por elementos equivalentes o simplificados (unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales), en los cuales se considera que el flujo sigue o responde a ciertas leyes físicas (continuidad y cantidad de movimiento), representadas mediante ecuaciones diferenciales que incluyen diferentes coeficientes empíricos. En el proceso de implementación del sistema de modelación matemática, inicialmente se lleva a cabo la fase de calibración del modelo hidrodinámico, el cual se constituye el módulo básico del sistema de modelación. Una vez lograda la calibración del modelo hidrodinámico, se procede a efectuar la calibración de los modelos de transporte y de calidad de agua, en la medida en que la información de campo disponible lo permita.

En la Tabla 16 se presentan los resultados de las variables hidrométricas, obtenidas después de la calibración hidráulica. Asimismo, en la Figura 9 se muestran los perfiles longitudinales de las variables observadas comparadas con las calculadas por el modelo (simuladas).

Tabla 16. Variables hidrométricas obtenidas en la calibración hidráulica

Abscisa (km)	Profundidad media (m)	Ancho Cauce (m)	Perímetro mojado (m)	Área húmeda (m ²)	Velocidad media (m/s)	Caudal (m ³ /s)	n Manning
0	0.270	4.50	5.040	1.216	0.639	0.777	0.1050
75	0.252	3.70	4.204	0.934	0.773	0.722	0.1710
580	0.252	4.30	4.804	1.082	0.999	1.081	0.0900
663	0.282	5.00	5.564	1.412	0.926	1.307	0.1500

Figura 9. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: Caudal – Simulado vs Observado

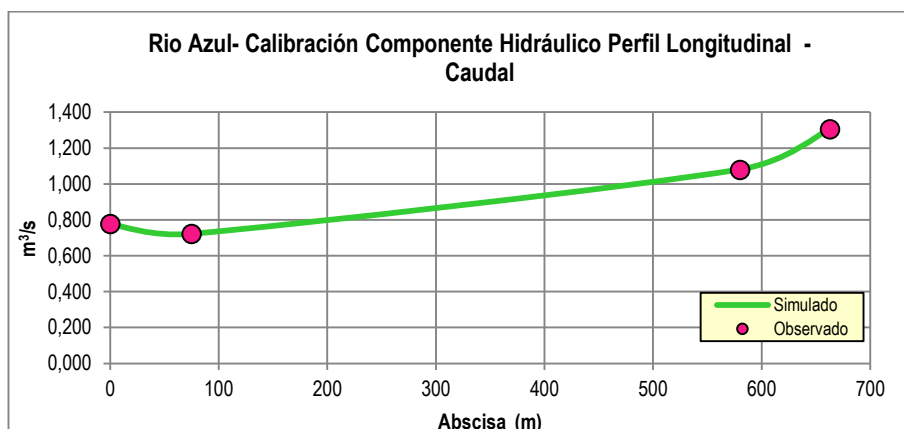


Figura 10. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: Velocidad – Simulado vs Observado

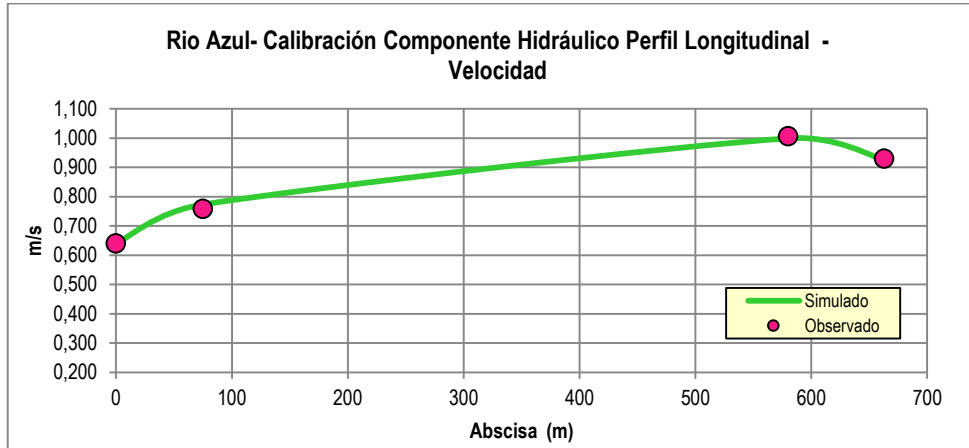
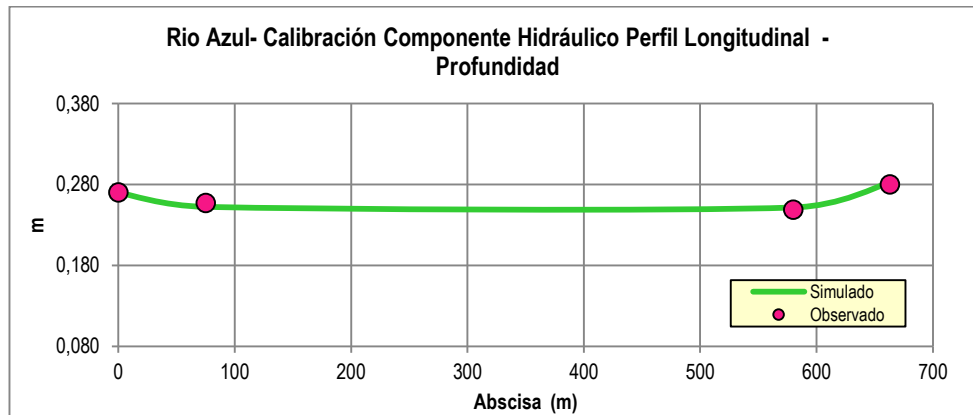


Figura 11. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: Profundidad del agua – Simulado vs Observado



5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO

Los datos de entrada (Inputs) para el modelo de “Calidad del agua” en el río Azul, fueron obtenidos por medio de la toma de muestras en el cauce principal y un tributario de mayor interés hídrico, de forma simultánea, siguiendo la masa de agua de acuerdo a los horarios establecidos (tiempos de viaje). Estas muestras fueron posteriormente analizadas en el laboratorio de aguas de la CRQ.

Tabla 17. Datos de calidad río Azul (CRQ) – Campaña de muestreo 28/07/2015

PUNTO DE MONITOREO		Caudal (m ³ /s)	Temp. (°C)	SST (mg/l)	ST (mg/l)	OD (mg/l O ₂)	DBO ₅ (mg/l O ₂)	DQO (mg/l O ₂)	pH (unidades)	Coliformes Fecales NMP/100ml	Coliformes Totales NMP/100ml
Antes bocatoma Truchas ACUAZUL LTDA*	A1	0.777	16.8	4.1	220	8.64	0.53	3.02	8.32 (16.8°C)	2.20E+03	2.20E+03
Después bocatoma ACUAZUL LTDA	A2	0.722	16.8	4.1	220	8.64	0.53	3.02	8.32 (16.8°C)	2.20E+03	2.20E+03
Vertimiento Truchas ACUAZUL LTDA	V1	0.269	17.2	5.8	247	8.16	0.7	5.1	8.39 (17.2°C)	3.30E+03	1.70E+04
Puente	A3	1.078	18.3	5.4	208	8.72	0.89	6.42	8.42 (18.3°C)	1.30E+03	1.70E+03
Quebrada N.N	V2	0.226	18.7	1.9	170	8.86	0.31	2.45	8.43 (18.7°C)	7.80E+02	1.30E+03
Desembocadura	A4	1.304	18.6	6.4	238	8.24	1.51	6.8	8.46 (18.6°C)	2.20E+04	2.20E+04

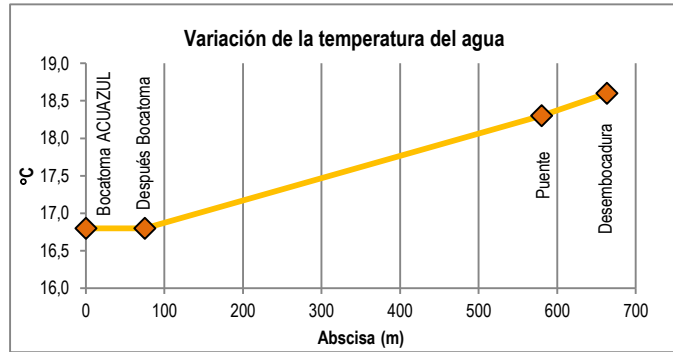
*Se asumen las mismas condiciones de calidad de la estación A2.

Nota: La producción de truchas en el momento de la visita era muy poca.

5.1.1 Observaciones Generales de los reportes de calidad

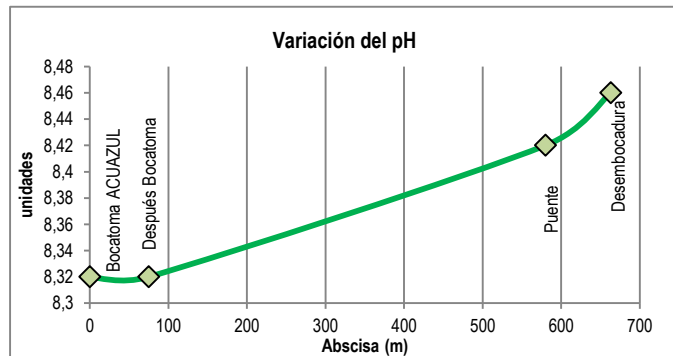
- **Temperatura**

La temperatura influye directamente en la disociación de sales y gases, por lo tanto en la conductividad eléctrica y el pH. Se aprecia un aumento de 1.5 grados de este parámetro, lo cual puede resultar del vertimiento de agua que proviene de la industria de truchas.



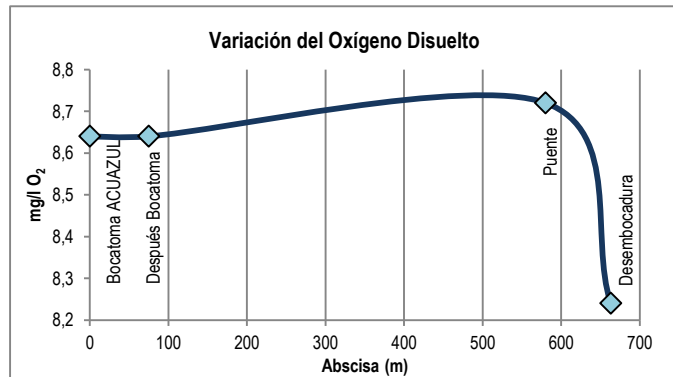
- **pH**

El análisis de esta variable es fundamental para establecer la calidad del agua, pues permite identificar las condiciones acidas o alcalinas de una corriente cuyos valores extremos puede repercutir seriamente en la flora y fauna acuáticas. En todo momento los valores se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84 (entre 5 y 9 unidades): cercanos a los 8.2 unidades apropiado para la mayoría de la fauna acuática.



- **OD**

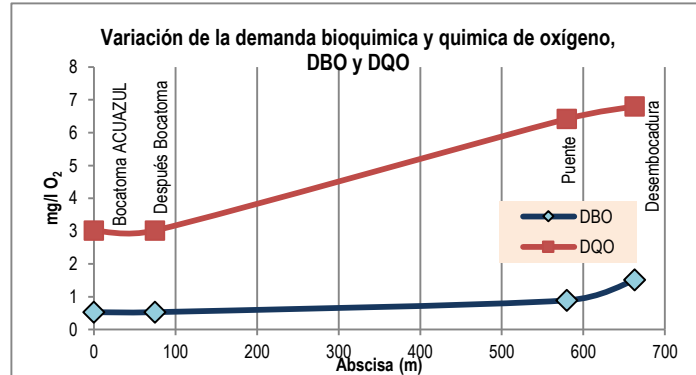
Indicador importante de la calidad del agua ambiental. El oxígeno disuelto en el agua proviene del oxígeno en el aire que se ha disuelto en el agua, por lo que están muy influidos por las turbulencias del río (que aumentan el OD) o ríos sin velocidad (en los que baja el OD). Los niveles de oxígeno disuelto típicamente pueden variar de 7 y 12 mg/l O₂. Los niveles bajos de OD pueden encontrarse en áreas donde el material orgánico (vertidos de depuradoras, granjas, plantas muertas y materia animal) está en descomposición. Las bacterias requieren oxígeno para



descomponer desechos orgánicos y, por lo tanto, disminuyen el oxígeno del agua. Los niveles de OD para el tramo de estudio aumentan un 1% luego del vertimiento de la truchera, (OD del vertimiento = 8.16 mg/l O₂). En todo el trayecto se presentan concentraciones de OD aceptables que indican una buena calidad del agua en el río.

• DBO y DQO

Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana, hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales.



DBO₅: Este parámetro mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en el agua. Es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos, entre mayor valor se presente mayor nivel de contaminación existe.

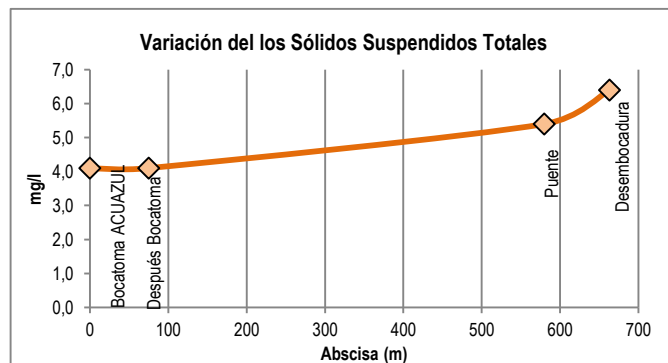
El río Azul en su cuenca baja presenta niveles de DBO₅ entre los 0.53 mg/l O₂ y 1.51 mg/l O₂. Estos niveles se consideran aceptables para la actividad biológica en la fuente hídrica.

DQO: Este parámetro estima la cantidad de materia orgánica en el agua que es oxidada o degradada por medios químicos, al igual que la DBO, entre mayor valor se presente mayor nivel de contaminación existe.

El río Azul en su cuenca baja presenta niveles de DQO ≤ 10 mg/l O₂, equivalente a aguas superficiales de excelente calidad, entre 3.02 y 6.8 mg/l O₂. (Tomado de: Escala de clasificación de la calidad del agua, CONAGUA, México).

• SST

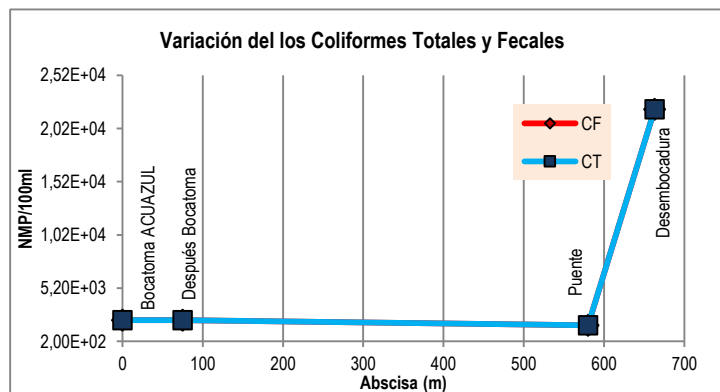
La concentración de sólidos suspendidos totales es importante para los ecosistemas fluviales por razones de calidad ecológica y del agua, los sólidos inorgánicos en suspensión atenúan la luz, principalmente a través del proceso



de dispersión lo cual disminuye el proceso fotosintético en la flora acuática. Los sólidos en suspensión también influyen en la actividad metabólica y proporcionan un área de superficie para la absorción y el transporte de una gran variedad de componentes. La mayor concentración de SST se presenta al final del tramo de estudio, estación Desembocadura con 6.4 mg/l (incremento del 36% respecto al punto inicial), estos niveles de SST indican buena calidad del agua en el rio Azul.

- **Coliformes Totales y Fecales**

Esta variable se relaciona directamente con la presencia de bacterias procedentes del intestino humano y de animales de sangre caliente, pero también ampliamente distribuidas en la naturaleza, especialmente en suelos, semillas y vegetales. Los valores obtenidos no presentan variaciones significativas, los CT y CF se mantienen en ambas estaciones con valores de 780 y 200 NMP/100ml respectivamente.



Los CT y CF provenientes luego del vertimiento (estación Puente) presentan valores de 1700 y 1300 NMP/100ml respectivamente, los cuales se ven incrementados hacia el final del tramo, dado que no se evidenció algún tipo de vertimiento directo que aumente su concentración, por el contrario, la quebrada NN localizada a 83 metros aguas arriba del último punto posee niveles de CT y CF de 1300 y 780 lo que presuntamente podría mejorar las condiciones de calidad en el rio.

En relación con la normatividad colombiana, los Coliformes Totales y Fecales no estarían cumpliendo con el Decreto 1594/84 en cuanto a la destinación del recurso para consumo humano, sólo en la estación Puente sobre el rio Azul y tributario quebrada N.N se cumpliría con los límites establecidos (CT y CF menores a los 20000 NMP/100m y 2000 NMP/100ml respectivamente).

De acuerdo a los resultados de los análisis de calidad reportados para el rio Azul, se puede concluir que esta fuente hídrica goza de buena calidad. No obstante, los valores obtenidos al final del tramo, evidencian algún tipo de vertimiento no identificado en campo que estaría aumentando en pequeñas cantidades las concentraciones de Temperatura del agua, DBO₅, SST, y CF-CT, además de disminuir el OD y el aumento de la temperatura del agua.

5.1.2 Cumplimiento Resolución 0631 de 2015, vertimiento Truchas ACUAZUL

Tabla 18. Cumplimiento Resolución 0631 de 2015, vertimiento Truchas ACUAZUL

PUNTO DE MONITOREO		SST (mg/l)	DBO ₅ (mg/l O ₂)	DQO (mg/l O ₂)	pH (unidades)
Vertimiento Truchas ACUAZUL	Concentración	5.8	0.7	5.1	8.39
	Cumplimiento Resolución 0631 de 2015	< 50 CUMPLE	< 50 CUMPLE	< 150 CUMPLE	(6-9) CUMPLE

*Para este caso no es necesario conocer su concentración, la tabla a utilizar en dicha Resolución sólo establece el valor del límite máximo de la concentración a cumplir. Es de aclarar que este vertimiento no hace parte del sistema de alcantarillado público del municipio de Pijao, por tal motivo los límites máximos permisibles fueron tomados del Capítulo VII - Resolución 0631/2015.

5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN

En el modelo se hace fundamental conocer las distintas constantes que determinan la tasa a la que reaccionan los diferentes parámetros de calidad. Las constantes que serán necesarias hallar son las siguientes:

- Constante de decaimiento de la DBO (Kd)
- Constante de reaireación (K2).
- Constante de decaimiento de los coliformes (Kb).

5.2.1 Constante de decaimiento de la DBO (Kd)

- **Método de la cinética de primer orden**

La tasa de remoción de la materia orgánica es proporcional a la cantidad de esta que se encuentre presente en el instante del análisis. Además se ha demostrado que la cinética de esta reacción se puede suponer para efectos prácticos como de primer orden, es decir:

$$dL/dT = -KdL \quad (1)$$

Dónde:

L = Cantidad de Materia orgánica oxidable en el tiempo t, mg/L

Kd = Coeficiente promedio de remoción de la DBO en el río, día⁻¹

- **Método de cálculo entre tramos**

La constante de desoxigenación se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Romero, 2004):

$$K_{de} = [(1/\Delta t) \ln (L_A/L_B)] \quad (2)$$

$$K_d = (K_{de}/2.3) \quad (3)$$

Dónde:

K_{de} : Constante de desoxigenación (base e), día⁻¹

K_d : Constante de desoxigenación (base 10), día⁻¹

L_A : DBOC en el punto A, mg/l

L_B : DBOC en el punto B, mg/l

Δt : Tiempo de viaje entre A y B, días

A : Punto localizado aguas arriba

B : Punto localizado aguas abajo

Si bien es cierto, que existen otros métodos para determinar la constante de desoxigenación - el método de mínimos cuadrados, método de Thomas, método de la pendiente de Thomas, método de los puntos de Rhame - para llevar a cabo la modelación se decide por la metodología del cálculo de tramos, método más intuitivo y de mayor facilidad de manejo, y el cual permite obtener las constantes entre cada tramo (estaciones de muestreo), lo que da una representación muy aproximada de los valores de decaimiento que se dan en el cauce.

Además, la bondad de este método frente al método de cinética de primer orden, es que no hace falta estimar la constante de desoxigenación a los 20 días, ya que no es representativo de la situación que ocurre en el río, en general, las fuentes hídricas de montaña tienen una alta capacidad de reaireación por la turbulencia que se genera en rápidos y caídas, y por lo tanto el nivel de oxígeno disuelto se mantiene alto favoreciendo la degradación aerobia de la materia orgánica y la nitrificación de las diferentes especies de nitrógeno. Adicionalmente, por la baja profundidad de la corriente, la luz solar penetra la columna facilitando la mortalidad de sustancias patógenas. A su vez, en las piscinas y zonas muertas o de almacenamiento de las fuentes de montaña, bajo condiciones de caudal bajo, la materia orgánica particulada

y los sólidos suspendidos se sedimentan y pueden quedar temporalmente atrapados, aumentando la capacidad efectiva de autopurificación.

Así pues, un método empírico como es el método de cálculo entre tramos, permite obtener valores de la constante de desoxigenación similares a los obtenidos después del proceso de calibración del modelo.

- **Constante de reaireación (K₂)**

Se ha demostrado que la tasa de transferencia de oxígeno a las corrientes por el fenómeno de reaireación depende de la hidrodinámica de los dos medios, de la intensidad, de la turbulencia y la superficie del agua, además de la relación entre el área superficial y el volumen del agua, como se muestra a continuación:

$$\frac{dC}{dt} = K_L A (C_s - C) / V = K_2 (C_s - C) \quad (4)$$

Donde K_L es el coeficiente de absorción o de transferencia de masa y K_2 es el coeficiente de reoxigenación.

5.2.2 Constante de decaimiento de los coliformes (K_b)

Se utilizará la siguiente fórmula:

$$K_B = K_B = K_{B1} + K_{Bluz} + K_{B(sed)} - K_{a(crecimiento)} \quad (5)$$

Dónde:

K_B	: Constante de decaimiento de los coliformes, dia^{-1}
K_{B1}	: Decaimiento por salinidad, dia^{-1}
K_{Bluz}	: Decaimiento por la luz, dia^{-1}
$K_{B(sed)}$: Decaimiento por sedimentación, dia^{-1}
$K_{a(crecimiento)}$: Tasa de crecimiento de los coliformes, dia^{-1}

La concentración de coliformes en aguas naturales se viene usando como indicador de contaminación potencial por patógenos desde 1890. Los factores que afectan a la aparición y desaparición de coliformes son múltiples, factores físicos, físico-químicos y bioquímicos-biológicos.

Tradicionalmente la desaparición de coliformes se trata como una cinética de primer orden (como casi todas las tasas relacionadas en el proceso de modelación). Lombardo va un poco más allá, y en un esfuerzo por describir la dinámica de los coliformes separa la cinética en tres ecuaciones de primer orden para Coliformes totales (CT), Coliformes fecales (CF) y estreptococos fecales (SF).

Existen muchos planteamientos sobre el decaimiento de los coliformes, otro interesante es la que propuesta por Lantrip (1983), en la cual propone una ecuación que modela el decaimiento, siendo este una combinación de la combinación de modelos que dependen de la intensidad lumínica y de los que no. La dificultad para la aplicación de este modelo, sería el conocimiento del valor de la intensidad lumínica y la temperatura para sustituir en la ecuación de Lantrip.

5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD

Una vez definidos los parámetros de calibración que tienen mayor sensibilidad además del ajuste manual de los valores de calidad para las descargas difusas, se inició el proceso de calibración del modelo seleccionado. Los parámetros con los menores efectos se dejaron fijos durante el proceso teniendo como base los valores reportados en la literatura científica.

La temperatura fue el primer parámetro de calidad del agua en ajustarse, y posteriormente se procedió con el ajuste de la DBO_5 , el OD, los SST y los CF. Con este ajuste manual preliminar de los parámetros de calibración, se realizaron las corridas del modelo. La calibración se efectuó comparando los resultados del modelo con los datos medidos en las estaciones sobre el cauce del río Azul.

A continuación se presentan los valores óptimos de los diferentes parámetros de calibración, además de los diferentes perfiles longitudinales para las variables temperatura del agua, DBO_5 , OD, SST, pH y CF.

Tabla 19. Calibración de las descargas difusas

Fuente Difusa		Localización entre la abscisa (m)		Caudal (m ³ /s)	Temp. Agua °C	SST (mg/l)	OD (mg/l O ₂)	DBO ₅ (mg/l O ₂)	pH (unidades)	Coliformes Fecales (NMP/100ml)
Fuente Difusa 1	D1	103	500	0.04	18.7	13.00	8.50	7.80	8.4	1.00E+02
Fuente Difusa 1	D2	579	663	0.06	18.7	20.00	3.80	15.00	8.7	4.10E+05

Tabla 20. Constantes cinéticas de reacción

Tramo (m)		Tasa de decaimiento de los coliformes (1/d)	Velocidad de sedimentación de los coliformes (m/d)	Constante de mortalidad de los coliformes por luz (d ⁻¹ Ly/h)
103	500	18.000	20.000	0.550

Figura 12. Modelo de calidad del agua – río Azul
Perfil longitudinal de Temperatura del agua y DBO₅

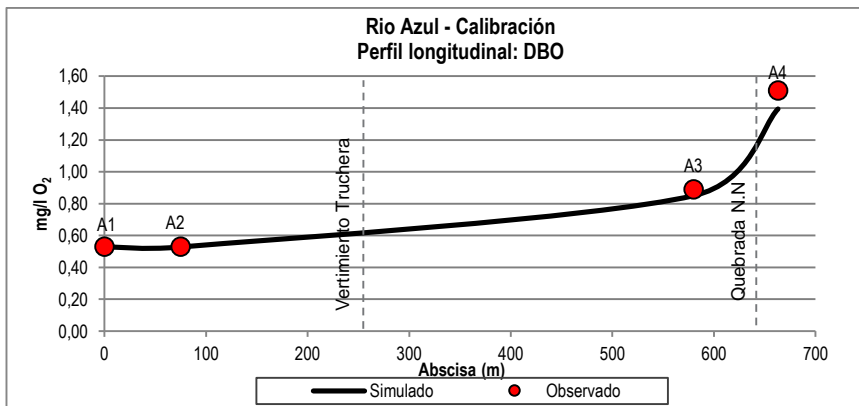
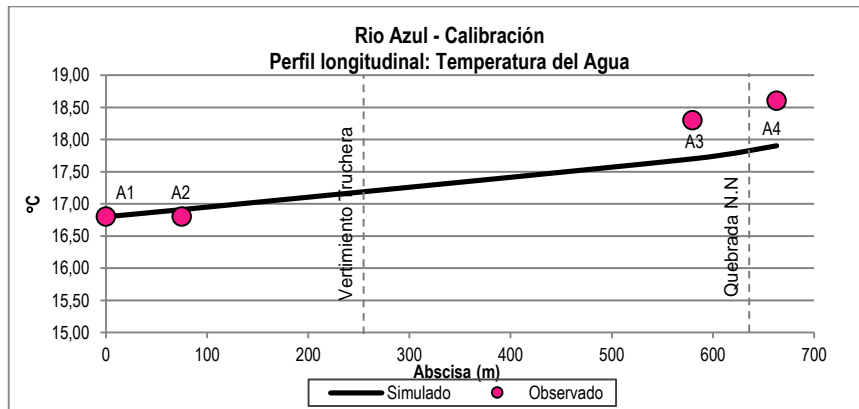


Figura 13. Modelo de calidad del agua – río Azul
Perfil longitudinal de OD, SST y pH

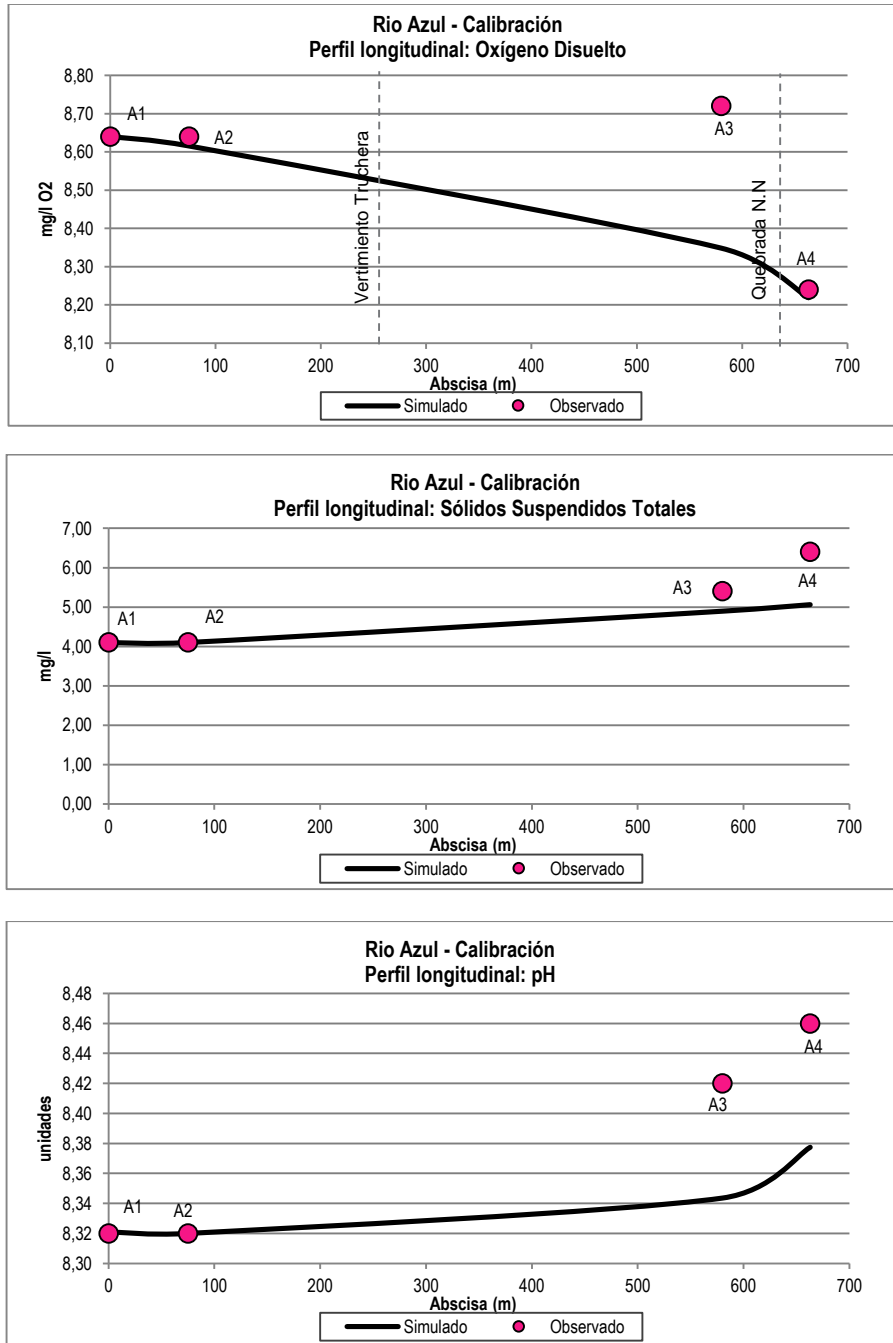
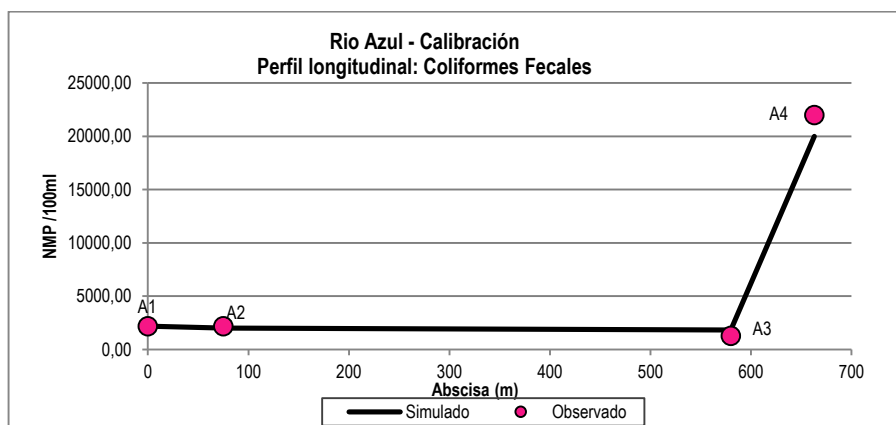


Figura 14. Modelo de calidad del agua – río Azul
Perfil longitudinal de Coliformes Fecales



6. VERIFICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

La validación o verificación del modelo de simulación, como su nombre lo indica, pretende certificar o garantizar que los resultados obtenidos de un modelo calibrado para una época específica, sirva para otras épocas cuando las condiciones sean similares. Con ello se pretende identificar un rango máximo o mínimo de los datos de calidad sobre cada punto monitoreado a partir de la información histórica. Para lo anterior, los diferentes modelos de calidad simulados para el año 2015 serán comparados con los valores obtenidos en las campañas de muestreo de los años 2013 y 2014 realizadas por la Corporación Autónoma Regional del Quindío sobre las estaciones de las que se dispone información, Bocatoma ACUAZUL y Puente.

Figura 15. Validación de los modelos de Temperatura y pH

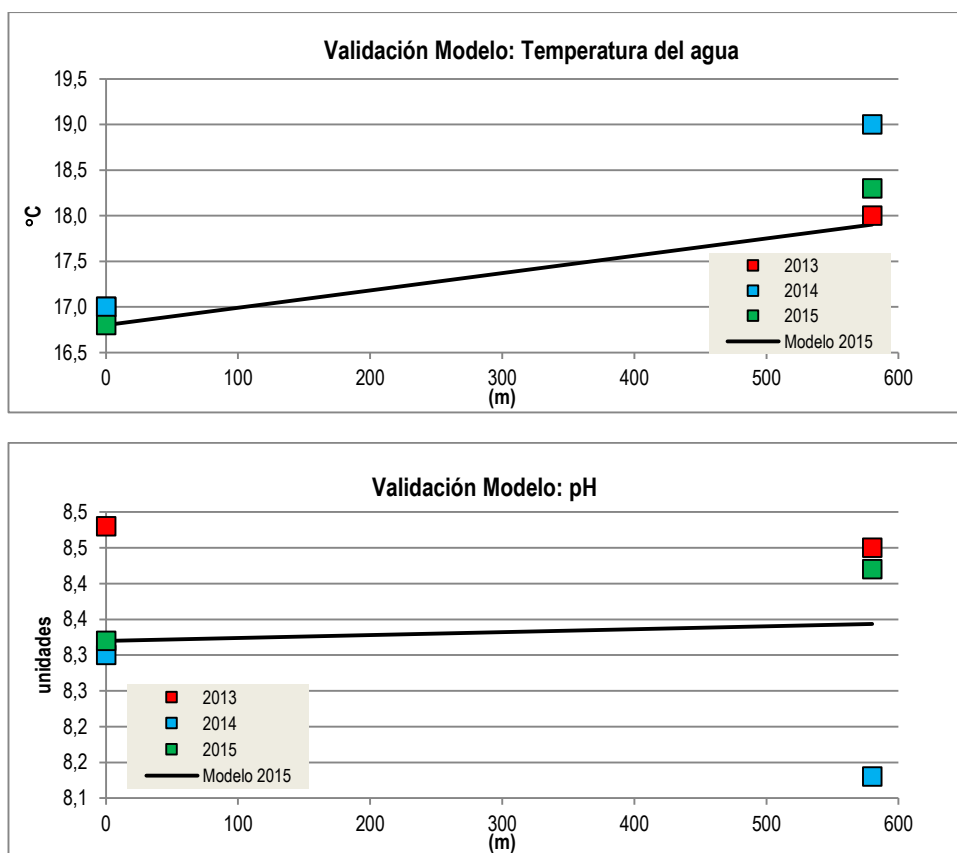


Figura 16. Validación de los modelos de DBO₅, OD y SST

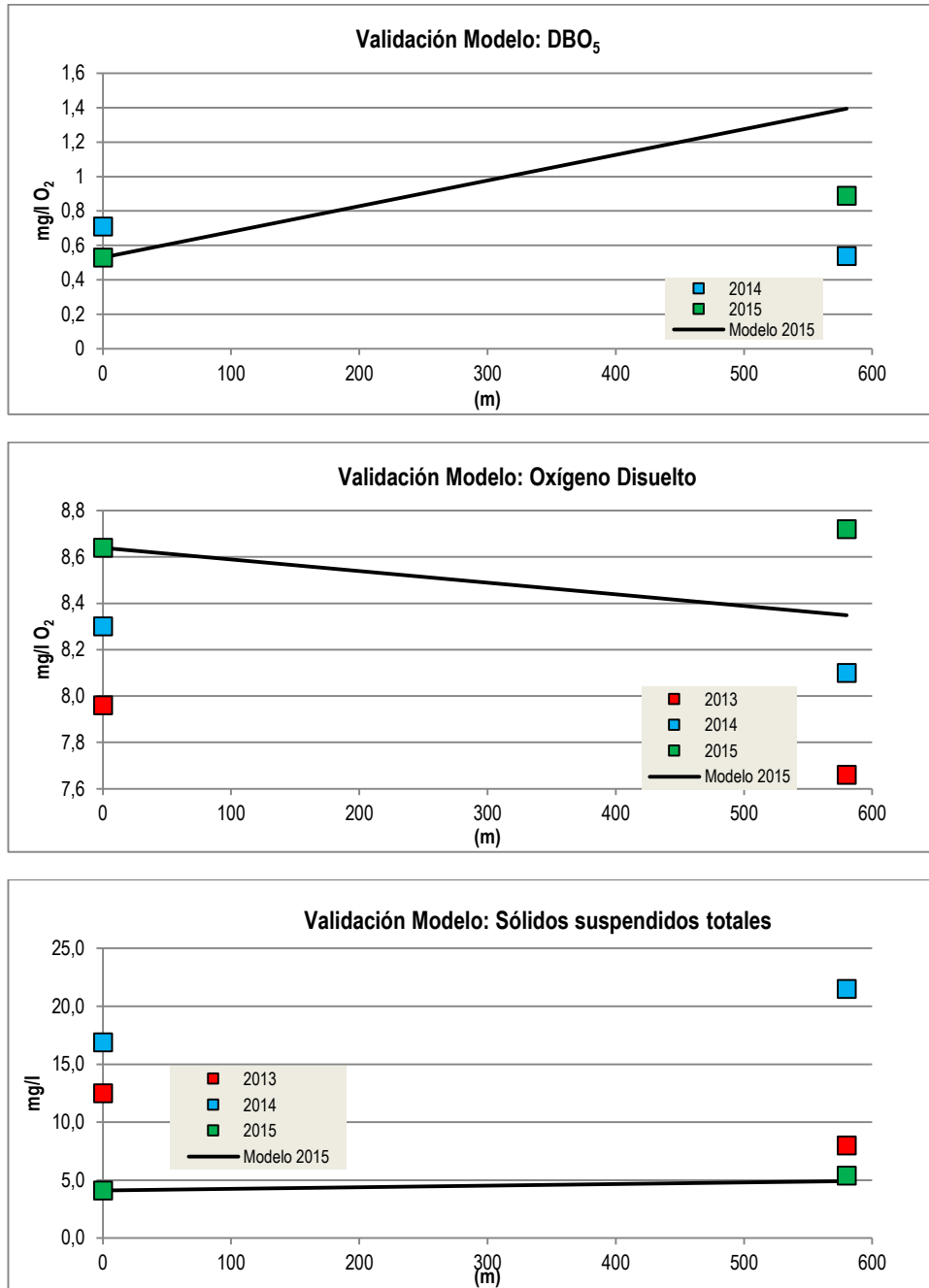
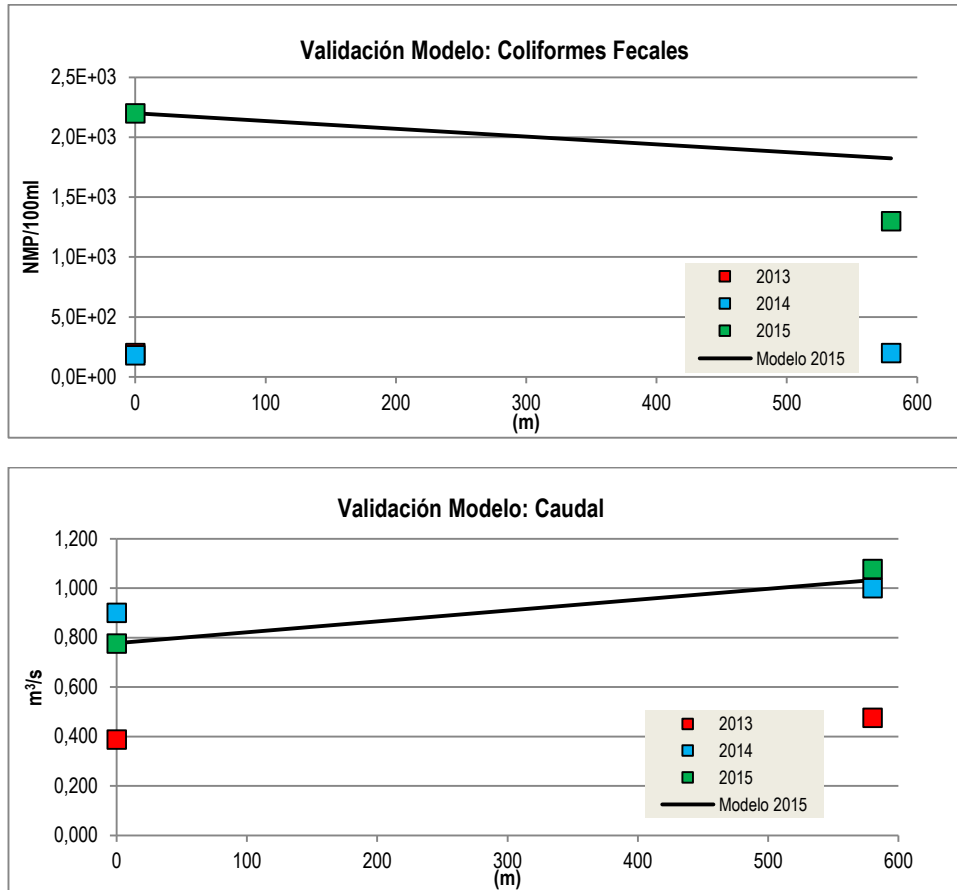


Figura 17. Validación de los modelos de CF y Caudal



Los valores de temperatura del agua poseen una tendencia creciente medidos desde el punto inicial (Bocatoma ACUAZUL) hasta la estación Puente, para lo cual el modelo de temperatura determinado para el año 2015 cumpliría con esta condición, además de encontrarse cerca del rango de valores reportados a través de los años (Bocatoma ACUAZUL=16.8 °C y Puente= 18 °C). De igual forma, las concentraciones de Oxígeno Disuelto (OD) obtenidas durante estos periodos, poseen tendencia decreciente encontrándose entre los 8.0 mg/l O₂ a 8.6 mg/l O₂, para lo cual el modelo actual (año 2015) se encuentra dentro de estos valores. En relación con los valores reportados para el año 2014, el modelo de DBO₅ se encuentra cercano a ellos, no obstante, los datos del año 2015 se ven en aumento a diferencia del año 2014, (para el año 2013 no se tienen reportes).

Los valores de pH, evidencia un comportamiento decreciente en todos los años a excepción del año 2015. En general el modelo de pH se encuentra dentro del rango medido a través de los años. Los SST no poseen un comportamiento similar entre los

años modelados. Podría observarse un comportamiento similar durante los años 2013 y 2015 (concentraciones más bajas).

En cuanto a los Coliformes Fecales, los modelos se diferencian por poseer mayor concentración de CF en el año 2013 en comparación con los años 2014 y 2015 donde la empresa ACUAZUL disminuyó su producción notablemente. Luego del vertimiento producido por la industria piscícola, la carga de CF pasa de 2000 a 11000 NMP/100ml medidos al inicio y final del tramo para el año 2013. En cuanto a los años 2014 y 2015 año no se evidenció afectación significativa del vertimiento sobre la fuente hídrica, ya que se obtuvieron valores de 180-2200 y 200-1300 NMP/100ml en la estación Bocatoma ACUAZUL y Puente respectivamente.

Dado lo anterior, es necesario continuar con los muestreos sincronizados y reportes de caudal instantáneo, lo cual hace posible la verificación de cualquier modelo de simulación en una época específica. La información puede ser utilizada, como en el caso de la calibración del modelo, para mostrar tendencias del comportamiento de los parámetros de calidad o para tener una base estadística de estos.

7. CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD PARA EL RIO AZUL

Luego de haber ejecutado, calibrado y verificado el modelo de simulación, se ha decidido por parte del modelador, no plantear escenarios de saneamiento debido a la buena calidad de sus aguas. De igual forma se evidencia que la calidad del agua del vertimiento Truchas ACUAZUL y la quebrada NN, no afectan la calidad del cuerpo receptor, río Azul, por lo cual no se requiere de remociones de los parámetros de calidad de DBO₅, SST, OD y CF.

Es así, que de acuerdo al Decreto 1594/84, el agua del río Azul medida en las estaciones Bocatoma ACUAZUL y Puente posee valores aceptables, en caso tal que se decidiera destinar el agua para alguno tipo de uso como los planteados en dicho Decreto. La anterior afirmación, está condicionada a los datos de calidad obtenidos el día 28 de julio de 2015.

A continuación se presenta gráficamente el cumplimiento de los Objetivos de Calidad establecidos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, para el río Lejos y el decreto 1594/84 en relación con la destinación del recurso para consumo humano y otros usos.

Figura 18. Perfil longitudinal DBO₅ año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ

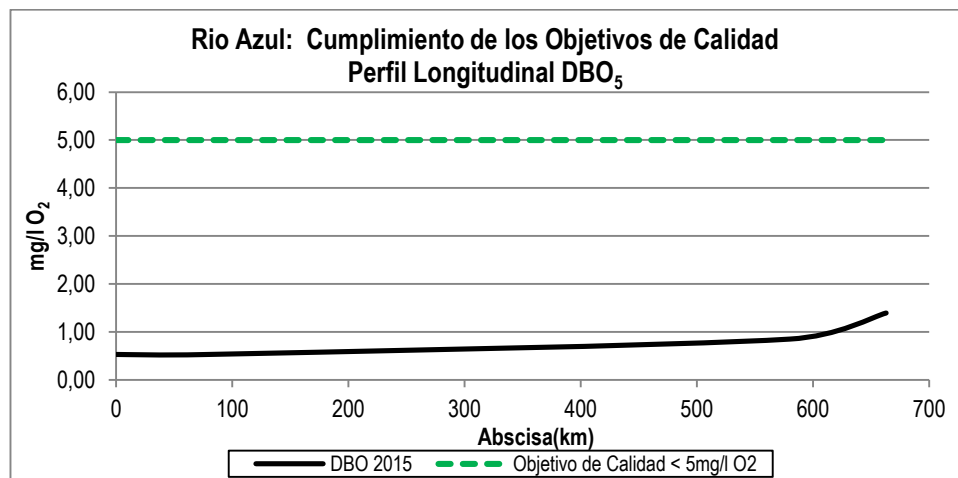


Figura 19. Perfil longitudinal OD, pH y SST año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ

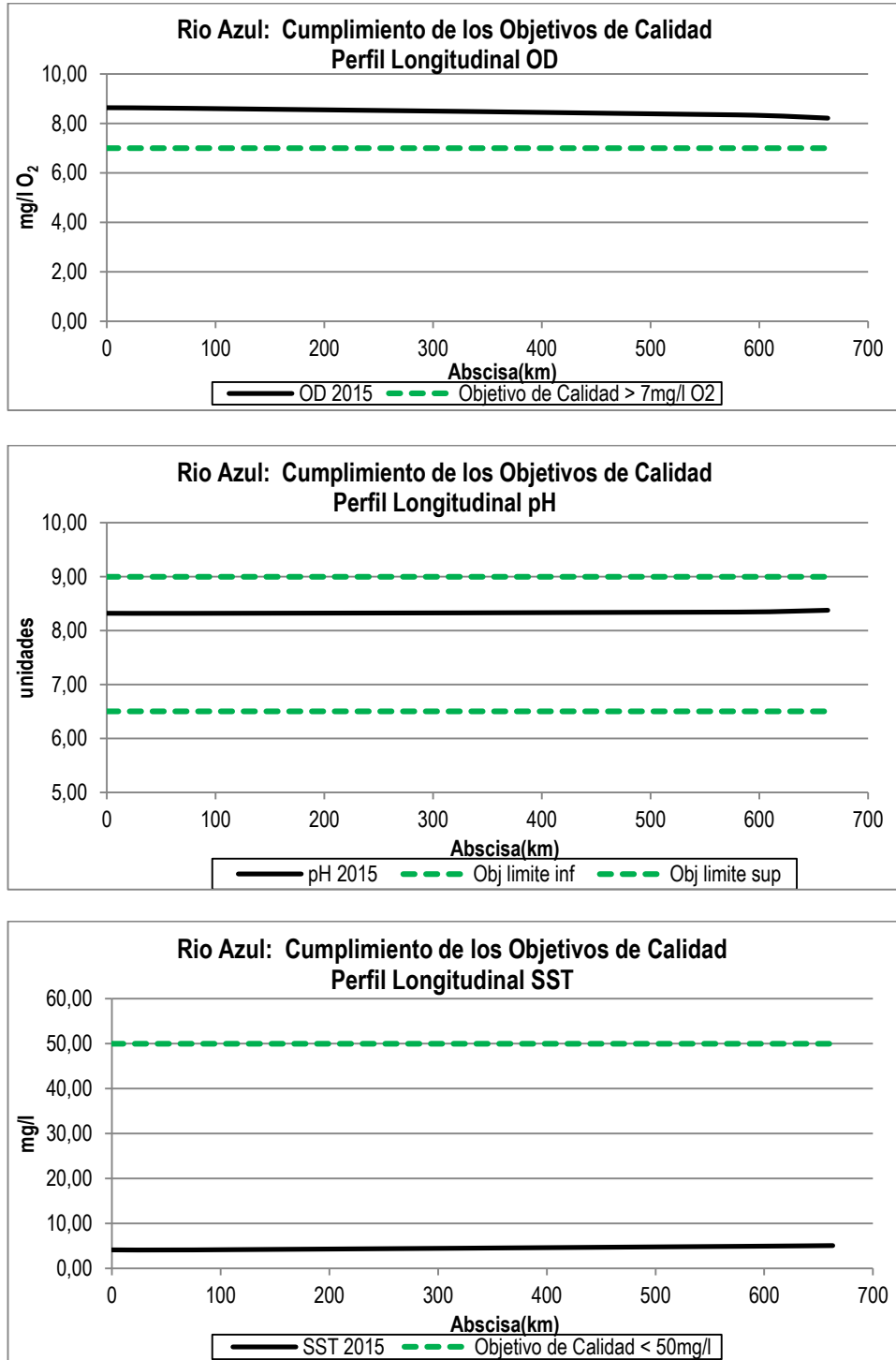
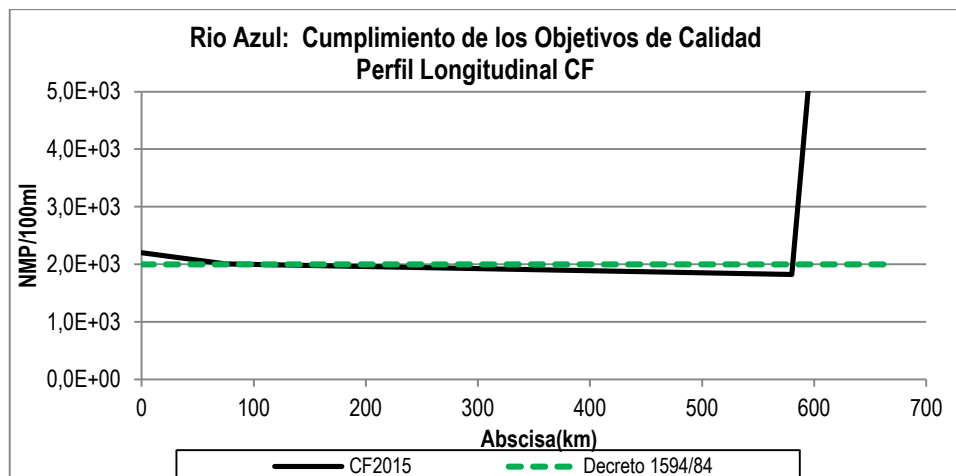


Figura 20. Perfil longitudinal de los CF, año 2015 en cumplimiento del Decreto 1594/84 para su destinación al consumo humano y otros usos



8. CONCLUSIONES

- En términos generales, el modelo de calidad del agua del río Azul reproduce en forma aceptable los valores de Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), pH, Temperatura y Coliformes Fecales (CF) en las diferentes estaciones ubicadas a lo largo de la corriente hídrica en su cuenca baja. Se contó con una campaña de monitoreo con propósitos de calibración en cinco (5) estaciones sobre el cauce principal y dos (2) vertimientos. El tramo seleccionado de 663 metros sobre el río Azul, obedece a la inspección de campo realizada sobre esta fuente hídrica donde el mayor impacto que podría afectar la calidad de sus aguas, sería el asociado al vertimiento producido por la industria de truchas ACUAZUL LTDA.
- La calidad del agua en el río Azul registrada el día 28 de julio de 2015, cumple con los objetivos de calidad propuestos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, como tributario principal del río Lejos. Por el contrario, los Coliformes Fecales y Totales se encuentran por encima de los valores exigidos por el Decreto 1594/84 para la destinación del recurso hídrico en los últimos 120 metros.
- El vertimiento producido por la industria piscícola ACUAZUL, revela concentraciones aceptables en la calidad del agua, a excepción de los Coliformes Fecales y Totales, los cuales poseen valores de 3300 y 17000 NMP/100ml respectivamente, (incremento del 6% en comparación con el año 2014). Luego de ser vertidos al cauce principal del río Azul, se evidencia la capacidad del río amortiguar estos agentes contaminantes llevándolos a valores menores que los registrados antes del vertimiento (Bocatoma ACUAZUL).
- Para mejorar la calibración del modelo de calidad del año 2015, se acudió a las descargas difusas, debido a que los reportes de calidad obtenidos no evidenciaron algún tipo de vertimiento que deteriorara la calidad del agua en el río Azul. Este supuesto se realiza, dado que se presentó un aumento en las concentraciones de DBO , SST y CF y reducción del OD al final del tramo de estudio (luego de tributar al río la quebrada N.N). Por lo anterior, se aconseja revisar el tramo de estudio en la búsqueda de algún tipo de vertimiento directo que esté afectando la calidad del río Azul al final del tramo de estudio.

9. BIBLIOGRAFIA

- Adela L.; Gloria G.(2010). Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Universidad Nacional de Colombia.
- Chapra, S. (1997). Surface water-quality modeling. The McGraw Hill Inc. NY
- CRQ, CARDER, CVC, UAESPNN, IDEAM, GTZ. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río La Vieja- Resumen documento plan 2008-2019.
- CRQ, (2013). Modelación de la calidad del agua en el río Azul.
- CRQ, CARDER, CVC, Universidades del Valle, Tecnológica de Pereira y del Quindío, Definición línea base, Ordenación del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río la Vieja Mediante el Desarrollo de una Metodología con Criterios de Eficiencia Económica e Implementación de Herramientas de Apoyo a la Decisión, 2011.
- Ven Te Chow. Hidrología Aplicada: Bogotá, McGraw-Hill, 1988.