

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
RIO ROJO, MUNICIPIO DE GÉNOVA 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	4
1.1 INTRODUCCIÓN	4
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.3 ALCANCE	5
1.4 MARCO NORMATIVO.....	6
2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	8
2.1 LOCALIZACIÓN.....	8
2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL	9
2.2.1 <i>Tributarios principales</i>	9
2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL	10
2.4 DEMANDA HÍDRICA	11
2.5 CALIDAD DEL AGUA	11
2.5.1 <i>Vertimientos de aguas residuales urbanas</i>	11
2.5.2 <i>Reportes históricos de calidad del agua: Estación “Desembocadura” rio Rojo</i>	12
3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2K	16
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	16
3.2 METODOLOGÍA	17
4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO.....	19
4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR.....	20
4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE	23
4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS	24
4.4 CONDICIONES DE BORDE.....	25
4.4.1 <i>Condiciones de borde externas</i>	25
4.4.1.....	26
4.4.2 <i>Condiciones de borde internas</i>	26
4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN	26
4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO.....	27
4.6.1 <i>Resultados de la modelación del componente hidráulico</i>	27
5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD.....	30
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO.....	30
5.1.1 <i>Observaciones Generales de los reportes de calidad</i>	30
5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN	33
5.2.1 <i>Constante de decaimiento de la DBO (Kd)</i>	33
5.2.2 <i>Constante de decaimiento de los coliformes (Kb)</i>	35
5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD	36
6. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	40
7. CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD PARA EL RIO ROJO	44
8. PLANTEAMIENTO ESCENARIO DE SANEAMIENTO: COLIFORMES FECALES.....	47
9. CONCLUSIONES.....	48
10. BIBLIOGRAFIA	50

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. NORMA PARA VERTIMIENTOS A UN CUERPO DE AGUA PARA USUARIOS NUEVOS	6
TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA DESTINACIÓN DEL RECURSO	6
TABLA 3. OBJETIVOS DE CALIDAD RIO ROJO, CRQ	7
TABLA 4. LOCALIZACIÓN UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROJO.....	8
TABLA 5. RESUMEN CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS – UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROJO.....	9
TABLA 6. NUMERO DE VERTIMIENTOS HACIA LOS DIFERENTES CUERPOS DE AGUA, PROVENIENTES DE LA ZONA URBANA.....	12
TABLA 7. HISTÓRICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL CAUCE PRINCIPAL DEL RIO ROJO	13
TABLA 8. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS A MODELAR SOBRE EL RIO ROJO.....	19
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE FORO Y MUESTREO.....	21
TABLA 10. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 14 DE MAYO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE.....	23
TABLA 11. TIEMPOS DE VIAJE DE LA MASA DE AGUA PARA EL DÍA 14 DE MAYO DE 2015.....	24
TABLA 12. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 23 DE JULIO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO Y MUESTREO.....	24
TABLA 13. CONDICIONES DE BORDE INTERNAS EN LA MALLA DE MODELACIÓN, RIO ROJO	26
TABLA 14. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES TRANSVERSALES DE LA MALLA DE MODELACIÓN PARA EL RIO ROJO.....	26
TABLA 15. RED ESQUEMATIZADA PARA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROJO.....	27
TABLA 16. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EN LA CALIBRACIÓN HIDRÁULICA.....	28
TABLA 17. DATOS DE CALIDAD RIO ROJO (CRQ) – CAMPAÑA DE MUESTREO 23/07/2015	30
TABLA 18. CALIBRACIÓN DE LAS DESCARGAS DIFUSAS	36
TABLA 19. CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN UTILIZADAS PARA LA CALIBRACIÓN.....	37
TABLA 20. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS CF, RIO ROJO.....	47

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN RIO ROJO - DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO	8
FIGURA 2. CORRIENTES IDENTIFICADAS – UNIDAD HIDROGRÁFICA, RIO ROJO	10
FIGURA 3. VARIACIÓN DEL PROMEDIO DE CAUDALES MENSUALES MULTIANUALES, RIO ROJO.....	10
FIGURA 4. PORCENTAJES DEL CAUDAL DEMANDADO, UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROJO.....	11
FIGURA 5. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD A TRAVÉS DE LOS AÑOS SOBRE LA CUENCA BAJA DEL RIO ROJO ...	13
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA	17
FIGURA 7. PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, RIO ROJO	20
FIGURA 8. MAPA DE PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, SUBCUENCA RIO SANTO DOMINGO	22
FIGURA 9. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES, RIO ROJO	25
FIGURA 10. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUDAL - OBSERVADAS VS SIMULADA ..	28
FIGURA 11. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: VELOCIDAD DEL CAUCE – OBSERVADAS VS SIMULADAS.....	28
FIGURA 12. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: PROFUNDIDAD DEL CAUCE – OBSERVADAS VS SIMULADAS.....	29
FIGURA 13. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROJO.....	37
FIGURA 14. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROJO.....	37
FIGURA 15. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROJO.....	38
FIGURA 16. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROJO.....	38
FIGURA 17. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROJO.....	38
FIGURA 18. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROJO.....	39
FIGURA 19. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE TEMPERATURA DEL AGUA Y PH.....	40
FIGURA 20. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE DBO ₅ , OD Y SST.....	41
FIGURA 21. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE COLIFORMES FECALIS Y CAUDAL	42

FIGURA 22. PERFIL LONGITUDINAL DBO₅ AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ	44
FIGURA 23. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS OD, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ	44
FIGURA 24. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS PH, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ.....	45
FIGURA 25. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS SST, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ.....	45
FIGURA 26. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS CF, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DEL DECRETO 1594/84 PARA SU DESTINACIÓN AL CONSUMO HUMANO	46
FIGURA 27. ESCENARIO DE SANEAMIENTO, REDUCCIÓN DEL 99% DE LOS COLIFORMES FECALES	47

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 auto depuración 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 auto depuración 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 Rojo”, 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 distintos usos a lo largo del tramo de análisis sobre la corriente principal del río Rojo.

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 2009, 2013, 2014 y 2015 se ha monitoreado un tramo del río Rojo en el municipio de Génova, 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 Rojo, en un tramo cercano a los 4 kilómetros.

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 diferentes puntos sobre el río Rojo y tributario principal denominado río San Juan. El tramo inicia antes de la unión con el río San Juan en zona rural del municipio de Génova, vereda las Brisas siguiendo el trayecto del río Rojo hasta la vereda La Venada antes de la confluencia con el río Barragán.

Las actividades desarrolladas dentro de la elaboración del presente estudio son las siguientes:

Trabajo de campo,

- Determinación de tiempos de viaje
- Campañas de aforo y muestreo 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	≤40 °C
DBO ₅	Remoción en carga ≥ 80%
Sólidos Suspendidos	Remoción en carga ≥ 80%
Grasas y/o Aceites	Remoción en carga ≥ 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 y doméstico.

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/l O ₂	-	-	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.

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.

Tabla 3. Objetivos de calidad rio Rojo, CRQ

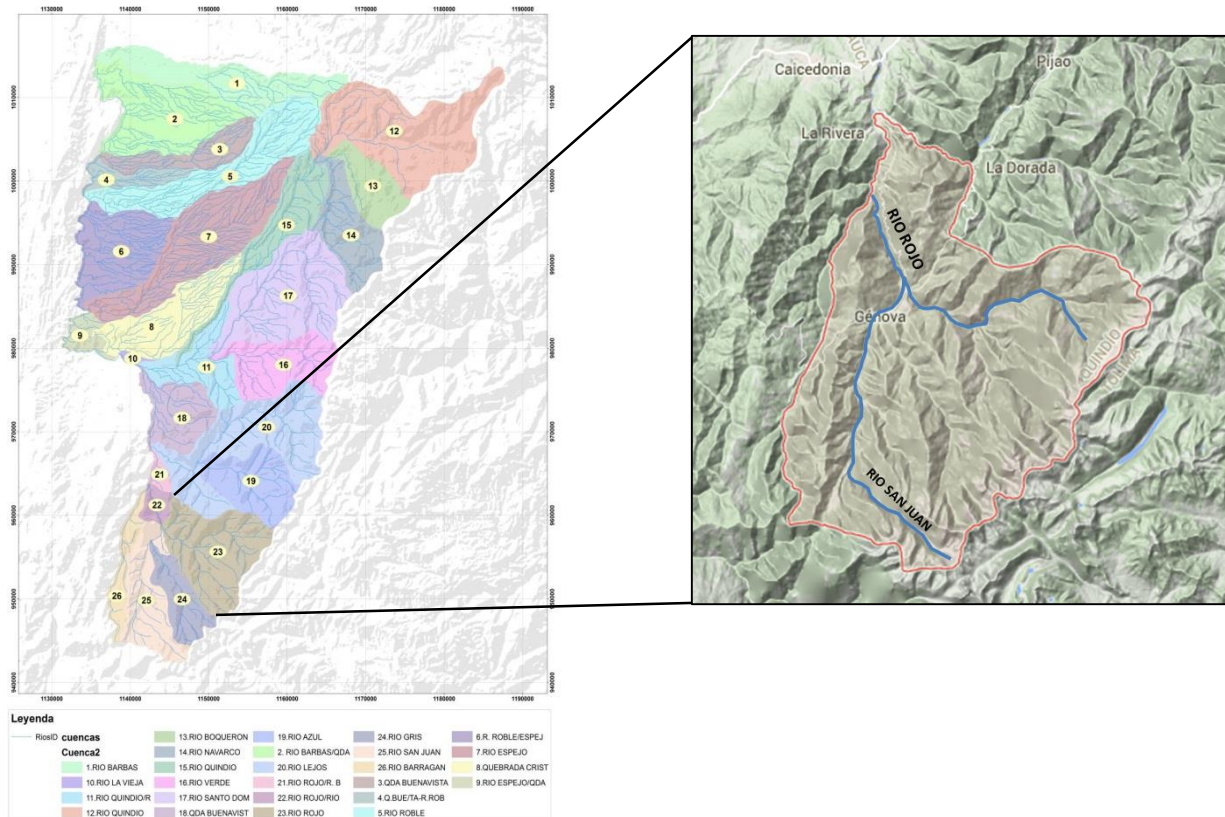
TRAMO DEL RIO	PARÁMETRO DE CALIDAD	OBJETIVO DE CALIDAD ESPERADA PARA EL AÑO 2017
Tramo Comprendido desde el puente vía a Génova hasta desembocadura en el rio Barragán	Oxígeno disuelto (mg/l O ₂)	Mayor a 5.0
	DBO (mg/l O ₂)	Menor a 5.0
	SST (mg/l)	Menor a 20
	pH (unidades)	Mayor a 6.5 y menor a 9

2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

2.1 LOCALIZACIÓN

El río Rojo nace en los límites con el departamento del Tolima a 3.750 m.s.n.m, conformado por las quebradas Brasil, Las Flores, Pedregales y Martina, para desembocar en el río Barragán.

Figura 1. Localización río Rojo - Departamento del Quindío



Geográficamente se localiza entre las siguientes coordenadas:

Tabla 4. Localización unidad hidrográfica Rio Rojo

	Latitud	Longitud
Parte Alta	04° 18' 40" N	75° 47' 43" W
	04° 12' 53" N	75° 39' 16" W
Parte Baja	04° 4' 32" N	75° 45' 18" W
	04° 5' 52" N	75° 50' 21" W

Fuente: Sig Quindío

2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL

De acuerdo a la información recopilada en el estudio "Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja, 2008", las características fisiográficas principales del río Rojo se indican en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen Características Fisiográficas – unidad hidrográfica río Rojo

UMC RIO ROJO	RÍO	Área (km ²)	Longitud Cauce	Perímetro (Km)	Cota Nacimiento	Cota Llegada	Forma		
							Kf	Kc	la
	Rojo	127.55	20.53	56.22	3750	1200	0.30	1.39	1.63
	Gris	53.75	15.16	41.55	3900	1465	0.23	1.59	2.57
	San Juan	63.1	21.99	43.56	3850	1361	0.13	1.54	2.58

Fuente: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río La Vieja, 2008.

En conjunto, estos ríos presentan un tipo de drenaje subdendrítico¹ con fuerte poder erosivo, formando cañones profundos en los flancos de la cordillera en dirección predominante de oriente a occidente presentando características de alto torrencialidad.

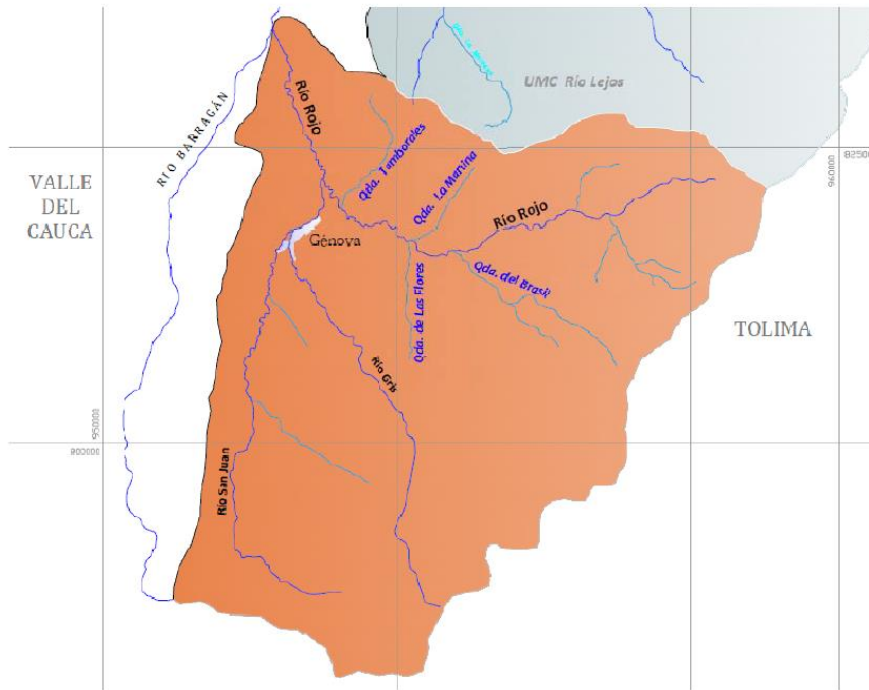
2.2.1 Tributarios principales

Río Gris: Nace al suroriente del municipio de Génova, en la cota 3900 m.s.n.m; atraviesa el casco urbano y abastece el acueducto municipal. Este río es considerado en época de lluvias, altamente peligroso ya que presenta un alto gradiente, limitado por valles estrechos y de pendientes moderadas a fuertes.

Río San Juan: Nace en el páramo sobre la cota 3850 m.s.n.m. formando el valle de las juntas; su afluente principal es el río Gris. Sus características son similares a las del río Gris pero aparentemente en menor grado, por poseer la microcuenca una forma más alargada. Igualmente, se evidencian procesos de remoción en masa y procesos de carácter superficial (erosión laminar y cárcavamientos).

¹En este caso se tiene un tributario mayor bien definido, con mayor cantidad de caudal, donde llegan una serie de afluentes pequeños. Se presentan cuando hay una captura intensa y además existe un control estructural o topográfico.

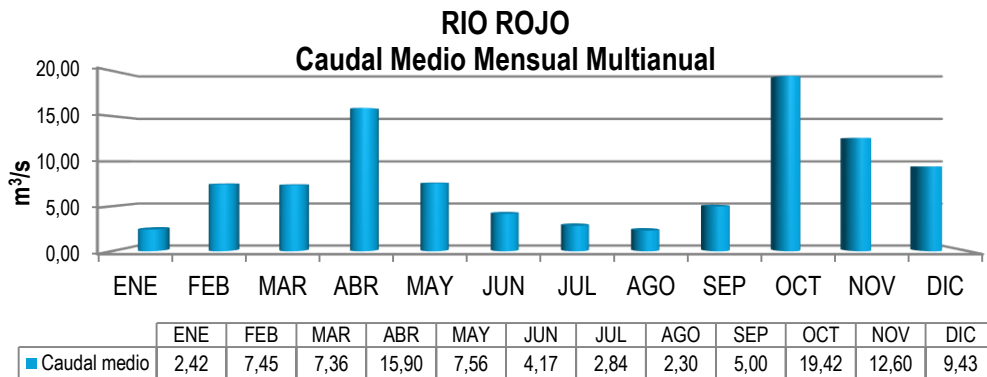
Figura 2. Corrientes identificadas – Unidad hidrográfica, río Rojo



2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

El municipio de Génova posee un alto potencial hídrico, resultado de las características hidrológicas del mismo. Éste pertenece a la unidad hidrográfica del río Rojo que a su vez es afluente principal del río Barragán, el cual finalmente desemboca al Río La Vieja.

Figura 3. Variación del promedio de caudales mensuales multianuales, río Rojo



Fuente: Índice de Escasez, CRQ 2014

2.4 DEMANDA HÍDRICA

La principal demanda hídrica en la unidad hidrográfica del río Rojo es para uso energético representando el 98% de la demanda total, seguido por el uso doméstico con un 2%. (*Base de datos Concesiones CRQ 2014*).

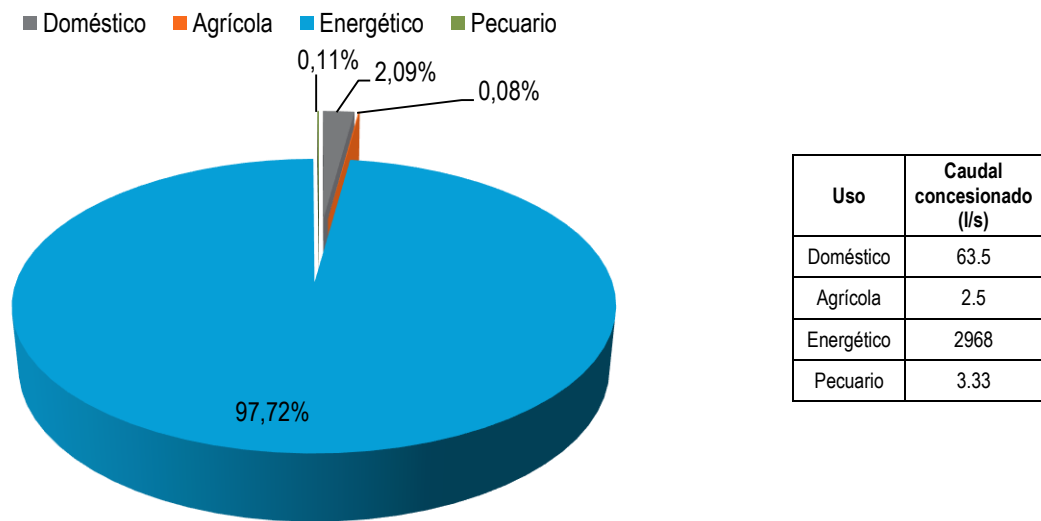


Figura 4. Porcentajes del caudal demandado, unidad hidrográfica río Rojo

2.5 CALIDAD DEL AGUA

Las principales fuentes de contaminación que afectan las fuentes hídricas del municipio de Génova son: las aguas residuales urbanas sin tratamiento y rurales, los beneficiaderos de café e insumos agroquímicos (PSMV Génova, 2009).

2.5.1 Vertimientos de aguas residuales urbanas

El río San Juan, es el límite del casco urbano del municipio por el norte, y transita de occidente a oriente. Sobre él se encuentran tres (3) vertimientos directos localizados en el sector Transversal 12 con calle 33, carrera 13 con calle 13 y Carrera 12 con calle 12, todos de origen doméstico.

Río Gris es límite del casco urbano del municipio por sur y occidente, y hace su recorrido de sur a norte, sobre él se encuentran dos (2) vertimientos de origen doméstico, localizados en el sector de la carrera 12 con calle 29 y carrera 12 con calle 28.

Tabla 6. Numero de vertimientos hacia los diferentes cuerpos de agua, provenientes de la zona urbana

Municipio Génova	Fuentes	Vertimientos
	Río San Juan	3
Río Gris	2	

Fuente: PSMV Génova, 2009

2.5.2 Reportes históricos de calidad del agua: Estación “Desembocadura” rio Rojo

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 últimos años sobre el cauce principal del rio Rojo, antes de desembocar al rio La Vieja (Estación Desembocadura).

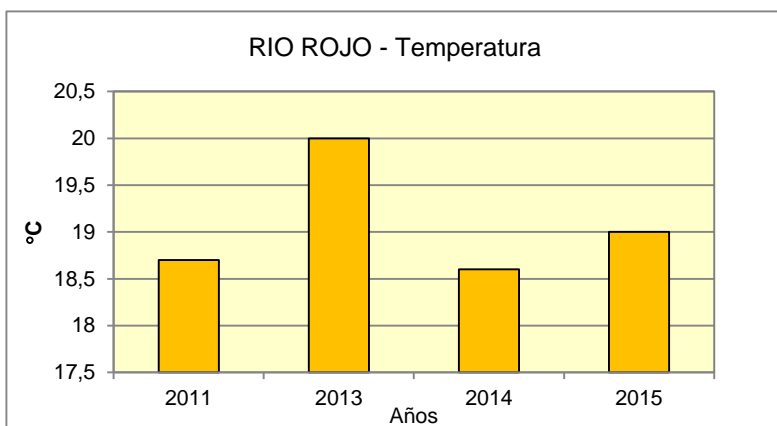
En la Figura 5 se identifican las variaciones de la calidad de agua correspondientes a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Oxígeno Disuelto (OD), Coliformes Totales (CT), Sólidos Suspendidos Totales (SST), pH y temperatura del agua. Estas variaciones exponen el comportamiento temporal sobre la estación “Desembocadura” localizada en la cuenca baja del rio Rojo.

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

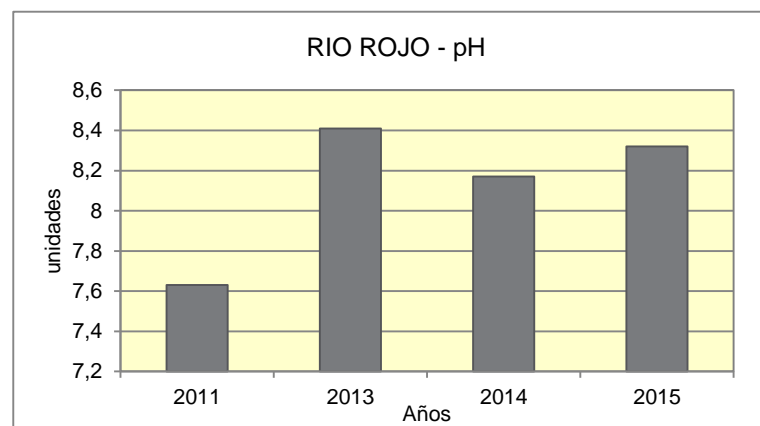
Corriente	Año	ESTACION	Caudal (m ³ /s)	T (°C)	pH (unidades)	DBO (mg/O ₂)	DQO (mg/O ₂)	SST (mg/l)	OD (mg/O ₂)	CT (NMP/100ml)	CF (NMP/100ml)
Rio Rojo	2011	Desembocadura	2.98	18.7	7.63	3	5.33	14.1	7.68	6.60E+05	6.60E+05
	2013		1.38	20	8.41	<5.7	9.4	4.4	10	1.60E+05	1.60E+05
	2014		4.66	18.6	8.17	1.73	10.4	26.8	7.8	1.30E+06	2.20E+05
	2015		5.30	19	8.32	1.64	11.9	20.9	8.95	1.60E+05	1.60E+05

Fuente: CRQ.

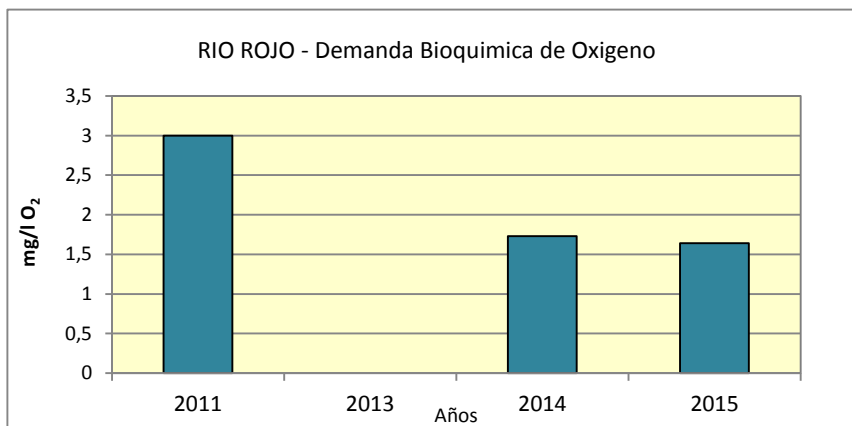
Figura 5. Variación de los parámetros de calidad a través de los años sobre la cuenca baja del rio Rojo



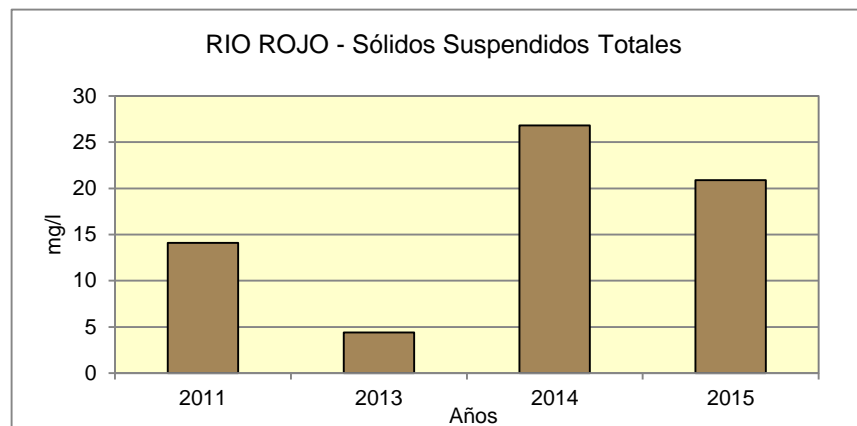
Las campañas de muestreo evidencian un rango de valores que van desde los 18.6 a 20 °C. No existe una variación significativa de la temperatura sobre este punto a través de los años. Su media se concentra en los 19 °C.



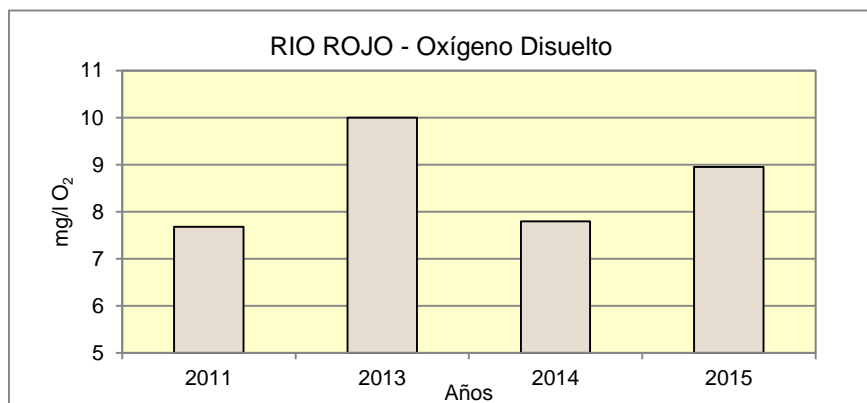
Los valores reportados se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84 de 5 a 9 unidades. Para el punto de análisis este se encuentran entre 7.63 y 8.41 unidades, aceptables para la preservación de la flora y la fauna.



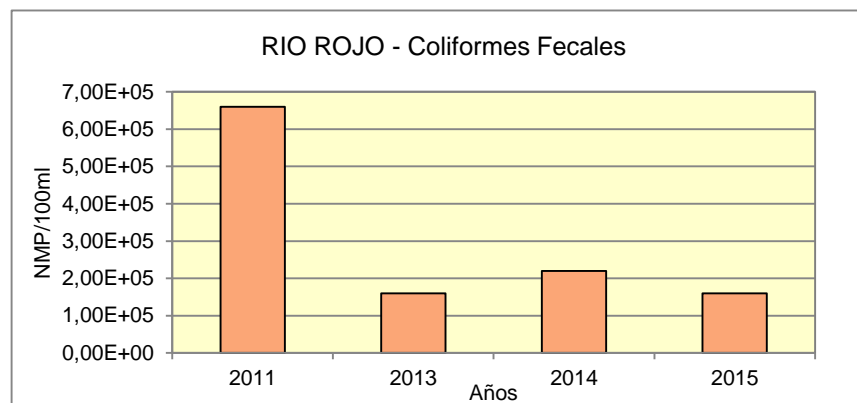
Para los dos últimos años de registro, este parámetro se encuentra entre los 1.64 y 1.73 mg/l O₂, lo que indica aguas relativamente limpias.



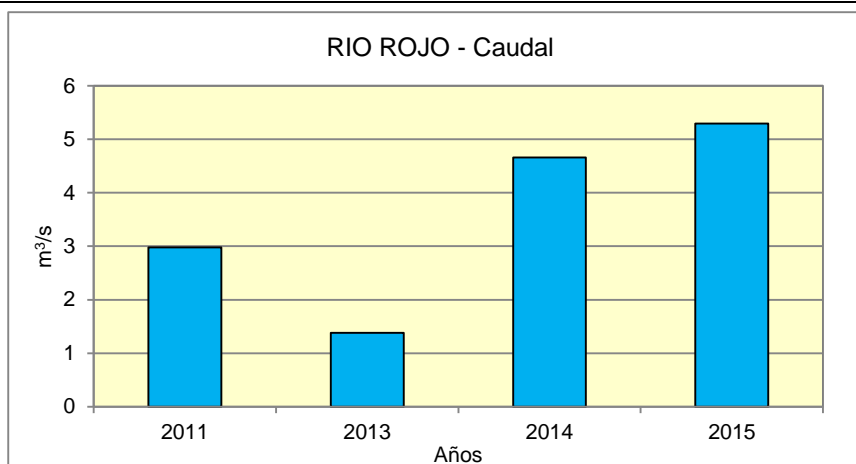
Para los dos últimos años de registro, se evidencian valores entre 26 y 20 mg/l, producto del arrastre de partículas (suelo) a través de las laderas hacia el río ocasionados por la lluvia presente días antes de la toma de las muestras.



Se tiene gran similitud en los valores de OD obtenidos en los años 2011 y 2014 con 7.7 y 7.8 mg/l O₂. Para el año 2013 este valor se ve incrementado en un 23% respecto a los dos años restantes.



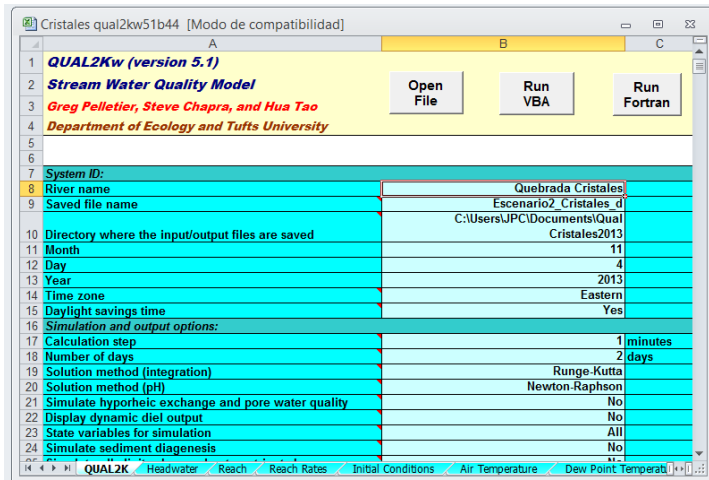
Se presenta un aumento significativo de este parámetro entre los años 2013 y 2014 del 87%, probablemente por la presencia de lluvias días antes del muestreo, lo que ocasionó el arrastre de partículas hacia la fuente hídrica.



El caudal para la estación desembocadura, oscila entre 1.4 y 5.3 m³/s. Estos van de caudales medios a bajos, antes de la desembocar el río Rojo en el río Barragán.

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 en el arroyo “Southampton” en el 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

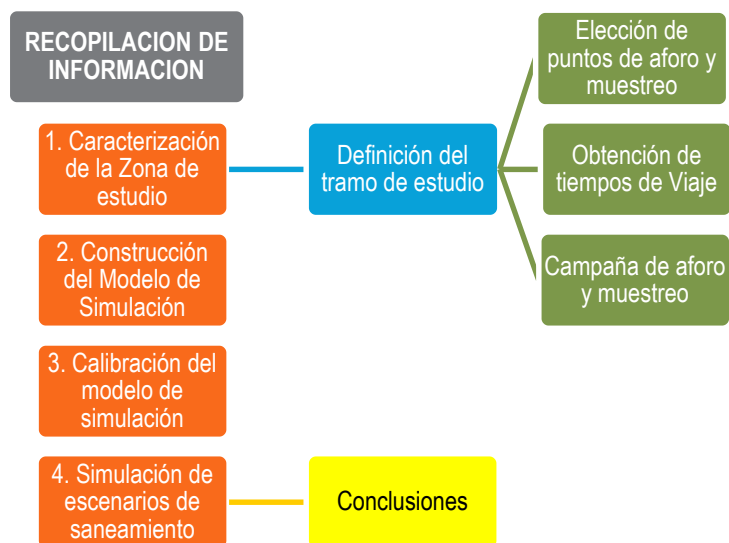
El modelo presenta características útiles para la simulación de los ríos y quebradas de montaña (cauces con pendiente longitudinal mayor al 1.0 %, Parraga 2004.) propios de nuestra región. A continuación se detallan algunas de sus cualidades:

- 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 23 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 4.4 kilómetros y está ubicado en su totalidad en el municipio de Génova. El cauce tiene una diferencia de nivel entre estaciones Cabecera y Desembocadura de 154 metros y una pendiente media de 3.5%.

A continuación se presentan las coordenadas de los puntos a modelar conformados por 2 secciones transversales sobre la fuente principal y 1 vertimiento (identificado como afluente natural, receptor de aguas residuales provenientes del casco urbano del municipio de Génova).

Tabla 8. Localización de puntos a modelar sobre el rio Rojo

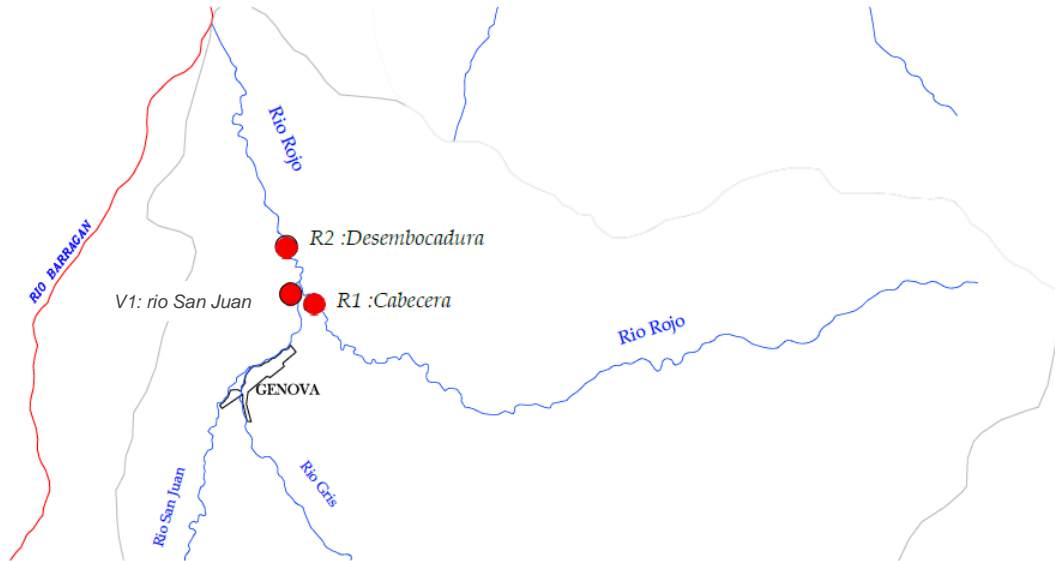
SECCION No.	ESTACION	CODIGO	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m)	COORDENADAS		
					X	Y	a.s.n.m.
1	Cabecera	R1	K00+000	0	958691	1144256	1265
2	Rio San Juan	V1	K00+020	20	958691	1144256	1263
3	Desembocadura	R2	K04+400	4400	959264	1143867	1210

R= Estación sobre el rio Rojo
V: Vertimiento
a.s.n.m.: altura sobre el nivel del mar

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

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



Figura 7. Puntos de aforo y muestreo, rio Rojo




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.

Tabla 9. Características de los puntos de foro y muestreo

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p>R1 Cabecera</p>	<p>Vía Génova-Barragán Vereda Las Brisas</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Rio en aparente buenas condiciones, rodeado por bosque. 	
		<ul style="list-style-type: none"> · Se observa agua un poco turbia. 	
<p>V1 Rio San Juan</p>	<p>Vía Génova-Barragán Vereda Las Brisas</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Rio en aparente buenas condiciones, rodeado por bosque. 	
		<ul style="list-style-type: none"> · Presencia de algas dentro del rio de color café. 	

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p>R2 Desembocadura</p>	<p>Vía Génova-Barragán Vereda La Venada</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Río en aparente buenas condiciones rodeado de bosque y cultivos de café. · Agua un poco turbia. 	 <p>A photograph showing a person standing in a river, using a long pole and a net to collect samples from the water. The river is surrounded by dense green vegetation and trees.</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 Rojo 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 14 de mayo de 2015 durante la jornada de aforo para la obtención de los tiempos de viaje

Estación	Velocidad (m/s)	Área Total (m ²)	Profundidad Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m ³ /s)
Cabecera	0.423	2.989	0.234	12.800	1.265
Río San Juan*	0.445	3.616	0.338	10.700	1.608
Desembocadura	0.434	6.620	-	-	2.874

*Tributario con mayor aporte de caudal sobre el río Rojo. Sumados los caudales de la estación Cabecera y río San Juan, se tiene como resultado el caudal en la estación Desembocadura sobre el río Rojo.

Tabla 11. Tiempos de viaje de la masa de agua para el día 14 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 (min)	ΣT viaje (hora)	Horas parciales
Cabecera	2.989	0	1.265	0	1.3	0	0	0	0	0
Desembocadura	6.620	4400	2.874	21139.50	2.1	10215.30	170.25	170.25	2.84	2.84

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.

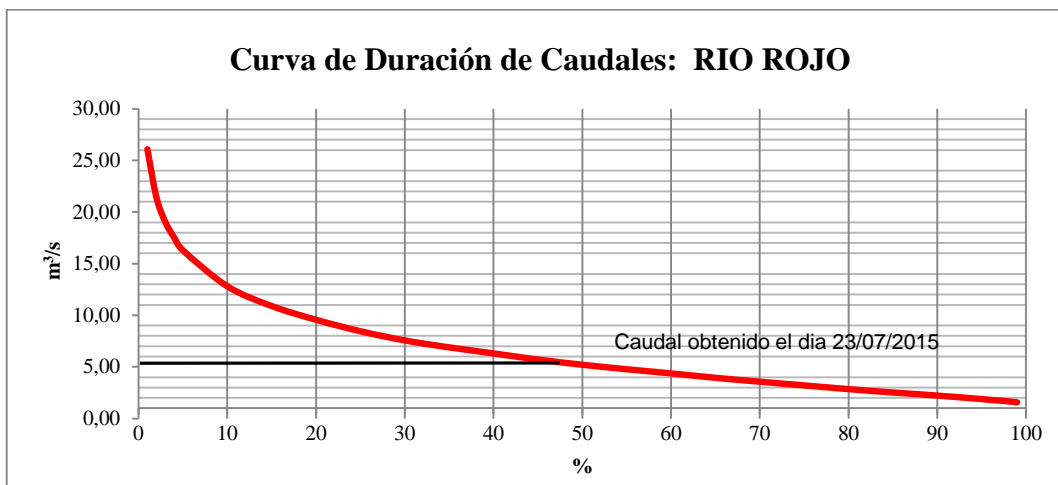
Tabla 12. Variables hidrométricas obtenidas el 23 de julio de 2015 durante la jornada de aforo y muestreo

Punto	Abscisa	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m ²)	Profundidad Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m ³ /s)	n Manning
R1	K00+000	Cabecera	0.516	4.548	0.417	10.900	2.348	0.1280
V1	K00+020	Río San Juan	0.766	3.785	0.350	10.800	2.898	0.1530
R2	K04+400	Desembocadura	0.634	8.356	0.389	15.767	5.298	0.1280

- Caudal de muestreo

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 et al, 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 9. Curva de Duración de Caudales, rio Rojo



Fuente: Línea Base, CRQ 2011.

El valor del caudal arrojado el día del muestreo (23 de julio de 2015) en la estación Desembocadura fue de **5.3 m³/s**, es decir, este caudal es superado un 48% durante el año, se puede considerar como caudal medio. 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 lo que se relaciona directamente con el aumento del caudal. Es de recordar que para estas fechas, se hacía presencia del 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 (estación Cabecera 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 afluentes naturales (receptoras de aguas residuales domésticas para el caso de estudio), concesiones y retornos de agua. Los caudales y las características de calidad para las condiciones de borde internas son las obtenidas durante el día de muestreo en el río Rojo. En la Tabla 13 se presentan todas las condiciones de borde internas incluidas en la modelación matemática.

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

PUNTO	ESTACION	CODIGO	ABSCISA (Km)	CAUDAL (m ³ /s)	CONDICION
	R1	Cabecera	K 00 + 000	2.898	Estación
1	V1	Rio San Juan	K 00 + 020	2.348	Tributario
	R2	Desembocadura	K 04 + 400	5.298	Estación

R: estación sobre el río Rojo

V: Tributario al río Rojo

4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN

El grid o malla de modelación, quedó conformada por 3 secciones transversales, las cuales corresponden a las secciones localizadas en las salidas de campo como estaciones de aforo y de toma de muestras de agua. En la tabla siguiente se representa la malla de modelación para el río Rojo, donde se especifican las distancias entre las secciones a implementar.

Tabla 14. Localización de las estaciones transversales de la malla de modelación para el río Rojo

SECCION No.	NOMBRE	CODIGO	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m)	COORDENADAS		
					Latitud	Longitud	a.s.n.m
1	Cabecera	R1	K 00+000	-	4° 13' 0.97"	75° 46' 41.17"	1364
2	Rio San Juan	V1	K 00+020	20	4° 13' 06"	75° 46' 42"	1364
3	Desembocadura	R2	K 04+400	4400	4° 16' 16.7"	75° 47' 47"	1210

Con base en los diferentes análisis efectuados, la red esquematizada para el río Rojo para fines de la modelación numérica, queda definida de la siguiente manera, (ver

Tabla 15): 3 estaciones transversales, 2 condiciones de borde externas (estación Cabecera y estación Desembocadura) y 1 frontera interna (rio San Juan).

Tabla 15. Red esquematizada para modelación de calidad del agua – rio Rojo

R1	0	1	K 0.000	Cabecera
Rio San Juan K0.020	1			
R2		2	K 4.400	Desembocadura

4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO

Los caudales aforados el día del muestreo, presentaron un buen balance entre los volúmenes de agua entrante y saliente. Por el anterior, no fue necesario tener en cuenta las fuentes difusas.

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 las Figuras 10, 11 y 12 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)	Área húmeda (m ²)	Velocidad media (m/s)	Caudal (m ³ /s)	n Manning
0.0	0.35	10.80	3.79	0.76	2.90	0.1280
4.4	0.47	15.77	7.39	0.71	5.25	0.1530

Figura 10. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal del caudal - Observadas vs Simulada

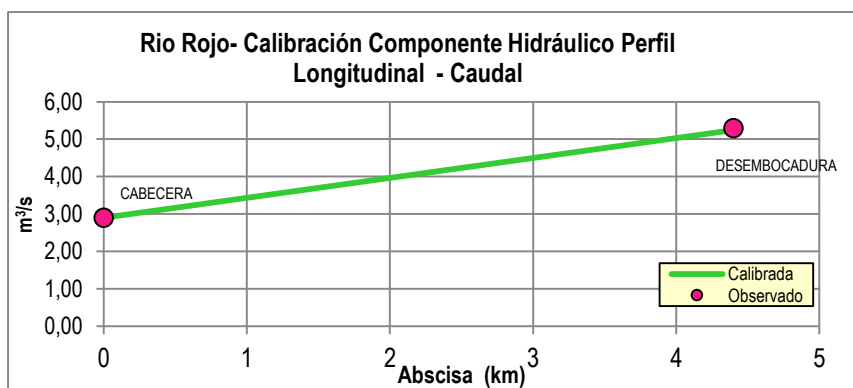


Figura 11. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: velocidad del cauce – Observadas vs Simuladas

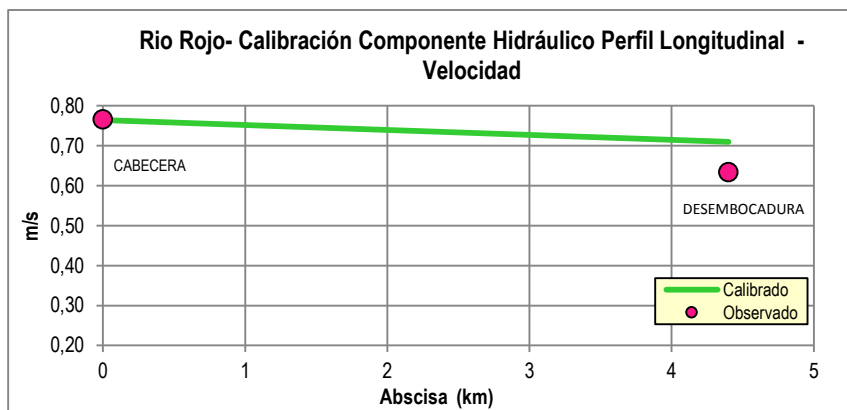
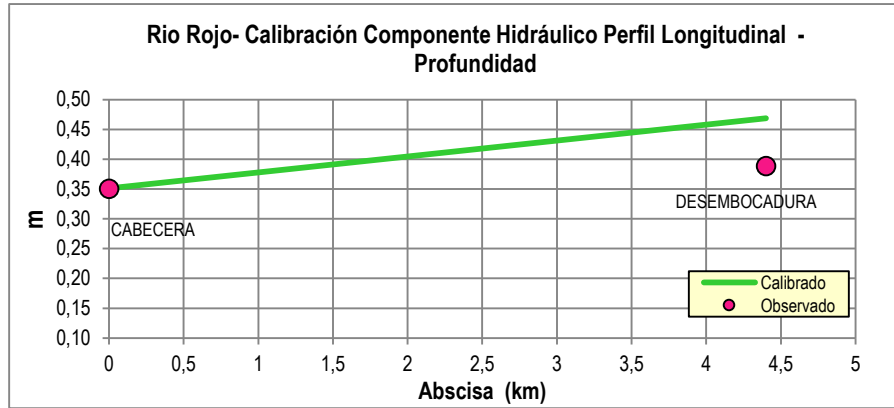


Figura 12. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: profundidad del cauce – Observadas vs Simuladas



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 Rojo, 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.

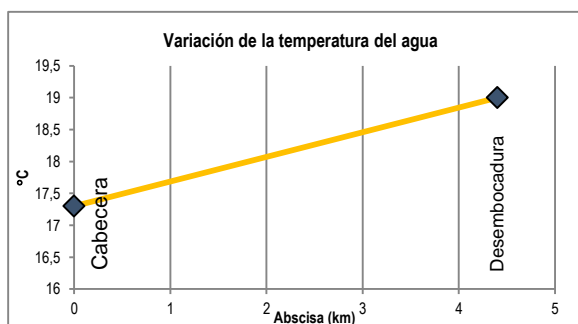
Tabla 17. Datos de calidad río Rojo (CRQ) – Campaña de muestreo 23/07/2015

PUNTO DE MONITOREO		Caudal (m³/s)	Temp. (°C)	SST (mg/l)	ST (mg/l)	OD (mg/l O₂)	DBO₅ (mg/l O₂)	DQO (mg/l O₂)	pH (unidades)	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
										NMP/100ml	NMP/100ml
Cabecera	R1	2.898	17.3	36.4	126.0	9.41	1.19	18.50	7.61 (17.3°C)	7.90E+03	7.90E+03
Río San Juan	V1	2.348	18.0	12.2	97.6	8.50	2.29	10.2	8.04 (18.0°C)	>1.6E+05	>1.6E+05
Desembocadura	R2	5.298	19.0	20.9	169.0	8.95	1.64	11.90	8.32 (19.0°C)	1.60E+05	1.60E+05

5.1.1 Observaciones Generales de los reportes de calidad

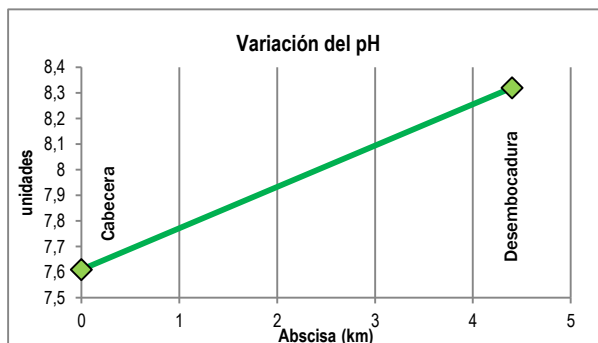
- **Temperatura**

Existe una tendencia creciente de esta variable relacionada directamente con la altura sobre el nivel del mar lo que hace que esta vaya en aumento de estación a estación (1364 a 1210m.s.n.m). Además, las mediciones de temperatura en las estaciones van asociadas al aumento o disminución de la temperatura ambiente que se produce en el transcurso del día. La temperatura influye directamente en la disociación de sales y gases, por lo tanto en la conductividad eléctrica y el pH. No se aprecia un aumento significativo de este parámetro que pueda resultar de algún tipo de vertimiento importante hacia este cuerpo de agua.



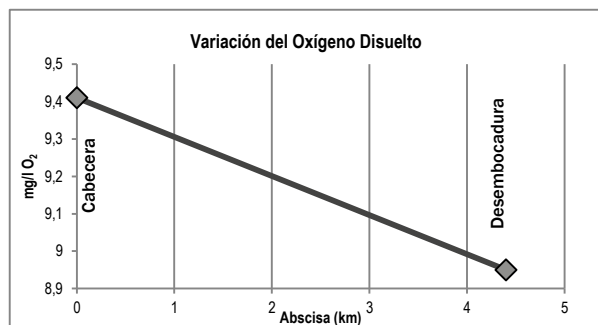
- pH

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 5.0-9.0 unidades): 8.17 a 8.23 unidades, aceptable para la destinación del recurso para consumo humano-doméstico y recreativo.



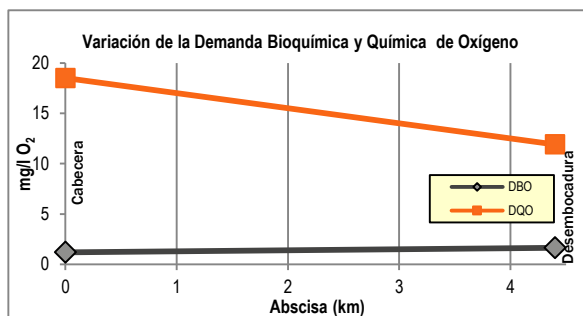
- OD

Indicador importante de la calidad del agua. El oxígeno disuelto en el agua proviene del oxígeno en el aire que se ha disuelto en el agua, por lo que están muy influenciados 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 entre 7 y 12 mg/l O₂. Los niveles bajos de OD pueden encontrarse en áreas donde el material orgánico (vertimientos de plantas de tratamiento, 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. Igualmente este indicador depende de la temperatura del agua, puesto que el agua más fría puede guardar más oxígeno en ella, que el agua más caliente. El nivel de OD en el río Rojo antes de la unión con el río San Juan fue de 9.41 mg/l O₂ y luego de este, sobre el río Rojo (estación Desembocadura) de 8.95 mg/l O₂, estos valores permiten la existencia de vida acuática. El porcentaje de saturación de Oxígeno disuelto es de 100% para las concentraciones y temperaturas del agua reportadas en las estaciones Cabecera y Desembocadura, este se considera como un excelente nivel de OD.



• **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.

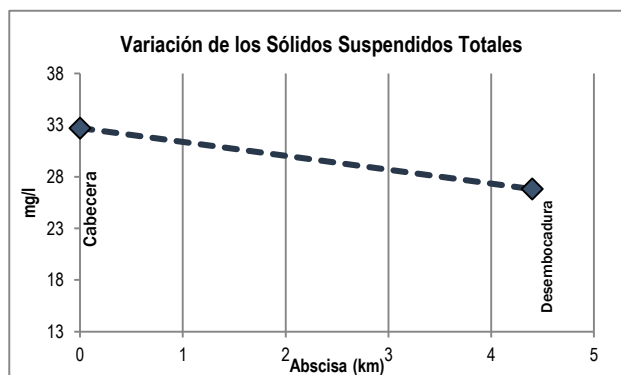
El río Rojo en su cuenca baja presenta niveles de DBO bajos, representativo este de aguas limpias, valores que se encuentran entre los 1.19 y 1.64 mg/l O₂.

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 Rojo en su cuenca baja presenta niveles de DQO entre 10 y 20 mg/l O₂, equivalente a aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, (18.5 y 11.9 mg/l O₂) lo que se clasifica como “Buena calidad del agua” (Tomado de: Escala de clasificación de la calidad del agua, CONAGUA, México).

• **SST**

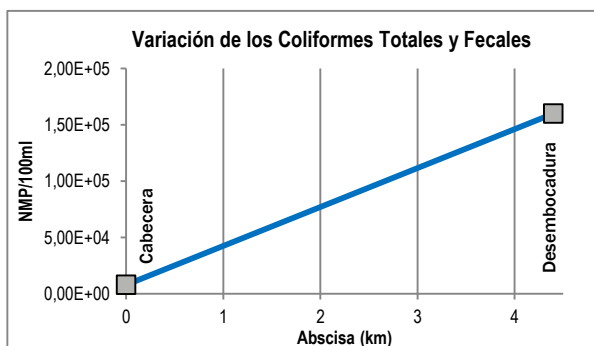
La concentración de sólidos suspendidos totales es importante para los ecosistemas fluviales por razones de calidad ecológica y del agua, los sólidos inorgánicos en suspensión atenúan la luz, principalmente a través del proceso de dispersión lo cual disminuye el proceso fotosintético en la flora acuática. Se ha demostrado las alteraciones en las relaciones depredador-presa (por ejemplo el agua turbia podría hacer difícil para los peces para ver a su presa – insectos). 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.



Los resultados arrojan un alto contenido de sólidos suspendidos totales (hasta 36.4 mg/l), probablemente producto del arrastre de partículas al lecho de la quebrada a causa de las lluvias de días anteriores.

- **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. En su trayecto, aumentan los niveles de coliformes Totales y Fecales en un 95% respecto al punto inicial (de $7.9E+03$ NMP/100ml a $1.6E+05$ NMP/100ml).



En relación con la normatividad colombiana, los Coliformes Totales y Fecales no estarían cumpliendo con el criterio de calidad establecido en el Decreto 1594/84 en cuanto a la destinación del recurso para consumo humano y doméstico utilizando para su potabilización tratamiento convencional, debido a que estos superan los valores permitidos por la normatividad de 20000 NMP/100m y 2000 NMP/100ml para CT y CF respectivamente.

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 (K_d)
- Constante de reaireación (K_2).
- Constante de decaimiento de los coliformes (K_b).

5.2.1 Constante de decaimiento de la DBO (K_d)

- **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:

$$dL/dT = -K_d L \quad (1)$$

Dónde:

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

K_d = 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 varios 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 la quebrada, en general, las fuentes 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 DBO₅, 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 principal del río Rojo.

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, DBO₅, OD, SST, pH y CF.

Tabla 18. 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	0	4.4	0.052	21.0	-	8.0	-	7.00	1.0E+07

Tabla 19. Constantes cinéticas de reacción utilizadas para la calibración

Velocidad de sedimentación (m/d)	Constante de decaimiento de los coliformes	Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (m/d)	Decaimiento por la luz
10.64	0.001	0.02	0.42
-	0.001	0.002	0.48

Figura 13. Modelo de calidad del agua – río Rojo
Perfil longitudinal de Temperatura del agua

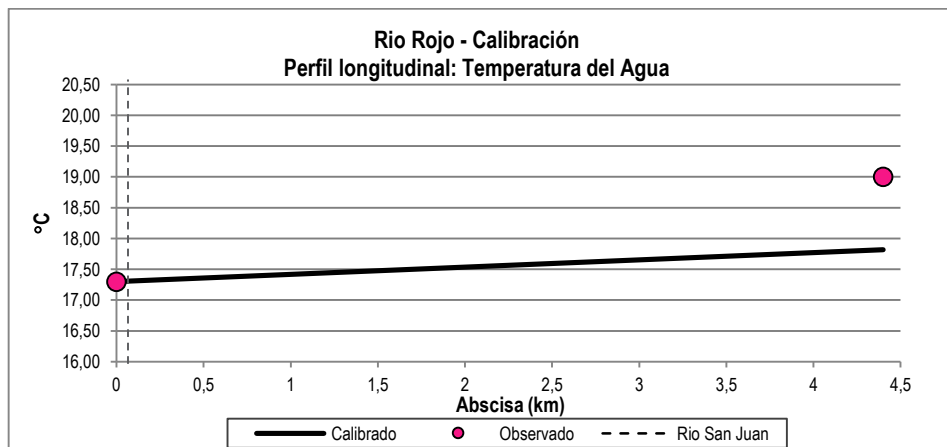


Figura 14. Modelo de calidad del agua – río Rojo
Perfil longitudinal DBO₅

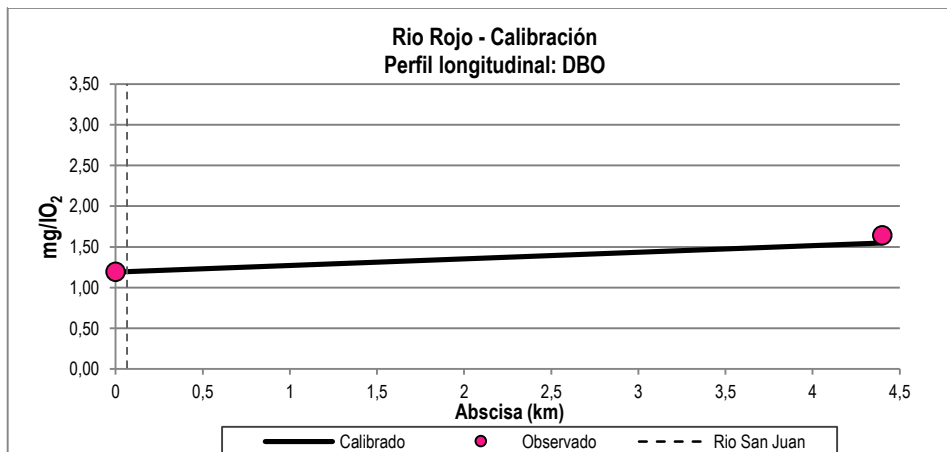


Figura 15. Modelo de calidad del agua – rio Rojo
Perfil longitudinal OD

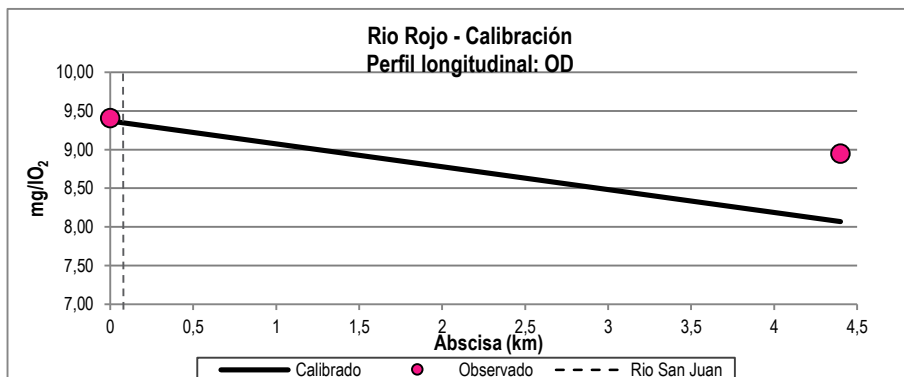


Figura 16. Modelo de calidad del agua – rio Rojo
Perfil longitudinal pH

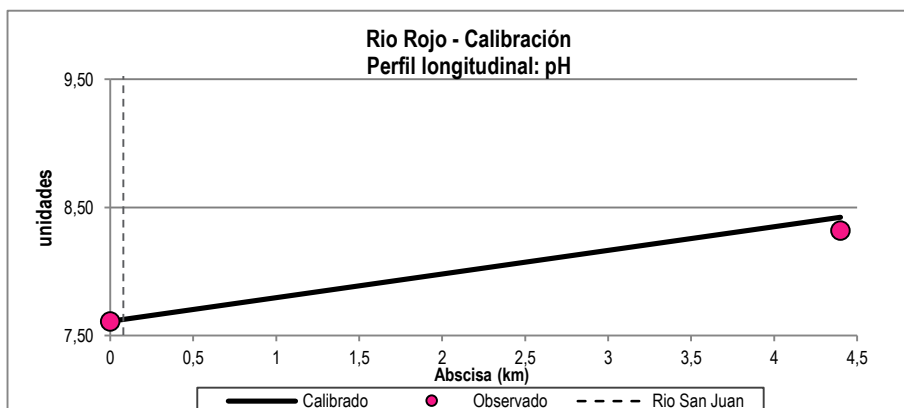


Figura 17. Modelo de calidad del agua – rio Rojo
Perfil longitudinal SST

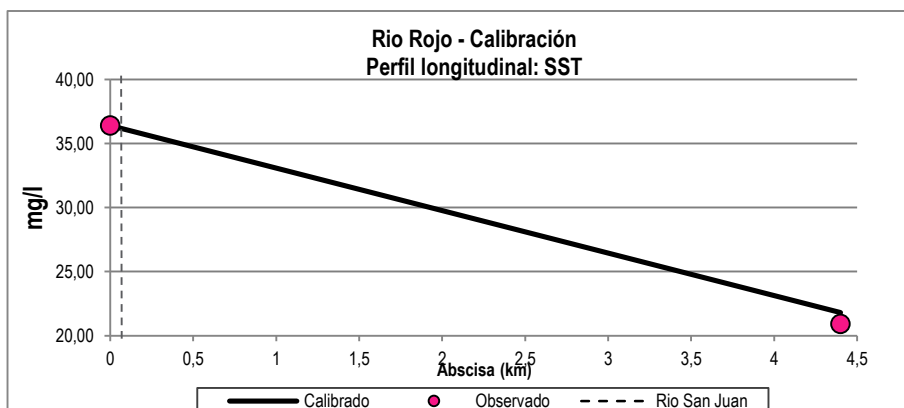
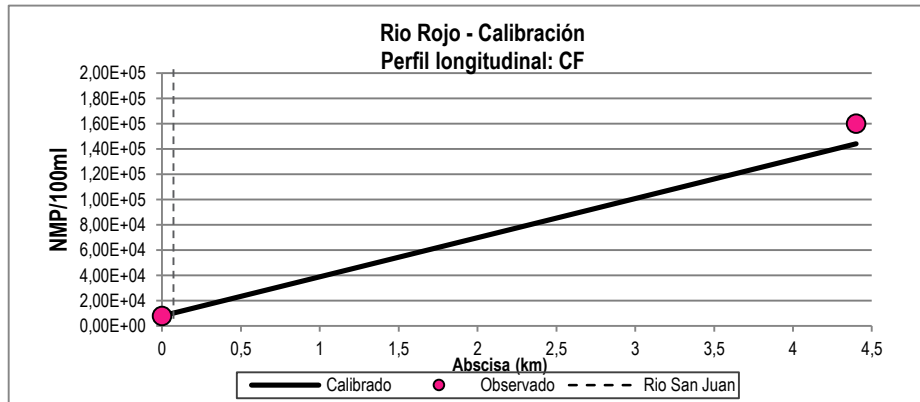


Figura 18. Modelo de calidad del agua – rio Rojo
Perfil longitudinal CF



6. VALIDACIÓN 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 2009, 2013 y 2014 realizadas por la Corporación Autónoma Regional del Quindío sobre las mismas estaciones de estudio.

Figura 19. Validación de los modelos de Temperatura del agua y pH

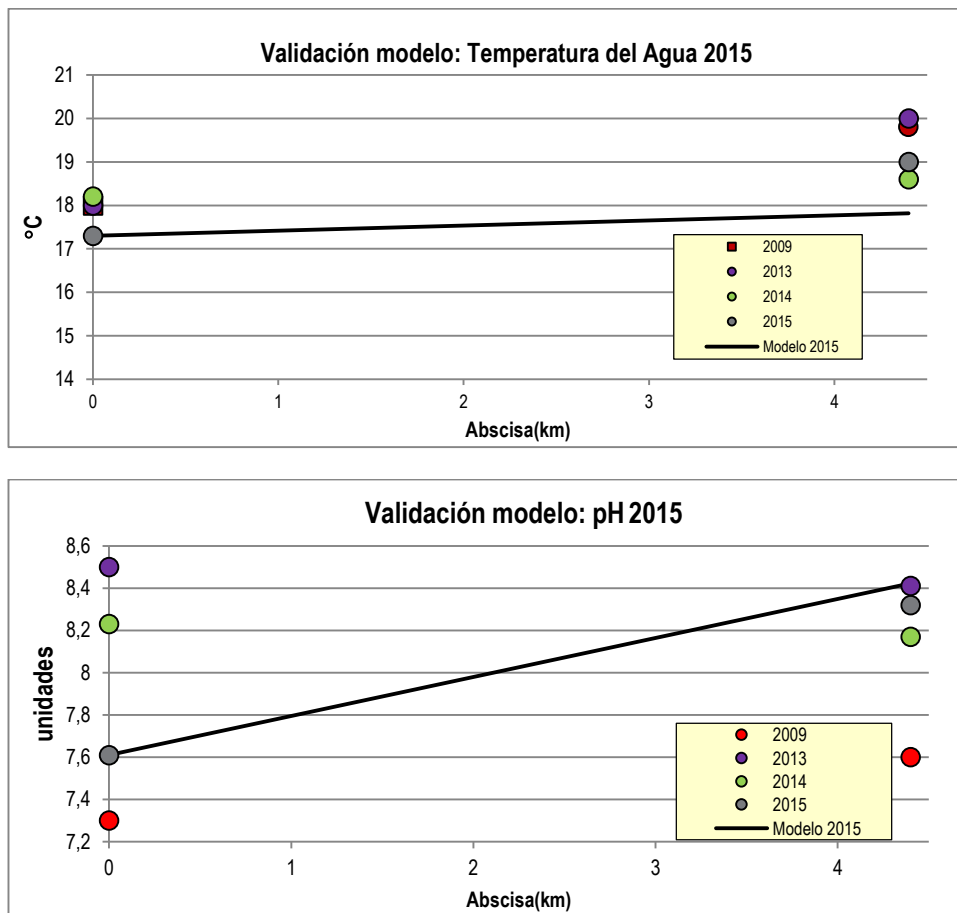


Figura 20. Validación de los modelos de DBO₅, OD y SST

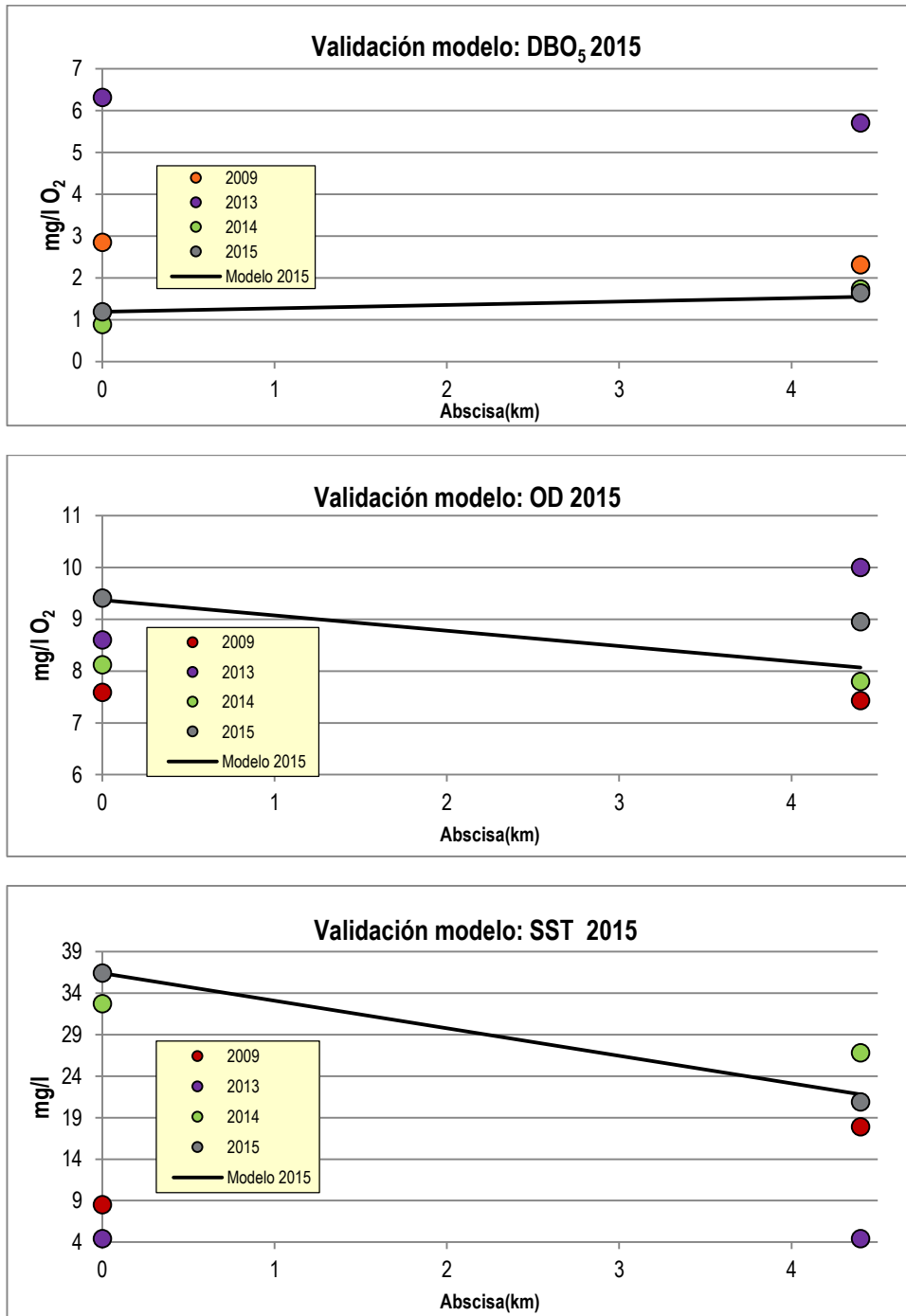
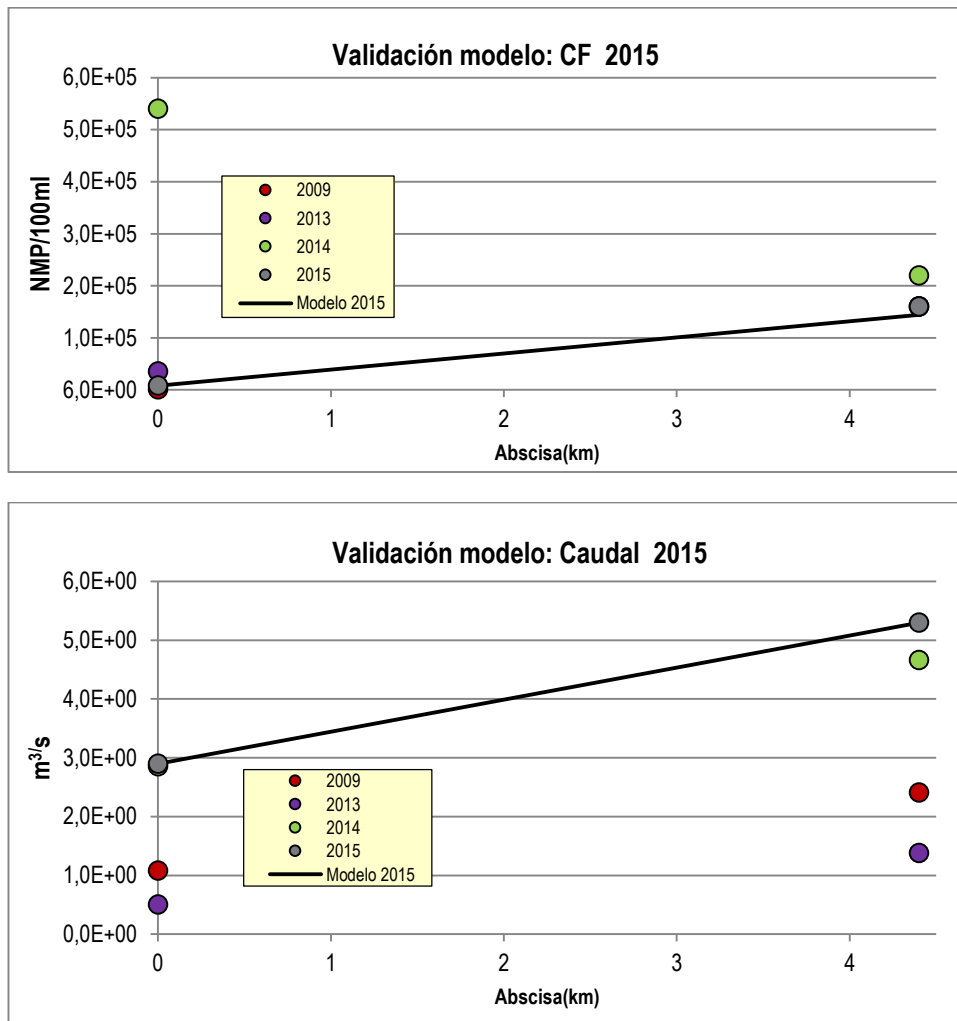


Figura 21. Validación de los modelos de Coliformes Fecales y Caudal



La validación o verificación del modelo de simulación del año 2015, se realizará utilizando la información de datos históricos de calidad (promedio entre parámetros = valor observado). Para esto se calculará el error porcentual promedio como se muestra a continuación.

$$Error (\%) = \frac{Valor\ simulado - valor\ observado}{valor\ observado} * 100$$

Observación: Las condiciones de caudal evidenciadas en la campaña de muestreo del año 2015 son semejantes a las obtenidas en el año 2014, por lo cual las variables

de calidad como temperatura del agua, DBO₅, y SST serán relacionadas sólo para estos años.

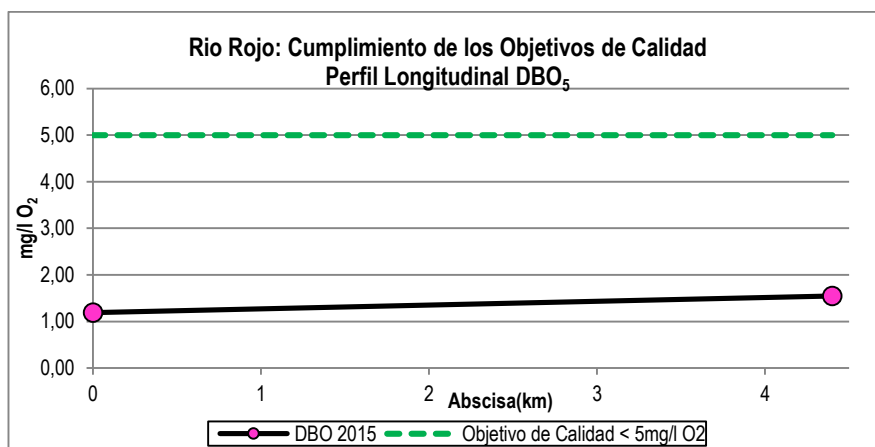
- a) Existe semejanza entre los datos de temperatura del agua y el modelo; estos poseen pendiente positiva. El valor promedio entre la estación Cabecera y Desembocadura es de 17.75 °C y 18.8 °C respectivamente, para lo cual se tiene un error porcentual medio entre la media de los datos observados y simulado de 2.24% y 5.22%.
- b) El valor promedio de Oxígeno Disuelto (OD) entre la estación Cabecera y Desembocadura es de 8.43 mg/l O₂ y 8.55 mg/l O₂ respectivamente, para lo cual se tiene un error porcentual medio entre la media de los datos observados y simulado de 11.2% y 5.6%.
- c) El valor promedio de DBO₅ entre la estación Cabecera y Desembocadura es de 1.04 mg/l O₂ y 1.69 mg/l O₂ respectivamente. Se tiene un error porcentual medio entre la media de los datos observados y simulado de 15.0% y 8.2%.
- d) Para los años 2014 y 2015 se presenta mayor concentración de SST sobre la fuente hídrica, río Rojo y tributario debido a la presencia de lluvias días antes de la toma de muestras de calidad, por lo cual se tiene un promedio de SST de 34.5 mg/l y 23.85 mg/l entre las estaciones Cabecera y Desembocadura. El error porcentual medio entre la media de los datos observados y simulado fue de 5.4% y 8.6% respectivamente.
- e) El error porcentual medio entre la media de los datos observados y simulado entre las estaciones Cabecera y Desembocadura para el pH fue de 3.8% y 3.7% respectivamente. El valor promedio entre ambas estaciones fue de 7.91 y 8.13 unidades.
- f) Para la estación Desembocadura el error porcentual medio para los Coliformes Fecales entre la media de los datos observados y simulado-2015 fue de 18%. Los datos reportados para la estación Cabecera varían entre los 5.4E+05 NMP/100ml y 1.1E+03 NMP/100ml, es decir, se presenta una diferencia promedio del 100% entre los datos anuales.

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 ROJO

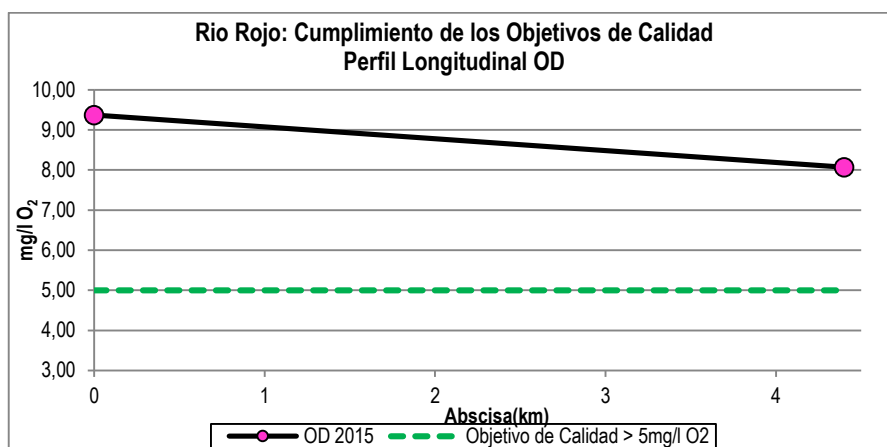
A continuación se presenta gráficamente el cumplimiento de los Objetivos de Calidad establecidos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008.

Figura 22. Perfil longitudinal DBO₅ año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



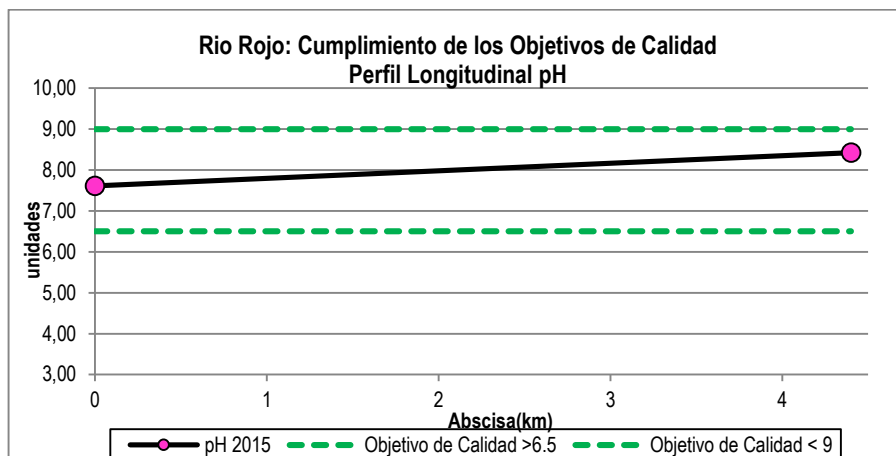
En todo momento se cumple con este objetivo menor a 5mg/l.

Figura 23. Perfil longitudinal de los OD, año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



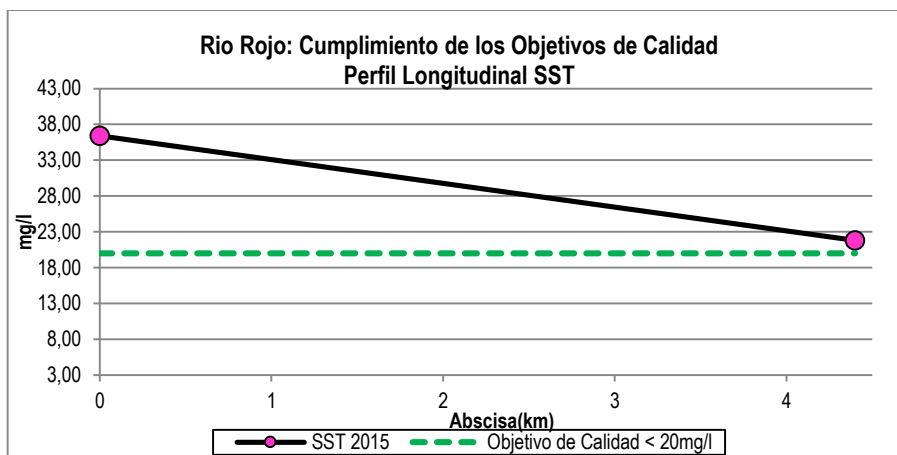
En todo momento se cumple con este objetivo mayor a 5mg/l O₂.

Figura 24. Perfil longitudinal de los pH, año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



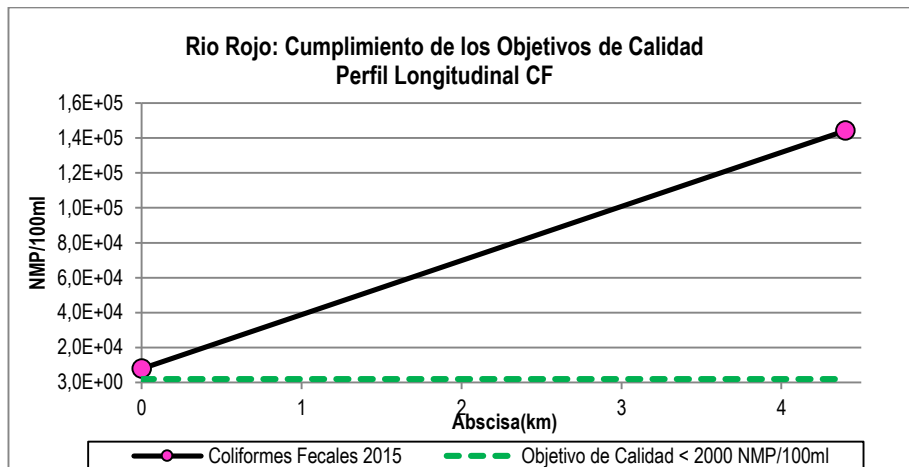
En todo momento se cumple con este objetivo entre los 6.5 a 9 unidades.

Figura 25. Perfil longitudinal de los SST, año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



Debido a la presencia de lluvias días antes de la campaña de muestreo, las concentraciones de SST aumentaron en el cauce principal de los rios Rojo y San Juan por lo cual no se cumple con este objetivo menor a 20 mg/l.

Figura 26. Perfil longitudinal de los CF, año 2015 en cumplimiento del Decreto 1594/84 para su destinación al consumo humano

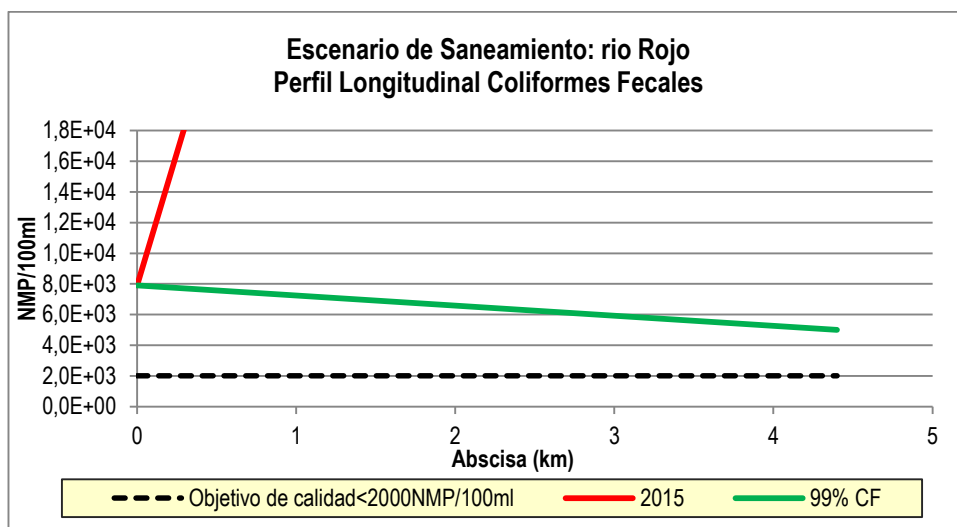


Las concentraciones de CF en el tramo analizado sobre el río Rojo no cumplen con el criterio de calidad para los usos: consumo humano y doméstico, recreativo con contacto primario y secundario y uso agrícola para riego de frutas, se requeriría la desinfección de las aguas residuales vertidas por el municipio y fuentes difusas, para tratar de reducir este parámetro a través del cauce.

8. PLANTEAMIENTO ESCENARIO DE SANEAMIENTO: COLIFORMES FECALES

Luego de haber ejecutado, calibrado y validado el modelo de simulación, se ha decidido por parte del modelador plantear un escenario de desinfección dado que los Coliformes Fecales no cumplen con el Decreto 1594/84 sobre el río Rojo. Es por ello que se realizará una reducción del 99% (desinfección) de los CF en el tributario “río San Juan”, el cual posee un valor de $1.60E+05$ NMP/100ml.

Figura 27. Escenario de saneamiento, reducción del 99% de los Coliformes Fecales



De acuerdo a lo evidenciado en la gráfica anterior, una reducción del 99% de los CF en el río San Juan y descargas difusas, no cumpliría con lo establecido en el Decreto 1594/84 en la destinación del recurso para consumo humano y doméstico y otros usos.

Tabla 20. Porcentaje de reducción de los CF, río Rojo

Abscisa (m)	Condición año 2015 (NMP/100ml)	Escenario 99% (NMP/100ml)	% de Reducción	Objetivo de Calidad CRQ
0	$7.90E+03$	$7.90E+03$		No cumple
4.4	$1.60E+05$	$5.00E+03$	96.88%	

9. CONCLUSIONES

- En términos generales, el modelo de calidad del agua del río Rojo reproduce en forma aceptable los valores de Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), pH, Temperatura y Coliformes Fecales en las estaciones Cabecera y Desembocadura ubicadas a lo largo de la corriente principal del río Rojo. Se contó con una campaña de monitoreo con propósitos de calibración en dos (2) estaciones sobre el cauce principal.
- La calidad del agua en el río Rojo registrada el día 23 de julio de 2015, no cumple con los objetivos de calidad propuestos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008 para los sólidos suspendidos totales, siendo estos superiores a 20 mg/l. De igual manera, los Coliformes Fecales y Totales no cumplen con los criterios de calidad admisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984 para consumo humano, agrícola y recreativo.
- Los resultados obtenidos en las tres estaciones de estudio, arrojan un alto contenido de sólidos suspendidos totales (hasta 36.4 mg/l), esto debido probablemente al arrastre de partículas al lecho de la quebrada a causa de las lluvias de días anteriores. De igual forma, los Coliformes Fecales y Totales podrían verse incrementados por la anterior condición.
- El error porcentual medio obtenido entre los valores de calidad históricos y simulados para las estaciones Cabecera y Desembocadura, estimaron un tamaño del error en términos porcentuales aceptable, estos oscilan en un rango entre 2.5% y 15% para la estación Cabecera, siendo el mayor error (15%) para la DBO_5 . La estación Desembocadura posee un rango de error entre 3.7% y 18%, donde el mayor error fue estimado para los Coliformes Fecales.
- 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 las aguas de los ríos Rojo y San Juan reportados en la campaña de aforo y muestreo el día 23 de julio de 2015. Lo anterior asumiendo que los valores elevados de SST y CF son atribuidos al incremento de las lluvias días anteriores a la toma de muestras, producto del arrastre de partículas al lecho de los ríos. Con ello, se omite cualquier tipo de vertimiento puntual que pudiera aumentar estos niveles ya que se tienen valores cercanos

de los demás parámetros medidos en los años 2009 y 2013 lo que respalda esta hipótesis.

10. 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, (2009). Modelación de la calidad del agua en el río Rojo.
- CRQ, (2013). Modelación de la calidad del agua en el río Rojo.
- 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.