

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA  
QUEBRADA CRISTALES, MUNICIPIOS DE ARMENIA Y LA TEBAIDA,  
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, Junio de 2015**

## CONTENIDO

<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>4</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	4
1.2 OBJETIVOS .....	5
1.3 ALCANCE .....	5
1.4 MARCO NORMATIVO .....	6
<b>2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.....</b>	<b>9</b>
2.1 LOCALIZACIÓN .....	9
2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL .....	10
2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL .....	12
2.4 DEMANDA HÍDRICA .....	13
2.5 CALIDAD DEL AGUA .....	13
<b>3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2K .....</b>	<b>20</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	20
3.2 METODOLOGÍA .....	21
<b>4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO.....</b>	<b>23</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR .....	24
4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE .....	28
4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS .....	29
4.4 CONDICIONES DE BORDE .....	30
4.4.1 <i>Condiciones de borde externas</i> .....	30
4.4.2 <i>Condiciones de borde internas</i> .....	30
4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN.....	31
4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO .....	32
4.6.1 <i>Resultados de la modelación del componente hidráulico</i> .....	33
<b>5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD.....</b>	<b>35</b>
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO .....	35
5.1.1 <i>Observaciones Generales de los reportes de calidad</i> .....	35
5.1.2 <i>Análisis de las concentraciones obtenidas en la estación “Bodega” y el vertimiento puntual “industria avícola Don Pollo” identificados en la quebrada Cristales con relación a la Resolución 0631 de 2015</i> .....	39
5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN.....	40
5.2.1 <i>Constante de decaimiento de la dbo (kd)</i> .....	40
5.2.2 <i>Constante de reaireación (K2)</i> .....	41
5.2.3 <i>Constante de decaimiento de los coliformes (Kb)</i> .....	42
5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD.....	43
<b>6. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....</b>	<b>47</b>
<b>7. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE SANEAMIENTO.....</b>	<b>51</b>
7.1 ESCENARIO 1: REDUCCIÓN DE HASTA UN 60% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO <sub>5</sub> AL INICIO DEL TRAMO DE ESTUDIO Y EN LAS QUEBRADAS MARMATO Y LA JARAMILLA, ADEMÁS DEL VERTIMIENTO DIRECTO DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA PROCESADORA AVÍCOLA DON POLLO. IGUALMENTE, REDUCCIÓN DE UN 99% DE CF SOBRE LOS PUNTOS ANTES MENCIONADOS.	

7.2	ESCENARIO 2: REDUCCIÓN DE HASTA UN 80% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO AL INICIO DEL TRAMO DE ESTUDIO Y EN LAS QUEBRADAS MARMATO Y LA JARAMILLA, ADEMÁS DEL VERTIMIENTO DIRECTO DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA PROCESADORA AVÍCOLA DON POLLO. IGUALMENTE, REDUCCIÓN DE UN 99% DE CF SOBRE LOS PUNTOS ANTES MENCIONADOS.	52
7.3	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES: ESCENARIOS 1 Y 2 .....	53
7.4	OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS .....	55
7.4.1	DBO <sub>5</sub> .....	55
7.4.2	SST .....	55
7.4.3	OD .....	56
7.4.4	pH.....	57
7.4.5	Coliformes Fecales.....	57
8.	CONCLUSIONES .....	58
9.	BIBLIOGRAFIA .....	60

### 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. VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA VERTIMIENTOS PUNTUALES, RESOLUCIÓN 0631 DE 2015 .....	7
TABLA 4. OBJETIVOS DE CALIDAD QUEBRADA CRISTALES, CRQ.....	8
TABLA 5. RESUMEN CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS – UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA CRISTALES .....	11
TABLA 6. HISTÓRICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL CAUCE PRINCIPAL DE LA QUEBRADA CRISTALES.....	14
TABLA 7. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS A MODELAR SOBRE LA QUEBRADA CRISTALES Y TRIBUTARIOS.....	23
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE FORO Y MUESTREO SOBRE LA QUEBRADA CRISTALES Y TRIBUTARIOS .....	25
TABLA 9. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 3 DE MARZO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE .....	28
TABLA 10. TIEMPOS DE VIAJE DE LA MASA DE AGUA PARA EL DÍA 3 DE MARZO DE 2015 .....	29
TABLA 11. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 7 DE ABRIL DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO Y MUESTREO .....	29
TABLA 12. CONDICIONES DE BORDE INTERNAS EN LA MALLA DE MODELACIÓN, QUEBRADA CRISTALES .....	31
TABLA 13. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES TRANSVERSALES DE LA MALLA DE MODELACIÓN PARA LA QUEBRADA CRISTALES .....	32
TABLA 14. RED ESQUEMATIZADA PARA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA CRISTALES .....	32
TABLA 15. FUENTES DIFUSAS INCLUIDAS COMO PARTE DEL BALANCE HÍDRICO DENTRO DE LA QUEBRADA CRISTALES .....	33
TABLA 16. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EN LA CALIBRACIÓN HIDRÁULICA.....	33
TABLA 17. DATOS DE CALIDAD QUEBRADA CRISTALES (CRQ) – CAMPAÑA DE MUESTREO 07/04/2015.....	35
TABLA 18. ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD* .....	37
TABLA 19. CARGA CONTAMINANTE DE LOS VERTIMIENTOS IDENTIFICADOS EN LA MODELACIÓN .....	39
TABLA 20. CUMPLIMIENTO DE LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015.....	40
TABLA 21. CALIBRACIÓN DE LAS DESCARGAS DIFUSAS.....	43
TABLA 22. CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN .....	43
TABLA 23. ESCENARIO 1 DE SANEAMIENTO .....	52
TABLA 24. ESCENARIO 2 DE SANEAMIENTO .....	52
TABLA 25. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA DBO, QUEBRADA CRISTALES: ESCENARIO 2.....	55
TABLA 26. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS SST, QUEBRADA CRISTALES: ESCENARIO 2 .....	56
TABLA 27. PORCENTAJE DE AUMENTO DEL OD, QUEBRADA CRISTALES: ESCENARIO 2.....	56
TABLA 28. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS CF, QUEBRADA CRISTALES: ESCENARIO 2 .....	57

### LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA CRISTALES.....	10
FIGURA 2. RED HIDROGRÁFICA, UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA CRISTALES.....	11
FIGURA 3. VARIACIÓN DEL PROMEDIO DE CAUDALES MENSUALES MULTIANUALES, QUEBRADA CRISTALES .....	12
FIGURA 4. QUEBRADA CRISTALES ANTES Y DESPUÉS DEL VERTIMIENTO “DON POLLO” .....	14
FIGURA 5. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD A TRAVÉS DE LOS AÑOS SOBRE LA QUEBRADA CRISTALES.....	16
FIGURA 6. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD A TRAVÉS DE LOS AÑOS SOBRE LA QUEBRADA CRISTALES.....	17
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA .....	21
FIGURA 8. UBICACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES DE AFORO Y MUESTREO, UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA CRISTALES .....	24
FIGURA 9. MAPA DE PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, SUBCUENCA RIO SANTO DOMINGO .....	27
FIGURA 10. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES, QUEBRADA CRISTALES.....	30
FIGURA 12. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFILES LONGITUDINALES: CAUDAL, VELOCIDAD DEL CAUCE Y PROFUNDIDAD - CALIBRADAS VS OBSERVADAS .....	34
FIGURA 13. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA CRISTALES.....	44
FIGURA 14. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA CRISTALES.....	45
FIGURA 15. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA CRISTALES.....	46
FIGURA 16. VALIDACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA Y PH, 2015 .....	47
FIGURA 17. VALIDACIÓN DEL MODELO DE DBO <sub>5</sub> , OD Y SST, 2015.....	48
FIGURA 18. VALIDACIÓN DEL MODELO CF Y CAUDAL, 2015 .....	49
FIGURA 19. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SANEAMIENTO: DBO, OD Y PH .....	53
FIGURA 20. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SANEAMIENTO: SST.....	54
FIGURA 21. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2 CON DESINFECCIÓN PARA LOS CF.....	54

## 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 de la quebrada Cristales”, 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 estos los diferentes vertimientos de aguas residuales originadas por sus distintos usos a lo largo de la corriente principal, identificados estos en la modelación realizada en el año 2014 en la unidad hidrográfica de la quebrada Cristales.

Es así, como la Corporación Autónoma Regional del Quindío en cumplimiento de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, viene adelantando estudios de modelación de la calidad del agua en las principales fuentes hídricas del departamento del Quindío, para lo cual este mecanismo se constituye como una herramienta de planificación que permite en la actualidad y a futuro, identificar y conservar el recurso hídrico.

## 1.2 OBJETIVOS

### General

- Realizar la modelación de la calidad del agua en la quebrada Cristales en un tramo cercano a los 34 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 la fuente receptora.
- Elaborar escenarios de saneamiento partiendo de información existente.

## 1.3 ALCANCE

El estudio considera el muestreo en diferentes puntos sobre la quebrada Cristales, dando inicio cerca de la PTAR localizada en el predio Almacafé (zona urbana del municipio de Armenia) hasta la vereda Pisamal cerca a la confluencia con el río La Vieja.

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 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 derogados e integrados en el decreto único reglamentario del sector ambiental, número 1076 de mayo 26 de 2015 y la Resolución 0631 de marzo del 2015, en donde se establecen las normas de vertimiento a un cuerpo de agua.

El Decreto 3930 de 2010, deroga el Decreto 1594 de 1984 excepto los Artículos 20 y 21. El Artículo 73 todo derogado y el Artículo 74 parcialmente derogado por la Resolución 0631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.

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 <sub>5</sub>	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.

Tabla 2. Criterios de calidad para la destinación del recurso

Parámetro	Expresado como	Consumo Humano y doméstico (1)	Uso Agrícola (3)	Uso Recreativo(2)
pH	Unidades	5 – 9	4.5 – 9.0	5.0 – 9.0
Oxígeno Disuelto (3)	mg O <sub>2</sub> /L	-	-	70% de la concentración de saturación
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) cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto

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:

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

La Resolución 0631 de 2015, establece en su Capítulo V los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas (ARD) y de las aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado a 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

PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS -ARD DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS -ARD Y DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PUBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES CON UNA CARGA MENOS O IGUAL A 625.00 Kg/día DBO <sub>5</sub>
pH	unidades	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
DQO	mg/l O <sup>2</sup>	200	180
DBO <sub>5</sub>	mg/l O <sup>2</sup>		90
SST	mg/l	100	90

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 4. Objetivos de calidad quebrada Cristales, CRQ

TRAMO	PARAMETRO DE CALIDAD	UNIDAD	OBJETIVO DE CALIDAD ESPERADO PARA EL AÑO 2017
Comprendido desde el casco urbano hasta la desembocadura al río La Vieja	Oxígeno disuelto	(mg/l O <sub>2</sub> )	> 5.0
	DBO	(mg/l O <sub>2</sub> )	<35
	SST	(mg/l)	< 100
	pH	unidades	[6.5-9.0]
	Material flotante y espumas, proveniente de actividad humana		Ausente
	Sustancia que produzca color		Ausente

## 2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

---

La Quebrada Cristales es una de las corrientes más importantes del departamento del Quindío a pesar de no tener el orden de magnitud de una corriente mayor como un río, su valor paisajístico la hace importante. Esta quebrada fue usada como fuente de suministro de agua para el acueducto del municipio de La Tebaida, la cual tuvo que ser interrumpida por el detrimento de las características físico-químicas del agua por causa de los vertimientos hechos cerca de su nacimiento provenientes de la zona urbana de Armenia, (Lozano, 2002).

### 2.1 LOCALIZACIÓN

La unidad hidrográfica “Quebrada Cristales” nace al sur de la ciudad de Armenia y sus aguas van en sentido oriente-occidente, desembocando en el río La Vieja. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 4° 25´ y 4° 31´ de Latitud Norte y 75° 42´ y 75° 51´ de Longitud Oeste.

El cauce principal de la unidad hidrográfica quebrada Cristales nace en el perímetro urbano del municipio de Armenia en la parte posterior del depósito de Almacafé cerca de los barrios Castilla y Castilla Grande al sur de la ciudad, y desemboca en el río La Vieja en predios de la hacienda Pisamal.

En su recorrido la Quebrada Cristales recibe las aguas de las quebradas: Marmato, Germania, La Argentina y La Jaramilla (afluente principal), entre otras de menor orden como las quebradas Balsora, Los Ángeles y Cristalito.

En cuanto a la ubicación geográfica de la unidad hidrográfica, influye su exposición a las corrientes de aire, las cuales varían según la altitud y posición, haciendo muy particular la meteorología predominante en la zona, encontrándose zonas bien definidas de características climáticas específicas.

La orientación de la unidad hidrográfica quebrada Cristales con respecto del sol y a la interposición de las cadenas montañosas con relación a las corrientes de aire, es un factor que influye en su comportamiento hidrométrico. De acuerdo a estos factores y a la orientación del cauce principal de la unidad hidrográfica con relación al norte geográfico, no hay insolación uniforme en esta, por lo que la evapotranspiración cambia ligeramente con respecto a la variación altitudinal, aunque realmente los cambios son sutiles teniendo en cuenta que la diferencia altitudinal no es ostensible. La unidad hidrográfica quebrada Cristales se encuentra en latitud tropical, con orientación N-SW, por lo tanto, la insolación es relativamente uniforme sobre las dos vertientes, (Lozano, 2002).

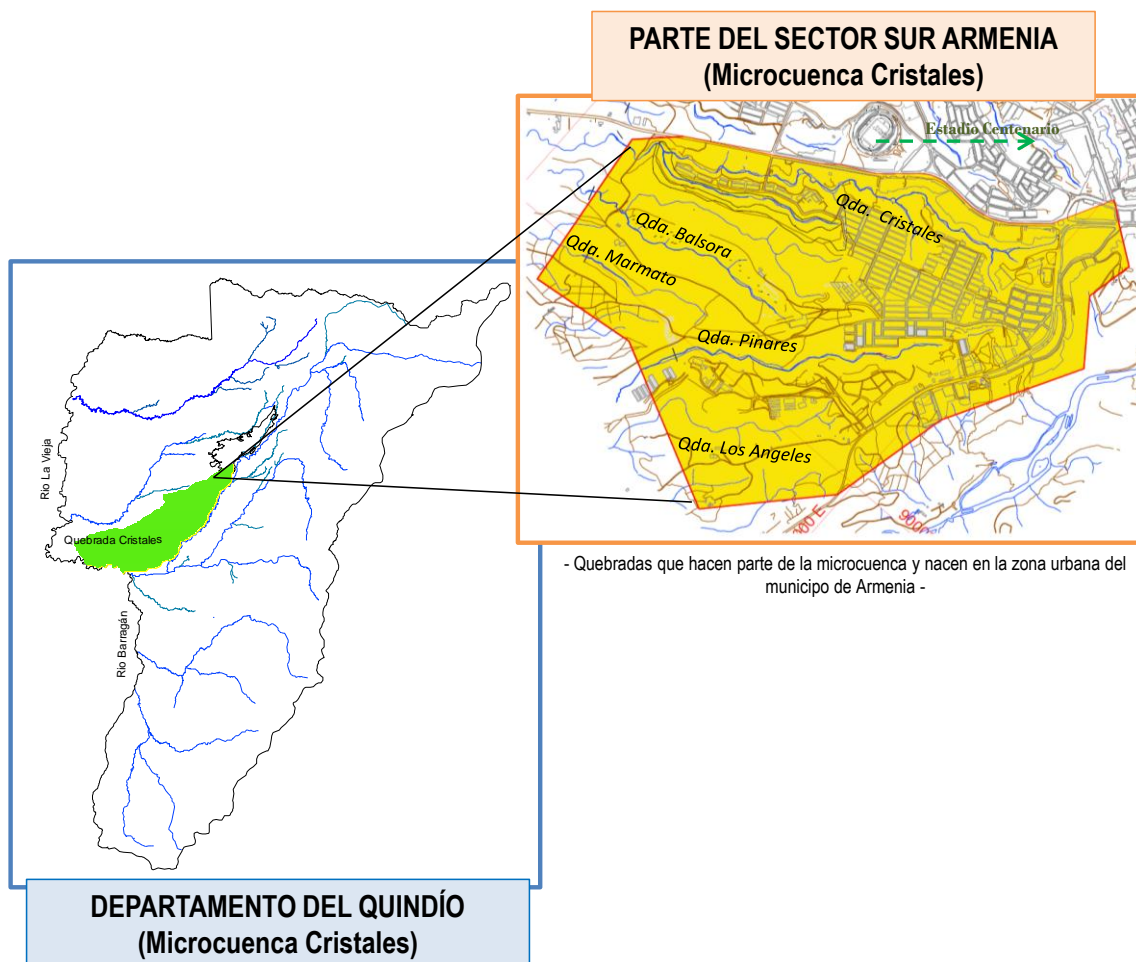


Figura 1. Localización unidad hidrográfica quebrada Cristales

## 2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL

La quebrada Cristales nace en la zona urbana del municipio de Armenia en la parte posterior de las bodegas de Almacafé a 1430 m.s.n.m. Esta hace un recorrido de 36.6 Km de longitud hasta su desembocadura a 1030 m.s.n.m. en el río La Vieja.

En su recorrido, la quebrada Cristales lleva consigo gran cantidad de pequeños tributarios que convergen en su cauce. A continuación se presenta la red hídrica de la unidad hidrográfica quebrada Cristales.

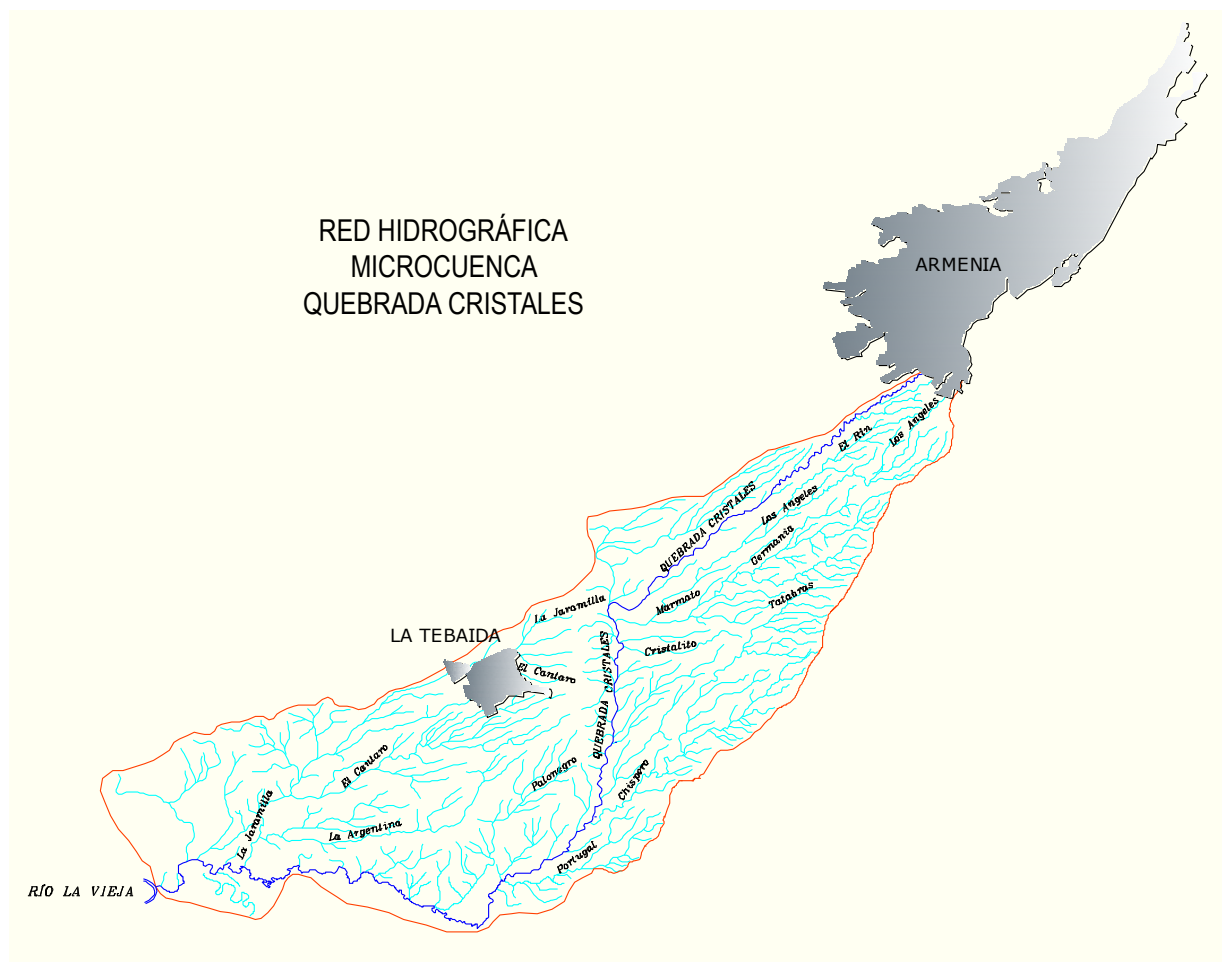


Figura 2. Red hidrográfica, unidad hidrográfica Quebrada Cristales

Tabla 5. Resumen Características Fisiográficas – unidad hidrográfica Quebrada Cristales

Unidad hidrográfica	Característica	Ítem	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
QUEBRADA CRISTALES	1. Área	1.1	Superficie	A	92.41	Km <sup>2</sup>
		1.2	Perímetro	P	56.57	Km
	2. Posición y Orientación	2.1	Posición	-	ZLT	
		2.2	Orientación	-	NE-SW	
	3. Forma	3.1	Coefficiente de Forma	Kf	0.069	
		3.2	Coefficiente de Compacidad	Kc	1.66	
		3.3	Índice de Alargamiento	Ia	1.47	
	4. Elevación	4.1	Elevación Mediana	Em	1210.00	m.s.n.m
		4.2	Elevación Media	Hm	1034.74	m.s.n.m
	5. Pendiente Cuenca	5.1	Pendiente Media de la Cuenca	Sm	9.87	%
6. Cauce Principal	6.1	Orden del Cauce		6		
	6.2	Longitud	L	36.6	Km	
	6.3	Pendiente Media de Cauce	Sc	1.09	%	

Fuente: Valores calculados con la ayuda de la plataforma SIGQuindío.

- **Coefficiente de Forma (Kf):** Como el valor del índice es de 0.069, y es menor a 1, se hace la consideración que la unidad hidrográfica es alargada, con una corriente principal larga y por ende con poca tendencia a concentrar el escurrimiento superficial.
- **Coefficiente de Compacidad (Kc):** La unidad hidrográfica quebrada Cristales tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga. Se tiene menor torrencialidad.
- **Índice de Alargamiento:** Se obtiene un índice de 1.47, el cual indica que es una unidad hidrográfica poco alargada.

### 2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

De acuerdo a los reportes históricos de caudales medios diarios de los años 1987 a 2005 obtenidos en la estación limnigráfica “Villa Sonia” administrada por la Corporación, fue posible la obtención de la variación mensual multianual de caudales en la quebrada Cristales. Esta estación está localizada en zona rural del municipio de La Tebaida en la vereda La Argentina. Es de anotar que el promedio de caudales presentados a continuación no representan la totalidad de la oferta hídrica en la quebrada Cristales, ya que uno de sus afluentes principales, Quebrada La Jaramilla, se encuentra localizada a 2km aguas debajo de este punto de monitoreo, cerca de la confluencia con el río La Vieja.

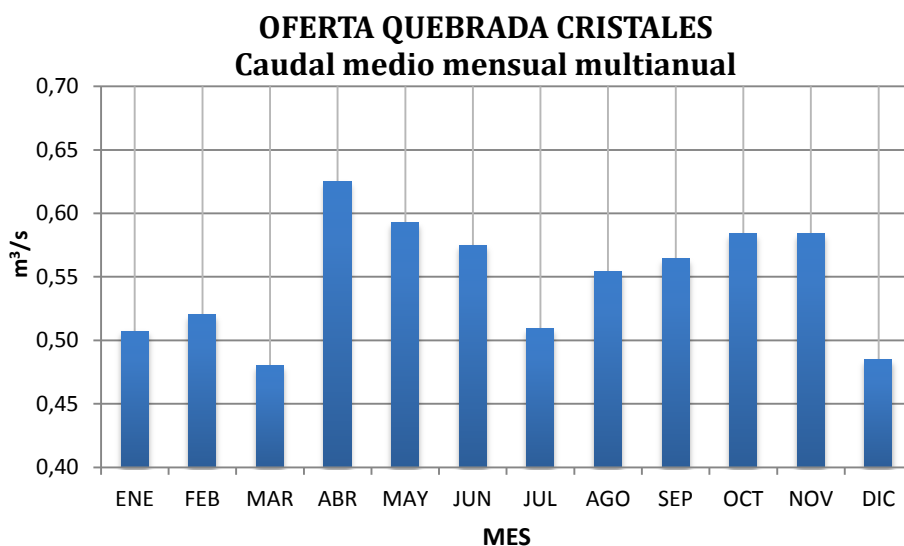


Figura 3. Variación del promedio de caudales mensuales multianuales, quebrada Cristales

## 2.4 DEMANDA HÍDRICA

El 100% de la demanda para la unidad hidrográfica, es destinado para uso agrícola (riego) con un caudal concesionado de 40 l/s, (*Base de datos concesiones, CRQ 2014 - 2015*).

## 2.5 CALIDAD DEL AGUA

La quebrada Cristales que nace en el sur del municipio de Armenia, comparte la particularidad junto con muchas otras quebradas de nacer en el casco urbano. La mayor parte de los cuerpos de agua que circundan la ciudad de Armenia han sido utilizados para disponer las aguas residuales del alcantarillado público. No obstante, el Plan de Saneamiento de la Zona Sur (Contelac - EPA) ha construido un sistema de colectores e interceptores de aguas residuales que captan estas aguas evitando ser vertidas de nuevo a las quebradas. El destino final de las aguas negras es la PTAR “La Marina”, la cual se encuentra en construcción.

El grupo de quebradas que ya están siendo intervenidas por las obras de saneamiento (colectores) y que hacen parte de la zona sur, se mencionan a continuación:

- Quebradas Los Naranjos, Santa Ana, Venus y Santa Rita, drenan a la zona sur – occidental de Armenia.
- Quebradas Cristales, Pinares y Balsora, drenan toda la zona sur – oriental de la ciudad.

A pesar de haberse realizado cerca del 100% de las obras para mejorar las condiciones de calidad de estas fuentes hídricas, la quebrada Cristales continúa presentando altos niveles de contaminación. Cerca de su nacimiento, la quebrada Cristales recibe los vertimientos de los barrios La Castilla y Castilla Grande donde existe un sistema de tratamiento de aguas residuales obsoleto. No obstante, a tan solo 2.2 kilómetros del nacimiento de la quebrada (fuera del perímetro urbano), se encuentra la industria avícola Don Pollo, la cual vierte las aguas residuales con previo tratamiento al cauce principal de la quebrada Cristales, deteriorando notablemente su calidad.

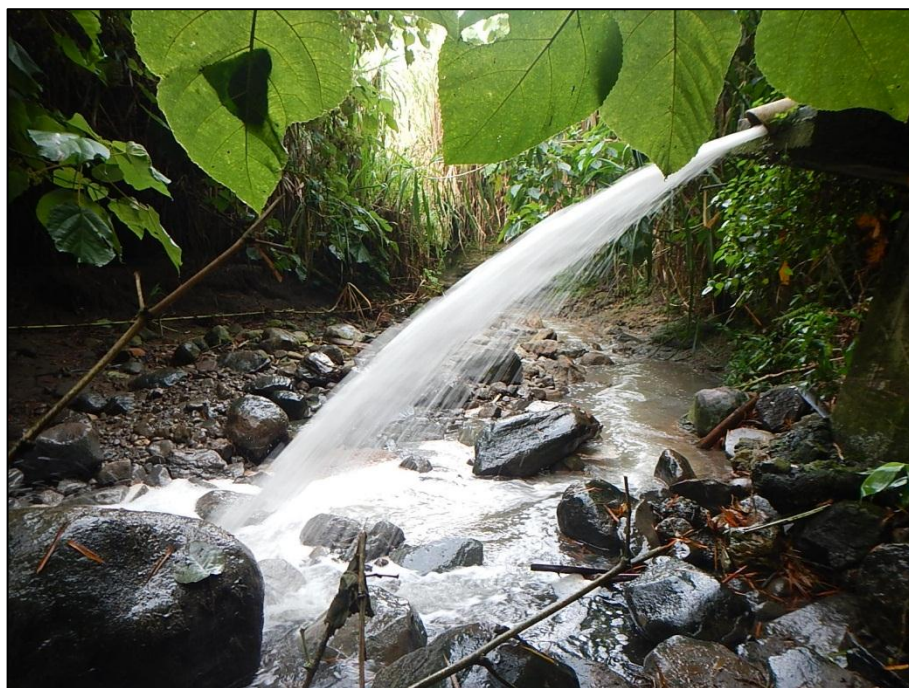


Figura 4. Quebrada Cristales antes y después del vertimiento “Don Pollo”

- **Calidad quebrada Cristales: Zona rural de los municipios de Armenia y La Tebaida**

A pesar de ser receptora de varios vertimientos de aguas residuales, la quebrada Cristales presenta una buena capacidad de auto-recuperación evidenciada en los reportes históricos de calidad monitoreados por la Corporación Autónoma Regional del Quindío.

Tabla 6. Históricos de calidad del agua en el cauce principal de la quebrada Cristales

Fecha	Tramo	Longitud (km)	CAUDAL (l/s)	T (°C)	pH	DBO (mg/l O <sub>2</sub> )	DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	SST (mg/l)	OD (mg/l O <sub>2</sub> )	CT (NMP/100ml)	CF (NMP/100ml)
07/04/2015	Parque Recreación	0	43	20.3	6.79	24.8	50.4	16.4	1.61	9.20E+10	1.10E+10
	Desembocadura	29.79	1281	24.8	7.06	8.3	20.8	41.8	5.76	5.40E+06	5.40E+06
10/06/2014	Parque Recreación	0	63	20	6.87	18.7	44.1	8.9	1.8	1.70E+06	1.30E+06
	Desembocadura	29.79	3344	24	7.56	5.63	23.2	27.8	5.65	7.0E+05	2.3E+05
15/08/2013	Parque Recreación	0									
	Desembocadura	29.79	629	24	7.59	<5.7	23.7	26.4	7.51	1.60E+05	1.60E+05
27/09/2011	Parque Recreación	0	20	22	7.34	5.7	45.4	27.7	1.2	5.40E+07	5.40E+07
	Desembocadura	29.79	1590	19	7.12	5.44	16.3	56.6	2.7	7.80E+02	7.80E+02

\* Desembocadura=Pisamal

Fuente: registros CRQ.

A continuación, se presenta un análisis gráfico de la calidad del agua en la quebrada Cristales tomada a la salida del perímetro urbano del municipio de Armenia (Estación: Parque de Recreación) y antes de su desembocadura con el río La Vieja (Estación Pisamal).



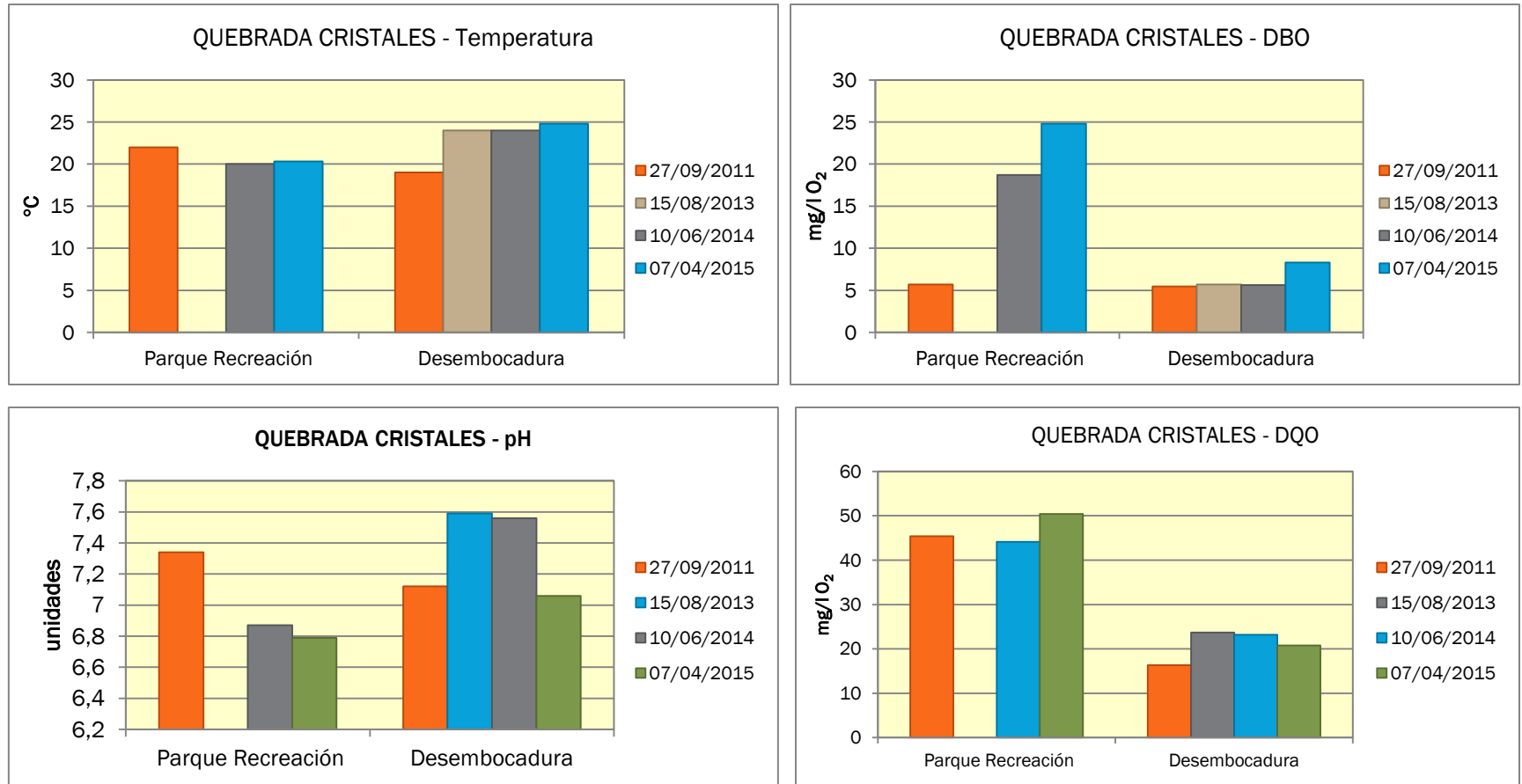


Figura 5. Variación de los parámetros de calidad a través de los años sobre la quebrada Cristales

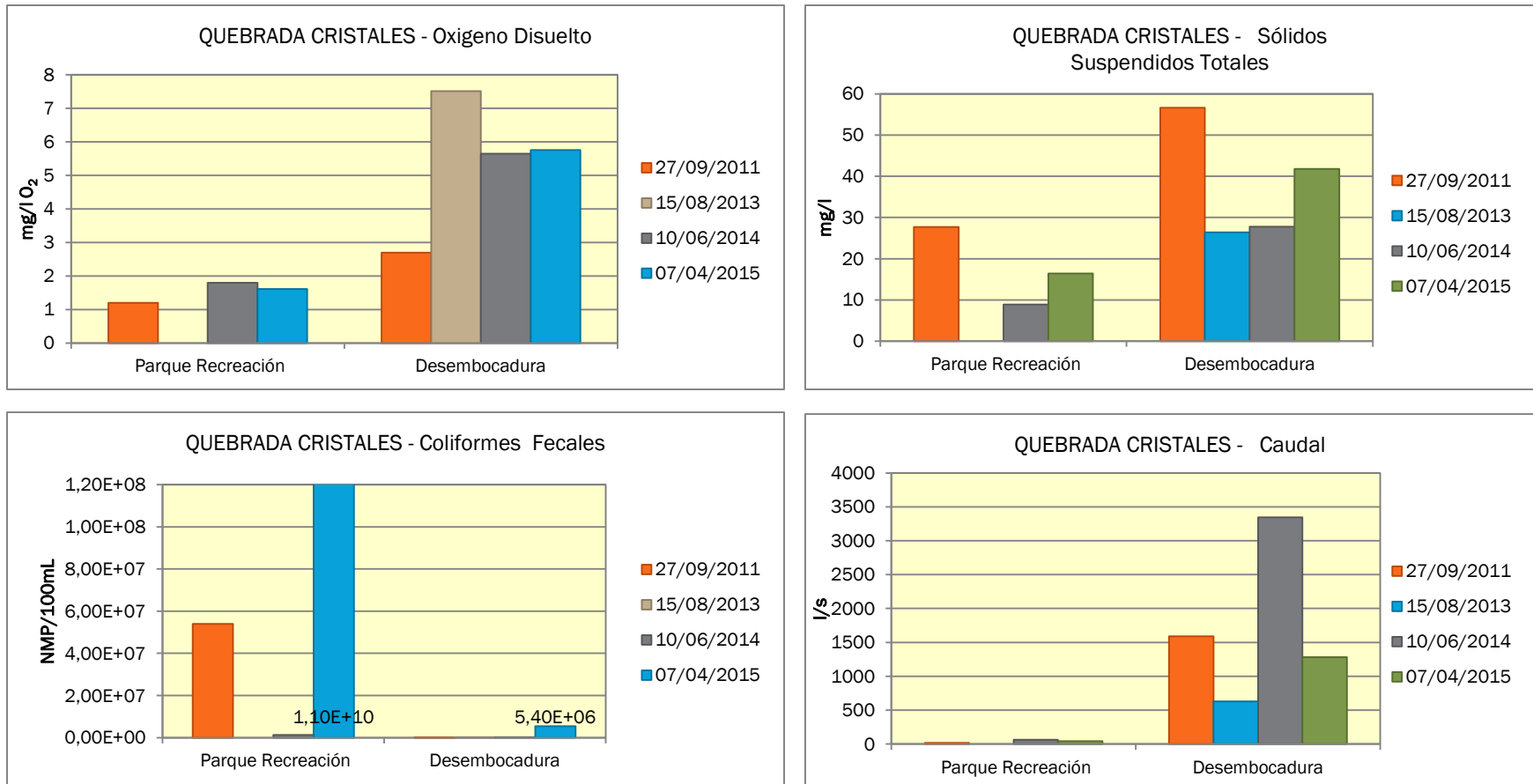


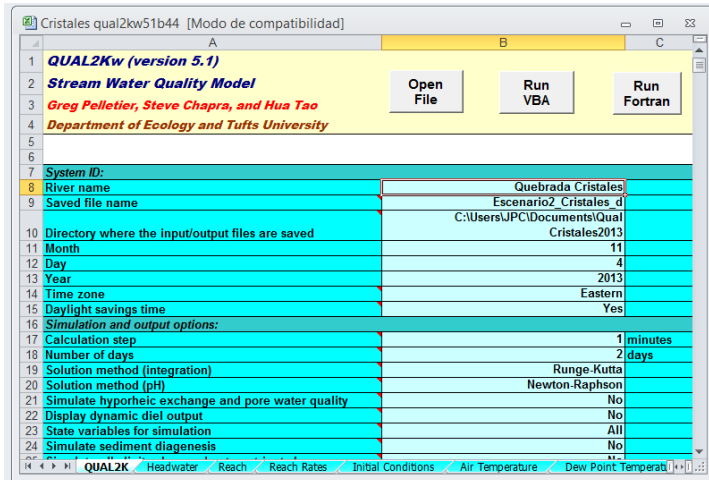
Figura 6. Variación de los parámetros de calidad a través de los años sobre la quebrada Cristales

- **Temperatura del agua:** En general, existe una tendencia creciente de esta variable relacionada con la altura sobre el nivel del mar y las variaciones horarias con la que se toman las muestras, lo que hace que vaya en aumento hacia límites con el Valle del Cauca. Se tiene en promedio una variación del 9.54 % entre la zona alta y baja de la unidad hidrográfica lo cuales un dato aceptable sin riesgo para el ambiente acuático. (Promedio histórico Parque de Recreación = 20.76 °C y Desembocadura = 22.95 °C).
- **pH:** Los valores reportados se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84 de 5 a 9 unidades. Para los dos puntos de análisis estos se encuentran entre 7.0 y 7.3 unidades, aceptables para la preservación de la flora y la fauna. En general se observa una tendencia creciente entre ambas estaciones.
- **DBO<sub>5</sub>:** Este parámetro se incrementa en cercanías a la zona rural del municipio de Armenia, debido a la recepción de vertimientos de aguas residuales en esta zona. Los niveles reportados por el laboratorio, evidencian valores entre 5.7 a 24.8 mg/IO<sub>2</sub> en la zona alta y de 5.44 a 8.3 mg/IO<sub>2</sub> cerca a la desembocadura con el río La Vieja. Para este último año entre ambas estaciones se observa un descenso del 67% (de 24.8 a 8.3 mg/IO<sub>2</sub>) lo que prueba la capacidad de re-oxigenación o dilución de los agentes contaminantes vertidos en la parte alta de la unidad hidrográfica.
- **Sólidos Suspendidos Totales:** Para los dos últimos años de registro, se observa cierta similitud en el incremento de los SST entre las estaciones Parque de Recreación y Desembocadura (Pisamal). Estos tienden en promedio a aumentar su concentración un 64% hacia la desembocadura con el río La Vieja.
- **Oxígeno Disuelto:** Se presenta una tendencia positiva en cuanto a la capacidad de re-oxigenación de esta fuente hídrica cerca a la desembocadura con el río La Vieja. Opuesto a lo anterior, el Oxígeno Disuelto empeora notablemente luego de que la quebrada Cristales abandona la zona urbana de Armenia (OD entre 1.2 y 1.8 mg/IO<sub>2</sub>), valores que representan muy mala calidad del agua (carencia de oxígeno).
- **Coliformes Totales y Fecales:** Se observa en la gráfica, concentraciones del orden de 1.10E+10 NMP/100ml a 1.30E+06 NMP/100ml, sobre la cuenca alta en cercanías al casco urbano del municipio de Armenia. Aguas abajo, se evidencia cierta disminución de este parámetro, lo que muestra síntomas de auto-recuperación en la quebrada debido a los procesos naturales que se producen en ella, al igual que la inexistencia de vertimientos significativos aguas arriba de su desembocadura con el río La Vieja. Es de notar que para el último año de monitoreo, este valor se ve incrementado cien (100) veces más

sobre el reporte del año 2014 para la zona alta de la quebrada Cristales. La descomposición de la materia orgánica es proporcional a la disminución de la concentración de oxígeno disuelto como se presentó en el grafico anterior.

### 3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL Qual2K

El modelo matemático Qual2k es una herramienta para estimar la respuesta de las corrientes hídricas ante diferentes condiciones hidrológicas, tratamientos de aguas residuales y el impacto de fuentes puntuales y difusas.



#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

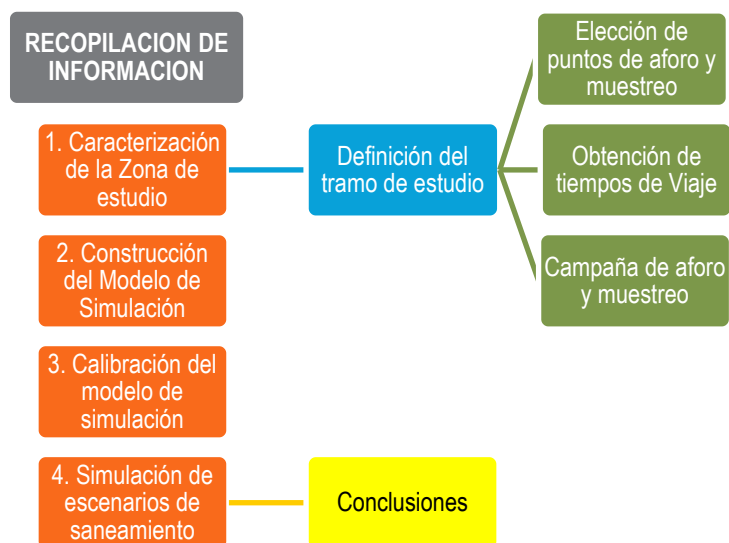
El modelo presenta características útiles para la simulación de los ríos y quebradas de montaña (cauces con pendiente longitudinal mayor al 1.0 %, *Parraga 2004.*) propios de nuestra región. A continuación se detallan algunas de sus cualidades:

- 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 (DBOC<sub>5</sub>) y lenta (DBOC<sub>20</sub> o DBOC<sub>ultima</sub>).
- Simula la anoxia.
- Simula las bacterias (Coliformes totales o fecales)

### 3.2 METODOLOGÍA

La Figura 7, representa esquemáticamente la metodología aplicada para la modelación de la calidad del agua para una corriente hídrica.

Figura 7. 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 (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 QUAL2Kw. Para el presente estudio, se realizó una campaña de aforo y muestreo el día 7 de Abril 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 inicia aproximadamente a unos 360 metros del nacimiento de la quebrada Cristales dentro de la zona urbana del municipio de Armenia (zona sur-oriental), y se extiende hacia el municipio de La Tebaida por la margen izquierda de la vía que conduce al Valle del Cauca, con un recorrido de 34.7 kilómetros. Hidrológicamente la longitud natural del cauce es de 36.6 Kilómetros, con una diferencia de nivel entre el nacimiento y su desembocadura de 400 metros (1430 m.s.n.m a 1030 m.s.n.m) y una pendiente media del cauce de 1.09 %.

A continuación se presentan las coordenadas de los puntos a modelar conformados por 5 secciones transversales sobre la fuente principal y 3 vertimientos (identificados como vertimientos directos y afluentes naturales -quebradas).

Tabla 7. Localización de puntos a modelar sobre la quebrada Cristales y tributarios

SECCION No.	NOMBRE	CODIGO	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m)	COORDENADAS		
					Latitud	Longitud	a.s.n.m
1	Bodega (antigua gallera)	C1	K 00+000	0	4° 30' 54.0"	75° 41' 33.2"	1410
2	Don Pollo	V1	K 02+220	2220	4° 30' 25"	75° 42' 28"	1320
3	Parque de Recreación	C2	K 04+255	2035	4° 29' 58"	75° 43' 1"	1290
4	Qda. Marmato	V2	K 12+428	8173	4° 27' 54"	75° 45' 29"	1180
5	Villa Sonia	C3	K 17+956	5528	4° 25' 30"	75° 45' 46"	1120
6	Maravelez	C4	K 23+834	5878	4° 24' 18"	75° 47' 28"	1050
7	Qda. La Jaramilla	V3	K 32+764	8929	4° 25' 15"	75° 49' 47"	1040
8	Pisamal	C5	K 34+672	1908	4° 24' 56"	75° 50' 22"	1040

*Tributarios de mayor interés hídrico*

C: Estación sobre la quebrada Cristales  
 CON: Concesión  
 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











Figura 8. Ubicación espacial de las estaciones de aforo y muestreo, unidad hidrográfica quebrada Cristales



#### 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 8. Características de los puntos de foro y muestreo sobre la quebrada Cristales y tributarios

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p><b>C1</b> <b>Bodega (antigua gallera)</b></p>	<p>Entrada por el callejón muebles Botero, sobre la vía principal Armenia - Valle del Cauca.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Inicialmente, en ella confluyen las aguas residuales de los barrios Castilla y Castilla Grande.</li> <li>· Se aprecian basuras dentro y fuera de la quebrada. Mal olor proveniente de la quebrada.</li> <li>· Se evidencia un Interceptor de aguas residuales (viaducto).</li> <li>· La quebrada evidencia color gris.</li> </ul>	
<p><b>V1</b> <b>Don Pollo</b></p>	<p>Industria avícola Don Pollo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Malos olores y turbiedad en la quebrada.</li> <li>· Quebrada rodeada de pastizales.</li> <li>· Se evidencia aceites en la quebrada (película de grasa en la lámina de agua).</li> </ul>	
<p><b>C2</b> <b>Parque de Recreación</b></p>	<p>Entrada por la bodega El Diamante, contiguo al Parque</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Agua con presencia de espuma, olor fuerte a agua residual, color turbio, rodeada por vegetación (guadua). Zona de extracción de arena en forma artesanal.</li> </ul>	

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p><b>V2</b> <b>Qda. Marmato</b></p>	<p>Ubicada en jurisdicción del municipio de Armenia, en la variante que comunica la glorieta del Club Campestre con el corregimiento del Caimo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Esta quebrada recibe en su parte alta la quebrada Los Ángeles la cual recibe vertimientos industriales provenientes del procesamiento de aves y otros procesos agrícolas.</li> <li>· Fuente visualmente limpia, en el punto de muestreo.</li> <li>· Quebrada rodeada por guaduales.</li> <li>· Construcción de casas campestres contiguo a la quebrada en el punto de muestreo</li> </ul>	
<p><b>C3</b> <b>Villa Sonia</b></p>	<p>Vereda Palo Negro. Acceso por la vía al aeropuerto el Edén sobre la vía que conduce el seminario Mayor Juan Pablo II. Antigua estación limnigráfica administrada por la CRQ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Se presenta buena cantidad del recurso hídrico, rodeada por guaduales.</li> <li>· Presencia de peces.</li> </ul>	
<p><b>C4</b> <b>Maravelez</b></p>	<p>Vía al aeropuerto el Edén sobre la vía que conduce el seminario Mayor Juan Pablo II. Hacienda Maravelez. Vereda La Argentina.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ganado cerca al lecho de la quebrada.</li> <li>· No se perciben malos olores y la turbiedad presente en los anteriores puntos ha disminuido en un gran porcentaje.</li> <li>· Se evidenciaron dos tortugas de tamaño mediano bajando por la quebrada.</li> </ul>	

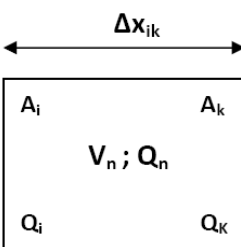
ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p><b>V3</b> <b>Qda. La Jaramilla</b></p>	<p>Vía al Valle antes del retén de policía La Herradura, entrada hacia el costado izquierdo de la vía. Vereda Pisamal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quebrada receptora de las aguas residuales provenientes del casco urbano del municipio de La Tebaida; estas aguas son conducidas por medio de un interceptor hacia la planta de aguas residuales (PTAR) para luego ser vertida a la quebrada La Jaramilla.</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Presencia de peces en la zona. Quebrada rodeada por guaduales.</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Hasta este punto, la quebrada presenta turbiedad y mal olor.</li> </ul>	
<p><b>C5</b> <b>Pisamal</b></p>	<p>Vía al Valle antes del retén de policía La Herradura, entrada hacia el costado izquierdo de la vía. Vereda Pisamal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rodeada de grandes pastizales, la quebrada posee cierta turbiedad. El punto seleccionado se encuentra a 1.5 km de la desembocadura con el río La Vieja.</li> </ul>	

## 4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE

Se requiere la obtención de los tiempos de viaje en los diferentes puntos dentro de la quebrada Cristales 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 9. Variables hidrométricas obtenidas el 3 de marzo de 2015 durante la jornada de aforo para la obtención de los tiempos de viaje

Abscisa	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
K 04+255	Parque de Recreación	0.236	0.129	0.08	1.80	0.036
K 17+956	Villa Sonia	0.310	1.210	0.28	4.60	0.461
K 34+672	Pisamal	0.413	1.695	0.11	16.00	0.828

Tabla 10. Tiempos de viaje de la masa de agua para el día 3 de marzo de 2015

ESTACIÓN	A(m <sup>2</sup> )	$\Delta x$ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Q medio (m <sup>3</sup> /s)	T viaje (seg)	T viaje (min)	$\Sigma T$ viaje (min)	$\Sigma T$ viaje (hora)	Horas parciales
Parque de Recreación	0.129	0	0.036	0	0.0	0	0	0	0	0
Villa Sonia	1.210	13701	0.461	9173.32	0.2	36888.42	614.81	614.81	10.25	10.25
Pisamal	1.695	16716	0.828	24274.52	0.6	37676.50	627.94	1242.75	20.71	10.47

### 4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS

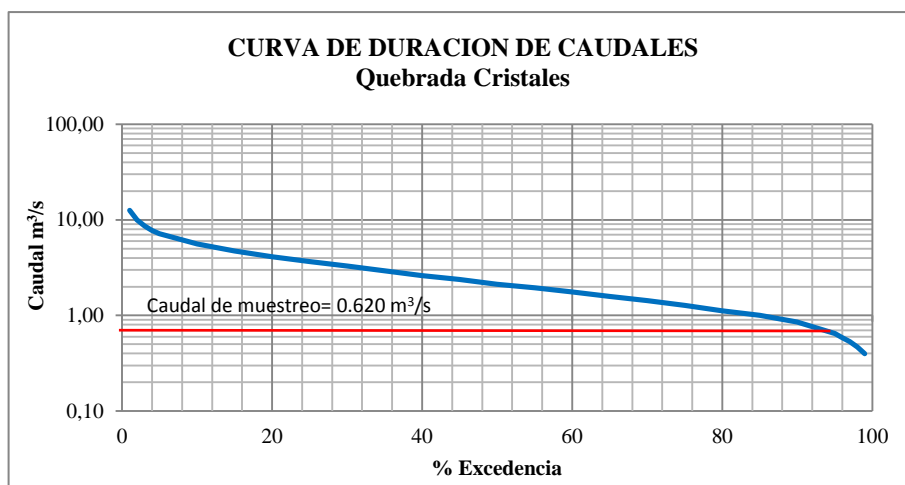
El método de aforo para la obtención de los tiempos de viaje y la toma de muestras de agua, fue seleccionado de acuerdo con lo establecido por el IDEAM en su “Guía para el monitoreo de cuerpos de agua, 1999”. El tipo de aforo implementado fue por vadeo; se seleccionaron un mínimo de 11 secciones verticales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

Tabla 11. Variables hidrométricas obtenidas el 7 de abril de 2015 durante la jornada de aforo y muestreo

Punto	Abscisa	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
C1	K 00+000	Bodega (antigua gallera)	0.065	0.049	0.035	1.450	0.003
C2	K 04+255	Parque de Recreación	0.173	0.251	0.120	2.100	0.043
C3	K 17+956	Villa Sonia	0.420	1.477	0.319	4.900	0.620
C4	K 23+834	Maravelez	0.647	1.089	0.227	4.800	0.705
C5	K 34+672	Pisamal	0.705	1.817	0.121	15.200	1.281

- 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 los registros históricos de caudal medio mensual de la estación limnigráfica “Villa Sonia”, la *Curva de Duración de Caudales*. 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.



Fuente: Línea Base, CRQ 2011.

Figura 10. Curva de Duración de Caudales, quebrada Cristales

El valor del caudal obtenido el día del muestreo (07 de abril de 2015) en la estación Villa Sonia fue de **0.620 m³/s**, equivalente a un 95% de probabilidad de excedencia considerado como caudal bajo.

#### 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 Bodega y Pisamal). 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 quebradas tributarias, vertimientos de aguas residuales (pecuarias, industriales, agrícolas y domésticas), 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 la quebrada Cristales. En la Tabla 12 se presentan

todas las condiciones de borde internas correspondientes a la quebrada incluidas en la modelación matemática Tributarios.

- Tributarios

Como afluentes de la corriente principal, son evaluados aquellos que poseen mayor impacto a nivel de calidad sobre la corriente principal definidas como fuentes receptoras de aguas residuales. Estas son las quebradas Marmato y La Jaramilla.

- Vertimientos de aguas residuales.

Vertimiento directo proveniente de la procesadora avícola Don Pollo, considerado de mayor impacto en las características de calidad de la fuente receptora.

- Concesiones de agua

No existen concesiones agua que capten directamente de esta quebrada.

Tabla 12. Condiciones de borde internas en la malla de modelación, quebrada Cristales

PUNTO	CODIGO	ESTACION	ABSCISA (km)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	CONDICION
	C1	Bodega	K 00+000	0.003	Estación
1	V1	Vertimiento Don Pollo	K 02+220	0.007	Vertimiento
2	V2	Quebrada Marmato	K 12+428	0.078	Vertimiento
3	V3	Quebrada La Jaramilla	K 32+764	0.325	Vertimiento
	C5	Pisamal	K 34+672	1.281	Estación

C: Estación sobre la quebrada Cristales  
V: Vertimiento

#### 4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN

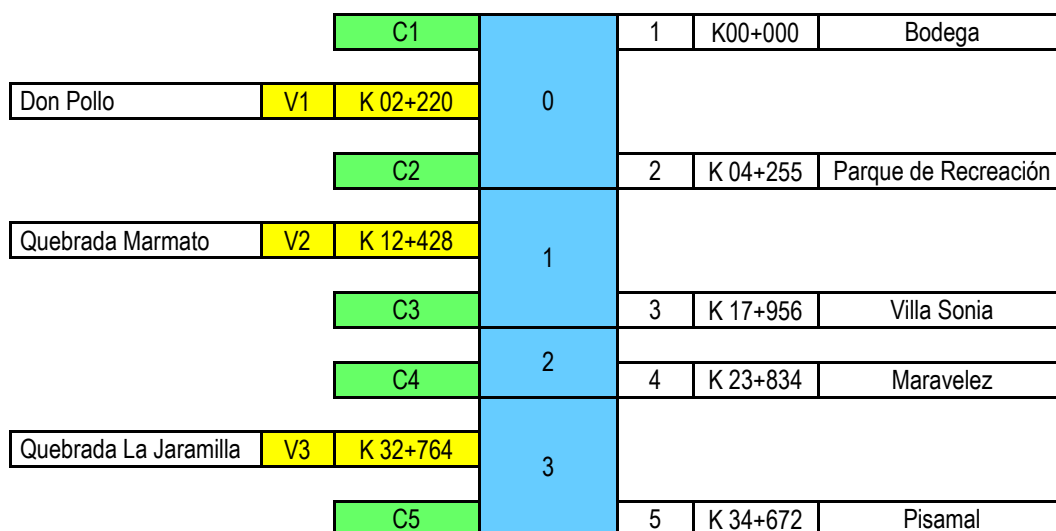
El grid o malla de modelación, quedó conformada por 5 secciones transversales, correspondientes a las secciones localizadas en las salidas de campo como estaciones de aforo y de toma de muestras de agua. En la siguiente tabla se representa la malla de modelación para la quebrada Cristales, donde se especifican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



Tabla 13. Localización de las estaciones transversales de la malla de modelación para la quebrada Cristales

SECCION Nº	NOMBRE	ESTACION	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m)	COORDENADAS		m.s.n.m
					Latitud	Longitud	
1	Bodega	C1	K00+000	0	4° 30' 54.0"	75° 41' 33.2"	1410
2	Parque de Recreación	C2	K 04+255	4255	4° 29' 58"	75° 43' 1"	1290
3	Villa Sonia	C3	K 17+956	13701	4° 25' 30"	75° 45' 46"	1120
4	Maravelez	C4	K 23+834	5878	4° 24' 18"	75° 47' 28"	1050
5	Pisamal	C5	K 34+672	10838	4° 24' 56"	75° 50' 22"	1040

Tabla 14. Red esquematizada para modelación de calidad del agua – Quebrada Cristales



#### 4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO

Durante la campaña de muestreo para la corriente en estudio, se obtuvo información de caudales y parámetros de calidad solamente en los tributarios de mayor interés en la quebrada Cristales, debido a su localización. Partiendo de este hecho, fue necesario tener en cuenta dentro de este componente, las fuentes difusas de agua necesarias para el balance de caudales no aforados en campo.

Tabla 15. Fuentes Difusas incluidas como parte del balance hídrico dentro de la quebrada Cristales

Fuente Difusa		Localización entre la abscisa (m)		Diffuse Abstraction	Diffuse Inflow
				m <sup>3</sup> /s	
Fuente Difusa 1	D1	0.0	4.6	–	0.0400
Fuente Difusa 2	D2	5.6	12.6	–	0.4710
Fuente Difusa 3	D3	15.6	24.6	–	0.1120
Fuente Difusa 4	D4	25.6	34.6	–	0.2450

#### 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 11 y 12 se muestran los perfiles longitudinales de las variables observadas comparadas con las calculadas por el modelo (calibradas).

Tabla 16. Variables hidrométricas obtenidas en la calibración hidráulica

Abscisa (km)	Profundidad media (m)	Ancho Cauce (m)	Perímetro mojado (m)	Área húmeda (m <sup>2</sup> )	Velocidad media (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0.04	1.45	1.53	0.06	0.05	0.003
4.255	0.13	2.10	2.36	0.27	0.17	0.046
17.956	0.30	4.90	5.51	1.48	0.42	0.627
23.834	0.24	4.80	5.28	1.14	0.61	0.701
34.672	0.12	15.20	15.44	1.79	0.71	1.281

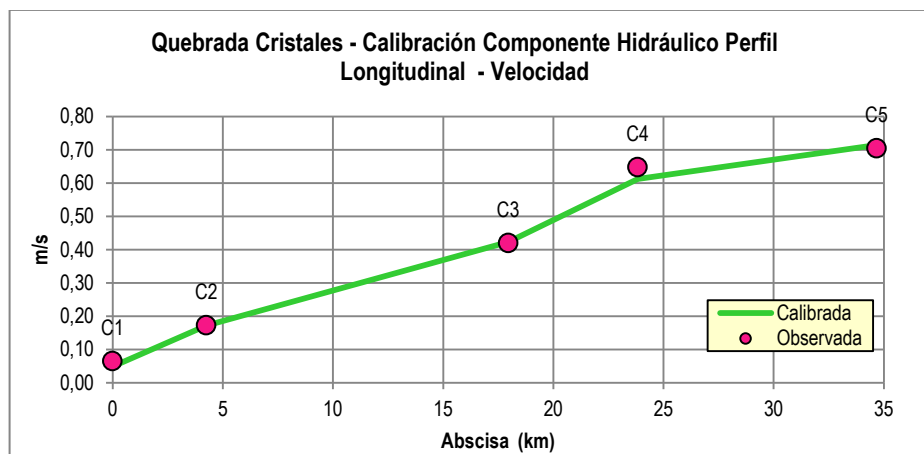
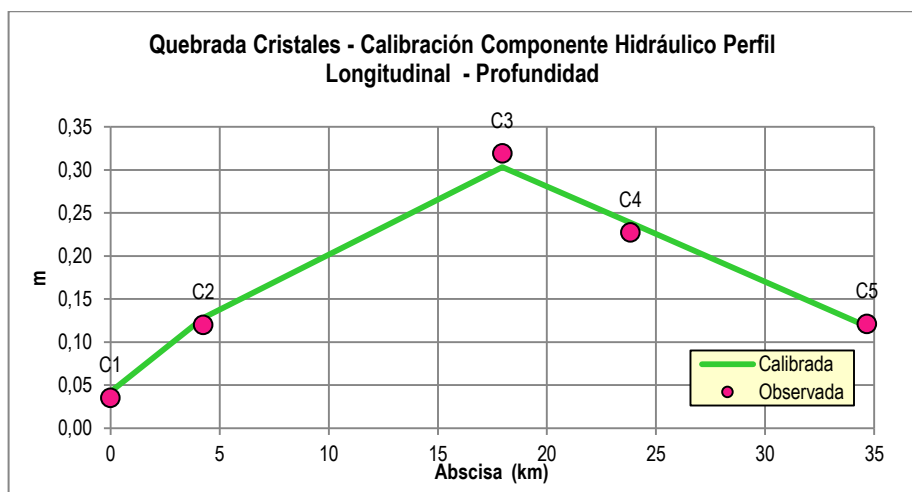
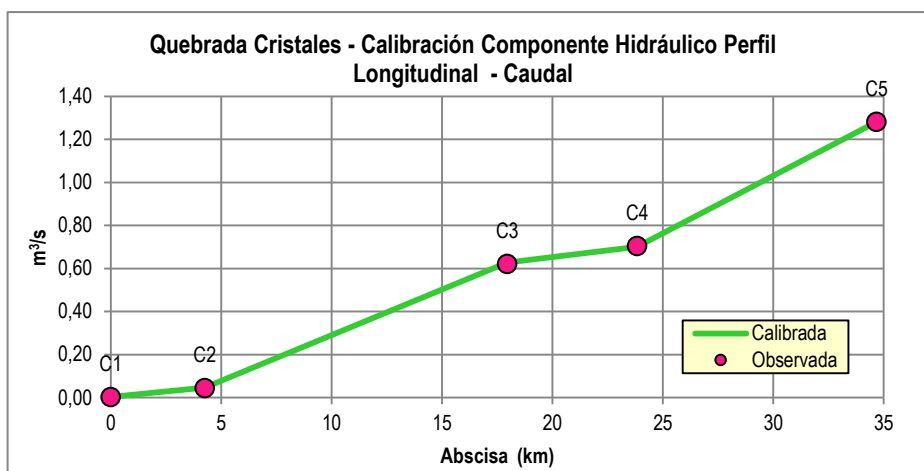


Figura 11. Calibración componente hidráulico, perfiles longitudinales: caudal, velocidad del cauce y profundidad - Calibradas vs Observadas

## 5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD

### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO

Los datos de entrada (Inputs) para el modelo de “Calidad del agua” en la quebrada Cristales, fueron obtenidos por medio de la toma de muestras en el cauce principal y dos tributarios 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.

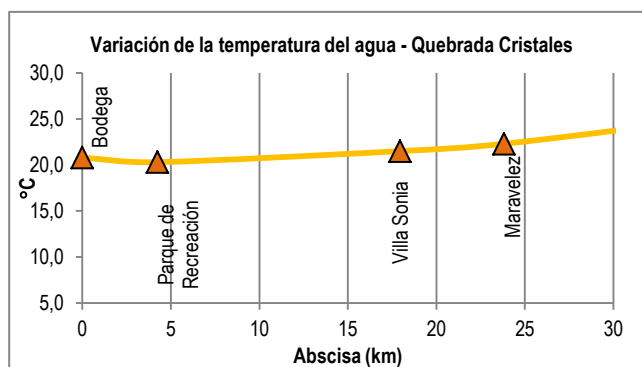
Tabla 17. Datos de calidad quebrada Cristales (CRQ) – Campaña de muestreo 07/04/2015

PUNTO DE MONITOREO		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Temp. (°C)	SST (mg/l)	OD (mg/l O <sub>2</sub> )	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	pH (unidades)	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
									NMP/100ml	NMP/100ml
Bodega (Antigua Gallera)	C1	0.003	20.8	46.1	1.85	133	256	6.9	>160000000000	>160000000000
Don Pollo	V1	0.007	20.5	178	6.39	273	1004	4.89		
Parque de Recreación	C2	0.043	20.3	16.4	1.61	24.8	50.4	6.79	1.10E+10	9.20E+10
Quebrada Marmato	V2	0.078	21.9	13.7	6.76	9.3	17.5	6.66	5.40E+06	1.60E+07
Villa Sonia	C3	0.620	21.5	26.8	6.86	6.96	18.2	7.15	3.50E+06	3.50E+06
Maravelez	C4	0.705	22.3	25.3	7.85	5.7	13.5	7.13		
Quebrada La Jaramilla	V3	0.325	23.0	6.8	5.21	8.7	16.2	7.07	>160000	>160000
Pisamal	C5	1.281	24.8	41.8	5.76	8.3	20.8	7.06	5.40E+06	5.40E+06

#### 5.1.1 Observaciones Generales de los reportes de calidad

- **Temperatura del agua**

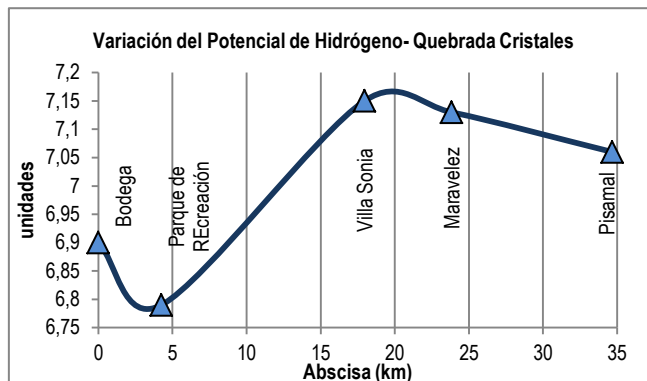
Existe una tendencia creciente de esta variable relacionada directamente con la altura sobre el nivel del mar lo que hace que esta vaya en aumento de tramo a tramo, debido a que el punto final se encuentra próximo al río La Vieja (límites con el Valle del Cauca). Además, las mediciones de temperatura 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. Así mismo, la relación entre densidad del agua y su temperatura, pueden modificar los movimientos de mezcla de diferentes masas en función de la alteración de la temperatura. En general, se tienen valores de temperatura del agua aceptables para el ambiente acuático en la quebrada (entre 20.3 y 24.8 °C).

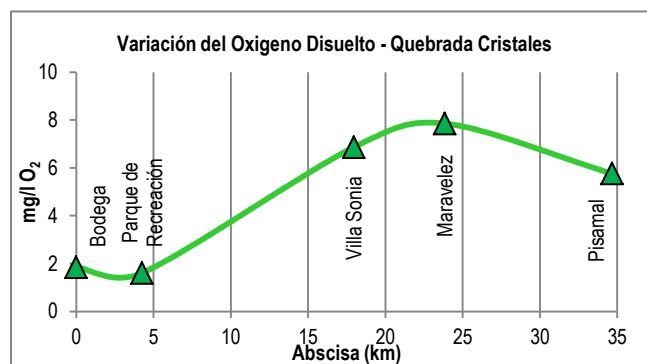
- **pH**

El análisis de esta variable es fundamental para establecer la calidad del agua, debido a que permite identificar las condiciones ácidas o alcalinas de una corriente cuyos valores extremos puede repercutir seriamente en la flora y fauna acuáticas. Los valores determinados se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84 (entre 5 a 9 unidades): 6.79 a 7.15 unidades.



- **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 relacionados 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 O<sub>2</sub>. Los niveles bajos de OD pueden encontrarse en áreas donde el material orgánico (vertidos 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. Algunos tipos de larvas de mosca y mosquito se hallan localizados entre los 4mg/l a 1mg/l. Los niveles más bajos de OD encontrados el día del muestreo se hallan localizados en el primer tramo “Bodega-Parque de Recreación” (1.61 mg/l O<sub>2</sub>). Por el contrario y de manera positiva, el valor más alto se encuentra localizado en la zona baja de la quebrada Cristales en la vereda Maravelez (7.85 mg/l O<sub>2</sub>). Para este punto, la quebrada ha dejado de ser receptora de aguas residuales y por el contrario, los afluentes que convergen en ella aumentan las concentraciones de oxígeno, brindando mayor calidad a sus aguas.



• **DBO**

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.

La quebrada Cristales presenta una carga máxima de 133 mg/l O<sub>2</sub> de DBO en el punto inicial estación “Bodega”. Aguas abajo del punto anterior, los resultados arrojaron un valor de 24.8 mg/l O<sub>2</sub> en la estación Parque de Recreación, dato que evidencia la gran capacidad de diluir la concentración del punto inicial y la vertida por la avícola Don Pollo (273 mg/l O<sub>2</sub>), sumado a los aportes de algunas pequeñas fuentes hídricas que permiten mejorar las condiciones de calidad en la quebrada, no obstante se concluye que se encuentra altamente contaminada.

• **Relación DQO/DBO**

La relación entre la DQO y DBO biodegradable, permite identificar si la materia orgánica presente en el agua es muy biodegradable, moderadamente o poco biodegradable.

Índice de biodegradabilidad:

- DQO/DBO = 1.5 Materia orgánica muy degradable
- DQO/DBO = 2 Materia orgánica moderadamente degradable
- DQO/DBO = 10 Materia poco degradable

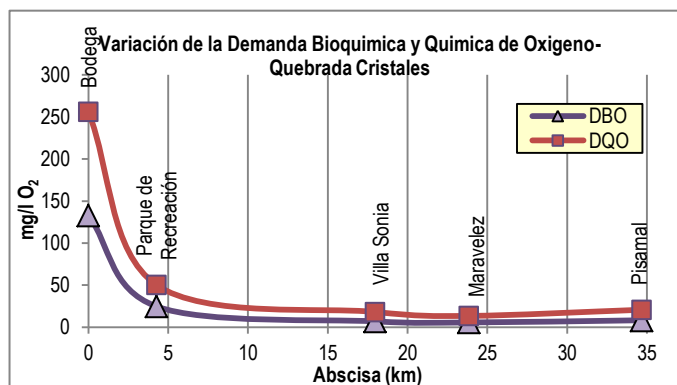


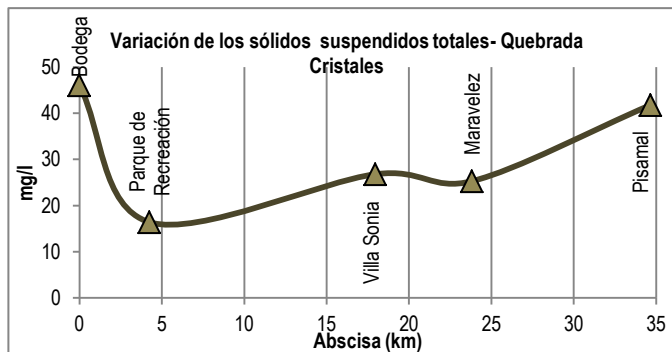
Tabla 18. Índice de biodegradabilidad\*

PUNTO DE MONITOREO	DQO	DQO/DBO	OBSERVACIÓN
Bodega (Antigua Gallera)	256	1.92	moderadamente degradable
Parque de Recreación	50.4	2.03	moderadamente degradable
Villa Sonia	18.2	2.61	moderadamente degradable
Maravelez	13.5	2.37	moderadamente degradable
Pisamal	20.8	2.51	moderadamente degradable

\*Biodegradables: Sustancias que pueden ser degradadas o transformadas por los microorganismos (bacterias y hongos). Por ejemplo tenemos al papel, al cartón, algunos detergentes y desechos orgánicos (excremento, alimentos).

• SST

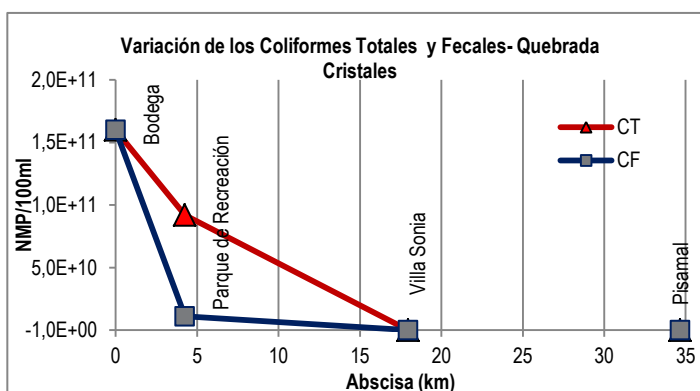
La concentración de sólidos suspendidos totales es importante para los ecosistemas fluviales por razones de calidad ecológica y del agua, los sólidos inorgánicos en suspensión atenúan la luz, principalmente a través del proceso de dispersión lo cual disminuye el proceso fotosintético en la flora acuática. 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.



La quebrada Cristales presenta niveles de SST entre 16.4 y 46.1 mg/l. Su mayor concentración se registra en la estación Bodega (sobre el nacimiento de la quebrada). Entre los tramos Parque de Recreación y Maravelez, la quebrada Cristales tiende a disminuir la concentración de SST, pero cerca de su desembocadura (estación Pisamal), la quebrada incrementa su valor en un 39% en relación con el punto anterior, estación Maravelez (de 25.3 mg/l a 41.8 mg/l). En la campaña de muestreo no se evidenció algún tipo de actividad antrópica que pudiera generar esta condición.

• 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. La mayor concentración de este parámetro se encuentra en la estación Bodega (>1.6E+11 NMP/100ml), donde la quebrada recibe las aguas residuales de los barrios Castilla y Castilla Grande. Por otro lado, se observa un descenso de este parámetro en la estación Pisamal con valores de los CT y CF de 5.40E+06 NMP/100ml.



### 5.1.2 Análisis de las concentraciones obtenidas en la estación “Bodega” y el vertimiento puntual “industria avícola Don Pollo” identificados en la quebrada Cristales con relación a la Resolución 0631 de 2015

Para la identificación de los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas y no domésticas de los prestadores del servicio público de alcantarillado (caso de la quebrada Cristales, estación Bodega), se evalúa previamente la carga contaminante en kg/día de DBO<sub>5</sub> con el fin de identificar la Tabla a ser aplicada de los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles a cumplir.

Es de recordar que la quebrada Cristales en su nacimiento recibe los vertimientos de los barrios Castilla y Castilla Grande, por este motivo, serán consideradas las concentraciones de los parámetros de calidad obtenidos sobre la estación Bodega como valores provenientes de los vertimientos de los barrios mencionados, para así relacionarlos con la Resolución 0631 de 2015.

Tabla 19. Carga contaminante de los vertimientos identificados en la modelación

ESTACION	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (l/s)	Carga Contaminante kg/día DBO <sub>5</sub>	Resolución 0631 de 2015 (Capítulo V y VII)
Bodega	133	0.0032	3.19	36.615	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS (ARD y ARnD) Y DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PUBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICALES CON UNA CARGA MENOS O IGUAL A 625.00 Kg/día DBO <sub>5</sub>
Don Pollo*	273	0.0069	6.95	163.872	AGUAS RESIDUALES NO DEOMESTICAS PARA LAS ACTIVIDADES INDUSTRIALES, COMERCIALES O DE SERVICIOS DIFERENTES A LOS DEL CAPITULO V Y VI

\*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 de la ciudad de Armenia, por tal motivo los límites máximos permisibles serán tomados del Capítulo VII - Resolución 0631/2015.

La carga contaminante calculada para la estación Bodega no supera los 625 kg/día. De acuerdo a lo anterior, se toma la primera tabla que aparece en el Capítulo V, Artículo 8 de la mencionada Resolución para el análisis de los valores límites máximos permisibles a cumplir.



Tabla 20. Cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015

PUNTO DE MONITOREO		SST (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	pH (unidades)
Bodega (barrios Castilla y Castilla Grande)	Concentración	46.1	133	256	6.9
	Cumplimiento Resolución 0631 de 2015	< 90 CUMPLE	< 90 NO CUMPLE	< 180 NO CUMPLE	(6-9) CUMPLE
Don Pollo	V2 - Concentración	178	273	1004	4.89
	Cumplimiento Resolución 0631 de 2015	< 50 NO CUMPLE	< 50 NO CUMPLE	< 150 NO CUMPLE	(6-9) NO CUMPLE

## 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<sup>-1</sup>

- **Método de cálculo entre tramos**

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

$$Kd_e = [(1/\Delta t) \ln (L_A/L_B)] \quad (2)$$

$$Kd = (Kd_e/2.3) \quad (3)$$

Dónde:

- $Kd_e$  : Constante de desoxigenación (base e), día<sup>-1</sup>
- $Kd$  : Constante de desoxigenación (base 10), día<sup>-1</sup>
- $L_A$  : DBOC en el punto A, mg/l
- $L_B$  : DBOC en el punto B, mg/l
- $\Delta t$  : 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.

### 5.2.2 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.

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

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 del agua fue el primer parámetro de calidad del agua en ajustarse, y posteriormente se procedió con el ajuste de la DBO<sub>5</sub>, el OD, pH, 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 de la quebrada Cristales.

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<sub>5</sub>, OD, SST, pH y CF.

Tabla 21. Calibración de las descargas difusas

Fuente Difusa		Localización entre la abscisa (m)		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Temp. Agua (°C)	SST (mg/l)	OD (mg/l O <sub>2</sub> )	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	pH (unidades)	Coliformes Fecales (NMP/100ml)
Fuente Difusa 1	D1	0	4.255	0.0400	20.00	-	-	-	7.0	1.00E+09
Fuente Difusa 2	D2	4.255	17.956	0.4710	22.00	-	20.00	-	6.0	-
Fuente Difusa 3	D3	17.956	23.834	0.1120	23.00	-	23.00	-	6.0	-
Fuente Difusa 4	D4	23.834	36.672	0.2450	24.00	-	24.00	-	6.8	5.00E+07

Tabla 22. Constantes cinéticas de reacción

Tramo (km)		Constante de reaireación (1/d)	Velocidad de sedimentación (m/d)	Tasa de Oxidación (1/d)
0	4.255	13.5	3	3.8

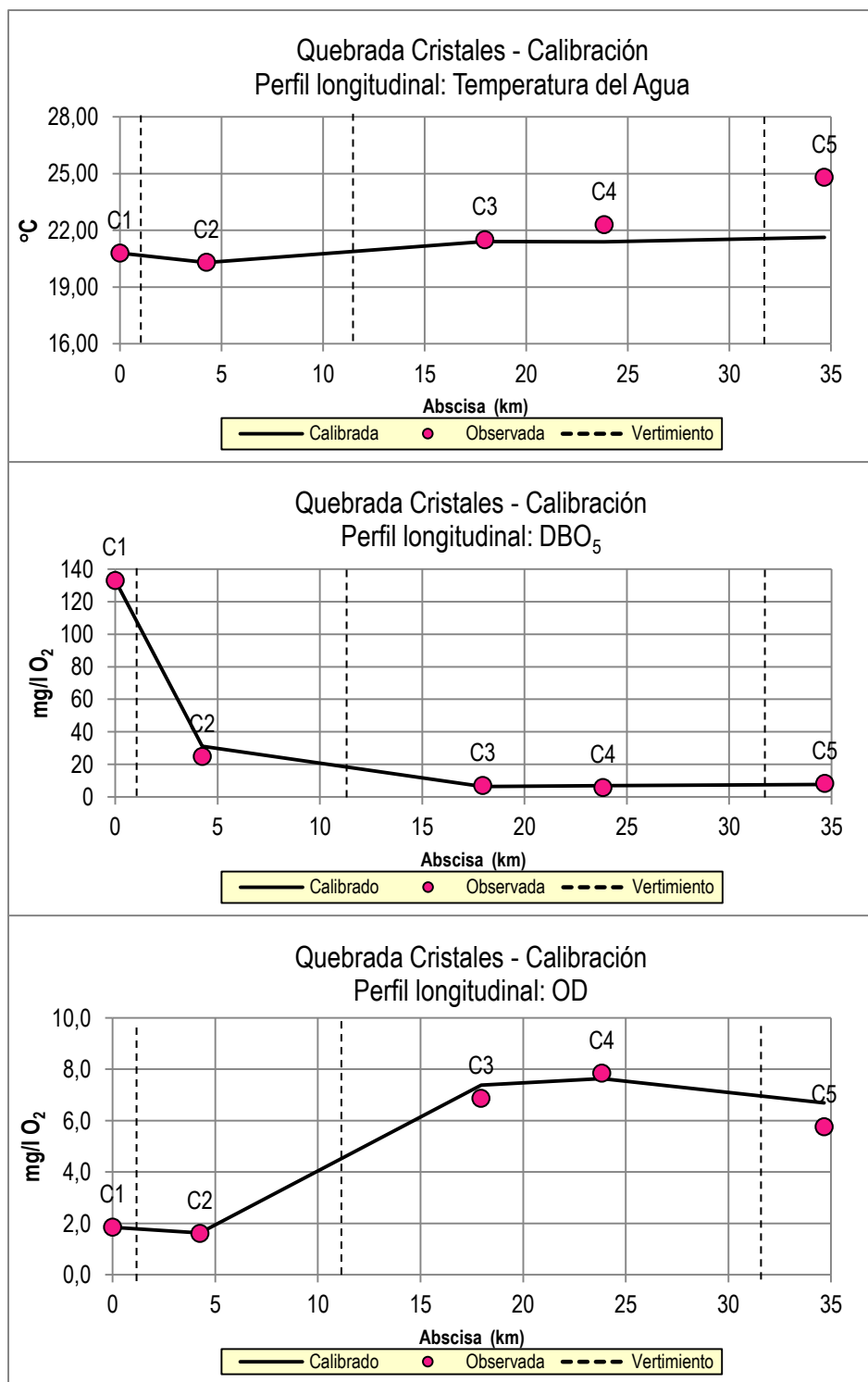


Figura 12. Modelo de calidad del agua – quebrada Cristales  
Perfil longitudinal de Temperatura del agua, DBO<sub>5</sub> y OD

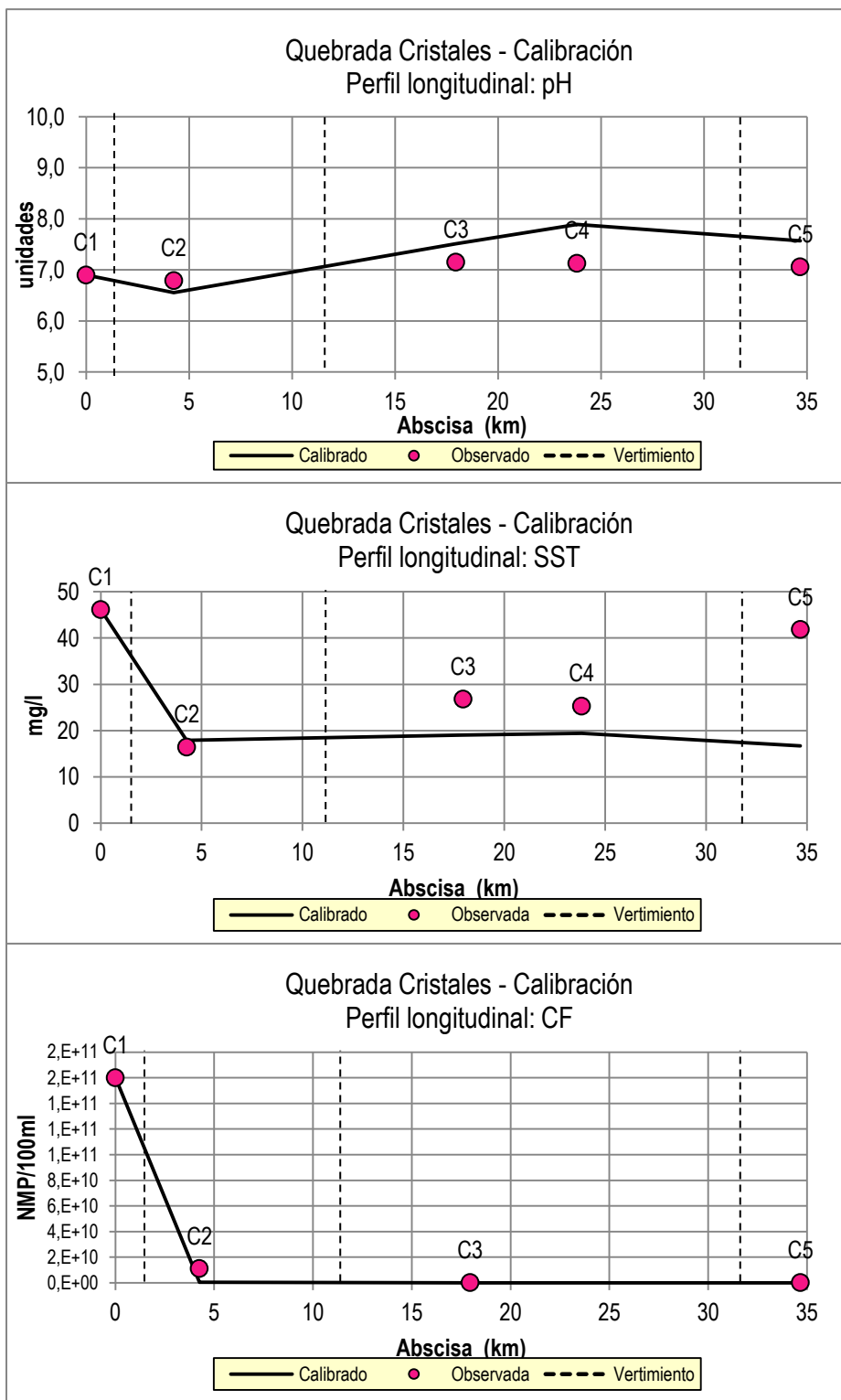


Figura 13. Modelo de calidad del agua – quebrada Cristales  
Perfil longitudinal de pH, SST y CF

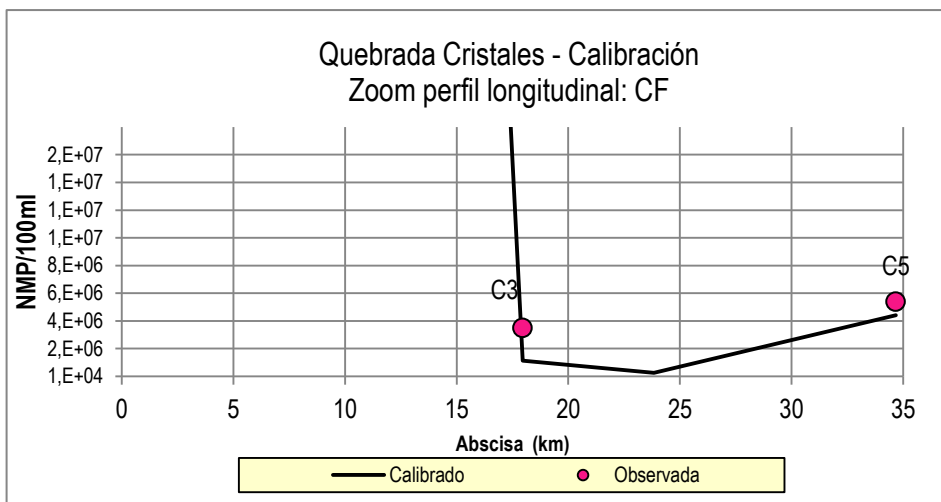


Figura 14. Modelo de calidad del agua – quebrada Cristales  
Perfil longitudinal de CF

## 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 2014 y 2013 realizadas por la Corporación Autónoma Regional del Quindío sobre las mismas estaciones de estudio.

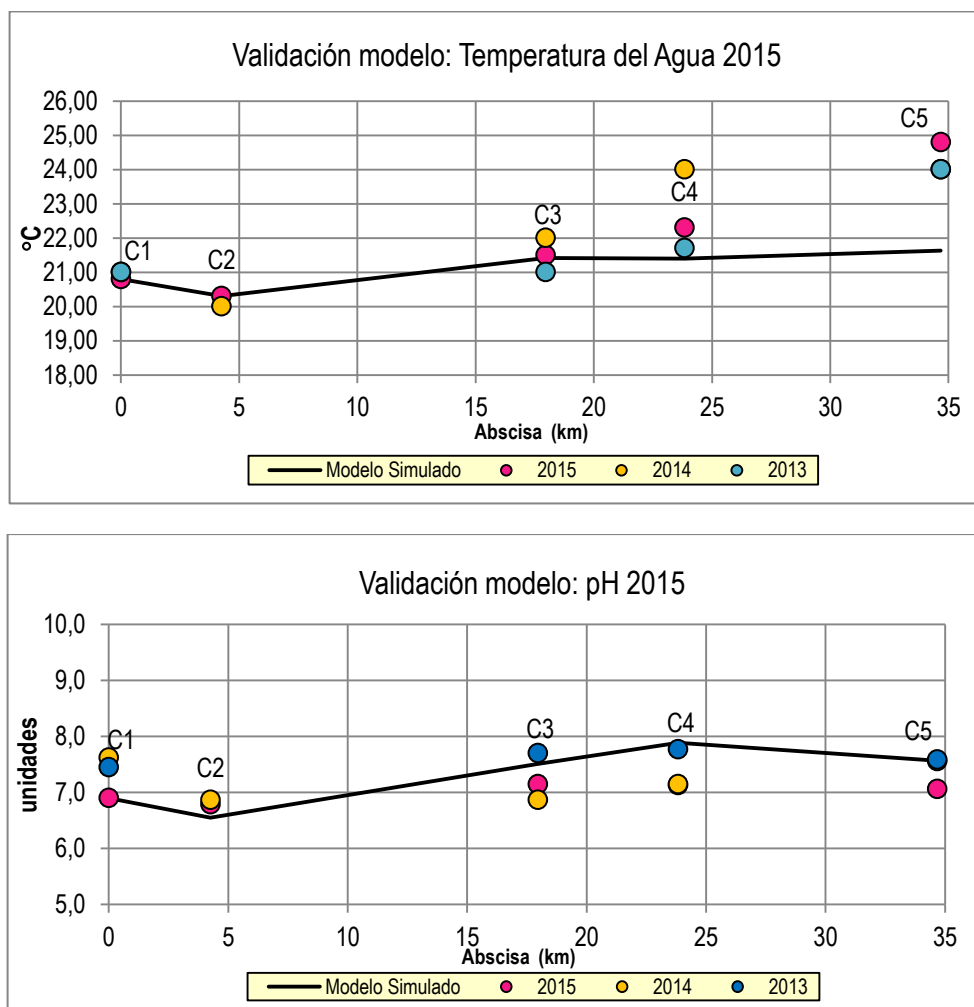


Figura 15. Validación del modelo de Temperatura y pH, 2015



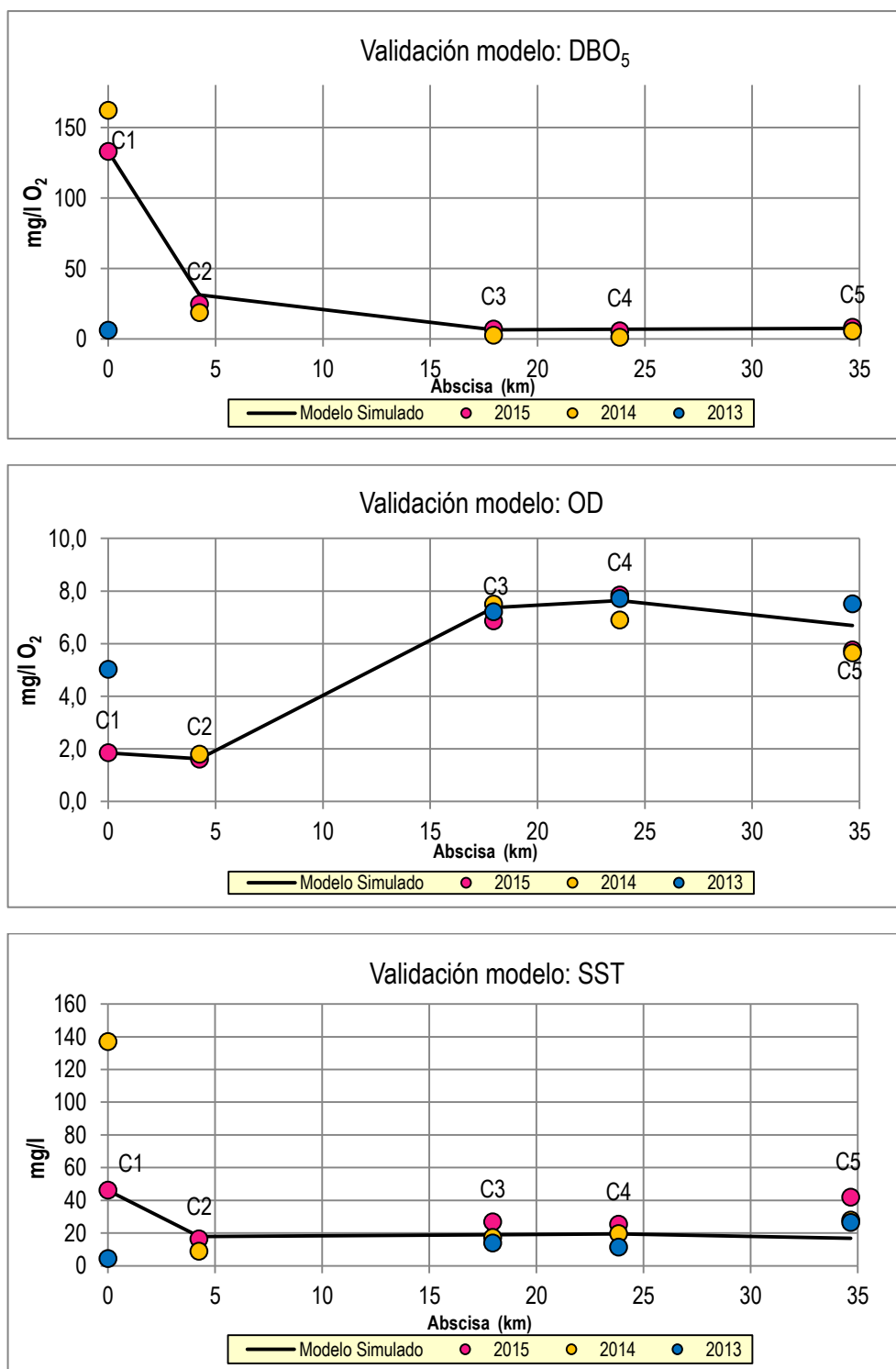


Figura 16. Validación del modelo de DBO<sub>5</sub>, OD y SST, 2015

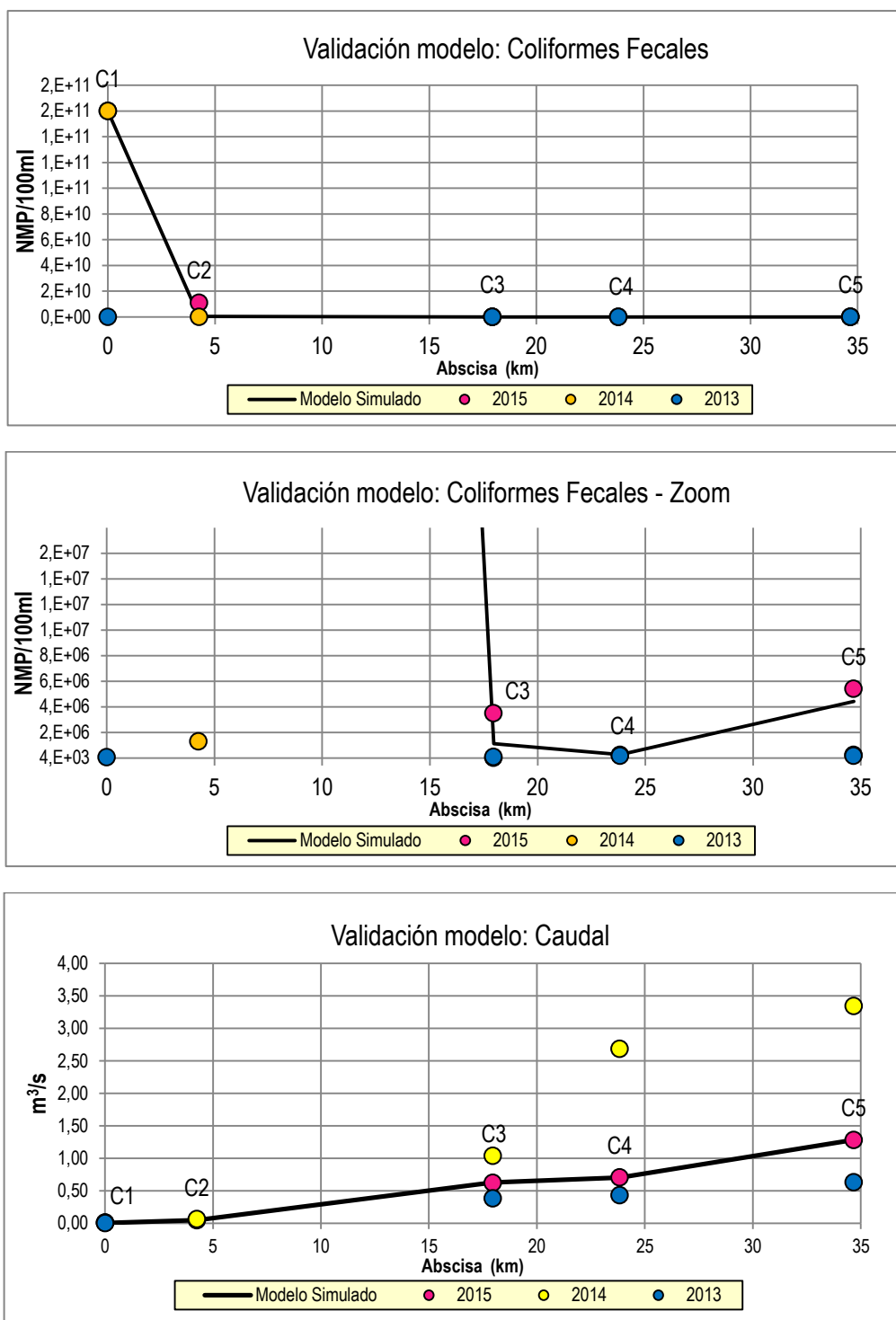


Figura 17. Validación del modelo CF y Caudal, 2015

**Observaciones:** La validación del modelo de calidad cuenta con un registro promedio de tres datos sobre cada estación monitoreada. Esta situación resulta aceptable para

la identificación de un patrón de calidad entre los tramos evaluados a lo largo de la quebrada Cristales. La aplicación de este ejercicio deja como evidencia cierta correlación de los parámetros de calidad en cada estación de monitoreo, lo cual indica un ajuste aceptable del modelo actual con los datos obtenidos en campañas anteriores.

- 1) En general, se observa que los modelos de calidad evaluados en el presente estudio, poseen un comportamiento similar a los históricos en cada uno de los puntos o estaciones seleccionados. En ellos se aprecian variaciones y tendencias similares.
- 2) El modelo de temperatura del agua se ajusta a los valores reportados en la mayoría de las estaciones de monitoreo. Sin embargo, para el último punto a modelar “estación Pisamal” no fue posible realizar un ajuste cercano a los obtenidos en campo, debido a que para ello se debería incorporar una descarga difusa en el modelo que aumentara la temperatura del agua cerca o superior a los 30 °C entre los dos últimos puntos de muestreo; asumir este valor sería forzar el modelo a una condición en campo inexistente.
- 3) El modelo que representa el comportamiento de la  $DBO_5$  a lo largo de la quebrada Cristales es consecuente con los reportes históricos. Sin embargo, el valor obtenido en la estación Bodega para el año 2013 es inferior (mejor calidad del agua) a los reportados en los años 2014 y 2015; esto debido a las bajas condiciones de calidad reportadas en estos dos últimos años.
- 4) En relación con el párrafo anterior, para el primer punto “estación Bodega” se tiene una concentración de OD igual a 5.02 mg/l  $O_2$  registrada para el año 2013, siendo este un valor aceptable en la calidad del agua. Contrario a lo anterior, los años 2014 y 2015 registraron valores deficiente de oxígeno disuelto evidenciando la mala calidad del agua en el primer tramos de estudio, (No detectable y 1.85 mg/l  $O_2$ ). Sin embargo, a lo largo de la quebrada Cristales se aprecia una tendencia positiva de este parámetro para los tres periodos de registro, lo que pone en evidencia la capacidad de re-oxigenación de las aguas.
- 5) No es coherente los datos de Coliformes Fecales reportados para el año 2014 entre la estación Bodega y Parque de Recreación, donde la concentración de materia orgánica disminuye cerca de un 100% sobre un tramo al cual en ese entonces se le había vertido una concentración de 1116 mg/l  $O_2$  de DBO y 1.10E+09 NMP/100ml de Coliformes Fecales (industria avícola Don Pollo). Para los años 2013 y 2015 este parámetro es acorde con los reportes obtenidos.

Dado lo anterior, es necesario continuar con los muestreos sincronizados y reportes de caudal instantáneo, lo cual hace posible la validación de cualquier modelo de simulación en una época específica. Igualmente, 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. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE SANEAMIENTO

---

Los escenarios de saneamiento son representaciones hipotéticas del comportamiento de una sustancia contaminante en un cuerpo de agua, que ha sido modelada por medio de un programa de computador o técnicas matemáticas, y a la cual se le aplica un tratamiento que también es simulado por el programa o las técnicas matemáticas.

Una vez se ha ejecutado, calibrado y validado el modelo de simulación, se procede a establecer escenarios con él para que así, sea utilizado como una herramienta de planificación. El modelo de simulación implementado para la quebrada Cristales, de acuerdo a su calibración, tiene validez para niveles medio a bajos. Con esto, ya se tiene el modelo de simulación listo para la formulación de escenarios, tanto de contaminación como de saneamiento en la quebrada.

Para el logro de este objetivo, se estima un porcentaje de tratamiento para cada una de las descargas puntuales que se han introducido previamente, para lo cual el modelo hará la presunción de que estas cargas tienen algún tipo de tratamiento y efectuará las operaciones respectivas con una disminución en la carga de DBO, SST y CF, así como el aumento en la concentración de OD para la estación Bodega (se sugiere un valor de 5 mg/l O<sub>2</sub>)<sup>1</sup>.

Las variables que se tomarán para el planteamiento de la mayoría de escenarios serán el OD, la DBO<sub>5</sub> y los SST como principales indicadores de la contaminación de las aguas.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los escenarios de saneamiento propuestos para la temporada de caudales medios a bajos.

### **7.1 Escenario 1: Reducción de hasta un 60% de los niveles de SST y DBO<sub>5</sub> al inicio del tramo de estudio y en las quebradas Marmato y La Jaramilla, además del vertimiento directo de agua residual proveniente de la procesadora avícola Don Pollo. Igualmente, reducción de un 99% de CF sobre los puntos antes mencionados.**

Se proponen reducciones del 60% en los vertimientos analizados dentro del estudio de modelación para la quebrada Cristales. Sumado a lo anterior, se pretende reducir en un 99% CF en el tramo de análisis, con el fin de evaluar tramos dentro del río que pudieran cumplir con el Decreto 1594/84 para la destinación del recurso. Con lo anterior se pretende evidenciar el comportamiento en la quebrada si se llegara a

---

<sup>1</sup> Resultado obtenido en la campaña de muestreo realizada en el año 2013 sobre la estación Bodega, donde se evidenció mejor calidad del agua en comparación de los reportes obtenidos para los años 2014 y 2015.

implementar algún sistema de tratamiento o mejorar los existentes que lograra reducir estos niveles de contaminación.

Tabla 23. Escenario 1 de saneamiento

	Sin Remoción (reportado el día del muestreo)		60% Remoción	
	DBO	SST	DBO	SST
Bodega	133	46.1	53.20	18.44
Vertimiento Don Pollo	273	178	109.20	71.20
Quebrada Marmato	9.3	13.7	3.72	5.48
Quebrada La Jaramilla	8.7	6.8	3.48	2.72

**7.2 Escenario 2: Reducción de hasta un 80% de los niveles de SST y DBO al inicio del tramo de estudio y en las quebradas Marmato y La Jaramilla, además del vertimiento directo de agua residual proveniente de la procesadora avícola Don Pollo. Igualmente, reducción de un 99% de CF sobre los puntos antes mencionados.**

Se proponen reducciones del 80% en los vertimientos analizados dentro del estudio de modelación para la quebrada Cristales. Sumado a lo anterior, se pretende reducir en un 99% CF en el tramo de análisis, con el fin de evaluar tramos dentro del rio que pudieran cumplir con el Decreto 1594/84 para la destinación del recurso. Con lo anterior se pretende evidenciar el comportamiento en la quebrada si se llegara a implementar algún sistema de tratamiento o mejorar los existentes que lograra reducir estos niveles de contaminación.

Tabla 24. Escenario 2 de saneamiento

	Sin Remoción (reportado el día del muestreo)		80% Remoción	
	DBO	SST	DBO	SST
Bodega	133	46.1	26.60	9.22
Vertimiento Don Pollo	273	178	54.60	35.60
Quebrada Marmato	9.3	13.7	1.86	2.74
Quebrada La Jaramilla	8.7	6.8	1.74	1.36

### 7.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES: Escenarios 1 y 2

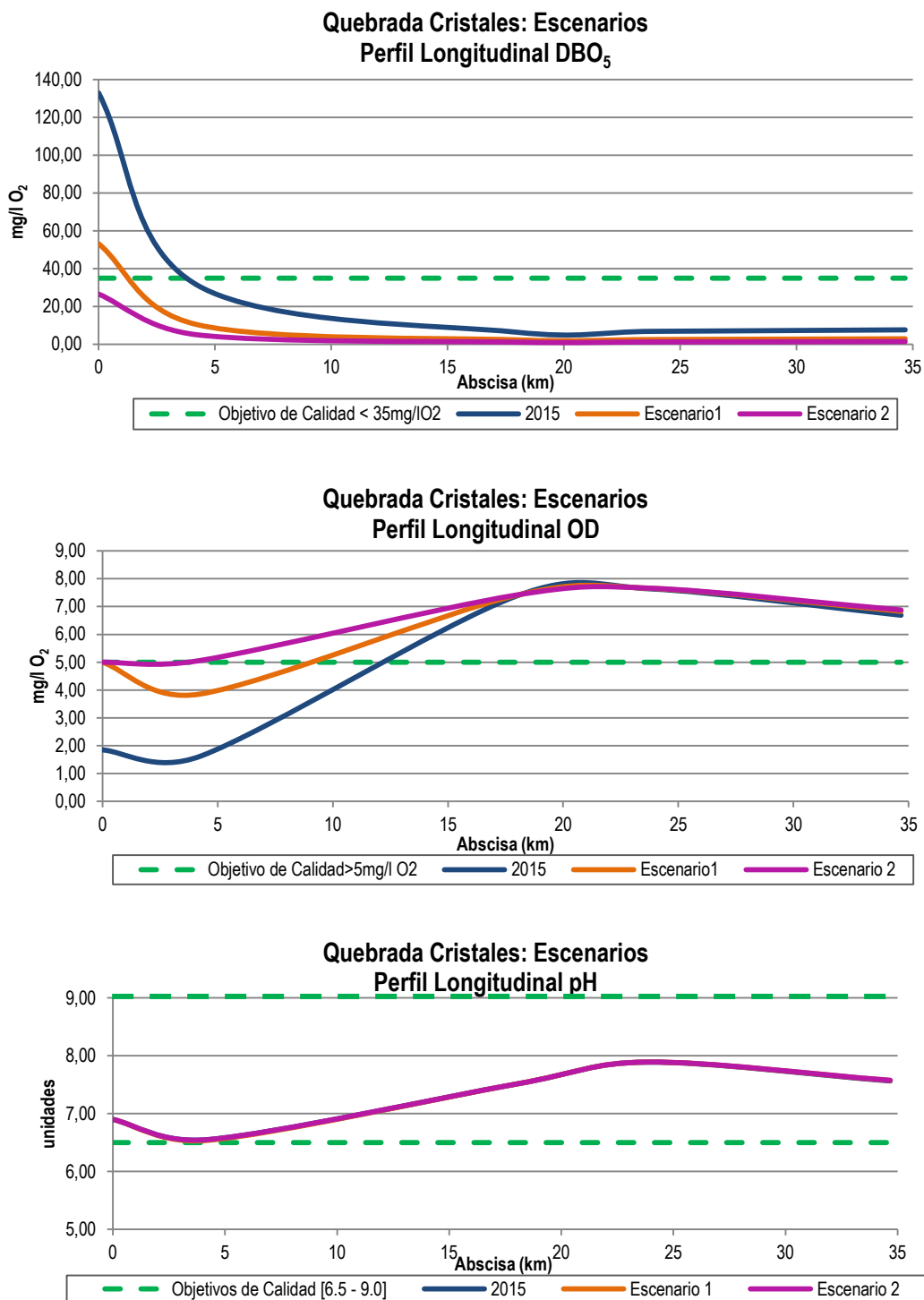


Figura 18. Resultados de la aplicación de los escenarios de saneamiento: DBO, OD y pH

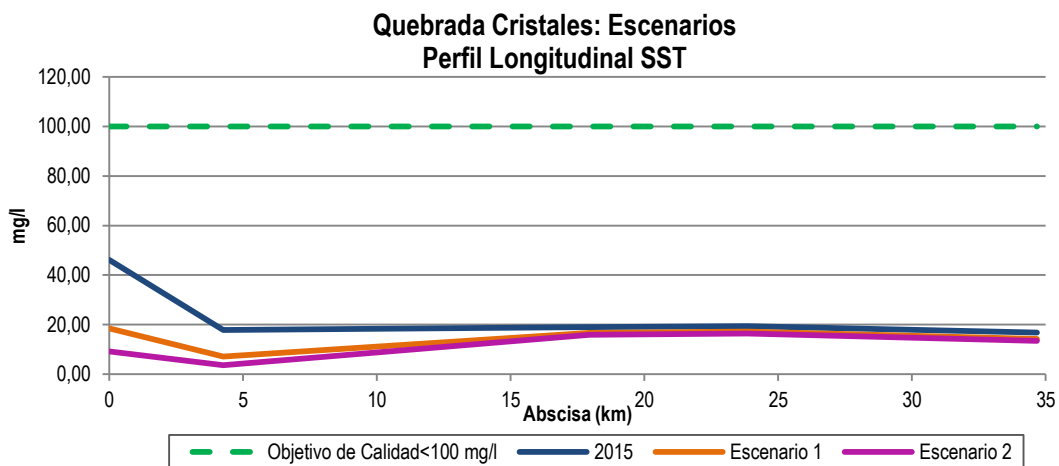


Figura 19. Resultados de la aplicación de los escenarios de saneamiento: SST

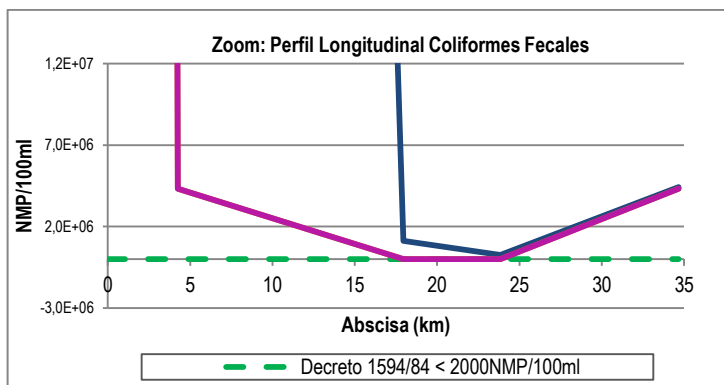
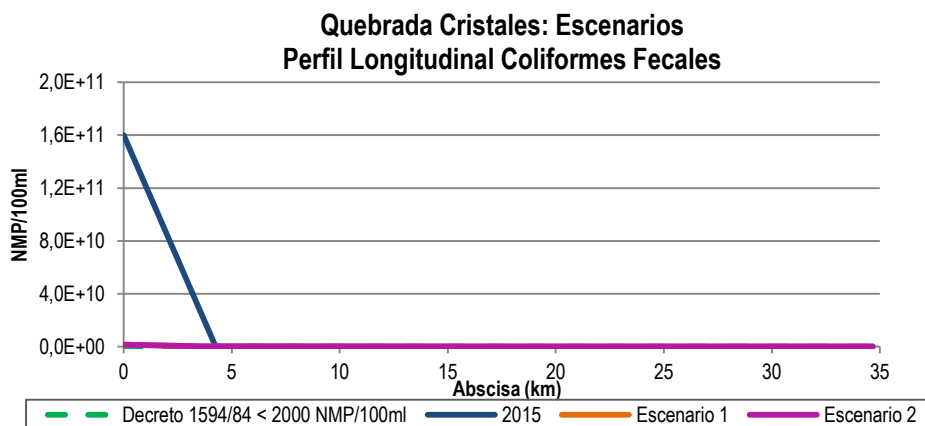


Figura 20. Resultados de la aplicación de los escenarios 1 y 2 con desinfección para los CF

## 7.4 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS

### 7.4.1 DBO<sub>5</sub>

- a) **Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** En los primeros 5 kilómetros del tramo en análisis, el modelo de simulación calibrado para el año 2015 presenta valores por encima de los 35 mg/IO<sub>2</sub>, valor propuesto dentro de los Objetivos de Calidad por la Corporación para la DBO<sub>5</sub>. A partir del kilómetro 5 en adelante, la DBO<sub>5</sub> desciende hasta 7.66 mg/IO<sub>2</sub> (estación Pisamal) lo que evidencia la capacidad de autodepuración de los agentes contaminantes a lo largo de la quebrada Cristales. Con la reducción de un 80% de la DBO en los tributarios de mayor contaminación, este parámetro cumple con este Objetivo de Calidad.
- b) **Escenario 2 de saneamiento.** La reducción del 80% en los niveles de este parámetro, evidencia una reducción del 80.9% entre el promedio de valores de la condición actual y la obtenida en el escenario 2. (Condición actual =37.04 mg/IO<sub>2</sub> y Escenario 2= 7.09 mg/IO<sub>2</sub>).

Tabla 25. Porcentaje de reducción de la DBO, quebrada Cristales: Escenario 2

Abscisa (m)	Condición año 2015 (mg/IO <sub>2</sub> )	Escenario 2 (mg/IO <sub>2</sub> )	% de Reducción
0	133.00	26.60	80.00%
4.255	31.21	5.03	83.89%
17.956	6.44	1.16	82.04%
23.834	6.88	1.25	81.89%
34.672	7.66	1.45	81.12%

### 7.4.2 SST

a) **Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** Para la condición inicial, año 2015, se cumplen los objetivos de calidad menor a 100 mg/l en todo el tramo de análisis. Estos alcanzan un nivel máximo de 46.10 mg/l al inicio de la quebrada Cristales y un mínimo al final de esta de 16.74 mg/l, estación Pisamal. Con remociones del 60% y 80% en los tributarios de mayor impacto negativo hacia la quebrada, igualmente se estarían cumpliendo los Objetivos de Calidad propuestos por la CRQ.

b) **Escenarios de saneamiento.** Con la remoción del 60% y 80% en los niveles de este parámetro sobre los tributarios de mayor contaminación hacia la quebrada, se tiene una reducción promedio de 31.78% y 42.37% de los SST respectivamente. Aguas abajo del tramo de mayor carga contaminante (Bodega – Parque de Recreación), los SST disminuyen de 9.22 mg/l a 3.58 mg/l para el escenario 2.



Tabla 26. Porcentaje de reducción de los SST, quebrada Cristales: Escenario 2

Abscisa (m)	Condición año 2015 (mg/l)	Escenario 2 (mg/l)	% de Reducción
0	46.10	9.22	80.00%
4.255	17.90	3.58	80.00%
17.956	19.03	15.93	16.30%
23.834	19.41	16.38	15.62%
34.672	16.74	13.40	19.95%

### 7.4.3 OD

- a) **Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** Para la condición actual (año 2015) no se cumplen los objetivos de calidad mayores a 5mg/l O<sub>2</sub> sobre los primeros 12 kilómetros del tramo en análisis. Es evidente el impacto negativo causado por las aguas residuales poco tratadas de los vertimientos identificados: STAR Almacafé (aguas arriba estación Bodega) y STAR Don Pollo (aguas arriba estación Parque de Recreación). En caso de realizarse tratamientos con remociones del 80% en los tributarios antes mencionados, los Objetivos de Calidad propuestos por la CRQ se estarían cumpliendo, otorgándole a la quebrada mejores condiciones de calidad.
- b) **Escenario 2 de saneamiento.** Se consideran remociones del 80% en los parámetros de DBO y SST además de un valor de 5mg/l O<sub>2</sub> de OD al inicio del tramo de estudio. De acuerdo a lo anterior, es posible evidenciar la capacidad de amortiguación de los agentes contaminantes producidos al inicio de la quebrada, para lo cual se tendrían un aumento de hasta un 68% de oxígeno disuelto en la estación Parque de Recreación (estación con menor OD=1.61 mg/l O<sub>2</sub>), y con ello mejorar las condiciones de calidad sobre el tramo de mayor impacto en la quebrada Cristales.

Tabla 27. Porcentaje de aumento del OD, quebrada Cristales: Escenario 2

Abscisa (m)	Condición año 2015 (mg/lO <sub>2</sub> )	Escenario 2 (mg/lO <sub>2</sub> )	% de Aumento
0	1.85	5.00	63.00%
4.255	1.62	5.06	67.93%
17.956	7.37	7.41	0.52%
23.834	7.64	7.66	0.32%
34.672	6.69	6.88	2.73%

#### 7.4.4 pH

**a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** Como se observa en la gráfica, se cumplen los objetivos de calidad entre 6.5 a 9 unidades en todo el tramo de la quebrada Cristales. No obstante, sobre la estación Parque de Recreación el valor del pH está muy próximo al límite inferior establecido dentro de los objetivos de calidad (6.55 unidades modeladas para un valor en campo de 6.9 unidades).

**b) Escenarios de saneamiento.** No se aprecia aumento significativo de este parámetro con la aplicación de los escenarios de saneamiento propuestos.

#### 7.4.5 Coliformes Fecales

**a) Cumplimiento Decreto 1594/84.** Para los escenarios de saneamiento planteados se tiene un máximo de 1.60E+09 NMP/100ml sobre el primer tramo, disminuyendo su valor sobre la cuenca media a 1.13E+04 NMP/100ml y finalizando con un valor de 4.33E+06 NMP/100ml cerca a la desembocadura con el río La Vieja. Por lo anterior, no se cumple con lo establecido en el Decreto 1594/84 en la destinación del recurso para consumo humano y doméstico y otros usos.

**b) Escenario 2 de saneamiento.** Con la reducción de un 99% de los CF en los tributarios de mayor impacto negativo sobre la quebrada Cristales no se observa una mejora en las condiciones de calidad en la quebrada.

Tabla 28. Porcentaje de reducción de los CF, quebrada Cristales: Escenario 2

Abscisa (m)	Condición año 2015 (NMP/100ml)	Escenario 2 (NMP/100ml)	% de Reducción
0	1.60E+11	1.60E+09	99%
4.255	4.33E+08	4.32E+06	99%
17.956	1.13E+06	1.13E+04	99%
23.834	2.69E+05	2.68E+03	99%
34.672	4.43E+06	4.33E+06	2%

\*La reducción del 2% de los coliformes fecales para la última estación, es atribuida a las descargas difusas provenientes de la actividad agrícola en la vereda Pisamal. Esta no se presenta como un vertimiento puntual para ser reducida a través de algún sistema de tratamiento.

## 8. CONCLUSIONES

---

- Se contó con una campaña de monitoreo con propósitos de calibración en cinco (5) estaciones sobre la quebrada Cristales, donde en promedio cada parámetro físico-químico y bacteriológico analizado a través de la corriente principal, evidenciaron una quebrada contaminada, en especial sobre los primeros 12 kilómetros de recorrido.
- La quebrada Cristales es vulnerable a los vertimientos producidos sobre su nacimiento a través de los barrios Castilla y Castilla Grande al sur de la capital Quindiana así como el vertido por la procesadora avícola Don Pollo. Se observa una notoria disminución de la concentración de este último vertimiento entre los años 2014 y 2015, para lo cual se tenía un valor de DBO<sub>5</sub> y SST iguales a 1116 mg/l O<sub>2</sub> y 1333 mg/l en el año 2014. Estos valores se vieron reducidos en un 76% y 87% respecto al año 2015. La reducción en la concentración de estos parámetros obtenidos el día 7 de abril de 2015, genera una leve mejora en la calidad del agua a lo largo de la quebrada Cristales. No obstante, la quebrada continúa contaminada en su totalidad.
- Sumado a lo anterior, 2.2 kilómetros aguas abajo del punto inicial (estación Bodega), la quebrada recibe el vertimiento puntual de la procesadora avícola Don Pollo (fuera del perímetro urbano del municipio de Armenia) con cargas de DBO y SST iguales a 273 mg/l O<sub>2</sub> y 178 mg/l respectivamente. De acuerdo al modelo de simulación ya calibrado, este impacto negativo perdura en la quebrada unos 18 kilómetros aguas abajo, para luego versen reducidos a DBO=6.44 mg/l O<sub>2</sub> y SST=19.03 mg/l. Lo anterior, evidencia la capacidad de la quebrada en reducir o mejorar las condiciones de calidad causadas por los vertimientos provenientes del casco urbano de la ciudad de Armenia. La reducción de su impacto se debe en gran medida a los diferentes aportes de agua (tributarios) a lo largo de la quebrada.
- Los Escenarios presentados en el estudio, representan la realidad del entorno ambiental que generan los vertimientos urbanos y de la industria sobre la quebrada Cristales; situación representativa para caudales medios a bajos. Sin embargo, para mejorar la calidad del agua en la fuente receptora es necesario la reducción de las cargas contaminantes en un 80% de la DBO<sub>5</sub> y SST. Igualmente, se recomienda mejorar el funcionamiento al Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) de los barrios Castilla y Castilla Grande, o en tal caso conducir estas aguas residuales a través del colector que se encuentra a lo largo de la quebrada Cristales.

- La demanda de agua en la quebrada Cristales es asociada al riego de cultivos en la cuenca baja; de esta quebrada se toman aproximadamente 40 l/s para uso agrícola, específicamente para riego de caña de azúcar. Por lo anterior, se sugiere realizar pruebas de laboratorio para la detección de metales pesados tales como: plomo, cinc, cobre, hierro, entre otros, y confrontarlos con los valores de calidad admisibles para el uso agrícola (Decreto 1594/84 - Artículo 40).

## 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 y 2014). Modelación de la calidad del agua quebrada Cristales.
- 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.