

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO PALACÉ  
USANDO EL MODELO QUAL2K EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE EL  
CORREGIMIENTO DE GABRIEL LÓPEZ (TOTORÓ) Y LA BOCATOMA DE LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO PALACÉ



Universidad  
del Cauca

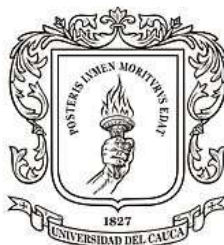
DANIELA ALEJANDRA MUÑOZ URREA

Cod: 104911024731

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2019

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO PALACÉ  
USANDO EL MODELO QUAL2K EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE EL  
CORREGIMIENTO DE GABRIEL LÓPEZ (TOTORÓ) Y LA BOCATOMA DE LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO PALACÉ



Universidad  
del Cauca

DANIELA ALEJANDRA MUÑOZ URREA.  
Cod: 104911024731

Informe final de trabajo de grado en la modalidad de Práctica Empresarial como  
requisito para optar por el título de Ingeniera Ambiental

Directora  
Ph.D. Nazly Efredis Sánchez Peña

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2019

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado en modalidad práctica empresarial titulado “EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO PALACÉ USANDO EL MODELO QUAL2K EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE EL CORREGIMIENTO DE GABRIEL LÓPEZ (TOTORÓ) Y LA BOCATOMA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PALACÉ” presentado por Daniela Alejandra Muñoz Urrea, cumple con los requisitos para optar por el título de Ingeniera Ambiental.

---

Ing. MSc. Mauricio Hernán Aguirre.  
Jurado

---

Ing. MSc. Javier Ernesto Fernández.  
Jurado

---

Ing. PhD. Nazly Efredis Sánchez.  
Directora

Fecha: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por ser la guía en mi vida y permitirme culminar este proceso para su gloria; a mis padres, mi familia y mi novio por el apoyo que me han brindado durante toda mi carrera.

Mis agradecimientos a la Ingeniera Nazly Sánchez, directora de práctica, por su gran aporte, dedicación y guía por medio de sus conocimientos y su paciencia en el desarrollo de este trabajo de grado, igualmente a la Universidad del Cauca por la formación y por el apoyo durante el proyecto por medio de los docentes y sus dependencias. A mis compañeros, quienes estuvieron compartieron y colaboraron en el transcurso de toda la carrera.

Al Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. por la oportunidad de realizar este trabajo de grado en práctica profesional en su empresa; a la división ambiental, principalmente a la Doctora Liliana Recamán y al Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga quienes fueron de gran ayuda durante el desarrollo del proyecto proporcionándome las herramientas necesarias, igualmente a cada uno de los funcionarios que hicieron acompañamiento en las salidas de campo.

Agradezco a la Asociación Corregimental de Usuarios Campesinos de Gabriel López quienes ayudaron en el proyecto en la identificación de la zona y puntos de interés; al señor Henry Cometa por el acompañamiento y colaboración en las salidas de campo.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. MARCO TEÓRICO.....	5
4.1. Calidad del agua.....	5
4.2. Modelización de calidad del agua:.....	6
4.3. Modelos de calidad del agua:.....	6
5. METODOLOGÍA.....	11
5.1. Generalidades de la zona a modelar, subcuenca del río Palacé.....	11
5.2. Modelo de Qual2K aplicado al río Palacé.....	13
5.3. Campaña de monitoreo 1.....	16
5.3.1. Medición del caudal.....	17
5.3.2. Datos meteorológicos.....	19
5.4. Modelización de calidad del agua del tramo definido mediante el software Qual2K.....	20
5.5. Calibración del modelo.....	22
5.6. Validación del modelo de calidad del agua.....	23
5.7. Campaña de monitoreo 2.....	23
5.8. Escenarios de contaminación.....	24
6. RESULTADOS.....	29
6.1. Modelización de calidad del agua del río Palacé.....	29
6.2. Calibración del modelo.....	5
6.3. Validación del modelo.....	16
6.4. Formulación y evaluación de escenarios de contaminación.....	20
6.4.1. Escenario de calidad # 1: Piscicultura.....	23
6.4.2. Escenario de calidad # 2: Ganadería.....	25

6.4.3.	Escenario de calidad # 3: Cultivos de fique.....	27
6.4.4.	Escenario de calidad # 4: Escenarios simultáneos.....	30
7.	CONCLUSIONES.....	33
8.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	34
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	35
10.	ANEXOS.....	39

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Priorización de puntos para modelización. ....	14
<i>Tabla 2 Coordenadas, distancia y tipo de puntos definidos para la modelización.</i> .....	15
Tabla 3. Coordenadas de puntos para el balance hídrico.....	15
Tabla 4. Centros poblados del tramo a modelar. ....	16
Tabla 5. Códigos del método estándar para el análisis de los parámetros de calidad.....	17
Tabla 6. Valores límites máximos permisibles de parámetros de calidad para vertimientos de ganadería. Fuente: (MADS, 2015b) .....	26
Tabla 7. Valores límites máximos permisibles de parámetros de calidad para vertimientos derivados de actividades asociadas a la fabricación y manufactura de bienes – Plantas integradas de fibra blanqueada. Fuente: (MADS, 2015b) .....	27
Tabla 8. Inventario de escenario actual de las actividades a valorar.....	28
Tabla 9. Formato para el cálculo de caudal. Medición mediante molinete. ....	29
Tabla 10 Resultados de análisis de laboratorio para las muestras de la primera campaña de monitoreo.....	2
Tabla 11. Caudales de los puntos y estaciones para el ingreso al modelo. ....	3
Tabla 12. Caudales en los puntos de monitoreo .....	3
Tabla 13. Caudales y coordenadas de las quebradas de segundo orden en la priorización. ....	4
Tabla 14. Tabla de datos meteorológicos. Fuente: Ideam y elaboración propia.....	4
Tabla 15. Variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning utilizadas en las pruebas de calibración subjetiva. ....	5
Tabla 16. Ecuaciones de reaeración para ríos de planicie. Fuente: (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 2013).....	7
Tabla 17. Valores calibrados del coeficiente de Manning. ....	10
Tabla 18. Modelos y valores de calibración objetiva para curva de temperatura.....	10
Tabla 19. Rangos de calibración de parámetros de calidad y valores tomados en la calibración objetiva. (Castro, 2015; Earth System Research Laboratory, 2019; Oliveira et al., 2012) .....	11
Tabla 20. Datos de la segunda campaña de monitoreo tomados para la validación del modelo de calidad del agua. ....	16
Tabla 21. Errores cuadráticos medios entre parámetros simulados y medidos en la calibración y en la validación.....	17
Tabla 22. Valores de escenarios de contaminación. ....	22
Tabla 23. Rangos de concentración de OD y consecuencias en sistemas acuáticos. (Goyenola, 2007).....	27
Tabla 24. Resultados de análisis de calidad del agua para las muestras del segundo monitoreo .....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos que componen la terminología adoptada de modelización. Fuente: (MADS, 2018).....	7
Figura 2. Interfaz de QUAL2K. Fuente: (Chapra et al., 2012).....	9
Figura 3. Cultivos de papa en Gabriel López, Totoró. Fuente: (Periódico La Campana, 2016) .....	11
Figura 4. Red Hídrica Río Palacé.....	12
Figura 5. Puntos tomados sobre el río Palacé.....	13
Figura 6. Aforo del caudal y toma de muestras en la quebrada Juntas .....	18
Figura 7. Esquematación por tramos del recorrido a modelar del río Palacé. ....	21
Figura 8. Precipitación media, Estación Polindara. ....	24
Figura 9. Precipitación medio, Estación Gabriel López. ....	24
Figura 10. Formato de calibración objetiva en plantilla de Excel. ....	9
Figura 11. Pasos tomados por la plantilla de Excel para la aplicación de la fórmula de calibración objetiva. ....	9
Figura 12. Curvas de caudal. ....	12
Figura 13. Curvas de velocidad. ....	12
Figura 14. Curvas de profundidad.....	12
Figura 15. Curvas de temperatura. ....	12
Figura 16. Curvas de conductividad.....	13
Figura 17. Curvas de OD.....	13
Figura 18. Curvas de DBO lenta. ....	13
Figura 19. Curvas de DBO rápida.....	13
Figura 20. Curvas de DBO última. ....	13
Figura 21. Curvas de nitratos.....	13
Figura 22. Curvas de patógenos.....	14
Figura 23. Curvas de alcalinidad.....	14
Figura 24. Curvas de pH.....	14
Figura 25. Curva de caudal de la validación del modelo. ....	17
Figura 26. Curva de velocidad de la validación del modelo.....	17
Figura 27. Curva de profundidad de la validación del modelo.....	18
Figura 28. Curva de temperatura de la validación del modelo.....	18
Figura 29. Curva de conductividad de la validación del modelo. ....	18
Figura 30. Curva de OD de la validación del modelo. ....	18
Figura 31. Curva de nitratos de la validación del modelo. ....	18
Figura 32. Curva de patógenos de la validación del modelo. ....	18
Figura 33. Curva de alcalinidad de la validación del modelo. ....	19
Figura 34. Curva de pH de la validación del modelo. ....	19
Figura 35. Posible escenario de contaminación cerca de la cabecera del tramo.....	20
Figura 36. Cultivo de papa, Gabriel López, Totoró. Tomado de: (RICCLISA, 2017).....	21
Figura 37. Cultivos de fique en la ribera del río Palacé. ....	22
Figura 38. Gráfica comparativa de temperatura de escenario 1 vs. curva temperatura inicial. ....	23
Figura 39. Gráfica comparativa de OD en el escenario 1 vs. OD inicial. ....	24



Figura 40. Gráfica comparativa DBO5 del escenario 1 vs. DBO5 inicial.....	25
Figura 41. Conductividad. Escenario 2 vs. Inicial. ....	26
Figura 42. OD. Escenario 2 vs. Inicial. ....	26
Figura 43. DBO5. Escenario 2 vs. Inicial.....	26
Figura 44. Patógenos. Escenario 2 vs. Inicial. ....	26
Figura 45. Alcalinidad. Escenario 2 vs. Inicial. ....	26
Figura 46. pH. Escenario 2 vs. Inicial.....	26
Figura 47. Curva de temperatura. Escenario 3 vs. Inicial. ....	28
Figura 48. Curva de OD. Escenario 3 vs. Inicial.....	29
Figura 49. Curva de DBO5. Escenario 3 vs. Inicial. ....	29
Figura 50. Curva de temperatura. Escenarios simultáneos.....	30
Figura 51. Curva de OD. Escenarios simultáneos.....	31
Figura 52. Curva de DBOf. Escenarios simultáneos. ....	31
Figura 53. Curva de Patógenos. Escenarios simultáneos. ....	31
Figura 54. Curva de alcalinidad. Escenarios simultáneos. ....	32
Figura 55. Curva de pH. Escenarios simultáneos. ....	32
Figura A157. Punto Juntas. Headwater. ....	39
Figura 582. Punto Chuscales. Tributario.....	39
Figura 59. Punto Palacé 1. Control.....	40
Figura 60. Punto La Lajita. Tributario. ....	40
Figura 61. Punto Sobretana. Tributario. ....	40
Figura 626. Punto Casasviejas. Tributario.....	41
Figura 63. Punto El Baho. Tributario. ....	41
Figura 64. Punto El Hatico. Tributario. ....	42
Figura 65. Punto Bocatoma. Control. ....	42

## LISTA DE ANEXOS

1. Registro fotográfico .....	67
2. Error en otras versiones de QUAL2K.....	70
3. Aforos de caudal campaña #1 y #2 .....	71
4. Análisis de calidad del agua segunda campaña de monitoreo.....	79

# 1. INTRODUCCIÓN

El Acueducto y Alcantarillado de Popayán en conjunto con la Fundación ProCuenca Río Las Piedras trabajan en la conservación de las cuencas hidrográficas que abastecen las plantas de tratamiento de agua potable que conforman el Acueducto de Popayán. La planta de tratamiento Palacé, que capta el agua del río Palacé en el Municipio de Totoró, inició su funcionamiento en el año 2011 tomando un caudal promedio de 250 L/s de agua para su potabilización y en la actualidad buscan incrementarlo a 500 L/s. (Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P., 2014)

La calidad del agua es un factor que limita su disponibilidad y además limita sus posibles usos. Los ríos colombianos transportan y reciben cargas de agua utilizadas en diferentes procesos socioeconómicos y vertidas mayoritariamente sin tratamiento previo, además, son receptores de altos volúmenes de sedimentos originados por procesos de erosión ya sea de origen natural o por acción del hombre. El deterioro de ecosistemas de páramo y bosques andinos están representados por la expansión de actividades agrícolas, e incluso ganaderas en las zonas altas de la cordillera, donde nacen la mayor parte de las corrientes del país. (IDEAM, 2015)

En Colombia se ha visto la necesidad de regular el uso del recurso hídrico y la disposición después de su uso para no alterar el ecosistema que depende del cauce natural, por tanto se regula considerando el caudal ambiental con condiciones de volumen, cantidad, duración y calidad para garantizar el sostenimiento del ecosistema (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a). El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible realizó la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales, donde se orienta la metodología para la modelización matemática general del agua enfocada al componente de calidad para el ordenamiento del recurso hídrico con el fin de que se pueda utilizar como herramienta de planificación y de prevención (MADS, 2018).

La cuenca del río Palacé se ve afectada por actividades agrícolas y ganaderas, fenómenos de erosión y remoción en masa, contaminación por aguas servidas, mal manejo de las basuras y desechos industriales en la zona alta de la cuenca (Alcaldía de Totoró, 2002), la zona es productora principalmente de papa, también se cosechan otros tubérculos y frutas como la fresa, la obtención de estos alimentos

junto con zonas de ganadería alteran la calidad del agua puesto a que en su proceso productivo se utilizan abonos, plaguicidas, entre otros agroquímicos, y la ganadería contamina por los desechos de los animales, las medicinas y productos químicos que se utilizan para tratarlos (Alcaldía de Totoró, 2002; INFAC, 2016).

Al observar el riesgo en la cuenca por la amenaza/vulnerabilidad en la cantidad y calidad del recurso hídrico, el Acueducto y la Fundación se interesaron en evaluar la respuesta del río frente a situaciones críticas de contaminación por dichas actividades de forma simulada bajo un modelo de calidad del agua que se adapta de manera aceptable al comportamiento del río. Se realizó la modelización, calibración, verificación y evaluación de escenarios de contaminación mediante el software Qual2K para determinar la capacidad asimilativa del río a los fenómenos contaminantes, esto con el fin de evaluar los riesgos por contaminación que puedan desencadenar la alteración de los parámetros de calidad del agua que ingresa a la bocatoma de la planta de tratamiento y que pueden dificultar y/o alterar el proceso de potabilización del agua siguiendo lo determinado en la Guía de Modelación del Recurso Hídrico.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

- Evaluar diferentes escenarios de contaminación de aguas en el Río Palacé en el tramo comprendido desde el corregimiento de Gabriel López (Municipio de Totoró) hasta la bocatoma de la planta de tratamiento Palacé usando un modelo calibrado con el software QUAL2K.

### 2.2. Objetivos específicos

- Construir un modelo de calidad de aguas para la subcuenca del río Palacé usando el paquete informático QUAL2K. Se considerará una adecuada esquematización de la zona de estudio y los principales parámetros de calidad de aguas incluidos en el software.
- Calibrar el modelo mediante métodos matemáticos objetivos y subjetivos con el fin de reducir el error de ajuste entre el resultado del modelo y los datos medidos.
- Evaluar los escenarios de modelización del río Palacé para la identificación del riesgo por el deterioro en la calidad del agua que ingresa a la planta de potabilización Palacé.

### 3. JUSTIFICACIÓN.

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible tiene como uno de sus objetivos mejorar la calidad y minimizar la contaminación del agua (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010c), por lo tanto, se tiene la necesidad de la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas; la modelización de calidad del agua es una herramienta que permite dicha planificación y ayuda en la toma de decisiones puesto a que permite predecir los impactos que se pueden generar tras los vertimientos de aguas con cargas contaminantes (MADS, 2018).

Para el Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P., es de gran interés el control de la calidad del agua de las fuentes de las que se abastece para la potabilización del recurso, en este caso, principalmente del río Palacé desde su origen hasta la bocatoma de la planta de tratamiento de agua potable Palacé debido a su poco tiempo de funcionamiento. La modelización de calidad del agua para el tramo mencionado permite simular escenarios de contaminación que representen un impacto negativo en el río y, por consiguiente, en la planta de potabilización. El modelo se ajusta a la necesidad de planificar acciones en función a la prevención y el ordenamiento de la cuenca conforme a la mitigación del riesgo por calidad del agua.

La evaluación de escenarios de contaminación mediante el modelo en QUAL2K calibrado y verificado presentes en este proyecto permiten representar el comportamiento del río frente a los escenarios de riesgo de planteados (Piscicultura, ganadería, producción de fibra de fique) y visualizar la capacidad autodepurativa de la fuente hídrica.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Calidad del agua

La gran mayoría de las fuentes de agua son de dominio público, el estado permite su uso libre siempre y cuando no se altere su calidad y no se tome como “propiedad” de particulares. Las aguas de dominio público abarcan los ríos, lagos, lagunas, las ciénagas, los pantanos, agua en la atmósfera, las aguas lluvias, además, las aguas de cauces artificiales que tienen su origen en un cauce natural (MADS, 2015a). Los criterios de calidad del agua dependen en gran medida al uso posterior que se le destine, ya sea para consumo humano, uso industrial, riego, entre otros.

La calidad del agua se determina al comparar las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua, con los valores de las normas que reglamentan estos aspectos (Ministerio de la Protección Social, 2007). La calidad del agua puede alterarse con gran rapidez por tanto los sistemas hídricos pueden presentar fallos ocasionales, por tanto, diferentes escenarios deben ser tenidos en cuenta para la interpretación de los resultados de los análisis.(OMS, 2006)

En el consumo humano se debe ofrecer al usuario seguridad en el uso del líquido para que su salud no se vea afectada por agentes patógenos o compuestos físicos y/o químicos dañinos (OMS, 2002). Dado a que agua es un elemento esencial para la vida, todas las personas deben, por derecho fundamental, tener acceso a este bien. La mejora del acceso al agua potable proporciona beneficios para la salud, por tanto, es de gran importancia lograr la mayor inocuidad en el agua.(OMS, 2006)

Para verificar la calidad microbiológica del agua se deben realizar análisis microbiológicos, generalmente se consideran coliformes fecales, pero también se puede incluir la determinación de patógenos específicos. La verificación de la calidad microbiológica del agua puede realizarla tanto el proveedor del servicio, como los organismos auditores del servicio, o realizarlos en cooperación. (OMS, 2006)

Por otro lado, la evaluación de la capacidad de la calidad química del agua de consumo se basa en la comparación de los resultados de los análisis con los valores de referencia, los cuales corresponden a los límites permisibles de la concentración de un componente la cual no ocasiona un riesgo para la salud superior al tolerable cuando se consume durante toda una vida. (OMS, 2006)

#### 4.2. Modelización de calidad del agua:

La modelización de calidad del agua es una herramienta de planeación, diseño e implementación de programas de vigilancia y control de la contaminación del agua principalmente para uso de consumo humano ya que ayuda a planificar y por tanto evitar el deterioro de la calidad de la fuente de abastecimiento de acueductos (MADS, 2018; OMS, 2002)

Streeter y Phelps desarrollaron un modelo que evalúa la calidad del agua mediante los niveles de oxígeno disuelto en ella, lo hicieron en 1925 para el río Ohio. A partir de los inicios del siglo XX, donde se innovó en la modelización de calidad del agua, se ha evolucionado de forma constante y considerable dada su gran importancia por ser un mecanismo de evaluación de las fuentes hídricas que permite la optimización de los recursos económicos y operacionales (Chapra, 1997). En la evolución de los modelos de calidad del agua se desarrolló el modelo QUAL2K por Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en el año 2003 (Castro, 2015). Un modelo calibrado y validado puede usarse en la evaluación de los impactos generados por descargas contaminantes en fuentes receptoras teniendo en cuenta la variabilidad de las condiciones climáticas y ambientales. El avance de la modelización en el aspecto informático hace que cada vez sean más accesibles, de costo bajo en software e implementación, más fáciles de usar, resultados más claros y por tanto fáciles de interpretar. (MADS, 2018)

#### 4.3. Modelos de calidad del agua:

Los modelos de calidad del agua en general deben interpretar la interacción de la realidad, el modelo conceptual, el código y el modelo matemático, los cuales se relacionan mediante procesos de análisis, programación, preparación del modelo y simulación como se muestra en la Figura 1.



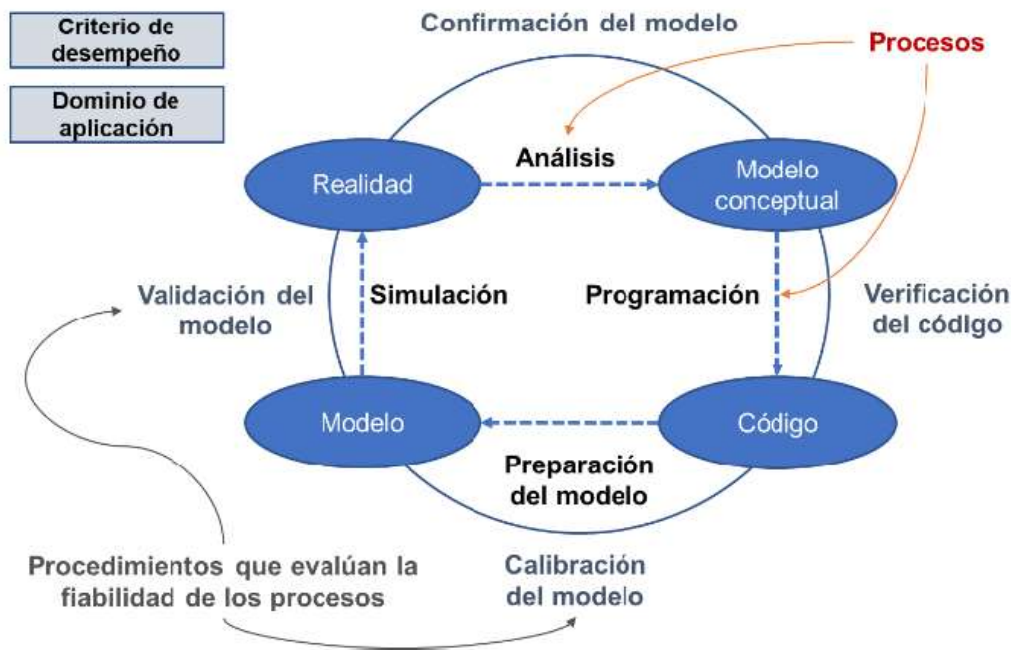


Figura 1. Elementos que componen la terminología adoptada de modelización. Fuente: (MADS, 2018)

En la actualidad existen diversos tipos de modelos de calidad del agua que cumplen lo detallado en la Figura anterior, y que representan la realidad de un cuerpo de agua en una escala computacional en donde se puede aprovechar la adaptabilidad para realizar simulaciones y usarlos en casos particulares.

Los modelos tienen características particulares principalmente en los procesos que su código lleva a cabo como, por ejemplo, los procesos de transporte y de reacción (Ordóñez & Palacios, 2017). Entre los modelos de calidad del agua se encuentran los siguientes, los cuales son ampliamente utilizados.

- Modelo Streeter – Phelps (1925)

Este modelo permite simular el comportamiento del OD en un río de manera simplificada, es aplicable a ríos con condiciones aerobias, flujo con superficie libre, flujo permanente (Romero, 2000). Es un modelo unidimensional en el cual se representan principalmente los procesos de reaireación y de descomposición bacteriana en la fase líquida, la evolución del modelo ha permitido la inclusión de procesos de fotosíntesis, demanda béntica de oxígeno y respiración (Ordóñez & Palacios, 2017).

- Modelo de flujo a pistón

Este modelo es una representación sencilla de las condiciones del río ya que en los procesos que desarrolla solamente tiene en cuenta el transporte por advección mas no por dispersión, además considera condiciones de flujo estable, así como las características hidrológicas y las características geométricas constantes (Chapra, 1997).

- Modelo Water Quality Analysis Simulation Problem (1984)


El modelo WASP (Water Quality Analysis Simulation Problem) representa los fenómenos que alteran la calidad del agua ya sean naturales o por contaminación por vertimientos provocados por acción humana. El modelo permite estudiar sistemas de 1, 2 y 3 dimensiones y variedad de contaminantes, toma los procesos de advección, dispersión, descargas puntuales y difusas, y permite la intervención de modelos hidrodinámicos, de cuencas hidrográficas y de transporte de sedimentos. Es de los modelos más utilizados en Estados Unidos y el resto del mundo por representar una ventaja al operar con múltiples tipos de contaminantes (EPA, 2019).

- Modelo Qual2E (1987)

Es un modelo de calidad del agua para ríos y corrientes, unidimensional en donde se puede representar al río como una corriente principal surtida por corrientes menores (tributarios). En este modelo se considera un flujo permanente no uniforme, simula el balance de calor y temperatura tomando la meteorología en una escala de tiempo diaria (Ordóñez & Palacios, 2017). Tiene la capacidad de simular cargas puntuales y difusas, a su vez las variables de calidad del agua son simuladas por día. Este modelo es aplicable solamente a corriente dendríticas que están bien mezcladas y toma como mecanismo de transporte la advección y la dispersión que tienen cabida en dirección a la corriente (Parveen, Nuzhat & Singh, 2016).

- Modelo Qual2K (2003)

Qual2K es un modelo de calidad de agua unidimensional que puede ser aplicado a ríos y corrientes de agua, en él se representa una mezcla completa tanto vertical como transversalmente, este modelo es una versión mejorada y complementada del Qual2E (Chapra, 2015), en la Figura 2 se muestra la interfaz del modelo en Microsoft Excel, las similitudes entre las versiones QUAL2E y QUAL2K se presentan a continuación (Chapra, Pelletier, & Tao, 2012):

<b>QUAL2K FORTRAN</b> <b>Stream Water Quality Model</b> <b>Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier</b> <b>Version 2.11b8</b>	
	
<b>System ID:</b>	
River name	Boulder Creek
Saved file name	BC092187v2_11b8
Directory where file saved	My Documents\Chapra\1111QUAL2KMaster
Month	9
Day	21
Year	1987
Local time hours to UTC	-7
Daylight savings time	Yes
<b>Calculation:</b>	
Calculation step	0.1 hours
Final time	30 day
Solution method (integration)	Euler
Solution method (pH)	Brent
Time zone	Mountain Standard Time
Program determined calc step	0.093750 hours
Time of last calculation	0.08 minutes
Time of sunrise	6:46 AM
Time of solar noon	12:53 PM
Time of sunset	6:59 PM
Photoperiod	12.22 hours

Open Old File
Run Fortran

Figura 2. Interfaz de QUAL2K. Fuente: (Chapra et al., 2012)

Unidimensional: el canal está bien mezclado vertical y transversalmente.

Sistema ramificado: el sistema puede estar conformado por un río principal con afluentes ramificados.

Hidráulica de estado estable: el modelo simula un flujo no uniforme y constante.

Presupuesto de calor diario: el presupuesto de calor y la temperatura se simulan en función de la meteorología de la zona y puede tener variaciones a lo largo del sistema, toma una escala de tiempo diaria.

Cinética de calidad de agua: todas las variables de calidad del agua se simulan en una escala de tiempo diaria.

Insumos de calor y masa: se simulan cargas puntuales y difusas, así como extracciones de agua.

El modelo QUAL2K se diferencia del Qual2E al incluir los siguientes elementos (Chapra et al., 2012):

Entorno de software e interfaz: el Qual2K se desarrolla mediante Microsoft Windows, teniendo como interfaz gráfica para el acceso al usuario Microsoft Excel. Los cálculos se programan en Fortran. Todas las operaciones de la interfaz están programadas en Visual Basic para aplicaciones (VBA).

Segmentación del modelo: el Qual2E segmenta el sistema en tramos de río compuestos de elementos igualmente espaciados, el Qual2K también divide el sistema en tramos y elementos, pero el tamaño del elemento puede variar de un tramo a otro. Además, múltiples cargas y retiros pueden ser ingresados a cualquier elemento.

Formas de DBO carbonacea: el Qual2K utiliza dos formas de DBO carbonácea para representar el carbono orgánico. Estas son una forma de oxidación lenta (DBOC lenta) y una forma de oxidación rápida (DBOC rápido).

Anoxia: Q2K adapta la anoxia reduciendo las reacciones de oxidación de cero a niveles bajos de oxígeno. Además, la desnitrificación se modela como una reacción de primer orden que se pronuncia a bajas concentraciones de oxígeno.

Interacciones sedimento – agua: el flujo de oxígeno disuelto entre el agua y el sedimento y de los nutrientes pueden simularse internamente en lugar de ser prescritos. Es decir, el oxígeno disuelto y el flujo de nutrientes se simulan en función de la sedimentación de la materia orgánica particulada, de las reacciones en los sedimentos y las concentraciones de formas solubles en las aguas que las recubren.

Algas de fondo: el modelo simula explícitamente las algas del fondo. Estas algas tienen estequiometría variable.

Extinción de la luz: la extinción de la luz se calcula en función de las algas, los detritos y los sólidos inorgánicos.

pH: el pH del río se calcula con base en la alcalinidad y el carbono inorgánico total simulados.

Patógenos: la eliminación de patógenos se determina en función de la temperatura, la luz y la sedimentación.

Parámetros cinéticos específicos: el Qual2K permite especificar varios de los parámetros cinéticos en una base específica para cada tramo.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Generalidades de la zona a modelar, subcuenca del río Palacé

El Municipio de Totoró se encuentra al noreste de Popayán, en la zona oriental del Departamento del Cauca, con coordenadas entre 2° 38' N y 76° 15' O, su cabecera municipal se encuentra a 2750 msnm y a 25 Km de Popayán por carretera en buenas condiciones de terrenos mayormente montañosos, su extensión se distribuye en pisos bioclimáticos de bosque subandino hasta el páramo lo que hace que tenga una media de temperatura anual de 14°C y una precipitación media de 2000 mm (Alcaldía de Totoró, 2013). La extensión del municipio es de 422 km<sup>2</sup> de los cuales 329 km<sup>2</sup> son rurales, allí se realiza la principal actividad económica del municipio, la agricultura. La zona de estudio cuenta principalmente con cultivos de papa (Figura 3), cebolla junca, en la parte baja del municipio se cultiva el fique, maíz, además, se tienen microcultivos de ulluco, arveja, diversas frutas, espárragos, café, habas, entre otros.



*Figura 3. Cultivos de papa en Gabriel López, Totoró. Fuente: (Periódico La Campana, 2016)*

En el corregimiento de Gabriel López nace el río Palacé, tiene un clima frío y su principal actividad económica es el cultivo de la papa; una de las consecuencias de esta actividad es la afectación de los cuerpos de agua por la disposición de los residuos de la labor agrícola que causa contaminación del río (Alcaldía de Totoró, 2002).

La hidrografía del municipio la conforman diversas fuentes de agua. La red hídrica del río Palacé (Figura 4) hace parte de la cuenca del río Cauca, nace principalmente en la zona nororiental de Totoró (Alcaldía de Totoró, 2013); la red la conforman la sub cuenca del río Palacé, enfoque del proyecto, la micro cuenca del río el Cofre y diversas quebradas como Aguas Vivas, Cazadores, Chuscales, Honda, Molino, la Victoria, Sobretana, la Chorrera, la Lajita, las Piedras, Agua Blanca, Tabaco, Santa Teresa, Sabaleta, entre otras que aún no han sido clasificadas.

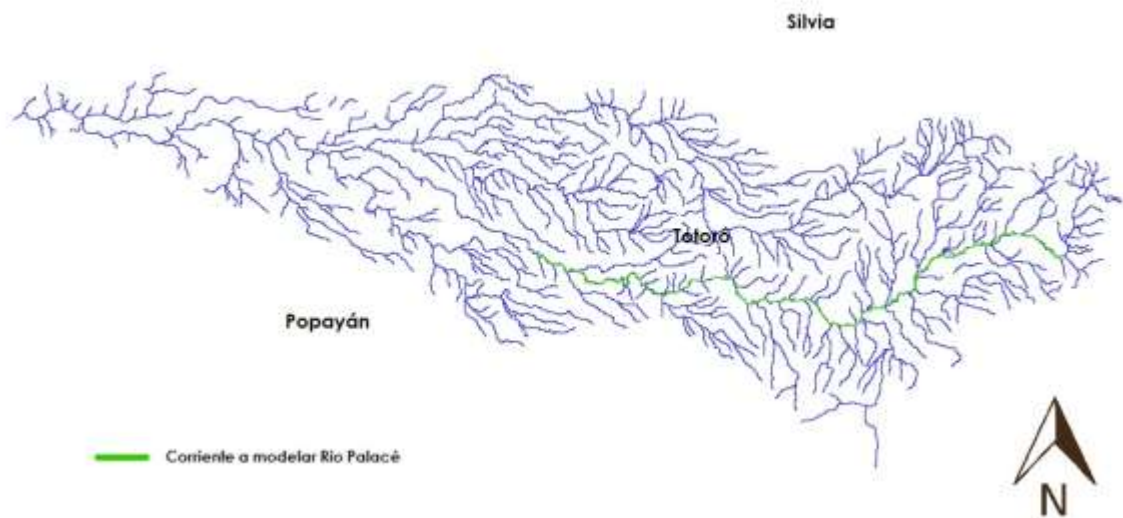


Figura 4. Red Hídrica Río Palacé.

La sub cuenca del Río Palacé inicia en la zona alta del corregimiento de Gabriel López, cerca de la laguna de Guanacas, esta área es de páramo a 3460 msnm aproximadamente.

La modelización de la calidad del agua, en el presente estudio, se realizó desde el punto conocido como Juntas a 3313 msnm hasta la bocatoma de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Palacé ubicada en el municipio de Totoró. El funcionamiento de la bocatoma inició en el año 2011 captando en promedio de 250 L/s del río Palacé, esta planta surte del líquido a la zona norte de la ciudad de Popayán, veredas surorientales y occidentales garantizando el acceso al servicio, además permite que la zona norte de la ciudad se siga expandiendo gracias a la accesibilidad de la red de acueducto (Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P., 2014).

## 5.2. Modelo de Qual2K aplicado al río Palacé

El tramo escogido para la modelización de calidad del agua consta de 42 km del río Palacé desde el puente de la quebrada Juntas hasta la bocatoma de la planta de tratamiento, como se mencionó anteriormente; en el recorrido del tramo se tomaron 11 puntos, entre ellos: una cabecera, dos puntos de control sobre el río (estaciones) y ocho tributarios representativos de la zona, con ayuda de la asociación de campesinos de Gabriel López quienes mostraron preocupación por la afectación al río y sus afluentes. Los puntos considerados en la modelización y su ubicación se muestran en la Figura 5.



Figura 5. Puntos tomados sobre el río Palacé.

Los puntos fueron evaluados por su importancia en términos de riesgo de contaminación del río por la descarga, uso de suelos en la zona del tributario, posibilidad de acceso al punto y caudal representativo. Adicionalmente, se consideró los recursos económicos limitados y transporte para la toma de muestras y su posterior análisis en el laboratorio por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado, por tanto, se priorizaron ocho tributarios. La priorización se llevó a cabo mediante una tabla de priorización, donde se evalúa cada aspecto mencionado con una puntuación del 1 al 10 siendo este último el de mayor impacto. En la Tabla 1 se encuentran los valores de relacionados para cada uno, las ocho quebradas con mayor puntuación se escogieron para el estudio (color verde) y las siguientes seis (color azul) se tomaron para considerar su caudal dentro de los puntos escogidos,



puesto que la masa de agua de estas quebradas, reúnen un caudal importante para la modelización.

En la Tabla 1 se encuentran las quebradas del tramo a modelar identificadas mediante la red hídrica con ayuda de los campesinos de la ACUC-GL, la puntuación se realizó por cada aspecto teniendo en cuenta la observación en campo, para determinarlos se puntuó del 1 al 10 cada problemática, en el riesgo de contaminación la puntuación 1 es bajo riesgo y 10 es alto riesgo; para el uso de suelos 1 es no existe uso del suelo para aprovechamiento humano y 10 es alta área usada para aprovechamiento humano; en el acceso, 1 es difícil acceso y 10 es facilidad en el acceso; para el caudal se tuvo en cuenta la percepción humana de esta variable donde, 1 es bajo caudal y 10 es alto caudal; en el ejercicio se distribuyeron 100 puntos por cada problemática para repartirlos en los 19 puntos identificados, se seleccionaron los ocho de mayor puntuación y seis fuentes más para tenerlas en cuenta para el balance hídrico.

Tabla 1. Priorización de puntos para modelización.

Quebrada	Riesgo de Contaminación	Uso de Suelos	Acceso	Caudal	Total
Chuscalito	3	4	7	3	17
Chuscales	7	6	6	6	25
La Palma	6	5	6	5	22
El Lindero	3	5	3	4	15
Cazadores	8	7	7	8	30
Tabaco	6	6	5	6	23
El Salado	4	4	4	4	16
La Lajita	7	6	7	5	25
Benito (Sobretana)	6	6	7	5	24
Aguas Vivas (Casasviejas)	7	7	8	8	30
Agua Blanca	4	6	3	4	17
La Chorrera	4	5	3	5	17
El Tigre	3	4	2	4	13
El Lindero II	3	3	3	4	13
De Piedras (El Baho)	5	5	8	6	24
El Rosal	4	3	3	3	13
El Molino (Hatico)	8	7	6	8	29
Honda (Palizada)	6	6	7	6	25
San Juan	6	5	5	6	22
	100	100	100	100	400



Las dos estaciones, están ubicadas en la parte media alta de la corriente a modelar (Palacé 1), y al final del tramo o bocatoma de la planta de tratamiento de agua potable.

Para el estudio se tomaron los puntos “Juntas” y “Chuscales” como zona alta, los puntos “Cazadores”, “La Lajita”, “Sobretana” y “Casasviejas” como zona media, y los puntos “El Baho”, “El Hatico”, “Palizada” como zona baja.

En la Tabla 2 se indican las coordenadas de cada uno de los puntos de muestreo y la distancia desde la cabecera.

*Tabla 2 Coordenadas, distancia y tipo de puntos definidos para la modelización.*

Punto	Tipo	Coordenadas		Distancia (Km)
		N	O	
<b>Juntas</b>	Headwater	2°29'52.9"N	76°14'14.2"O	0
<b>Chuscales</b>	Tributario	2°30'56.5"N	76°15'54.4"O	4,66
<b>Palacé 1</b>	Control	2°30'14.9"N	76°16'43.1"O	6,38
<b>Cazadores</b>	Tributario	2°29'24.4"N	76°18'39.0"O	11,65
<b>La Lajita</b>	Tributario	2°28'24.4"N	76°19'35.9"O	15,5
<b>Sobretana</b>	Tributario	2°28'21.8"N	76°19'38.8"O	15,65
<b>Casasviejas</b>	Tributario	2°28'02.4"N	76°20'21.2"O	17,42
<b>El Baho</b>	Tributario	2°28'29.9"N	76°23'36.2"O	24,86
<b>El Hatico</b>	Tributario	2°28'44.3"N	76°26'25.3"O	31,57
<b>Palizada</b>	Tributario	2°29'24.0"N	76°28'53.5"O	39,08
<b>Bocatoma</b>	Control (Fin)	2°29'56.63"N	76°30'09.17"O	42,4

Además, se tienen los nombres y georreferenciaciones de los puntos tenidos en cuenta para el balance hídrico, se presentan en la Tabla 3.

*Tabla 3. Coordenadas de puntos para el balance hídrico.*

Punto	Nombre	Coordenadas	
		N	O
<b>P1</b>	Chuscalito	2°30'32.15"N	76°15'28.30"O
<b>P2</b>	La Palma	2°30'14.97"N	76°16'29.49"O
<b>P3</b>	Tabaco	2°28'51.62"N	76°18'44.74"O
<b>P4</b>	Agua Blanca	2°27'46.30"N	76°21'2.78"O
<b>P5</b>	La Chorrera	2°27'49.10"N	76°21'16.57"O
<b>P6</b>	San Juan	2°29'22.73"N	76°29'15.88"O

En el área que cubre el tramo a modelar se encuentran algunos centros poblados que se presentan en la Tabla 4, allí se encuentra el nombre de la población y el número de habitantes (Alcaldía de Totoró, 2002).

*Tabla 4. Centros poblados del tramo a modelar.*

<b>Nombre</b>	<b>Población</b>
Núcleo Urb. Gabriel López	734
Chuscales	2108
Calvache	2389
Tabaco	1140
Aguas vivas	2103
Siberia	988
Portachuelo	876
El Hatico	1411
Núcleo Urb. de Polindara	729
Palizada	401
Alto Moreno	193
Malvasa	522

En la mayoría de los centros poblados se cuenta con tratamiento de aguas residuales, en donde se encuentran dispersos se tienen tratamientos individuales in situ y en los núcleos urbanos, plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para la modelización de calidad del agua del río Palacé se realizaron dos campañas de monitoreo, una para la realización del modelo y posterior calibración, y otra para la validación de dicho modelo de calidad, en ambas se realizó aforo de caudal, toma de datos de campo (nubosidad, sombra, temperatura ambiente, temperatura del agua, georreferenciación, etc.), y se recolectaron muestras de agua para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

### 5.3. Campaña de monitoreo 1.

La recolección de muestras de agua, captura de datos meteorológicos y aforo de caudal en cada punto para el modelo inicial, se realizó el 4 y 5 de diciembre del 2017, las muestras se tomaron, rotularon y transportaron hasta el laboratorio según la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas (IDEAM, 2004) para toma de muestras puntuales. Los análisis de físico químicos y microbiológicos fueron de conductividad, turbiedad, pH, alcalinidad, dureza, temperatura, hierro, nitritos, nitratos, sulfatos, cloruros, aluminio, SDT, DQO, OD,

DBO<sub>5</sub>, coliformes fecales y coliformes totales. Dichos análisis fueron llevados a cabo en el laboratorio ambiental de la CRC ubicado en la vereda González, vivero La Floresta y el laboratorio de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado S.A. E.S.P. ubicado en la planta de tratamiento de agua potable El Tablazo. El registro fotográfico se encuentra en el Anexo 1.

Los métodos empleados en el análisis de cada parámetro y el código correspondiente al Standard Methods se consignan en la Tabla 5.

*Tabla 5. Códigos del método estándar para el análisis de los parámetros de calidad.*

<b>Parámetro</b>	<b>Código</b>	<b>Método</b>
Conductividad	2510B	Conductividad – M. Laboratorio
Turbiedad	2130B	Nefelométrico
Color aparente	2120C	Color en agua
pH	4500-H+B	Potenciometría
Alcalinidad total	2320B	Titulación
Dureza total	2340C	Titrimétrico EDTA
Hierro total	3500 Fe B	Fenantrolina
Nitratos	4500-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> B	Espectrofotometría
Nitritos	4500-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> B	Colorimétrico
Sulfatos	4500 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> E	Turbidimétrico
Cloruros	4500B	Argentométrico
Aluminio	3500B	Cianuro eriocromo R
OD	4500-OG	Prueba 5 días/ Electrodo de membrana
DBO	5210B/4500-OG	Electrodo de membrana
Coliformes totales	9223B	Sustrato definido
Coliformes fecales	9223B	Sustrato definido

### 5.3.1. Medición del caudal

En cada punto se realizó el aforo de caudal mediante la metodología citada en la Guía de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)(Figura 6), en este caso se realizó una medición con molinete hidrométrico ya que los puntos definidos se ajustan a las características que se deben tener para este tipo de medición (Organización Meteorológica Mundial, 1994), en las etapas de esta medición se consideran los siguientes aspectos:

Medición de la sección transversal: Al encontrar que ninguno de los puntos es considerablemente grande, la medición se realizó con ayuda de cinta graduada.

Dependiendo del ancho se determinó el número de verticales en cada caso y la distancia entre ellas.

Medición de la profundidad: La profundidad se tomó mediante vadeo, con varilla graduada directamente en el lecho de la corriente mediante la metodología IDEAM descrita en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas.(IDEAM, 2004, 2007)

Medición de la velocidad: En este procedimiento se utilizó molinete hidrométrico para tomar las velocidades en cada vertical por un tiempo entre uno y tres minutos dependiendo de la variación de la velocidad en el punto.



*Figura 6. Aforo del caudal y toma de muestras en la quebrada Juntas*

Cálculo del caudal: El cálculo se realizó mediante el método aritmético de sección media, donde el caudal de cada sección será:

$$q = \left( \frac{v_1 \cdot v_2}{2} \right) \left( \frac{d_1 \cdot d_2}{2} \right) b$$

En donde  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades de la vertical 1 y la vertical 2, respectivamente, así,  $d_1$  y  $d_2$  son las profundidades medidas de cada vertical, y  $b$  la distancia horizontal entre las verticales. El caudal será entonces, la sumatoria de los caudales de cada sección. (Organización Meteorológica Mundial, 1994)

Los cálculos del caudal para los 11 puntos se realizaron mediante una hoja de Excel, procesando los datos recolectados en campo, se consideraron las seis quebradas subsecuentes nombradas en la tabla de priorización (Tabla 1) para tener en cuenta su caudal, dependiendo de la ubicación de cada una de estas quebradas a lo largo del río se adicionaron al punto de muestreo que se encuentra aguas abajo.

### 5.3.2. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos fueron obtenidos mediante solicitud de información al IDEAM, además del Atlas de Radiación Solar (MADS, 2005). La temperatura de rocío se calculó mediante la temperatura mínima y la humedad relativa por medio de la siguiente ecuación. (Guevara-Díaz, 2003)

$$td = \text{LogHR} * 63,45 - 117,45 + t$$

Donde,

td: Punto de rocío

HR: Humedad relativa expresada en %

t: Temperatura mínima del mes en grados centígrados

La cobertura de nubes y la sombra fueron determinadas mediante lo observado en campo y por los registros fotográficos en donde se aplicó el porcentaje por cuadrantes.

La velocidad del viento debe ser corregida puesto a que el IDEAM toma el valor a una altura de 10 metros, mientras que el modelo recibe la información tomada a 7 metros de altura, por tanto, se corrigió mediante la fórmula (Chapra et al., 2012).

$$V_{viento7m} = V_{viento10m} * \left( \frac{alt}{7 \text{ metros}} \right)^{0,15}$$

Donde,

Vviento7m: Velocidad del viento a 7 metros de altura

Vviento10m: Velocidad del viento a 10 metros

alt: Altura tomada

#### 5.4. Modelización de calidad del agua del tramo definido mediante el software Qual2K.

La modelización se realizó mediante el ingreso de los datos descritos anteriormente sobre caudal, calidad del agua y datos meteorológicos al software Qual2K.

El modelo considera al río como una serie de segmentos los cuales representan tramos donde se toman las características hidráulicas como constantes (pendiente, ancho de fondo, etc.). Estos segmentos van enumerados de forma ascendente desde la cabecera del río, aunque este aspecto depende de la versión del software. Adicionalmente dentro de la esquematización se ubican las entradas o salidas de agua que afectan la cantidad y calidad del cauce principal (Figura 7) (Chapra et al., 2012).

El modelo QUAL2K requiere información de DBO lenta, rápida y última, el laboratorio entrega resultados de DBO<sub>5</sub>, por tanto, para el ingreso se considera DBO rápida  $\approx$  DBO<sub>5</sub>, la DBO<sub>5</sub> representa el 22% de la DBO última y la DBO lenta es igual a la diferencia entre la DBO última y la DBO<sub>5</sub>, puesto que se tiene condiciones de agua cruda y se emplea la estimación que Marais recomienda en casos como este en los que no se tienen datos reales medidos (Ronzano & Dapena, 1995).

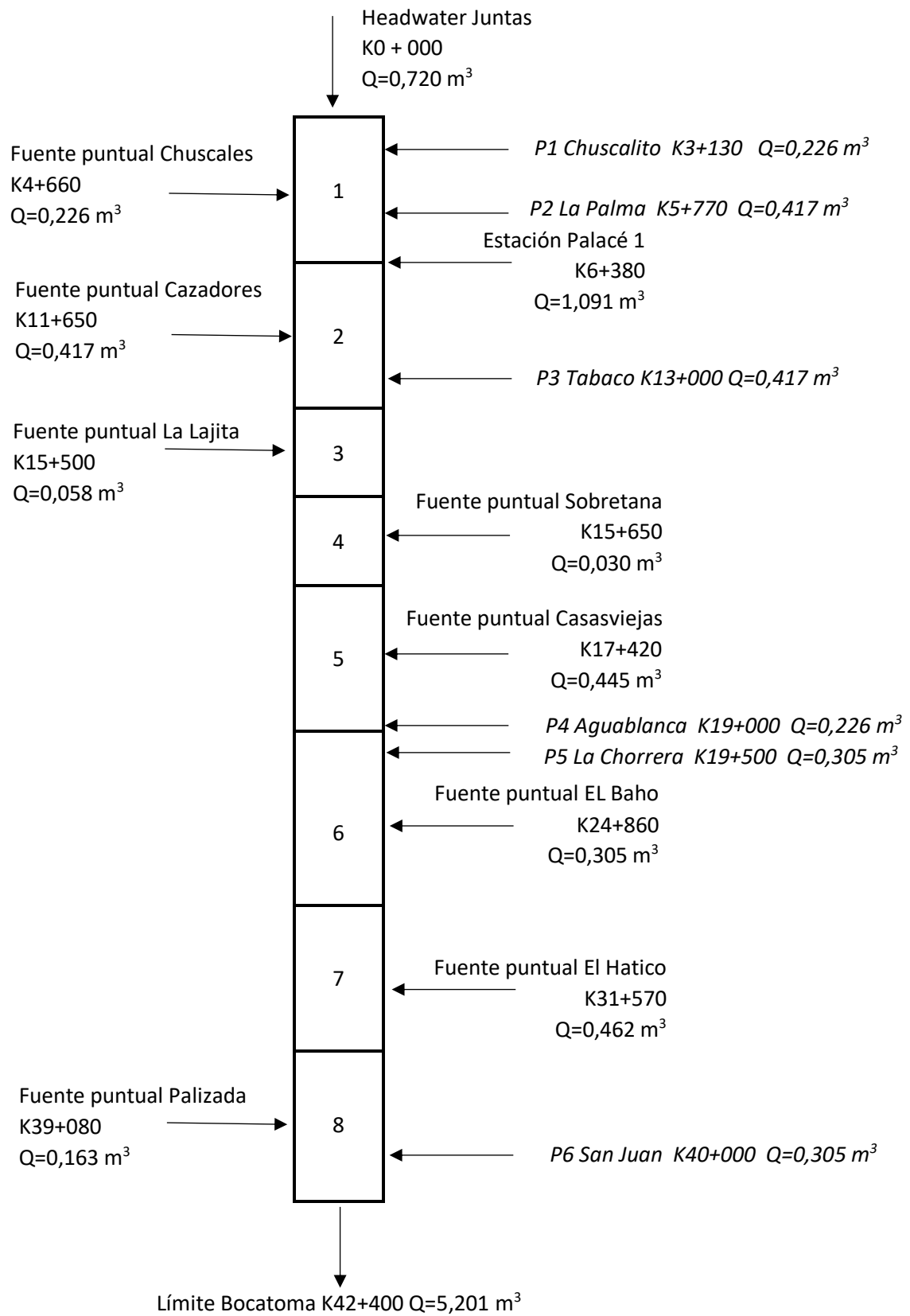


Figura 7. Esquematización por tramos del recorrido a modelar del río Palacé.

## 5.5. Calibración del modelo.

La calibración del modelo tiene por objetivo ajustar los valores simulados por el modelo a los datos de las estaciones observados en campo, con el fin de que los resultados de la aplicación del modelo en escenarios futuros sea lo más acertado a la realidad del comportamiento del río (MADS, 2018). La calibración del modelo se realizó en dos partes, primero la calibración subjetiva mediante cambios a conveniencia de los parámetros de calibración, iniciando por el caudal, velocidad y profundidad y variando, en este caso, el coeficiente de rugosidad de Manning en repetidas ocasiones teniendo en cuenta los valores sugeridos en el libro de Hidrología aplicada de Chow, (1988).

Posteriormente, se calibra la temperatura que depende de los parámetros de luz y calor, por tanto se varían los sistemas utilizados por el modelo de, atenuación atmosférica (Bras, Ryan – Stolzenbach), radiación atmosférica de onda larga (Brunt, Brutsaert, Koberg), conducción y convección (Braly – Graves – Geyer, Adams 1, Adams 2) y por último se calibra la calidad variando los métodos que el modelo utiliza para la reaeración (Churchill, O’connor – Dobbins, Owens – Gibbs) y demás parámetros cinéticos que se encuentran en la hoja “rates” del modelo.

La segunda parte es la calibración objetiva, la cual se realizó mediante la aplicación del recíproco del promedio ponderado de la normalización de la raíz del error cuadrático medio. Esta función es sugerida por Pelletier, 2006 como una de las funciones que pueden describir el ajuste de diferentes variables, puesto que realiza una comparación de los datos medidos o de ingreso de varios parámetros con los datos simulados por el modelo maximizando la bondad del ajuste de la curva modelada con los datos de ingreso de los puntos de control representados en las gráficas del modelo. (Kannel, Lee, Lee, Kanel, & Pelletier, 2007)

$$f(x) = \left[ \sum_{i=1}^q w_i \right] \times \left[ \sum_{i=1}^q \frac{1}{w_i} \left[ \frac{\frac{\sum_{j=1}^m O_{ij}}{m}}{\left[ \frac{\sum_{j=1}^m (P_{ij} - O_{ij})^2}{m} \right]^{1/2}} \right] \right]$$



Donde,

Oij: Datos medidos

Pij: Valor simulado

m: número de pares de valores simulados y medidos

Wi: Factor de peso

q: número de diferentes variables incluidas en la normalización

Con la aplicación de esta fórmula se pretende maximizar el resultado, entre mayor sea mayor será el ajuste del modelo. Se prueba el modelo y se determina si requiere ajustes (Rivera, 2011; Villalobos, 2008).

## 5.6. Validación del modelo de calidad del agua.

La validación del modelo se realizó tomando el modelo de calidad de agua aplicado en el tramo del río Palacé ya calibrado e ingresando los nuevos datos hidráulicos, de calidad del agua y meteorológicos de la segunda campaña de monitoreo que se menciona en el siguiente apartado. No se cambiaron las constantes cinéticas ya determinadas, ni demás ajustes al modelo. De la variación y del error de los datos de las estaciones de control y de las curvas depende la confiabilidad del modelo (Rivera, 2011).

## 5.7. Campaña de monitoreo 2.

Esta campaña se realizó los días 23 y 24 de abril del 2019, al tener determinados los puntos críticos, se procedió a realizar la toma de muestras y aforo de caudal en cada punto mediante la misma metodología seguida en la primera campaña de monitoreo 1, de esta campaña se obtuvieron datos de calidad y caudales, los datos meteorológicos se solicitaron al IDEAM mediante el formato de solicitud de información. Las muestras se analizaron en los mismos laboratorios de la primera campaña.

Las campañas de monitoreo se realizaron en distintos meses para que las condiciones del río en caudal y calidad del agua fuesen diferentes, teniendo en cuenta los datos históricos se puede confirmar la diferencia de condiciones. Se analizaron los datos de precipitación de dos estaciones del IDEAM, “Gabriel López” y “Polindara”, las cuales están ubicadas en la zona alta y la zona baja respectivamente, por esta razón la tendencia de las precipitaciones no es la misma, los datos son la media de los registros de 1986 a 2016. En las figuras 8 y 9 se puede observar la tendencia en cada una de las estaciones.

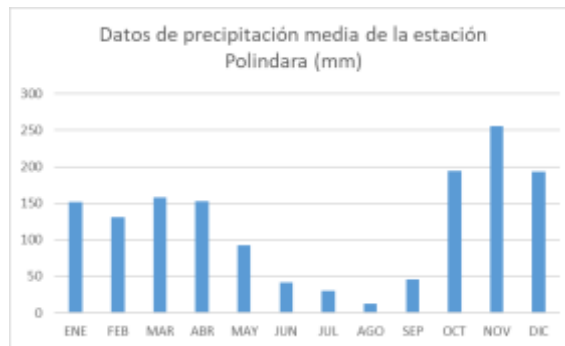


Figura 8. Precipitación media, Estación Polindara.

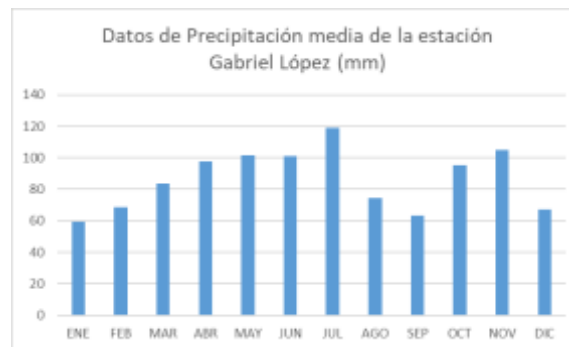


Figura 9. Precipitación medio, Estación Gabriel López.

Los meses de abril y de diciembre en los que se realizaron las campañas de monitoreo tienen tendencias contrarias en las zonas, los datos por estación difieren entre ellos, por tanto, corresponden a épocas climáticas diferentes.

## 5.8. Escenarios de contaminación

La contaminación ya sea por la inadecuada disposición de residuos, vertimientos industriales o domésticos, por escorrentía, ganadería, erosión, generan un impacto

negativo de las fuentes de agua superficial y además para la salud de quienes se surten del líquido vital de estas corrientes (OMS, 2002), por tanto, es de gran utilidad la aplicación de modelos de calidad del agua para la evaluación del impacto de la contaminación sobre las fuentes hídricas y así sugerir alternativas para la mitigación del deterioro de la calidad del agua. Los procesos de contaminación son continuos y dinámicos, en algunos casos la tendencia es a agudizar los fenómenos de contaminación con el tiempo y ocasionar una mayor presión en el recurso, en ese caso los escenarios son importantes.

Para el presente trabajo se han determinado algunos escenarios de posible contaminación en la subcuenca del río Palacé, pues el sector se encuentra en constante crecimiento de su economía y por esto, sin un adecuado acompañamiento, podrían generar alteraciones en el ecosistema hídrico.

Se realizaron tres posibles escenarios de contaminación, de situaciones que se están presentando en la parte alta, media y baja. En la parte alta del tramo, cerca de la quebrada Juntas, se evidenció la construcción de lo que sería un estanque para piscicultura, en la zona media se percibe un constante crecimiento de la ganadería, y en la zona baja se están expandiendo los cultivos de fique, los residentes de la zona realizan el lavado de este material en el río lo que causa contaminación. Para construir dichos escenarios, se investigó sobre los impactos que estas actividades pueden tener en la calidad del agua obteniendo valores característicos que indicarían el nivel de afectación de cada actividad.

Para la zona alta, en el punto “Juntas” tomado para la modelización como cabecera, se tiene expansión de las actividades agropecuarias en producción piscícola, anterior a la construcción de este estanque no existía en este lugar dicha actividad pecuaria teniendo en cuenta que inicia la zona de páramo, esta actividad exige unas buenas condiciones del agua en términos de temperatura, calidad y flujo. Los valores de las condiciones de calidad del agua se tomaron de un estudio realizado en la comunidad de Chiliglo en el municipio de Puracé, Cauca (Luna Imbacuán, Campos Bermúdez, & Gutiérrez, 2016), en el cual, describen las descargas contaminantes que se producen por el lavado de los estanques, para esto se toman los valores críticos de los parámetros de calidad, dado a que las condiciones de la zona de dicho estudio se asemejan a las de la zona en la que se ubica la quebrada Juntas que se ve afectada por esta actividad.

En la zona media del tramo modelado de la subcuenca del río Palacé, se desarrolla principalmente la producción de cultivos de papa, esta actividad es la más relevante de la zona, pese a esto se observa un incremento en la actividad ganadera. Por

tanto, en la zona media los puntos “La Lajita”, “Sobretana” y “Casasviejas” se evaluará el posible impacto de esta actividad en la fuente de agua según el Resolución 631 de 2015 (MADS, 2015b) considerando que los contaminantes ingresan de forma difusa a las quebradas mencionadas y se vierten al río por medio del tributario como fuente puntual, se tiene en cuenta que en dicha zona no se observan ni se registran grandes terrenos de ganadería extensiva, sino, que se evidencia que los habitantes tienen ganado para su propio aprovechamiento, se toma el riesgo de que se incrementen las cabezas de ganado puesto que existen grandes terrenos que aún no han sido cultivados y que son potencialmente áreas ganaderas. Los datos de calidad del agua característicos de esa actividad fueron tomados de la investigación “Efecto de los corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río la Vieja, Colombia” (Chará, Pedraza, Giraldo, & Hincapié, 2007), la zona de este estudio comparte características hidrológicas con la zona media del tramo de modelización. Los resultados del escenario se evalúan con la norma tomando los valores límites de la actividad “Ganadería de bovino, equino, caprino, bufalino y/o ovino” de la Tabla 6.

Tabla 6. Valores límites máximos permisibles de parámetros de calidad para vertimientos de ganadería.  
Fuente: (MADS, 2015b)

Parámetro	Unidades	Ganadería de bovino, equino, caprino, bufalino y/o ovino		Ganadería de porcinos	
		Cría	Beneficio	Cría	Beneficio
pH	und pH	6 a 9	6a 9	6 a 9	6 a 9
DQO	mg/L O2	500	900	900	800
DBO	mg/L O2	250	450	450	450
SST	mg/L	150	200	400	200

Para la zona baja del tramo modelado se observó expansión en el cultivo de fique, el problema de contaminación provocado por este cultivo es en el momento del lavado de las fibras, el lavado en esta zona de la subcuenca en particular lo realizan directamente en las fuentes de agua, la carga contaminante es alta por el llamado “licor verde” que contiene principalmente celulosa (Dagua, Dagua, & Morales, 2008). La caracterización de estos vertimientos se tomó del estudio realizado en el municipio de Totoró “Evaluación de los efluentes provenientes de la agroindustria del fique en el municipio de Totoró – Cauca”. Se valorará como vertimiento puntual para los puntos de “Hatico” y “Palizada”, puesto a que en las veredas en las que se encuentran estos tributarios es donde se presentan los cultivos de fique que afectan el tramo de estudio de la subcuenca del río Palacé. Para la evaluación de la calidad

del vertimiento se consideran los límites permisibles de la normatividad presentada en la Tabla 7.

*Tabla 7. Valores límites máximos permisibles de parámetros de calidad para vertimientos derivados de actividades asociadas a la fabricación y manufactura de bienes – Plantas integradas de fibra blanqueada. Fuente: (MADS, 2015b)*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Plantas integradas de fibra blanqueada</b>
pH	und pH	6 a 9
DQO	mg/L O2	400
DBO	mg/L O2	200
SST	mg/L	50

Puesto a que el escenario supone un crecimiento del cultivo de fique en el área de los afluentes “Hatico” y “Palizada” se tomará un incremento de la actividad en un 30% la cual se proyecta para un horizonte de 10 años, que representan 170 hectáreas que se distribuyen en 40 hectáreas para “Hatico” y 130 hectáreas para “Palizada”, a su vez se consideran 2 lavados de la fibra al día de 2 horas cada uno con un uso de agua de 190,82 L de agua por cada 20,8 kg de fibra de fique (Dagua et al., 2008), conociendo que para el departamento del Cauca, el cual es el mayor productor de fique en el país, se obtienen 1,5 toneladas de fique por hectárea al año (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014).

Las proyecciones de los escenarios de calidad para cada zona se realizaron teniendo en cuenta el escenario actual de cada actividad a valorar, así, se presenta la Tabla 8.

Tabla 8. Inventario de escenario actual de las actividades a valorar.

Zona	Fuentes	Actividad	Existentes
Zona alta	Juntas	Piscicultura	0 estanques
	Chuscales		
Zona media	Cazadores	Ganadería	350 cabezas
	La Lajita		
	Sobretana		
	Casasviejas		
Zona Baja	El Baho	Fique	580 hectáreas
	El Hatico		
	Palizada		

El cuarto escenario por evaluar es la condición de que se presenten los 3 escenarios formulados con anterioridad al tiempo. Se tendrán en cuenta los límites permisibles tenidos en cuenta para los escenarios 1, 2 y 3.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Modelización de calidad del agua del río Palacé

El modelo final se realizó mediante el software QUAL2KMaster2, se elaboró también en QUAL2K2 versión 07 y QUAL2K2 versión 12b1, se obtuvo un error en estas dos últimas versiones que se presentan en el Anexo 2.

En el modelo QUAL2KMaster2 se ingresaron los datos de los caudales obtenidos mediante el formato del proceso de cálculo de medición de caudal de la Tabla 9, también, los datos de calidad del agua resultantes de los análisis de laboratorio consignados en la Tabla 10, los caudales y resultados presentados en la Tabla 11, también se ingresaron las coordenadas mostradas anteriormente en la Tabla 2.

Tabla 9. Formato para el cálculo de caudal. Medición mediante molinete.

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	0,00	0,560	0,224	0,00		0,56	0,480		
2	1,00	0,690	0,276	1,00	0,625	2,01	0,450	0,465	0,291
3	2,00	0,690	0,276	1,00	0,690	2,00	0,150	0,300	0,207
4	3,00	0,300	0,120	1,00	0,495	2,07	0,240	0,195	0,097
5	4,00	0,220	0,088	1,00	0,260	2,00	0,360	0,300	0,078
6	5,00	0,180	0,072	1,00	0,200	2,00	0,120	0,240	0,048
					<b>2,27</b>	<b>10,65</b>	Q (m <sup>3</sup> /s)		<b>0,720</b>
							Q (L/s)		720,15

Los demás cálculos de caudal se presentarán en el anexo 3.





Tabla 10 Resultados de análisis de laboratorio para las muestras de la primera campaña de monitoreo.

Análisis de laboratorio de muestras tomadas los días 4 y 5 de diciembre de 2017

Análisis	Unidades	Juntas	Palacé 1	Cazadores	Chuzcales	La Lajita	Sobretana	Casas viejas	Palizada	El Baho	El Hatico	Bocatoma
<b>Conductividad</b>	μS/cm	59,10	70,80	50,60	50,40	50,60	60,20	70,90	70,90	60,80	57,70	90,20
<b>Turbiedad</b>	NTU	5,21	2,15	4,57	4,91	6,00	13,60	5,26	3,21	5,21	2,88	7,89
<b>Color aparente</b>	UPC	20,90	11,20	36,70	31,50	36,20	42,50	27,1	35,20	40,20	23,50	30,20
<b>pH</b>	und	8,0	8,0	7,5	7,1	7,9	7,9	8,0	7,3	7,9	7,2	7,0
<b>Alcalinidad total</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	48,20	47,20	36,90	29,60	30,80	27,80	30,60	20,40	28,00	31,70	45,20
<b>Dureza total</b>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	146,60	97,80	49,00	66,30	126,30	48,18	154,70	66,07	59,20	75,02	86,60
<b>Hierro total</b>	mg/L Fe(II)	0,54	0,29	0,86	0,43	1,22	0,59	0,58	0,09	0,24	0,22	0,55
<b>Nitratos</b>	mg/L NO <sub>3</sub> -	1,00	1,22	0,53	0,86	1,96	1,03	0,93	1,28	0,93	1,22	1,20
<b>Nitritos</b>	mg/L NO <sub>2</sub> -	0,000	0,023	0,023	0,013	0,033	0,042	0,021	0,018	0,001	0,007	0,002
<b>Sulfatos</b>	mg/L SO <sub>4</sub>	5,41	5,51	4,08	5,51	4,27	3,42	3,42	1,24	1,71	1,43	3,61
<b>Cloruros</b>	mg/L Cl-	9,30	9,14	17,50	2,75	13,60	6,70	22,40	11,60	9,63	5,70	4,70
<b>Aluminio</b>	mg/L Al(III)	0,07	0,07	0,04	0,05	0,06	0,03	0,06	0,01	0,05	0,02	0,05
<b>Temperatura</b>	°C	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
<b>SDT</b>	mg/L	29,60	35,40	25,30	25,20	25,30	30,10	35,50	35,50	30,40	28,90	45,10
<b>DQO</b>	mg/L	12,80	12,10	12,80	12,30	13,50	12,90	12,50	12,90	11,50	11,90	14,30
<b>OD</b>	mg/L	8,20	8,40	7,80	8,10	8,60	8,90	7,60	9,50	7,70	7,40	7,90
<b>DBO</b>	mg/L	<0,90	<0,90	2,30	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90
<b>Coliformes totales</b>	NMP/100 mL	1413,60		24196,00		4884,00	6131,00	5794,00	3070,00	745,00	3654,00	7270,00
<b>Coliformes fecales</b>	NMP/100 mL	136,80		2419,600		295,00	676,00	110,00	1401,00	185,00	135,00	882,00

La Tabla 11 contiene los caudales calculados para el ingreso al modelo, que fueron hallados por balance hídrico.

*Tabla 11. Caudales de los puntos y estaciones para el ingreso al modelo.*

<b>Punto</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>Juntas</b>	0,720
<b>Chuzcales</b>	0,452
<b>Palacé 1</b>	1,091
<b>Cazadores</b>	1,060
<b>La lajita</b>	0,475
<b>Sobretana</b>	0,030
<b>Casasviejas</b>	0,890
<b>El Baho</b>	0,836
<b>Hatico</b>	0,462
<b>Palizada</b>	0,468
<b>Bocatoma</b>	5,201

Los caudales de los puntos y estaciones se encuentran a continuación en la Tabla 12, estos caudales fueron los aforados en cada punto.

*Tabla 12. Caudales en los puntos de monitoreo*

<b>Punto</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>Juntas</b>	0,720
<b>Chuzcales</b>	0,226
<b>Palacé 1</b>	1,091
<b>Cazadores</b>	0,417
<b>La lajita</b>	0,058
<b>Sobretana</b>	0,030
<b>Casasviejas</b>	0,445
<b>El Baho</b>	0,305
<b>Hatico</b>	0,462
<b>Palizada</b>	0,163
<b>Bocatoma</b>	5,201

Los caudales de las quebradas de segundo orden en la priorización que se tendrán en cuenta y sus coordenadas se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Caudales y coordenadas de las quebradas de segundo orden en la priorización.

Punto	Nombre	Coordenadas		Caudal (m <sup>3</sup> /s)
		N	O	
P1	Chuscalito	2°30'32.15"N	76°15'28.30"O	0,226
P2	La Palma	2°30'14.97"N	76°16'29.49"O	0,417
P3	Dosquebradas	2°29'57.62"N	76°17'53.77"O	0,226
P4	Tabaco	2°28'51.62"N	76°18'44.74"O	0,417
P5	(Sin clasificar)	2°28'15.01"N	76°20'8.54"O	0,445
P6	Agua Blanca	2°27'46.30"N	76°21'2.78"O	0,226
P7	La Chorrera	2°27'49.10"N	76°21'16.57"O	0,305
P8	San Juan	2°29'22.73"N	76°29'15.88"O	0,305

En la Tabla 14 se encuentran los datos meteorológicos recolectados que son necesarios para el ingreso al modelo.

Tabla 14. Tabla de datos meteorológicos. Fuente: Ideam y elaboración propia.

Punto	T. del aire (°C)	Humedad relativa (%)	T. del punto de rocío (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Cobertura de nubes (%)	Sombra (%)
Juntas	8	60	7,00	3,05	100	50
Chuzcales	9	60	7,00	3,05	90	30
Cazadores	10	60	7,00	3,05	85	30
La lajita	11	60	7,00	3,05	65	5
Sobretana	12	60	7,00	3,05	30	75
Casasviejas	14	60	7,00	3,05	50	10
Baho	12	60	7,00	3,05	15	20
Hatico	14	60	7,00	3,05	30	15
Palizada	15	60	7,00	3,05	25	80

Se tomó la primera campaña de monitoreo para realizar la modelación por la disponibilidad de los datos, ya que se realizó en diciembre de 2017.

Las gráficas resultantes de la modelización previa a la calibración se compararán más adelante con las curvas de calibración en las Figuras 10 a 22.

De las curvas obtenidas en la modelización, las de caudal, temperatura, profundidad, DBO lenta, rápida, última, y pH, tienen un buen ajuste que puede ser optimizado. Posteriormente se procede a la calibración del modelo.

## 6.2. Calibración del modelo.

### 6.2.1 Calibración subjetiva

- Caudal, velocidad y profundidad

En la calibración subjetiva se inició por las condiciones hidráulicas con el ajuste del caudal, velocidad y profundidad principalmente. Se realizaron variaciones en el coeficiente de rugosidad de Manning para observar cómo este afectaba las curvas del modelo. La tabla 15 muestra las variaciones del coeficiente en las diferentes pruebas realizadas.

*Tabla 15. Variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning utilizadas en las pruebas de calibración subjetiva.*

<b>PRUEBA</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Tramo</b>						
<b>Juntas</b>	0,05	0,05	0,05	0,08	0,06	0,06
<b>Chuscales</b>	0,06	0,05	0,05	0,08	0,07	0,08
<b>Cazadores</b>	0,06	0,03	0,04	0,08	0,003	0,025
<b>La Lajita</b>	0,03	0,05	0,05	0,08	0,07	0,07
<b>Sobretana</b>	0,03	0,05	0,05	0,08	0,07	0,07
<b>Casaviejas</b>	0,05	0,04	0,04	0,08	0,06	0,06
<b>El Baho</b>	0,06	0,04	0,04	0,08	0,06	0,06
<b>El Hatico</b>	0,06	0,03	0,03	0,08	0,06	0,07
<b>Palizada</b>	0,05	0,03	0,03	0,08	0,06	0,08
<b>Bocatoma</b>	0,06	0,05	0,05	0,08	0,08	0,09

Los cambios de los coeficientes de rugosidad del canal de Manning se realizaron en la hoja Reach del modelo, para las pruebas se tuvo en cuenta los coeficientes sugeridos por Chow (1988). Además, se evaluaron extremos para conocer la consecuencia del cambio en las curvas.

En las diferentes pruebas realizadas (1 a 5) se pudo observar que al adaptar el coeficiente de Manning aumentándolo en todos los puntos a excepción de “Cazadores” se obtuvo una mejora en el ajuste de las curvas de caudal, velocidad y profundidad; en la gráfica de profundidad a la distancia cercana a la quebrada Cazadores se observa un pico, por tanto, se disminuye el valor del coeficiente de Manning para dicho punto obteniendo un mejor ajuste. Los resultados de las pruebas se tomaron como satisfactorios; para continuar con la calibración de la temperatura se tomó la versión de la prueba 5.

- Temperatura

La calibración de la temperatura se realizó cambiando los modelos de luz y calor que usa el modelo sin cambiar coeficientes, los cambios se realizaron en la hoja Light and Heat del modelo, se inició por la atenuación atmosférica teniendo en cuenta lo sugerido en el Manual del QUAL2K (Chapra et al., 2012), el modelo toma por defecto para la atenuación atmosférica el método de Bras, en él se usa un factor de turbiedad atmosférica en donde se utiliza 2 para un cielo limpio y 4 o 5 para un cielo con contaminación (ciudades principalmente) (prueba 6).

La prueba 7 (primera de calibración de temperatura) consistió en el cambio del método de cálculo de la atenuación atmosférica de Bras por el de Ryan – Stolzenbach, el cual usa la altitud de la superficie del suelo para el cálculo, en él se utiliza el coeficiente de transmisión atmosférica que tiene un rango de 0,07 a 0,91, usualmente se toma 0,8 por defecto, para la primera prueba se tomó el valor por defecto el cual no respondió con un mejor ajuste; para la segunda prueba se varió el coeficiente de transmisión atmosférica por 0,07 (prueba 8), en esta prueba la curva de temperatura se desajustó; en la tercera prueba este valor se cambió a 0,91 (prueba 9) y logró un buen ajuste.

Por tanto, para continuar con la calibración se tomó la última versión (prueba 9). Se siguió con los métodos para el cálculo de la radiación de onda larga, el modelo toma por defecto el método de Brunt el cual es comúnmente utilizado en los modelos de calidad del agua (Chapra et al., 2012), el método de Koberg complementa el método de Brunt, en él se considera la temperatura del aire y la radiación solar; el método de Brutsaert se utiliza en condiciones de latitud intermedia y de congelación. En el Manual de QUAL2K se recomienda este último método para los casos donde las condiciones atmosféricas sean variables a lo largo del tramo, teniendo en cuenta esto, se cambia el método a Brutsaert puesto que resulta conveniente teniendo en cuenta que el tramo modelado toma diferentes condiciones atmosféricas. En este sentido, se obtuvo una mejora en el ajuste de la curva de temperatura ya que

incrementa los valores y se acerca a los datos observados. Al percibir un mejor ajuste, se tomó esta versión para continuar con la calibración.

Considerando los métodos para el cálculo de la conducción y convección, se observa que el método por defecto utilizado en el modelo es el de Braly - Graves y Geyer, en este se asume que la temperatura del agua es siempre mayor a la temperatura ambiente, especialmente en las noches (Chapra et al., 2012). Para este método la velocidad del viento es tomada a 7 metros de altura. Otro método que presenta el QUAL2k a consideración del usuario es el de Adams, en él la velocidad del viento debe ser tomada a 2 metros, en caso contrario se realiza la conversión automáticamente. Se prueba realizando un cambio de método de Braly – Graves y Geyer a Adams, se observó un cambio en la curva, los valores modelados descienden reflejando un desajuste, por tanto, no se considera viable el cambio de método y se conserva el método usado por defecto por el modelo.

- Parámetros de calidad

A continuación, se muestra la calibración de los parámetros de calidad del agua mediante la variación de los métodos de solución numérica para las ecuaciones diferenciales no analíticas empleadas en la modelización. Se inició verificando la correcta estequiometría en el modelo siguiendo la información sugerida en el Manual de QUAL2K, estos cambios para la calibración se realizan en la hoja “Rates” del modelo, también se comprobó que los coeficientes de corrección de temperatura para la reaireación, oxidación, fitoplancton y demanda béntica fueran correctos.

El primer cambio para la calibración fue el modelo matemático de cálculo de la tasa de reaireación, el modelo emplea un método interno, de acuerdo con la velocidad y profundidad. En la Tabla 16 se encuentran los métodos de cálculo de la reaireación teniendo en cuenta los rangos de profundidad y velocidad media.

Tabla 16. Ecuaciones de reaireación para ríos de planicie. Fuente: (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 2013)

Parámetro	O' Connor – Dobbins	Churchill	Owens – Gibbs
Profundidad (m)	0.30 – 9.14	0.31 – 3.35	0.12 – 0.73
Velocidad media (m/s)	0.15 – 0.49	0.55 – 1.52	0.03 – 0.55
Expresiones	$k_a = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$	$k_a = 5.026 \frac{U}{H^{1.67}}$	$k_a = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$

Se prueba O'connor Dobbins por describir las condiciones de los puntos de la modelización. Los resultados simulados que arrojaron las curvas del modelo a causa del cambio de método de reaireación fueron satisfactorios puesto que las curvas en las que tiene impacto este aspecto se ajustaron mejor con el cambio realizado. Se continúa valorando otros métodos.

Seguido de esto, se realiza la prueba con el método de cálculo de reaireación de Owens – Gibbs, este método tiene aplicabilidad en fuentes hídricas con bajas profundidades y un rango más amplio de valores de velocidad en comparación con el método probado anteriormente; teniendo en cuenta que varias de las quebradas que alimentan el modelo tienen una baja profundidad, se decide evaluar el método obteniendo variaciones en las curvas de reaireación, oxígeno disuelto y pH para las cuales los cambios resultaron en un desajuste de la curva de datos modelados con respecto a los valores que fueron medidos.

Los cambios observados por el cambio de método de reaireación al método de Owens – Gibbs no fueron buenos a comparación con el método de O'connor – Dobbins, por tanto, se continúa la calibración con la versión del este método (prueba 12). No se realizó la prueba con el método de cálculo propuesto por Churchill ya que este se sugiere para velocidades del cauce más altas y en general, las fuentes no se condicionan a ese rango.

La versión 12 se utilizó para iniciar la calibración objetiva mediante la aplicación del recíproco del promedio ponderado de la normalización de la raíz del error cuadrático medio. En las Figuras 10 a 22 se muestran las curvas para los parámetros físico-químicos de interés resultantes de la calibración subjetiva del río Palacé usando QUAL2K.

### 6.2.2 Calibración objetiva

Para la calibración objetiva se empleó el recíproco del promedio ponderado de la raíz del error cuadrático medio normalizado (Pelletier et al., 2006) desde la interfaz del modelo QUAL2K Master desglosando la función como se muestra en la Figura 11, en la zona azul se llamaron los datos simulados por el modelo de las estaciones desde las hojas de cálculo “Hydraulics data”, “Temperature data” y “WQ data” según corresponde a la calibración de cada parámetro, en la zona rosa se realizaron las operaciones por parámetro como muestra la Figura 10 usando la ecuación de calibración recíproco del promedio ponderado de la RECM normalizada.

Variables simuladas					Función de ajuste		
Headwater	Distance	Q-sim	H-sim	U-sim	(1)	(2)	(3)
ID	a(km)	m <sup>3</sup> /s	m	m/s	(Q-sim - Q-data) <sup>2</sup>	(H-sim - H-data) <sup>2</sup>	(U-sim - U-data) <sup>2</sup>
1	0,00	0,72	0,39	0,37	0,0000	0,0025	0,0048
1	6,38	1,17	0,31	0,42	0,0066	0,0077	0,0014
1	42,40	5,39	0,52	0,45	0,0369	0,0004	0,0034
(4)	E(1,2,3)/m				0,0146	0,0019	0,0032
(5)	(4) <sup>1/2</sup>				0,1203	0,0431	0,0565
(6)	Promedio observado				2,3374	0,4484	0,3570
(7)	(6)/(5)				19,4219	10,4062	6,3182
factor					0,4	0,3	0,3
RECFactor					48,55565415	34,88734873	21,06073406
E(8)							1
E(9)							104,3077
(10)	(8)/(9)						104,3077

Figura 10. Formato de calibración objetiva en plantilla de Excel.

$$f(x) = \left[ \sum_{i=1}^q w_i \right] \times \sum_{i=1}^q \frac{1}{w_i} \left[ \frac{\frac{\sum_{j=1}^m O_{ij}}{m}}{\left[ \frac{\sum_{j=1}^m (P_{ij} - O_{ij})^2}{m} \right]^{1/2}} \right]$$

Figura 11. Pasos tomados por la plantilla de Excel para la aplicación de la fórmula de calibración objetiva.

La variable calibrada en esta etapa para las curvas hidráulicas fue el coeficiente de rugosidad de Manning, se modificó teniendo en cuenta las características del canal de agua de tal forma que de la variación de los valores por tramo se obtuviera resultado de la ecuación de calibración maximizado. La calibración de parámetros hidráulicos se realizó en la versión 17 de la modelización. Los nuevos valores calibrados tomados para el coeficiente de Manning que se presentan en la Tabla 17.



Tabla 17. Valores calibrados del coeficiente de Manning.

Tramo	Coeficiente de Manning
Juntas	0,100
Chuzcales	0,080
Palacé 1	0,100
Cazadores	0,025
La lajita	0,070
Sobretana	0,070
Casasviejas	0,060
Baho	0,060
Hatico	0,070
Palizada	0,080
Bocatoma	0,100

La calibración de la temperatura se realizó modificando los valores de las hojas de ingreso de datos “cloud cover”, “shade” y “light and heat”, aunque la curva ya ajustaba benévolamente después de la calibración subjetiva se determinó que se podría realizar un mayor ajuste mediante esta calibración. Las variaciones de datos en las dos primeras hojas (cloud cover and shade) no obtuvieron resultados maximizados en la ecuación de calibración por tanto se conservaron, para la hoja de datos “Light and heat” se alteraron los modelos de radiación solar de onda corta, radiación atmosférica infrarroja de onda larga descendente, y evaporación y conducción/convección del aire. Solo una variación obtuvo un resultado maximizado de la función de calibración, presentada en la Tabla 18. Esta etapa de la calibración se realizó en la versión 18 del modelo de calidad del agua para el río Palacé.

Tabla 18. Modelos y valores de calibración objetiva para curva de temperatura

Parámetro	Modelo/Valor
Modelo de radiación solar de onda corta	Ryan-Stolzenbach
Coeficiente de transmisión atmosférica	0,91
Radiación atm. infrarroja de onda larga descendente	Brutsaert
Evaporación y conducción/convección del aire	Adams 2

Los parámetros de calidad se calibraron objetivamente mediante la maximización de la función determinada variando los valores de las constantes cinéticas presentadas en la tabla 19 desde la hoja de ingreso de datos del modelo “Rates” en las versiones 19 y 20 del modelo de calidad del agua de este estudio. La modificación de los valores se realizó teniendo en cuenta los rangos de calibración sugeridos en Oliveira, 2012, y en Castro, 2015.

Para la presión parcial del dióxido de carbono se realizó una actualización del valor del modelo por un promedio actual encontrado en la página web del Laboratorio de Investigación del Sistema de la Tierra – Mauna Loa el cual lleva un registro histórico de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera y para el momento del estudio ya había incrementado (Earth System Research Laboratory, 2019).

*Tabla 19. Rangos de calibración de parámetros de calidad y valores tomados en la calibración objetiva. (Castro, 2015; Earth System Research Laboratory, 2019; Oliveira et al., 2012)*

Parámetro	Unidad	Valor		
		Mínimo	Máximo	Tomado
<b>ESTEQUIOMETRÍA</b>				
Carbono	gC	30	50	40
Nitrógeno	gN	3	9	7,2
Fósforo	gP	0,4	2	1
Clorofila	gA	0,4	2	1
Tasa de hidrólisis de DBOs	/d	0	5	1,78
Tasa de oxidación de DBOf	/d	0	5	5
Tasa de hidrólisis del N org	/d	0	5	0,01
Tasa de nitrificación de amonio	/d	0	10	4
Tasa de denitrificación del nitrato	/d	0	2	2
Deterioro de patógenos	/d	0	2	0,1
Presión parcial del CO2	ppm	N/A	N/A	400

Las curvas resultantes de la calibración total del modelo de calidad del agua del río Palacé (calibración objetiva), comparadas con las curvas de calibración subjetiva y del modelo sin calibrar se presentan en las Figuras 12 a 24 para facilitar la observación del beneficio del proceso de calibración en los parámetros determinados.

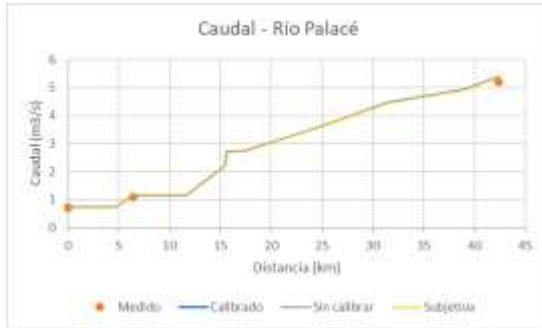


Figura 12. Curvas de caudal.



Figura 14. Curvas de profundidad.

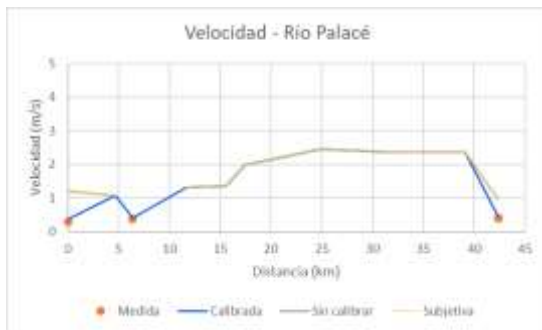


Figura 13. Curvas de velocidad.

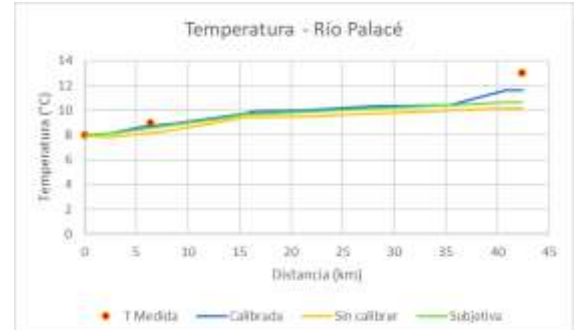


Figura 15. Curvas de temperatura.

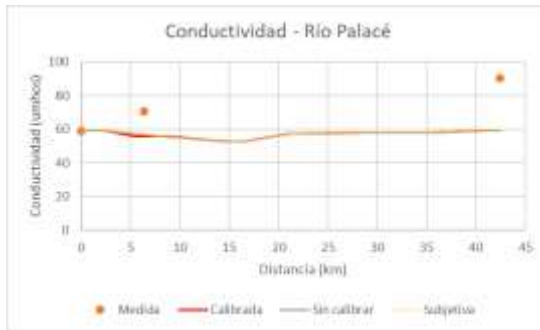


Figura 16. Curvas de conductividad.

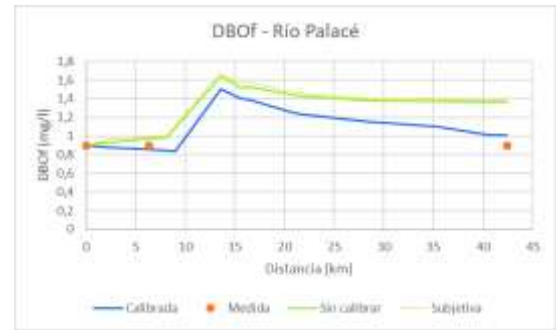


Figura 19. Curvas de DBO rápida.

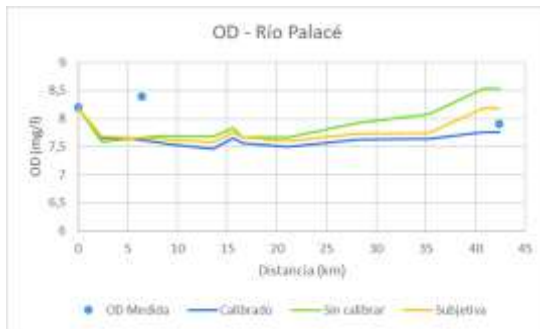


Figura 17. Curvas de OD.

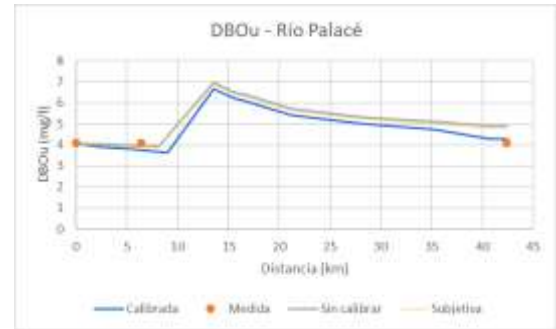


Figura 20. Curvas de DBO última.

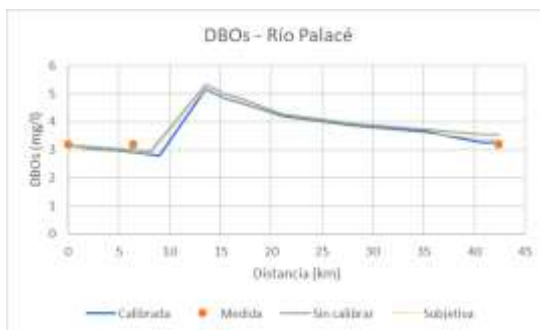


Figura 18. Curvas de DBO lenta.

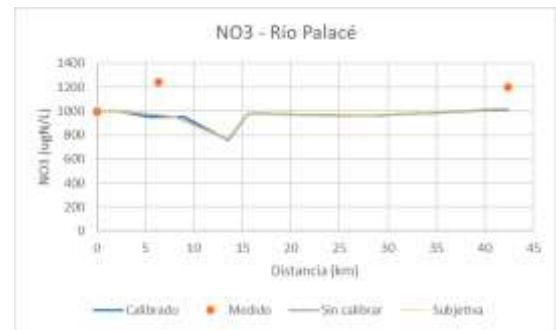


Figura 21. Curvas de nitratos.

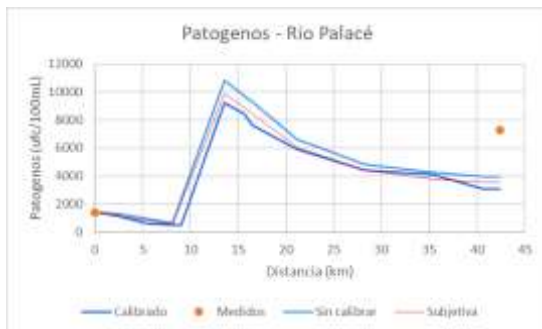


Figura 22. Curvas de patógenos.

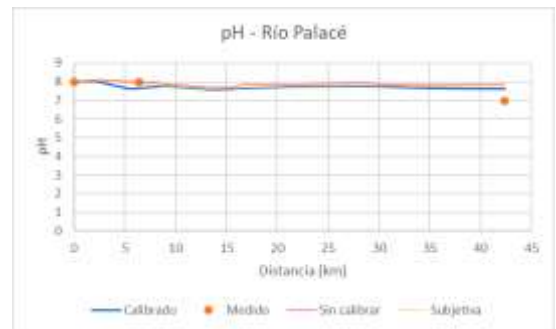


Figura 24. Curvas de pH.

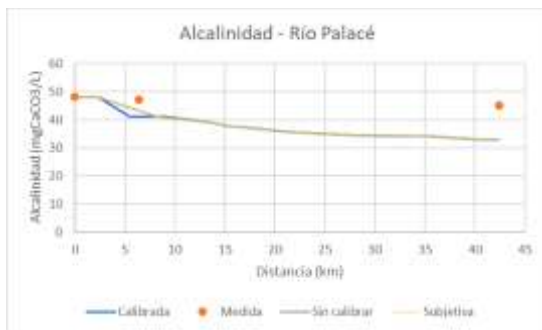


Figura 23. Curvas de alcalinidad.

El modelo calibrado muestra un buen ajuste de lo simulado con los datos tomados en los puntos de control principalmente en las curvas de caudal, velocidad media, profundidad, temperatura, DBO lenta, rápida y última, OD, alcalinidad y patógenos.

Se observa en las curvas de profundidad, DBO lenta, rápida y última, nitratos y patógenos un pico en el tramo del kilómetro 14 al 15 que se ha mantenido en la calibración, el parámetro que influyó en los demás fue la profundidad y esto puede deberse a que a dicha distancia aproximada se encuentra la laguna de Calvache en el corregimiento de Gabriel López lo cual puede ocasionar cambios en la calidad del agua del río, ello por el tiempo de retención en la laguna y los procesos de nitrificación que ocasionan desoxigenación (Chapra et al., 2012), además, podría explicarse el aumento de la DBO en las curvas, y los patógenos debido al incremento en la capa superficial del agua y de los sedimentos en el fondo del lago.

Para efectos de la modelización este hecho no se tuvo en cuenta debido a que el software no lo permite, por tanto, se asumió que el caudal de entrada a la laguna es el mismo que de salida.

### 6.3. Validación del modelo

La validación del modelo de calidad de agua para el río Palacé se realizó mediante los datos obtenidos en la segunda campaña de monitoreo, las condiciones atmosféricas y de caudal fueron diferentes a la primera campaña de monitoreo, pese a la dificultad de acceso al sector durante el invierno. En la Tabla 20 se presentan los datos de ingreso al modelo que fueron tomados en cuenta, los análisis completos se muestran en el anexo 4; los resultados del análisis de DBO<sub>5</sub> no se ingresaron para la validación puesto que se obtuvo un rango de <10 mg/l para todas las muestras, así el método fue limitado.

En esta campaña de monitoreo se evidenció el crecimiento del caudal en algunas de las quebradas (fuentes puntuales), así como el río Palacé se observó más caudaloso en comparación a la primera toma de muestras. Los caudales se calcularon conforme a lo dictado por la Organización Meteorológica Mundial en la Guía de Prácticas Hidrológicas (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Tabla 20. Datos de la segunda campaña de monitoreo tomados para la validación del modelo de calidad del agua.

Punto	Caudal (Q)	Temp	Conduct	OD	Nitra.(+nitri)	Patogenos	Alcalinidad	pH	T aire	T pto. Rocío	V. viento	Cobert. Nubes	Sombra	Cobert. Algas
	m <sup>3</sup> /s	°C	umhos	mg/l	ugN/l	ufc/100ml	mgCaCO <sub>3</sub> /l		°C	°C	m/s	%	%	%
Juntas	0,664	10,0	29,4	7,2	2600	717	4,7	7,5						
Chuscales	0,716	11,0	36,8	8,1	2395	2187	15,3	7,9	10	11,3	3,6	0,95	0,50	0,05
Palacé1	1,413	11,0	18,8	5,2	2300	9208	4,7	7,7	11	11,3	3,6	0,90	0,20	0,07
Cazadores	1,184	12,0	50,8	7,8	2154	24196	22,3	7,3	11	11,3	3,6	0,90	0,15	0,03
La lajita	0,465	13,0	73,2	8,6	2910	11199	37,4	7,5	11	11,3	3,6	0,90	0,05	0,25
Sobretana	0,029	12,0	70,7	8,9	2872	15531	34,5	7,7	12	11,3	3,6	0,95	0,85	1,00
Casasviejas	1,236	10,5	23,3	7,6	2196	12033	9,4	7,5	13	11,3	3,6	0,75	0,15	0,85
El Baho	1,152	12,0	38,3	7,7	3020	3448	9,8	7,8	12	11,3	3,6	0,95	0,15	0,60
Hatico	0,651	13,0	57,7	7,4	1227	10462	31,7	7,2	12	11,3	3,6	1,00	0,20	0,30
Palizada	0,354	14,0	51,1	9,5	1867	4352	32,7	7,8	14	11,3	3,6	0,50	0,85	0,05
Bocatoma	7,207	14,0	62,4	8,9	2160	12997	18,8	7,8	18	11,3	3,6	0,50	0,03	0,05

Para evaluar la bondad de la calibración del modelo a través de la validación se tienen en cuenta los errores cuadráticos medios (entre datos medidos y simulados) de cada parámetro de calidad del agua destacado en la Tabla 18 como lo muestra Kannel et al., 2007.

Tabla 21. Errores cuadráticos medios entre parámetros simulados y medidos en la calibración y en la validación.

Parámetro	RECM	
	Calibración	Validación
Caudal (m <sup>3</sup> )	19,42	7,08
Velocidad (m/s)	6,32	3,74
Profundidad (m)	10,41	3,36
OD (mg/L)	18,38	4,75
Temperatura (°C)	11,98	17,95
Patógenos (UFC)	1,47	1,32
pH	0,40	2,51
Alcalinidad (µS/cm)	5,91	2,90

Los valores obtenidos de la RECM son satisfactorios para la validación del modelo de calidad del agua aplicado para el río Palacé. Teniendo en cuenta los valores del error, se considera que la validación del modelo en parámetros como el caudal, velocidad, profundidad, OD, patógenos y alcalinidad, tiene un mejor ajuste que en la calibración del modelo lo cual es positivo puesto que el modelo cumple con su objetivo de describir el comportamiento del río en las diversas condiciones que puedan presentarse. En las Figuras 23 a 32 se presentan las curvas que resultan de la validación del modelo de calidad del agua.

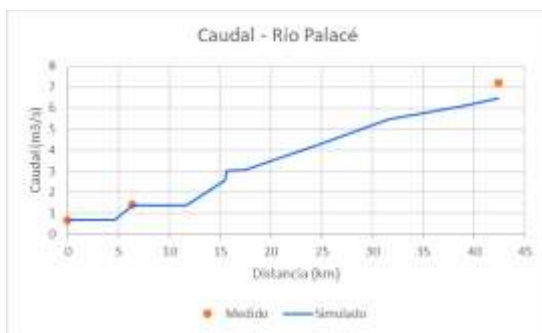


Figura 25. Curva de caudal de la validación del modelo.



Figura 26. Curva de velocidad de la validación del modelo.





Figura 27. Curva de profundidad de la validación del modelo.

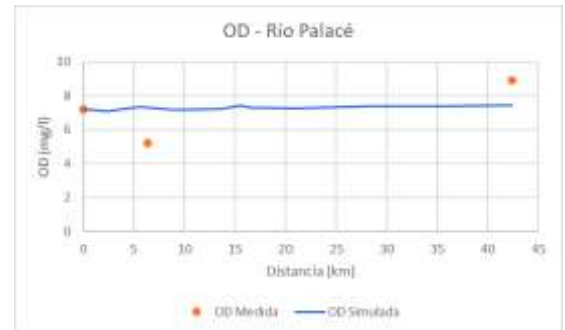


Figura 30. Curva de OD de la validación del modelo.

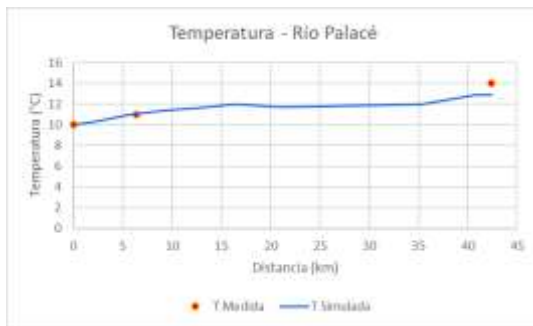


Figura 28. Curva de temperatura de la validación del modelo.

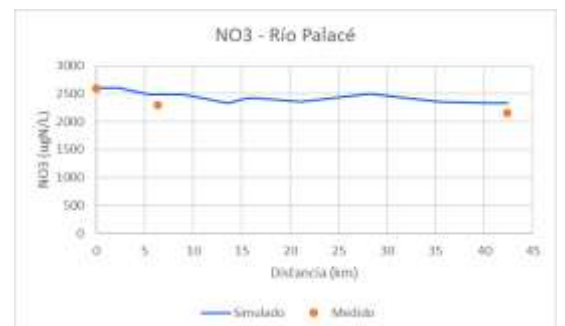


Figura 31. Curva de nitratos de la validación del modelo.

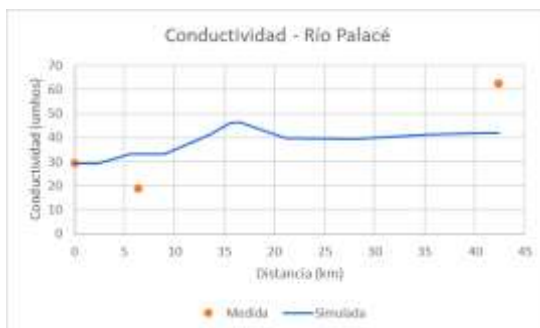


Figura 29. Curva de conductividad de la validación del modelo.



Figura 32. Curva de patógenos de la validación del modelo.

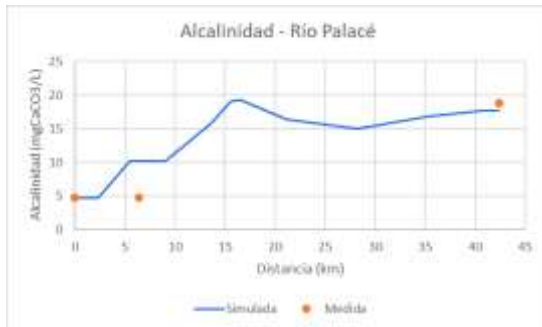


Figura 33. Curva de alcalinidad de la validación del modelo.

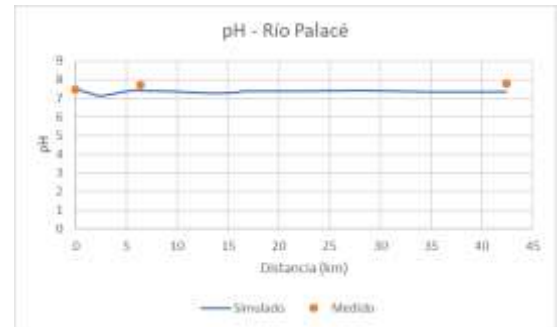


Figura 34. Curva de pH de la validación del modelo.

Además de la valoración de la bondad del modelo con la validación mediante la RECM, se observa en las gráficas que las curvas en general se ajustan aceptablemente a los datos obtenidos en campo.

#### 6.4. Formulación y evaluación de escenarios de contaminación.

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. así como las comunidades campesinas e indígenas que se encuentran en el área de subcuenca del río Palacé están interesadas en la conservación de esta fuente hídrica y la mitigación de los impactos ambientales negativos que sobre ella recaen, por tanto, surge la necesidad de implementar estrategias que ayuden a mitigar el daño ya causado, así como prevenir eventos futuros en donde se vea el riesgo de contaminación al río que exceda los límites de carga que este pueda soportar. Debido a esto, la construcción del modelo resulta útil ya que la modelización de calidad del agua es una herramienta que ayuda en la planeación que permite evaluar situaciones específicas que se requieran solucionar (Vera, 2007).

Se plantearon escenarios de contaminación de la calidad del agua del río Palacé, teniendo constante las condiciones meteorológicas y de caudal para posibles problemas de contaminación en la cuenca observadas en las visitas y teniendo en cuenta la expansión de las actividades productivas de la región ya que esta zona es una de las despensas agrícolas más importantes del departamento.

Para la zona alta fue el ingreso de la actividad piscícola como lo evidencia la Figura 35.



*Figura 35. Posible escenario de contaminación cerca de la cabecera del tramo.*

Para la zona media se consideró un posible incremento en la actividad ganadera puesto que se observó que existen terrenos que potencialmente servirían de potreros para ganado, los pobladores tienen dichos animales para consumo propio.



*Figura 36. Cultivo de papa, Gabriel López, Totoró. Tomado de: (RICCLISA, 2017)*

En la zona baja del tramo modelado se observó la posible expansión de los cultivos de fique como se observa en la Figura 37 lo que procede al lavado para la extracción de las fibras lo cual es fuente de contaminación.



Figura 37. Cultivos de fique en la ribera del río Palacé.

La información de los parámetros de calidad relevantes para cada caso obtenidas de las caracterizaciones de los vertimientos típicos de las actividades a evaluar encontradas en los estudios relacionados se presenta en la Tabla 22, solo se tienen en cuenta los parámetros que se han utilizado en la modelización.

Tabla 22. Valores de escenarios de contaminación.

Escenario	Parámetro	Valores	Puntos
1	OD (mg/l)	6,5	Juntas
	T (°C)	13,5	
	Q (m <sup>3</sup> /s)	0,028	
	DBO5 (mg/l)	25,3	
2	DBO5 (mg/l)	16,4	La Lajita, Sobretana, Casasviejas
	OD (mg/l)	4,7	
	Conductividad (μS/cm)	102,7	
	pH	6,4	
	Alcalinidad (mg/l)	61,7	
	Coliformes Tot. (UFC)	93550,0	
3	pH	5,03	Hatico Palizada
	OD (mg/l)	2,68	
	T (°C)	17,1	
	DBO5 (mg/l)	792,3	
	Q (l/s)	0,1047-0,3404	
	Conductividad (μS/cm)	1311	

Con esta información se encuentran las condiciones de mezcla para obtener los datos puntuales para el ingreso al modelo y obtener el escenario de condiciones de calidad.

#### 6.4.1. Escenario de calidad # 1: Piscicultura.

El primer escenario para evaluar es el ingreso de la piscicultura en la zona alta de la subcuenca del río Palacé, puesto que se encontró en la campaña de monitoreo la construcción de estanques para esta actividad. La disposición del vertimiento que supone riesgo de contaminación de las aguas es el lavado de los tanques, este vertimiento tiene un caudal pequeño comparado con el caudal de la quebrada Juntas que sería a donde descargaría. Los parámetros que varían en la mezcla del vertimiento en la quebrada Juntas son el caudal (0,748 m<sup>3</sup>/s), oxígeno disuelto (8,14 mg/L), DBO<sub>5</sub> (1,81 mg/L) y la temperatura (8,21 °C).

La Figura 38 muestra el comportamiento de la temperatura del río Palacé tras el vertimiento comparada con las condiciones actuales.

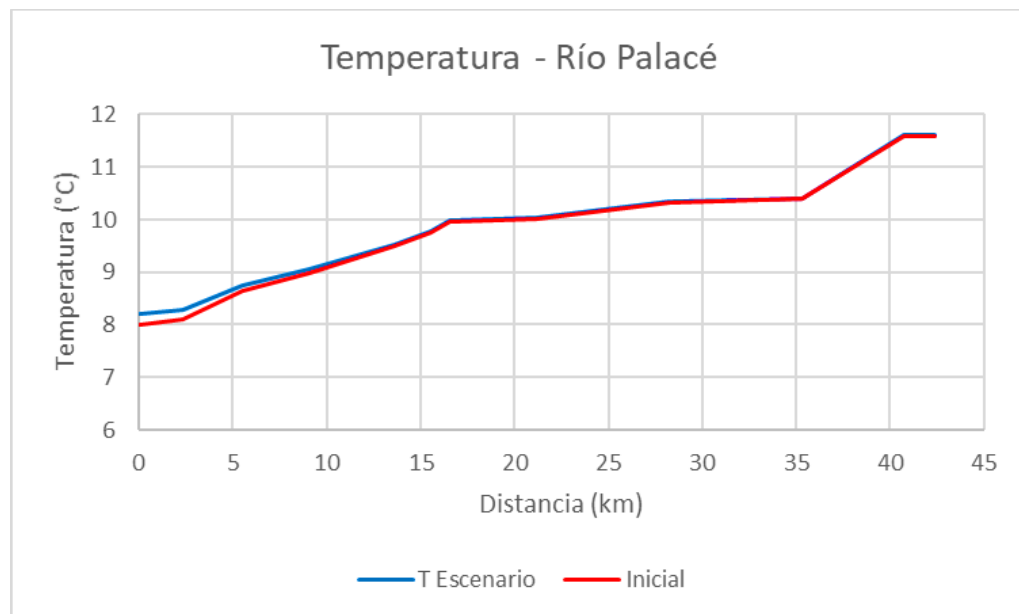


Figura 38. Gráfica comparativa de temperatura de escenario 1 vs. curva temperatura inicial.

De acuerdo con la curva de temperatura del escenario, esta incrementa levemente en la cabecera, en el recorrido del río va recuperando la temperatura modificada por el vertimiento en la quebrada Juntas.

La Figura 39 representa las condiciones del oxígeno disuelto en el río aguas abajo del vertimiento, comparado con las condiciones actuales

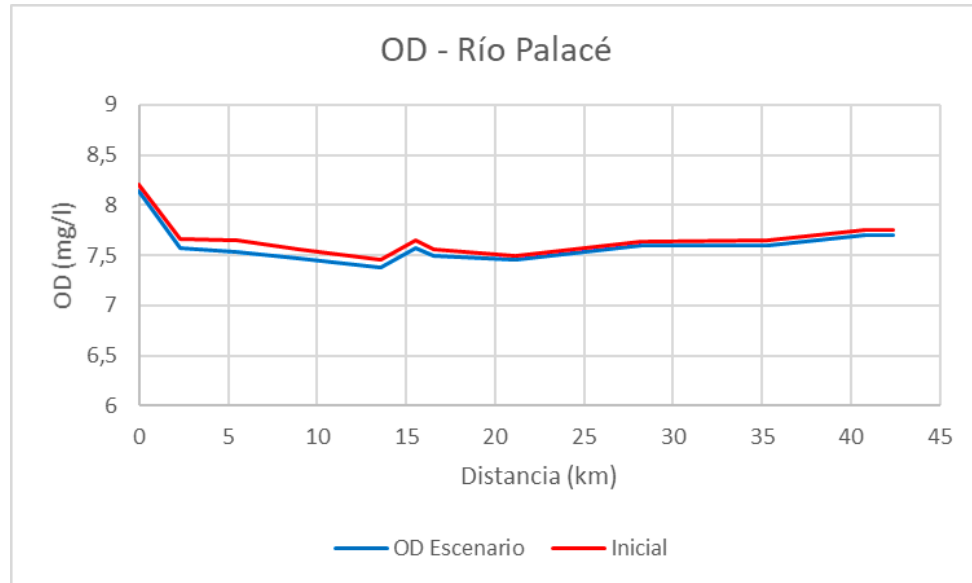


Figura 39. Gráfica comparativa de OD en el escenario 1 vs. OD inicial.

El oxígeno disuelto en el río tras el vertimiento del lavado de los tanques piscícolas descendería; en la figura 39 se observa el descenso del nivel del oxígeno disuelto, pero aguas abajo se observa una pequeña recuperación, por tanto, se puede considerar que esta actividad tiene un impacto negativo en el contenido de oxígeno disuelto en el agua, aun así, no son condiciones críticas para la vida acuática y se ajusta muy bien a la normatividad.

En la gráfica comparativa (Figura 40) se observa un incremento de la DBO rápida, comparada a la actual en la descarga del vertimiento en la quebrada Juntas, posteriormente el río retorna la DBO rápida a nivel similar al que tendría sin la descarga, así el río tiene la capacidad de asimilar la carga contaminante vertida en los 42 Km de tramo simulado.

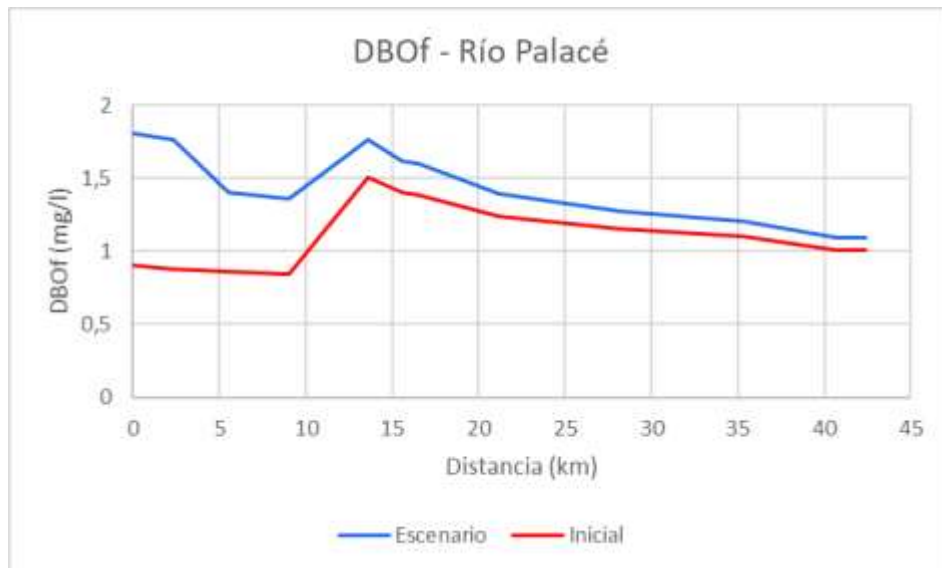


Figura 40. Gráfica comparativa DBO5 del escenario 1 vs. DBO5 inicial.

#### 6.4.2. Escenario de calidad # 2: Ganadería.

La zona media del tramo modelado presenta ganadería, en el escenario 2 se simuló un incremento de esta actividad, la cual tendría un vertimiento por escorrentía a las quebradas “La lajita”, “Sobretana” y “Casasviejas”. Por tanto, se incurre en un cambio en los parámetros de calidad del agua DBO<sub>5</sub>, OD, conductividad, pH, alcalinidad y coliformes totales. Para presentar los impactos en la calidad de aguas se muestran las figuras 41 a 46.



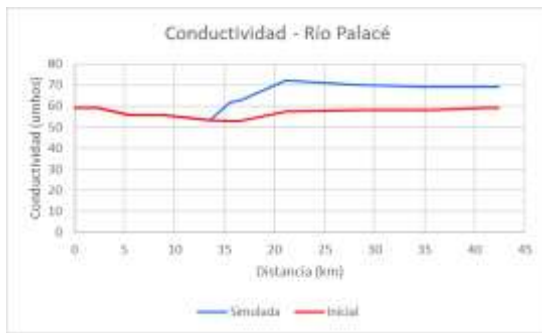


Figura 41. Conductividad. Escenario 2 vs. Inicial.

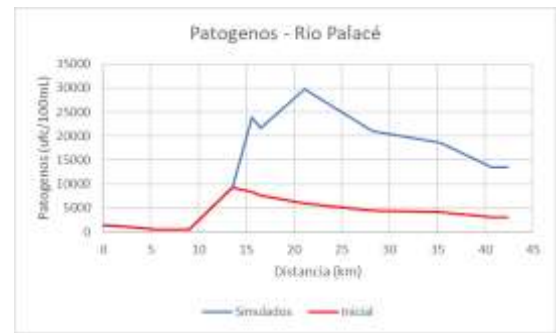


Figura 44. Patógenos. Escenario 2 vs. Inicial.



Figura 42. OD. Escenario 2 vs. Inicial.

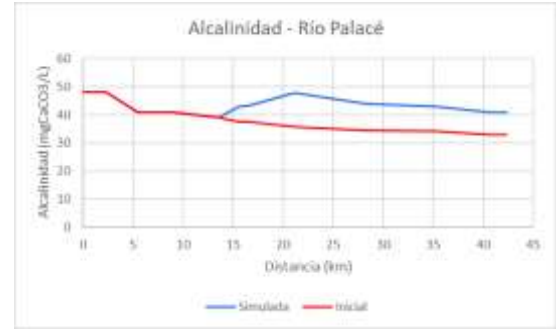


Figura 45. Alcalinidad. Escenario 2 vs. Inicial.

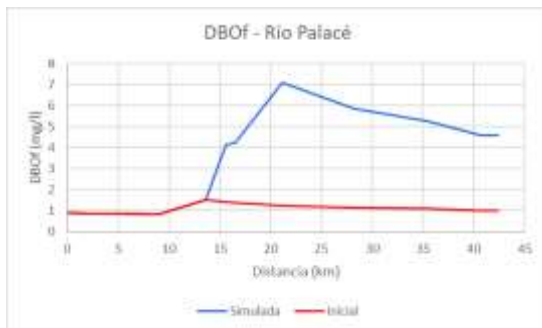


Figura 43. DBO5. Escenario 2 vs. Inicial.

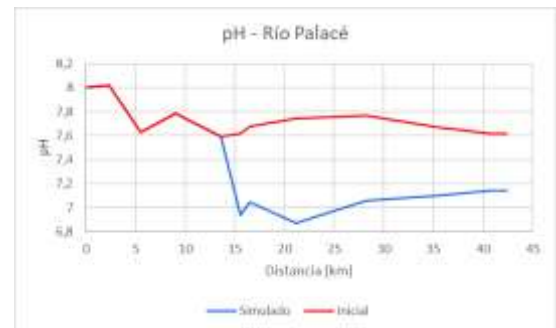


Figura 46. pH. Escenario 2 vs. Inicial.

La conductividad en el río aumenta progresivamente desde el punto “La Lajita” como se esperó por el cambio de valor en el parámetro, después del incremento se observa una ligera tendencia a disminuir y posteriormente a conservar el valor; de igual forma sucede con la alcalinidad. El oxígeno disuelto es un gran indicador de la calidad del agua, en este escenario posterior a la descarga de las quebradas intervenidas por la actividad ganadera se observa la disminución considerable del

oxígeno, teniendo en cuenta que los niveles eran óptimos. Aun así, como se observa en la Tabla 23, el agua sigue siendo aceptable y adecuada para la conservación de especies de peces y demás organismos acuáticos (Goyenola, 2007).

Tabla 23. Rangos de concentración de OD y consecuencias en sistemas acuáticos. (Goyenola, 2007)

OD (mg/L)	Condición	Consecuencias
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios
0 - 5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles
5 - 8	Aceptable	Adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.
8 - 12	Buena	
>12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética

La DBO rápida incrementó en dicho tramo a un poco más de 7 mg/L lo cual es aceptable para cauces naturales, el río se recupera paulatinamente aguas abajo hasta un valor de alrededor de 4 mg/L. Los patógenos incrementaron considerablemente; la tasa de decaimiento de los patógenos es baja por lo que no se observa un descenso rápido en el nivel con un pico de 30000 ufc/100mL.

La normatividad Colombiana permite a las CARs fijar los límites permisibles según su criterio (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010b), por tanto, se tuvo en cuenta que el uso posterior del agua del río será para la potabilización, el límite para patógenos es de 10000 ufc/100mL (León Suematsu & OMS, 1999), siendo así, en los siguientes 20 km no se podría hacer uso del agua para la potabilización, en el punto de bocatoma los niveles de patógenos han disminuido pero no alcanzan al límite por lo que se debe tener especial atención en el tratamiento del agua para que se puedan eliminar por completo.

Para el caso del pH, este desciende a 6,8 unidades y en el resto del tramo se observa que retorna poco a poco a los niveles anteriores, se relaciona observando la curva de la alcalinidad, ya que esta responde a la acidificación actuando como buffer, los valores incrementan levemente y se regulan en su tendencia a la vez que el pH inicia el retorno a los valores iniciales. El rango de pH se encuentra dentro de los límites permisibles (MADS, 2015b).

#### 6.4.3. Escenario de calidad # 3: Cultivos de fique.

El tercer escenario de calidad representa el crecimiento de la actividad de cultivo de fique principalmente por el lavado de las fibras en el proceso de transformación,

este caso se está presentando en la zona final del tramo de modelización, en zona aledaña a la bocatoma de la planta de tratamiento Palacé del acueducto de Popayán; en las visitas se observó el crecimiento de esta actividad, la cual no representaba un área muy grande, pero en el futuro podría ser altamente contaminante, se cuenta actualmente con 580 hectáreas de cultivos de fique en dicha zona, si continua una tendencia de crecimiento del 30%, se incrementaría la producción en 170 hectáreas que según la disposición serán 130 ha para “Palizada” y 40 ha para “El Hatico”.

Según estudios de caracterización del agua proveniente del lavado de la fibra del fique en el municipio de Totoró se conocen los valores de los parámetros fisicoquímicos de interés presentados en la tabla 22, en el estudio realizado en el municipio, se analizaron muestras de licor resultante en el lavado de la fibra del fique, para este caso se tomó tales valores para simular la actividad en la zona, también se tomó una frecuencia de lavado de 2 veces al día con una duración de 2 horas cada lavado, se conoce que por cada 20,8 kilogramos de fibra de fique se utilizan 190,82 litros de agua para el lavado, conociendo el incremento en la producción se obtiene el caudal adicional utilizado en el lavado de las fibras. La simulación del modelo arrojó las siguientes gráficas (Figuras 47, 48 y 49) de interés.



Figura 47. Curva de temperatura. Escenario 3 vs. Inicial.

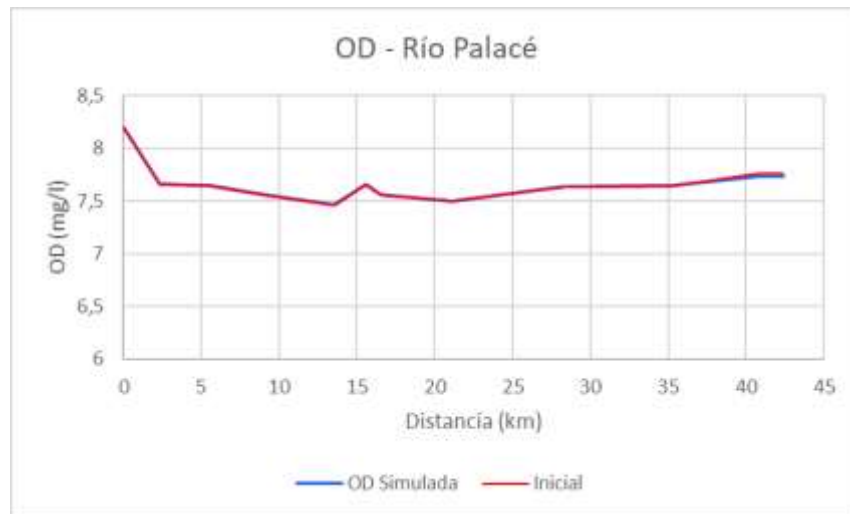


Figura 48. Curva de OD. Escenario 3 vs. Inicial.

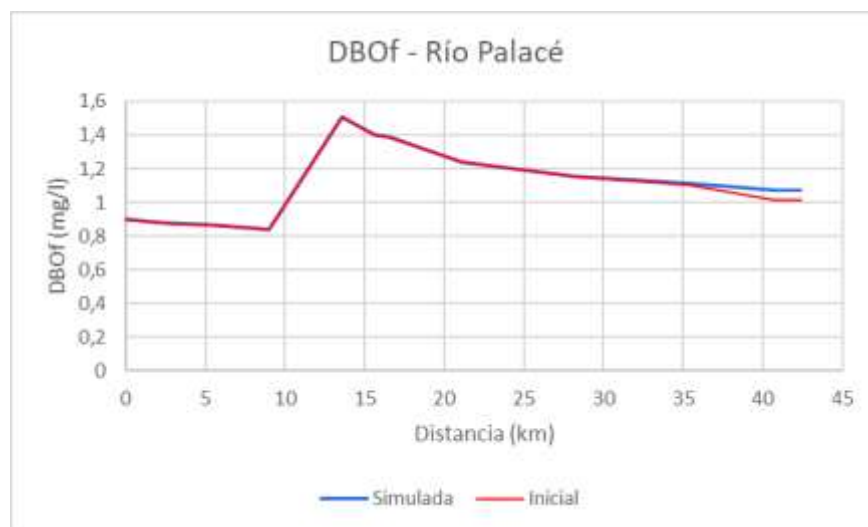


Figura 49. Curva de DBO5. Escenario 3 vs. Inicial.

La temperatura, así como la conductividad y el pH, no mostraron diferencias comparándolas con los resultados del modelo sin considerar el crecimiento de esta actividad agrícola. Los valores de dichos parámetros para el vertimiento no fueron extremos y el caudal del agua residual frente al caudal de las quebradas es muy bajo. El oxígeno disuelto para el vertimiento presenta estado de hipoxia pero el agua de ambas quebradas tiene buen nivel de oxígeno (Goyenola, 2007) con lo cual no se observa un impacto significativo para este parámetro.

La demanda bioquímica de oxígeno para el agua residual del lavado de la fibra de fique es alta. La fibra representa tan solo un 5% del peso de la planta aproximadamente, el vertimiento “licor verde” es rico en celulosa y azúcares (70%), los cuales al ser dispuestos en el recurso hídrico tienen un gran impacto para la hidrobiota (Dagua et al., 2008; Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006; Romero, 2000). Para este escenario, la curva muestra un incremento de la DBO en el tramo final que puede ser despreciable, sin embargo, es de considerar y controlar el crecimiento de la actividad por la cercanía con la bocatoma de la planta de tratamiento de agua potable de Palacé.

#### 6.4.4. Escenario de calidad # 4: Escenarios simultáneos.

En el cuarto escenario se observa la combinación de los escenarios descritos anteriormente, se simula un estado crítico en el cual intervienen todos los factores de riesgo evaluados. Para el ingreso al modelo se tomaron los valores de cada escenario para posteriormente realizar la simulación.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 50 a 55.

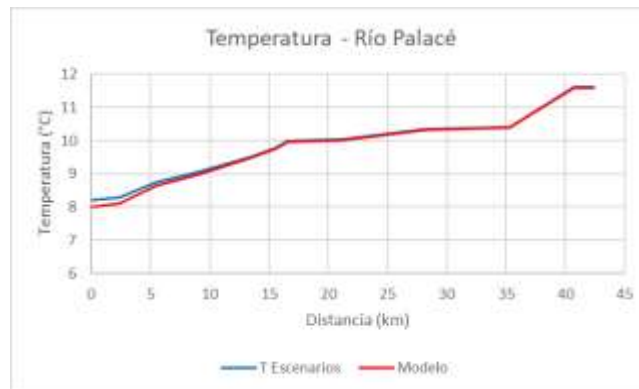


Figura 50. Curva de temperatura. Escenarios simultáneos.

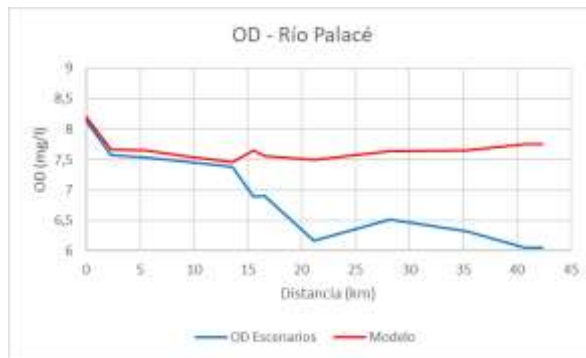


Figura 51. Curva de OD. Escenarios simultáneos.

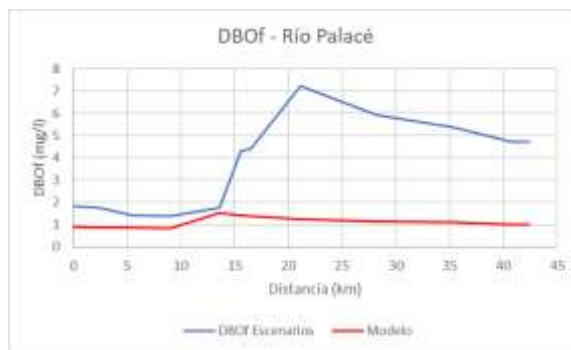


Figura 52. Curva de DBOf. Escenarios simultáneos.

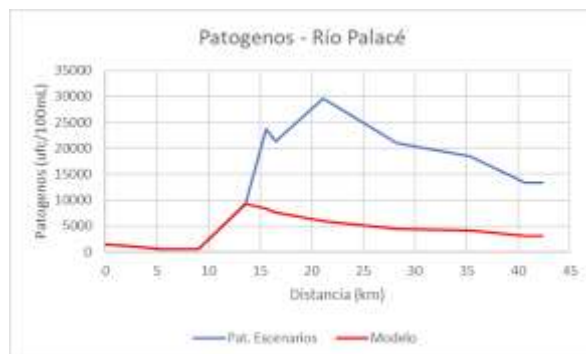


Figura 53. Curva de Patógenos. Escenarios simultáneos.

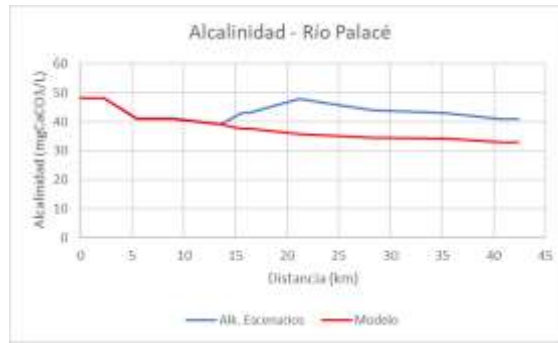


Figura 54. Curva de alcalinidad. Escenarios simultáneos.

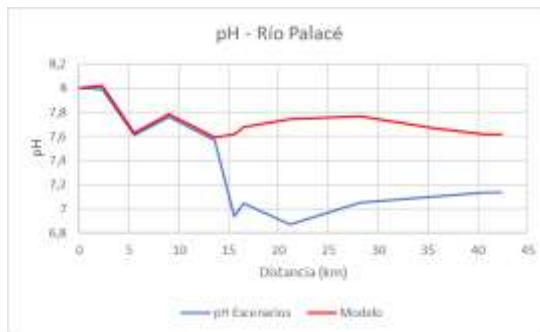


Figura 55. Curva de pH. Escenarios simultáneos.

El escenario simultáneo muestra un incremento leve en la temperatura por acción de los lavados de tanques piscícolas que se presentan en la zona alta y se va regulando a lo largo del tramo. El oxígeno disuelto muestra una caída, en su punto más bajo llegó a acercarse a la hipoxia. La DBO rápida muestra un incremento a lo largo del tramo teniendo un pico en donde se presenta la actividad ganadera. Los patógenos incrementan significativamente especialmente en el tramo en el que se tiene ganadería extensiva. El pH muestra un descenso que al igual que anteriores parámetros se ve afectada la zona media, en consecuencia, la alcalinidad en el mismo sector incrementa.

En este escenario simultáneo se observa que la actividad que causa mayor contaminación es la ganadería, ocasiona que el agua deba tener un mayor tratamiento para poder optar por su consumo, especialmente porque debe tener una óptima desinfección. Por esto se debe hacer seguimiento continuo para mitigar los efectos adversos de esta actividad en la subcuenca del río Palacé.

## 7. CONCLUSIONES.

Las campañas de monitoreo realizadas para el desarrollo y validación del modelo de calidad del agua revelaron buenos valores de los parámetros de calidad del agua en las estaciones, a excepción de los patógenos los cuales excedieron en la quebrada Cazadores las 24000 ufc/mL.

La modelización de calidad del agua del río Palacé desde la quebrada Juntas hasta la Bocatoma de la planta de tratamiento de agua potable Palacé en su etapa sin calibrar obtuvo un beneficioso ajuste inicial que conllevó a facilitar la posterior calibración.

Los resultados de la calibración del modelo en QUAL2K fueron satisfactorios tomando como referencia la información en las campañas de monitoreo en la mayoría de los parámetros analizados obteniendo un buen ajuste para la descripción de los procesos naturales del río frente a condiciones de cambios en la calidad del agua.

La segunda campaña de monitoreo tuvo como finalidad la validación del modelo en condiciones diferentes a las incluidas en su elaboración, el modelo calibrado tuvo un desempeño aceptable evaluando los datos de la segunda campaña ya que continuó describiendo el comportamiento del río de manera coherente.

La evaluación de los tres escenarios determinó que la actividad de mayor impacto en la calidad del agua es la ganadería, que se puede potenciar en la zona media del tramo de estudio, debido a que las aguas se contaminan por vertimientos distribuidos, de esta manera los valores de DBO, oxígeno disuelto y principalmente de coliformes totales son críticos por lo que se debe tener precaución en la posterior potabilización del agua del río Palacé.

Se observa que el río Palacé en el tramo estudiado tiene una buena capacidad de autodepuración y cumple con la normatividad colombiana para tratamiento con fines de uso para consumo humano. Esto se debe a que aún se encuentra poco intervenido por actividades antrópicas, además de las condiciones geográficas y atmosféricas adecuadas.

El modelo desarrollado es determinante en el estudio de la calidad del agua de la subcuenca del río Palacé puesto que no existen estudios previos de modelización de calidad del agua y se obtuvo información que puede ser útil para el uso y conservación de la fuente hídrica a futuro.



## 8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

El modelo existente puede ser enriquecido y actualizado con más información de otras campañas de monitoreo para mejorar la confiabilidad y ajuste para su utilización como herramienta para la planificación con fines de la conservación de la calidad del recurso hídrico en la subcuenca del río Palacé considerando el análisis de otros parámetros que no fue posible medir en este estudio, tales como: el ciclo del nitrógeno y fósforo, fitoplancton.

El sector de estudio se encuentra en constante crecimiento agropecuario por lo que es necesario el seguimiento preventivo, por parte de los entes de control y la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, de las actividades para la conservación medioambiental, además de la instrucción a los campesinos e indígenas de la región para la cooperación en el cuidado y buen aprovechamiento de los recursos naturales minimizando el impacto negativo de origen antrópico que se pueda presentar.

No fue posible la medición del impacto de los agroquímicos utilizados en las diferentes etapas de cultivo, por esta razón no se puede concluir sobre la contaminación del río y sus afluentes por dichos compuestos, se sugiere el análisis del agua por especies químicas y su impacto en los organismos mediante una modelización ecológica.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. (2014). Plantas de tratamiento. Retrieved June 10, 2018, from <http://www.acueductopopayan.com.co/institucional/infraestructura/plantas-de-tratamiento/>
- Alcaldía de Totoró. (2002). *EOT Totoró*. Totoró.
- Alcaldía de Totoró. (2013). Nuestro Municipio - Alcaldía de Totoró. Retrieved June 10, 2018, from [http://totoro-cauca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://totoro-cauca.gov.co/informacion_general.shtml)
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. (2013). Metodología para la definición de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial. *Metodología Para La Definición de La Longitud de Influencia de Vertimientos Sobre Corrientes de Agua Superficial.*, (8), 1–25.
- Castro, M.-A. (2015). *Aplicación del QUAL2Kw en la Modelación de la Calidad del Agua del Río Guacaica, Departamento de Caldas, Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water-Quality Modeling* (1st ed.). Waveland Press. Inc.
- Chapra, S. (2015). Qual2K. Retrieved March 25, 2019, from QUAL2K, EPA website: <http://www.qual2k.com/>
- Chapra, S., Pelletier, G., & Tao, H. (2012). *Manual Qual2K*. 1–97.
- Chará, J., Pedraza, G., Giraldo, L., & Hincapié, D. (2007). Efecto de los corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río La Vieja, Colombia. *Agroforestería En Las Américas*, 45, 72–78.
- Chow, V. Te. (1988). *Applied Hydrology*.
- Dagua, C., Dagua, D., & Morales, S. (2008). Evaluación de los efluentes provenientes de la agroindustria del fique en el municipio de totoró - cauca. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 6(2), 47–55. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v6n2/v6n2a07.pdf>
- Earth System Research Laboratory. (2019). Monthly Average Mauna Loa CO2. Retrieved August 14, 2019, from Trends in atmospheric Carbon Dioxide website: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- EPA. (2019). Water Quality Analysis Simulation Program (WASP). Retrieved May 26, 2019, from <https://www.epa.gov/ceam/water-quality-analysis-simulation->

program-wasp

- Goyenola, G. (2007). *Oxígeno Disuelto - Guía para la utilización de las Valijas Viajeras* (No. 1). Uruguay.
- Guevara-Díaz, J. M. (2003). Estimación de la humedad relativa media, la temperatura mínima y la temperatura de punto de rocío. In *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos* (Segunda ed, pp. 83–84). Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- IDEAM. (2004). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2007). *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua* (1st ed.). Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2015). Estudio nacional del agua. *Journal of the American College of Cardiology*, 2(1). [https://doi.org/10.1016/0735-1097\(94\)90561-4](https://doi.org/10.1016/0735-1097(94)90561-4)
- INFAC. (2016). Farmacontaminación. Impacto ambiental de los medicamentos. *ESKUALDEKO FARMAKOTERAPI INFORMAZIOA*, 24(10), 59–64.
- Kannel, P.-R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S.-R., & Pelletier, G.-J. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River , Nepal. *Ecological Modelling*, 202(9 february 2007), 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.033>
- León Suematsu, G., & OMS. (1999). *Parámetros de Calidad para el Uso de Aguas Residuales. Guías de Calidad de Efluentes para la Protección de la Salud*.
- Luna Imbacuán, M. A., Campos Bermúdez, F., & Gutiérrez, O. M. (2016). Evaluación de las aguas residuales del lavado de estanques multipropósito con cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 191. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol17\\_num2\\_art:488](https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num2_art:488)
- MADS. (2015a). Decreto 1076 de 2015.
- MADS. Resolución 631 De 2015. , Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015 § (2015).
- MADS. (2018). *Guía Nacional del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales*. Bogotá, Colombia.
- MADS, I. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2014). Área sembrada y área cosechada del cultivo de fique 2007-2014. *Evaluaciones Agropecuarias Municipales*.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Guía ambiental del*

- subsector fiquero* (Segunda ed). Bogotá, Colombia: USAID-ARD.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. *Decreto 3930 de 2010*. , 2010 § (2010).
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. *Decreto 3930 de 2010*. , (2010).
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010c). *Política Nacional Recurso Hídrico* (1st ed.). Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Ministerio de la Protección Social. (2007). *Decreto 1575 de 2007*. (Mayo 9), 1–14.
- Oliveira, B., Bola, J., Quinteiro, P., & Nadais, H. (2012). *Application of Qual2Kw model as a tool for water quality management : Cértima River as a case study*. 184(3 November 2011), 6197–6210. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2413-z>
- OMS. (2002). *Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano*. Lima, Perú.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. 1, 408.
- Ordóñez, J., & Palacios, M. *Modelo de calidad del agua. Doble Calzada Rumichaca - Pasto*. , (2017).
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas*. In *OMM* (5th ed.). OMM.
- Parveen, Nuzhat & Singh, S. (2016). Application of Qual2e Model for River Water Quality Modelling. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 4, 429-432.
- Pelletier, G.-J., Chapra, S.-C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21(23 september 2005), 419–425.
- Periódico La Campana. (2016, July 11). Comenzaron las extorsiones en zona de Totoró. *Periódico La Campana*, p. 1. Retrieved from <https://www.periodicolacampana.com/comenzaron-las-extorsiones-en-zona-de-totoro/>
- RICCLISA. (2017). Visita técnica al Valle de Malvazá en el Cauca, para la actualización de los mapas de clasificación y uso del suelo.
- Rivera, J. (2011). Evaluación de la Materia Orgánica en el Río Frío Soportada en el QUAL2K Versión 2.07. *Dyna*, 169(0012–7353), 131–139.
- Romero, J. A. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales* (3rd ed.; Escuela

Colombiana de Ingeniería, Ed.). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ronzano, E., & Dapena, J. L. (1995). Tratamiento biológico de las aguas residuales. *Ediciones Diaz de Santos, 1995*, 511. Retrieved from <http://opac.udea.edu.co/cgi-olub/?infile=details.glu&luid=184986&rs=4685735&hitno=2>

Vera, I. (2007). Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo qual2k como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D. C. Pontificia Universidad Javeriana.

Villalobos, H. (2008). *Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua para el caso de un río específico en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.

## 10. ANEXOS.

### 10.1. Registro fotográfico.



*Figura A156. Punto Juntas. Headwater.*



*Figura 572. Punto Chuscales. Tributario.*



*Figura 58. Punto Palacé 1. Control.*



*Figura 59. Punto La Lajita. Tributario.*



*Figura 60. Punto Sobretana. Tributario.*





*Figura 616. Punto Casasviejas. Tributario.*



*Figura 62. Punto El Baho. Tributario.*





*Figura 63. Punto El Hatico. Tributario.*



*Figura 64. Punto Bocatoma. Control.*

## 10.2. Errores de otras versiones de software.

El modelo se realizó con el software QUAL2KMaster2 por la ventaja que ofrecía frente a las versiones QUAL2K2 versión 07 y QUAL2K2 versión 12b1, entre ellas existen varias diferencias desde el ingreso de datos, el orden para tomar los tramos hasta el número de elementos por tramo; el principal error encontrado de dichas versiones fue que no se estaba modelando el caudal como se observa en la Figura A10, no se consideraban los ingresos de agua por tributarios, por tanto, al ser tan

importante el parámetro del caudal, se decidió cambiar la versión del software por una más estable.



Figura A10. Error encontrado del caudal en QUAL2K2\_v12b1

### 10.3. Aforo de caudales.

- Campaña de monitoreo 1.

Lugar		Palacé - Juntas							
Altitud (msnm):		4/12//2017							
fecha:									
Longitud:									
Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,560	0,224	0,00		0,56	0,480		
2	1,00	0,690	0,276	1,00	0,625	2,01	0,450	0,465	0,291
3	2,00	0,690	0,276	1,00	0,690	2,00	0,150	0,300	0,207
4	3,00	0,300	0,120	1,00	0,495	2,07	0,240	0,195	0,097
5	4,00	0,220	0,088	1,00	0,260	2,00	0,360	0,300	0,078
6	5,00	0,180	0,072	1,00	0,200	2,00	0,120	0,240	0,048
					2,27	10,65	Q (m3/s)		0,720
							Q (lps)		720,15

Lugar Palacé - Chuscales  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 4/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,200	0,080	0,00		0,20	0,380		
2	0,50	0,320	0,128	0,50	0,130	1,01	0,310	0,345	0,045
3	1,00	0,340	0,136	0,50	0,165	1,00	0,130	0,220	0,036
4	1,50	0,450	0,180	0,50	0,198	1,01	0,130	0,130	0,026
5	2,00	0,300	0,120	0,50	0,188	1,02	0,260	0,195	0,037
6	2,50	0,360	0,144	0,50	0,165	1,00	0,140	0,200	0,033
7	3,00	0,350	0,140	0,50	0,178	1,00	0,160	0,150	0,027
8	3,50	0,220	0,088	0,50	0,143	1,02	0,090	0,125	0,018
9	4,00	0,160	0,064	0,50	0,095	1,00	0,000	0,045	0,004
					<b>1,26</b>	<b>8,27</b>	Q (m3/s)		<b>0,225</b>
							Q (lps)		<b>225,10</b>

Lugar Palacé - Puente Cazadores  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 4/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,280	0,112	0,00		0,28	0,000		
2	0,50	0,480	0,192	0,50	0,190	1,04	0,180	0,090	0,017
3	1,00	0,430	0,172	0,50	0,228	1,00	0,300	0,240	0,055
4	1,50	0,400	0,160	0,50	0,208	1,00	0,440	0,370	0,077
5	2,00	0,430	0,172	0,50	0,208	1,00	0,240	0,340	0,071
6	2,50	0,450	0,180	0,50	0,220	1,00	0,270	0,255	0,056
7	3,00	0,400	0,160	0,50	0,213	1,00	0,280	0,275	0,058
8	3,50	0,270	0,108	0,50	0,168	1,02	0,440	0,360	0,060
9	4,00	0,150	0,060	0,50	0,105	1,01	0,000	0,220	0,023
					<b>1,54</b>	<b>8,36</b>	Q (m3/s)		<b>0,417</b>
							Q (lps)		<b>416,96</b>

Lugar Palacé - puente Palacé 1 en Gabriel Lopez  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 4/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,920	0,368	0,00		0,92	0,200		
2	1,00	0,350	0,140	1,00	0,635	2,15	0,250	0,225	0,143
3	2,00	0,480	0,192	1,00	0,415	2,01	0,200	0,225	0,093
4	3,00	0,300	0,120	1,00	0,390	2,02	0,270	0,235	0,092
5	4,00	0,240	0,096	1,00	0,270	2,00	0,120	0,195	0,053
6	5,00	0,170	0,068	1,00	0,205	2,00	0,010	0,065	0,013
7	6,00	0,190	0,076	1,00	0,180	2,00	0,800	0,405	0,073
8	7,00	0,250	0,100	1,00	0,220	2,00	0,000	0,400	0,088
9	8,00	0,250	0,100	1,00	0,250	2,00	1,390	0,695	0,174
10	9,00	0,490	0,196	1,00	0,370	2,03	0,570	0,980	0,363
					<b>2,94</b>	<b>19,13</b>	Q (m3/s)		<b>1,091</b>
							Q (lps)		<b>1.091,13</b>

Lugar Palacé - La Lajita  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 4/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,450	0,180	0,00		0,45	0,180		
2	0,10	0,540	0,216	0,10	0,050	0,23	0,310	0,245	0,012
3	0,20	0,570	0,228	0,10	0,056	0,20	0,290	0,300	0,017
4	0,30	0,600	0,240	0,10	0,059	0,20	0,260	0,275	0,016
5	0,40	0,510	0,204	0,10	0,056	0,23	0,200	0,230	0,013
					<b>0,22</b>	<b>1,33</b>	Q (m3/s)		<b>0,058</b>
							Q (lps)		<b>57,63</b>

Lugar: Palacé - Sobretana  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 4/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,270	0,108	0,00		0,27	0,190		
2	0,10	0,230	0,092	0,10	0,025	0,21	0,140	0,165	0,004
3	0,20	0,290	0,116	0,10	0,026	0,22	0,320	0,230	0,006
4	0,30	0,390	0,156	0,10	0,034	0,24	0,210	0,265	0,009
5	0,40	0,440	0,176	0,10	0,042	0,21	0,130	0,170	0,007
6	0,50	0,220	0,088	0,10	0,033	0,34	0,130	0,130	0,004
					<b>0,16</b>	<b>1,49</b>	Q (m3/s)		<b>0,030</b>
							Q (lps)		<b>30,46</b>

Lugar: Palacé - Casas Viejas  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 4/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,180	0,072	0,00		0,18	0,050		
2	0,60	0,300	0,120	0,60	0,144	1,21	0,140	0,095	0,014
3	1,20	0,360	0,144	0,60	0,198	1,20	0,270	0,205	0,041
4	1,80	0,390	0,156	0,60	0,225	1,20	0,280	0,275	0,062
5	2,40	0,400	0,160	0,60	0,237	1,20	0,320	0,300	0,071
6	3,00	0,410	0,164	0,60	0,243	1,20	0,260	0,290	0,070
7	3,60	0,450	0,180	0,60	0,258	1,20	0,260	0,260	0,067
8	4,20	0,380	0,152	0,60	0,249	1,20	0,140	0,200	0,050
9	4,80	0,280	0,112	0,60	0,198	1,21	0,120	0,130	0,026
10	5,40	0,310	0,124	0,60	0,177	1,20	0,140	0,130	0,023
11	6,00	0,260	0,104	0,60	0,171	1,20	0,110	0,125	0,021
					<b>2,10</b>	<b>12,21</b>	Q (m3/s)		<b>0,445</b>
							Q (lps)		<b>444,72</b>

Lugar: Palacé - El Baho  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 5/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,220	0,088	0,00		0,22	0,000		
2	0,40	0,330	0,132	0,40	0,110	0,81	0,040	0,020	0,002
3	0,80	0,480	0,192	0,40	0,162	0,83	0,310	0,175	0,028
4	1,20	0,250	0,100	0,40	0,146	0,86	0,010	0,160	0,023
5	1,60	0,420	0,168	0,40	0,134	0,83	0,510	0,260	0,035
6	2,00	0,340	0,136	0,40	0,152	0,81	0,220	0,365	0,055
7	2,40	0,370	0,148	0,40	0,142	0,80	0,500	0,360	0,051
8	2,80	0,260	0,104	0,40	0,126	0,81	0,060	0,280	0,035
9	3,20	0,160	0,064	0,40	0,084	0,81	0,020	0,040	0,003
					<b>1,06</b>	<b>6,79</b>	Q (m3/s)		<b>0,304</b>
							Q (lps)		<b>304,19</b>

Lugar: Palacé - Hatico  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 5/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,140	0,056	0,00		0,14	0,340		
2	0,40	0,150	0,060	0,40	0,058	0,80	0,330	0,335	0,019
3	0,80	0,230	0,092	0,40	0,076	0,81	0,650	0,490	0,037
4	1,20	0,240	0,096	0,40	0,094	0,80	0,380	0,515	0,048
5	1,60	0,300	0,120	0,40	0,108	0,80	0,240	0,310	0,033
6	2,00	0,350	0,140	0,40	0,130	0,80	0,440	0,340	0,044
7	2,40	0,320	0,128	0,40	0,134	0,80	0,430	0,435	0,058
8	2,80	0,300	0,120	0,40	0,124	0,80	0,240	0,335	0,042
9	3,20	0,400	0,160	0,40	0,140	0,81	0,500	0,370	0,052
10	3,60	0,320	0,128	0,40	0,144	0,81	0,500	0,500	0,072
11	4,00	0,250	0,100	0,40	0,114	0,81	0,220	0,360	0,041
12	4,40	0,200	0,080	0,40	0,090	0,80	0,090	0,155	0,014
					<b>1,21</b>	<b>8,99</b>	Q (m3/s)		<b>0,461</b>
							Q (lps)		<b>461,38</b>

Lugar: Palacé - Palizada  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 5/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,330	0,132	0,00		0,33	0,140		
2	0,30	0,290	0,116	0,30	0,093	0,60	0,390	0,265	0,025
3	0,60	0,240	0,096	0,30	0,080	0,60	0,490	0,440	0,035
4	0,90	0,180	0,072	0,30	0,063	0,61	0,440	0,465	0,029
5	1,20	0,150	0,060	0,30	0,050	0,60	0,350	0,395	0,020
6	1,50	0,130	0,052	0,30	0,042	0,60	0,170	0,260	0,011
7	1,80	0,120	0,048	0,30	0,038	0,60	0,140	0,155	0,006
8	2,10	0,090	0,036	0,30	0,032	0,60	0,170	0,155	0,005
9	2,40	0,070	0,028	0,30	0,024	0,60	0,160	0,165	0,004
10	2,70	0,070	0,028	0,30	0,021	0,60	0,000	0,080	0,002
					<b>0,44</b>	<b>5,75</b>	Q (m3/s)		<b>0,136</b>
							Q (lps)		<b>135,73</b>

Lugar: Palacé - Bocatoma  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 5/12//2017  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,250	0,100	0,00		0,25	0,330		
2	1,00	0,360	0,144	1,00	0,305	2,01	0,520	0,425	0,130
3	2,00	0,280	0,112	1,00	0,320	2,00	0,360	0,440	0,141
4	3,00	0,300	0,120	1,00	0,290	2,00	0,620	0,490	0,142
5	4,00	0,250	0,100	1,00	0,275	2,00	0,190	0,405	0,111
6	5,00	0,300	0,120	1,00	0,275	2,00	0,160	0,175	0,048
7	6,00	0,340	0,136	1,00	0,320	2,00	0,150	0,155	0,050
8	7,00	0,540	0,216	1,00	0,440	2,02	0,530	0,340	0,150
9	8,00	0,580	0,232	1,00	0,560	2,00	0,640	0,585	0,328
10	9,00	0,520	0,208	1,00	0,550	2,00	0,440	0,540	0,297
11	10,00	0,710	0,284	1,00	0,615	2,02	0,630	0,535	0,329
12	11,00	0,750	0,300	1,00	0,730	2,00	0,620	0,625	0,456
13	12,00	0,650	0,260	1,00	0,700	2,00	0,840	0,730	0,511
14	13,00	0,850	0,340	1,00	0,750	2,02	0,930	0,885	0,664
15	14,00	0,800	0,320	1,00	0,825	2,00	0,550	0,740	0,611
16	15,00	0,750	0,300	1,00	0,775	2,00	0,100	0,325	0,252
17	16,00	0,700	0,280	1,00	0,725	2,00	0,230	0,165	0,120
18	17,00	0,750	0,300	1,00	0,725	2,00	0,330	0,280	0,203
19	18,00	0,600	0,240	1,00	0,675	2,01	0,140	0,235	0,159
20	19,00	0,550	0,220	1,00	0,575	2,00	0,000	0,070	0,040
21	20,00	0,580	0,232	1,00	0,565	2,00	0,160	0,080	0,045
22	21,00	0,530	0,212	1,00	0,555	2,00	0,360	0,260	0,144
23	22,00	0,600	0,240	1,00	0,565	2,00	0,230	0,295	0,167
24	23,00	0,450	0,180	1,00	0,525	2,01	0,170	0,200	0,105
					<b>12,64</b>	<b>46,36</b>	Q (m3/s)		<b>5,201</b>
							Q (lps)		<b>5.200,90</b>

- Campaña de monitoreo 2.

Lugar Palacé - Juntas  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,330	0,132	0,00		0,33	0,134		
2	0,70	0,420	0,168	0,70	0,263	1,41	0,597	0,365	0,096
3	1,40	0,300	0,120	0,70	0,252	1,41	0,551	0,574	0,145
4	2,10	0,300	0,120	0,70	0,210	1,40	0,834	0,693	0,145
5	2,80	0,280	0,112	0,70	0,203	1,40	0,510	0,672	0,136
6	3,50	0,650	0,260	0,70	0,326	1,49	0,361	0,435	0,142
7	4,20	0,600	0,240	0,70	0,438	1,40	1,722	1,042	0,456
8	4,90	0,730	0,292	0,70	0,466	1,41	1,647	1,685	0,784
					<b>1,25</b>	<b>7,44</b>	Q (m3/s)		<b>0,664</b>
							Q (lps)		<b>664,04</b>

Lugar Palacé - Chuscales  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,200	0,080	0,00		0,20	0,104		
2	0,50	0,150	0,060	0,50	0,088	1,00	0,413	0,259	0,023
3	1,00	0,300	0,120	0,50	0,113	1,02	0,291	0,352	0,040
4	1,50	0,300	0,120	0,50	0,150	1,00	0,239	0,265	0,040
5	2,00	0,500	0,200	0,50	0,200	1,04	0,579	0,409	0,082
6	2,50	0,380	0,152	0,50	0,220	1,01	0,333	0,456	0,100
7	3,00	0,400	0,160	0,50	0,195	1,00	0,222	0,278	0,054
8	3,50	0,200	0,080	0,50	0,150	1,04	0,039	0,131	0,020
					<b>1,12</b>	<b>7,32</b>	Q (m3/s)		<b>0,358</b>
							Q (lps)		<b>357,99</b>

Lugar Palacé - Puente Cazadores  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,370	0,148	0,00		0,37	0,039		
2	0,50	0,450	0,180	0,50	0,205	1,01	0,046	0,042	0,009
3	1,00	0,650	0,260	0,50	0,275	1,04	0,163	0,104	0,029
4	1,50	0,800	0,320	0,50	0,363	1,02	0,291	0,227	0,082
5	2,00	0,780	0,312	0,50	0,395	1,00	0,316	0,304	0,120
6	2,50	0,750	0,300	0,50	0,383	1,00	0,271	0,293	0,112
7	3,00	0,700	0,280	0,50	0,363	1,00	0,068	0,170	0,061
					<b>1,98</b>	<b>6,44</b>	Q (m3/s)		<b>0,413</b>
							Q (lps)		<b>413,18</b>

Lugar Palacé - puente Palacé 1 en Gabriel Lopez  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	1,100	0,440	0,00		1,10	0,260		
2	1,00	0,620	0,248	1,00	0,860	2,11	0,320	0,290	0,249
3	2,00	0,590	0,236	1,00	0,605	2,00	0,250	0,285	0,172
4	3,00	0,550	0,220	1,00	0,570	2,00	0,310	0,280	0,160
5	4,00	0,490	0,196	1,00	0,520	2,00	0,120	0,215	0,112
6	5,00	0,390	0,156	1,00	0,440	2,00	0,010	0,065	0,029
7	6,00	0,280	0,112	1,00	0,335	2,01	0,800	0,405	0,136
8	7,00	0,360	0,144	1,00	0,320	2,00	0,730	0,765	0,245
9	8,00	0,350	0,140	1,00	0,355	2,00	0,090	0,410	0,146
10	9,00	0,520	0,208	1,00	0,435	2,01	0,670	0,380	0,165
					<b>4,44</b>	<b>19,24</b>	Q (m3/s)		<b>1,413</b>
							Q (lps)		<b>1.413,15</b>

Lugar Palacé - La Lajita  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,330	0,132	0,00		0,33	0,302		
2	0,10	0,440	0,176	0,10	0,039	0,25	0,375	0,338	0,013
3	0,20	0,440	0,176	0,10	0,044	0,20	0,555	0,465	0,020
4	0,30	0,350	0,140	0,10	0,040	0,23	0,406	0,480	0,019
					<b>0,12</b>	<b>1,01</b>	Q (m3/s)		<b>0,052</b>
							Q (lps)		<b>52,45</b>

Lugar Palacé - Sobretana  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,250	0,100	0,00		0,25	0,239		
2	0,10	0,310	0,124	0,10	0,028	0,22	0,250	0,245	0,007
3	0,20	0,420	0,168	0,10	0,037	0,25	0,186	0,218	0,008
4	0,30	0,380	0,152	0,10	0,040	0,21	0,189	0,187	0,007
5	0,40	0,480	0,192	0,10	0,043	0,24	0,111	0,150	0,006
					<b>0,15</b>	<b>1,16</b>	Q (m3/s)		<b>0,029</b>
							Q (lps)		<b>28,74</b>

Lugar Palacé - Casas Viejas  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,350	0,140	0,00		0,35	0,786		
2	0,80	0,300	0,120	0,80	0,260	1,60	0,541	0,664	0,173
3	1,60	0,350	0,140	0,80	0,260	1,60	0,558	0,550	0,143
4	2,40	0,350	0,140	0,80	0,280	1,60	0,330	0,444	0,124
5	3,20	0,440	0,176	0,80	0,316	1,61	0,524	0,427	0,135
6	4,00	0,440	0,176	0,80	0,352	1,60	0,137	0,330	0,116
7	4,80	0,450	0,180	0,80	0,356	1,60	0,423	0,280	0,100
					<b>1,82</b>	<b>9,96</b>	Q (m3/s)		<b>0,791</b>
							Q (lps)		<b>790,57</b>

Lugar Palacé - Palizada  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,300	0,120	0,00		0,30	0,215		
2	0,30	0,230	0,092	0,30	0,080	0,61	0,399	0,307	0,024
3	0,60	0,250	0,100	0,30	0,072	0,60	0,340	0,369	0,027
4	0,90	0,250	0,100	0,30	0,075	0,60	0,343	0,342	0,026
5	1,20	0,290	0,116	0,30	0,081	0,60	0,316	0,330	0,027
6	1,50	0,250	0,100	0,30	0,081	0,60	0,295	0,305	0,025
7	1,80	0,220	0,088	0,30	0,071	0,60	0,333	0,314	0,022
8	2,10	0,170	0,068	0,30	0,059	0,60	0,274	0,304	0,018
9	2,40	0,140	0,056	0,30	0,047	0,60	0,111	0,192	0,009
					<b>0,56</b>	<b>5,12</b>	Q (m3/s)		<b>0,177</b>
							Q (lps)		<b>176,92</b>

Lugar Palacé - Hatice  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,080	0,032	0,00		0,08	0,075		
2	0,70	0,210	0,084	0,70	0,102	1,41	0,350	0,213	0,022
3	1,40	0,400	0,160	0,70	0,214	1,43	0,551	0,451	0,096
4	2,10	0,280	0,112	0,70	0,238	1,41	0,382	0,467	0,111
5	2,80	0,320	0,128	0,70	0,210	1,40	0,749	0,565	0,119
6	3,50	0,300	0,120	0,70	0,217	1,40	0,697	0,723	0,157
7	4,20	0,200	0,080	0,70	0,175	1,41	0,548	0,623	0,109
8	4,80	0,110	0,044	0,60	0,093	1,21	0,271	0,409	0,038
					<b>1,25</b>	<b>9,74</b>	Q (m3/s)		<b>0,651</b>
							Q (lps)		<b>651,49</b>

Lugar Palacé - El Baho  
 Altitud (msnm):  
 fecha: 23/04/2019  
 Longitud:

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,200	0,080	0,00		0,20	0,333		
2	0,50	0,200	0,080	0,50	0,100	1,00	0,143	0,238	0,024
3	1,00	0,250	0,100	0,50	0,113	1,00	0,392	0,268	0,030
4	1,50	0,260	0,104	0,50	0,128	1,00	0,545	0,468	0,060
5	2,00	0,340	0,136	0,50	0,150	1,01	0,437	0,491	0,074
6	2,50	0,350	0,140	0,50	0,173	1,00	0,496	0,467	0,080
7	3,00	0,310	0,124	0,50	0,165	1,00	0,111	0,303	0,050
8	3,50	0,320	0,128	0,50	0,158	1,00	0,302	0,206	0,032
9	4,00	0,150	0,060	0,50	0,118	1,03	0,493	0,397	0,047
					<b>1,10</b>	<b>8,24</b>	Q (m3/s)		<b>0,397</b>
							Q (lps)		<b>396,95</b>



Lugar  
 Altitud (msnm):  
 fecha:  
 Longitud:

Palacé - Bocatoma

23/04//2019

Punto	Distancia (m)	Profundidad (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Velocidad Puntual (m/s)	Velocidad Media (m/s)	Caudal (m3/s)
1	0,00	0,340	0,136	0,00		0,34	0,480		
2	1,00	0,420	0,168	1,00	0,380	2,00	0,720	0,600	0,228
3	2,00	0,360	0,144	1,00	0,390	2,00	0,540	0,630	0,246
4	3,00	0,370	0,148	1,00	0,365	2,00	0,810	0,675	0,246
5	4,00	0,320	0,128	1,00	0,345	2,00	0,280	0,545	0,188
6	5,00	0,370	0,148	1,00	0,345	2,00	0,240	0,260	0,090
7	6,00	0,300	0,120	1,00	0,335	2,00	0,220	0,230	0,077
8	7,00	0,550	0,220	1,00	0,425	2,03	0,760	0,490	0,208
9	8,00	0,600	0,240	1,00	0,575	2,00	0,810	0,785	0,451
10	9,00	0,540	0,216	1,00	0,570	2,00	0,660	0,735	0,419
11	10,00	0,750	0,300	1,00	0,645	2,02	0,880	0,770	0,497
12	11,00	0,780	0,312	1,00	0,765	2,00	0,850	0,865	0,662
13	12,00	0,680	0,272	1,00	0,730	2,00	0,960	0,905	0,661
14	13,00	0,810	0,324	1,00	0,745	2,01	0,990	0,975	0,726
15	14,00	0,840	0,336	1,00	0,825	2,00	0,730	0,860	0,710
16	15,00	0,790	0,316	1,00	0,815	2,00	0,140	0,435	0,355
17	16,00	0,760	0,304	1,00	0,775	2,00	0,310	0,225	0,174
18	17,00	0,770	0,308	1,00	0,765	2,00	0,500	0,405	0,310
19	18,00	0,650	0,260	1,00	0,710	2,01	0,200	0,350	0,249
20	19,00	0,620	0,248	1,00	0,635	2,00	0,000	0,100	0,064
21	20,00	0,610	0,244	1,00	0,615	2,00	0,240	0,120	0,074
22	21,00	0,630	0,252	1,00	0,620	2,00	0,470	0,355	0,220
23	22,00	0,600	0,240	1,00	0,615	2,00	0,270	0,370	0,228
24	23,00	0,450	0,180	1,00	0,525	2,01	0,210	0,240	0,126
					<b>13,52</b>	<b>46,44</b>	Q (m3/s)		<b>7,207</b>
							Q (lps)		7.206,50

#### 10.4. Resultados de análisis de calidad del agua de segunda campaña de monitoreo.

Tabla 24. Resultados de análisis de calidad del agua para las muestras del segundo monitoreo

Análisis	Unidades	Juntas	Palacé 1	Cazadores	Chuzcales	La Lajita	Sobretana	Casas viejas	Palizada	El Baho	El Hatico	Bocatoma
Conductividad	πS/cm	29,4	18,8	50,8	36,8	73,2	70,7	23,2	71,1	38,3	57,7	62,4
Turbiedad	NTU	1,71	7,88	23,00	4,06	7,50	23,50	27,80	7,64	22,80	2,88	32,50
Color aparente	UPC	62,0	74,4	79,6	66,2	37,4	74,8	78,8	15,4	68	23,5	88,6
pH	und de pH	7,5	7,7	7,3	7,9	7,5	7,7	7,5	7,8	7,8	7,2	7,8
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	4,7	4,7	22,3	15,3	37,4	34,5	9,4	36,7	9,8	31,7	18,8
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	0,00	0,00	9,96	6,10	14,60	6,51	0,00	14,64	12,20	75,02	8,70
Hierro total	mg/L Fe(II)	0,75	0,83	0,98	0,89	3,29	3,07	2,03	0,41	0,71	0,22	2,31
Nitratos	mg/L NO <sub>3</sub> -	3,00	2,30	2,14	2,39	2,90	2,86	2,19	1,86	3,01	1,22	2,16
Nitritos	mg/L NO <sub>2</sub> -	0,000	0,003	0,014	0,005	0,010	0,012	0,006	0,007	0,010	0,007	0,007
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub>	7,00	6,98	7,11	7,12	7,16	7,40	7,03	2,37	8,13	1,43	8,54
Cloruros	mg/L Cl-	0,00	0,00	0,00	0,00	1,57	2,00	0,00	0,19	0,00	5,70	0,98
Aluminio	mg/L Al(III)	0,15	0,16	0,14	0,12	0,06	0,04	0,14	0,07	0,11	0,02	0,08
Temperatura	°C	10,0	11,0	12,0	11,0	13,0	12,0	10,5	14,0	12,0	13,0	14,0
SDT	mg/L	14,7	9,4	25,4	18,4	36,6	35,4	11,6	35,6	19,2	22,1	31,2
OD	mg/L	7,2	5,2	6,8	7,5	9,5	9,4	7,5	9,6	9,1	8,6	8,9
DBO	mg/L	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Coliformes totales	NMP/100 mL	717	9208	24196	2187	11199	15531	12033	4352	3448	10462	12997
Coliformes fecales	NMP/100 mL	10	1130	24196	228	771	1259	1354	488	504	272	1467

