

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MOLINO EN EL ÁREA
URBANA DE LA CIUDAD DE POPAYÁN – CAUCA**



DANNY REINALDO CAICEDO ZAMBRANO

YIMMY ERASO HUERTAS

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE

PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

INVESTIGACIÓN

POPAYÁN, 2017

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MOLINO EN EL ÁREA
URBANA DE LA CIUDAD DE POPAYÁN – CAUCA**



DANNY REINALDO CAICEDO ZAMBRANO

YIMMY ERASO HUERTAS

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

DIRECTOR

ING. FABIAN FERNANDEZ

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE

PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

INVESTIGACIÓN

POPAYÁN, 2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y los jurados del trabajo de grado, modalidad de trabajo de investigación: “MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MOLINO EN EL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE POPAYÁN – CAUCA” realizado por YIMMY ERASO HUERTAS Y DANNY REINALDO CAICEDO ZAMBRANO. Una vez revisado el informe final y aprobada la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar al título Profesional de ingenieros Ambientales y Sanitarios.

FIRMA DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro tan especial en mi vida a mis padres **ALVARO RODRIGO ERASO ROSALES** y **DEANIRA HUERTAS TORO**, por estar siempre pendientes en mi vida, por su apoyo, amor, esfuerzo y todos sus aportes financieramente para hacer realidad esta meta alcanzada.

YIMMY ERASO H.

Este trabajo de grado está dedicado a mis padres: **NELSON CAICEDO IMBACHI** y **FLOR MARIA ZAMBRANO** por su constante esfuerzo y actitud para llevarme siempre adelante, sus consejos y apoyo fueron imprescindibles para alcanzar esta meta y lo serán para las muchas que me faltan.

DANNY CAICEDO

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a nuestros padres, quienes con su amor nos inculcaron valores, nos enseñaron a enfrentar las dificultades, nos impulsan a seguir adelante y por habernos brindado la oportunidad de prepararnos académicamente para lograr nuestras metas.

A nuestra familia y amigos por estar siempre pendientes de nosotros en esta etapa tan importante en nuestras vidas y por ofrecernos su amistad y comprensión.

A la Dra. Liliana Recaman Mejía, Jefe de División Ambiental de la Empresa Acueducto y Alcantarillado de Popayán y demás compañeros de la oficina, por la gestión, orientación, apoyo, disposición y financiación brindada para la ejecución de este proyecto.

A Diego Zuluaga Vera, Director de Laboratorio Ambiental CRC por darnos la oportunidad y confianza de realizar este importante trabajo. Además de su colaboración y siempre tener la mejor actitud de recibirnos.

Al profesor Juan Pablo Catamusca, por el apoyo, paciencia y orientación al principio de este trabajo, sin su compromiso, responsabilidad, dedicación y exigencia no tendríamos estos resultados.

Y por último y no menos importante a mi compañero de trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I: PROBLEMA	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. Objetivo general	19
1.3.2. Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES	20
2.1. ANTECEDENTES	20
2.2. BASES TEORICAS	21
2.2.1. Parámetros de medición.....	21
2.2.2. Protocolo de modelación.	24
2.2.3. Selección de modelos.	25
2.2.4. Descripción del modelo Qual2kw.	25
2.2.4.1. Segmentación hidráulica.....	28
2.2.4.2. Balance de flujo.....	29
2.2.4.3. Definición de arranque.	30
2.2.4.4. Información general hojas de Excel.	30
2.2.4.5. Monitoreo de calidad del agua	33
2.2.4.6. Constantes hidráulicas.....	34
2.2.4.7. Constantes cinéticas.	34
2.2.4.8. Calibración del modelo.....	34

2.2.4.9. Confirmación del modelo.....	36
2.2.5. Descripción del modelo Streeter & Phelps.	36
2.3. BASES LEGALES	37
CAPITULO III: METODOLOGÍA	38
3.1 FASE I.....	38
3.1.1. Descripción sub-cuenca río Molino.....	38
3.1.2. Localización.....	39
3.1.3. Información existente.	41
3.1.4. Recopilación de información.	43
3.1.5. Identificación de fuentes puntuales.	44
3.1.6. Monitoreo de calidad del agua.	44
3.1.7. Definición de constantes hidráulicas.	45
3.1.8. Definición de variables meteorológicas.	46
3.1.9. Datos de entrada del modelo.	47
3.1.10. Calibración de los modelos.	50
3.1.11. Confirmación de los modelos.	51
3.2. FASE II	53
3.2.1. Planteamiento de escenarios	53
3.3. FASE III	54
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	56
4.1. FASE I: CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DE LOS MODELOS.....	56
4.2. FASE II: PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS.....	61
4.3. FASE III: COMPARACIÓN DE LOS MODELOS	66
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
5.1. CONCLUSIONES.....	70
5.2. RECOMENDACIONES.....	71

BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXOS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Protocolo de modelación.....	24
Figura 2. Segmentación hidráulica consultada.....	28
Figura 3. Segmentación hidráulica del río Molino.	29
Figura 4. Balance de flujo.	29
Figura 5. Calibración del modelo.....	35
Figura 6. Ubicación micro cuenca río Molino.	38
Figura 7. Puntos de entrada y salida río Molino en la ciudad de Popayán.....	39
Figura 8. Sectores atendidos por las PTAP en Popayán.	40
Figura 9. Planta de tratamiento de agua potable Tulcán.....	40
Figura 10. Vertimiento Aeronáutica Civil y Pandiguando.	41
Figura 11. Identificación de fuentes puntuales sobre el río Molino.....	44
Figura 12. Ecuaciones predictivas para calcular tasas de re aireación.	46

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Calibración y confirmación de OD.	57
Gráfica 2. Calibración y confirmación de OD modelo Streeter & Phelps.....	57
Gráfica 3. Calibración y confirmación de DBO ₅	58
Gráfica 4. Calibración y confirmación de DBO ₅ modelo Streeter & Phelps.	58
Gráfica 5. Calibración y confirmación de caudal.	59
Gráfica 6. Calibración y confirmación de temperatura.	59
Gráfica 7. Calibración y confirmación de solidos suspendidos totales.	60
Gráfica 8. Calibración y confirmación de pH.	60
Gráfica 9. Calibración microorganismos patógenos.....	61
Gráfica 10. Simulación de escenarios 1 y 2 en OD.....	62
Gráfica 11. Simulación de escenarios 1 y 2 en OD Streeter & Phelps.....	62
Gráfica 12. Simulación de escenarios 1 y 2 en DBO ₅	63
Gráfica 13. Simulación de escenarios 1 y 2 en DBO ₅ Streeter & Phelps.	63
Gráfica 14. Simulación de escenarios 1 y 2 en caudal.....	64
Gráfica 15. Simulación de escenarios 1 y 2 en temperatura.....	64
Gráfica 16. Simulación de escenarios 1 y 2 en SST.	65
Gráfica 17. Simulación de escenarios 1 y 2 en pH.....	65
Gráfica 18. Simulación de escenarios 1 y 2 en microorganismos patógenos. .	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de modelos y sus características.....	26
Cuadro 2. Constantes cinéticas de calibración en el modelo Qual2Kw.	35
Cuadro 3. Normatividad ambiental relacionada con la calidad del agua.....	37
Cuadro 4. Datos históricos de parámetros para modelación en el río Molino. .	42
Cuadro 5. Consideraciones para seleccionar el río a modelar.....	43
Cuadro 6. Sitios de aforo y muestreo sobre el río Molino.	45
Cuadro 7. Características hidráulicas de los sitios de aforo.....	45
Cuadro 8. Resultados del laboratorio de la CRC.	46
Cuadro 9. Constantes hidráulicas para n de Manning.	46
Cuadro 10. Datos de entrada en el modelo Qual2kw.....	47
Cuadro 11. Datos de entrada modelo Qual2kW.....	48
Cuadro 12. Datos de entrada hoja reach modelo Qual2kW.....	48
Cuadro 13. Datos de entrada hoja point sources modelo Qual2kW.....	48
Cuadro 14. Datos de entrada hoja wq data modelo Qual2kw.	49
Cuadro 15. Datos de entrada hoja hydraulics data modelo Qual2kw.....	49
Cuadro 16. Datos entrada puntos de monitoreo modelo Streeter & Phelps.....	49
Cuadro 17. Constantes cinéticas de calibración en el modelo Qual2Kw.	50
Cuadro 18. Datos de entrada hoja rates modelo Qual2kw.....	50
Cuadro 19. Constantes cinéticas de calibración modelo Streeter & Phelps.....	51
Cuadro 20. Desviación estándar (S) de parámetros históricos a modelar.	52
Cuadro 21. Promedio de parámetros históricos a modelar en el río Molino.....	53
Cuadro 22. Resultados obtenidos de las gráficas de OD (mg/L).	66
Cuadro 23. Resultados obtenidos de las gráficas de DBO ₅ (mg/L).....	67

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Equipos y materiales para la toma de muestras.	78
Anexo 2. Aforo y toma de muestras Pueblillo.	78
Anexo 3. Aforo y toma de muestras Tributario Cantera.	79
Anexo 4. Aforo y toma de muestras Pte. Bolívar.....	79
Anexo 5. Aforo y toma de muestras Vertimiento Aeronáutica Civil.	80
Anexo 6. Aforo y toma de muestras Vertimiento Pandiguando.....	80
Anexo 7. Aforo y toma de muestras Tributario río Ejido.....	81
Anexo 8. Aforo y toma de muestras unión Molino y Ejido.	81
Anexo 9. Formato para recolección de datos en campo del río.	82
Anexo 10. Formato para recolección de datos en campo de vertimientos.	82
Anexo 11. Resultados en puntos de monitoreo sobre el río.....	83
Anexo 12. Resultados en puntos de monitoreo en vertimientos entregados. .	85
Anexo 13. Datos de entrada modelo Qual2kw.	86
Anexo 14. Calibración en el modelo Qual2kw época de invierno.....	87
Anexo 15. Confirmación en el modelo Qual2kw época de verano.	88
Anexo 16. Simulación implementando la PTAR en el modelo Qual2k.	89
Anexo 17. Simulación aumentando la carga contaminante en Qual2kw.....	90
Anexo 18. Puntos críticos para la distribución de t de student.	91

RESUMEN

Se realizó la modelación de calidad del agua del río Molino a través de los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps en el área urbana de la ciudad de Popayán, Departamento del Cauca, cuyo curso de agua recibe descargas directas de aguas residuales de algunos sectores de la ciudad, degradando su diversidad biológica y generando problemáticas como la proliferación de vectores y la generación de malos olores.

Una alternativa para mejorar esta situación es la implementación de modelos matemáticos como el Qual2kw y Streeter & Phelps que permiten a partir de escenarios o simulaciones recreadas tomar decisiones apropiadas para la gestión y planeación de los recursos naturales, como también la intervención en obras de saneamiento con la finalidad de dar un manejo adecuado a las descargas de aguas residuales.

Se recolectó información de variables climatológicas, a su vez, se tuvo en cuenta datos históricos de parámetros fisicoquímicos del río Molino desde el año 2005 hasta el año 2016 y se realizó una campaña de monitoreo en el año 2017, considerando una longitud de 10 km en 7 puntos de muestreo de esta manera: 3 sobre la fuente hídrica (parte alta, media y baja), 2 tributarios y 2 vertimientos, en los cuales se hizo un análisis estadístico para reducir el margen de error y para comparar los resultados de OD y DBO₅ del modelo Qual2kw con respecto al Streeter & Phelps.

Posteriormente los resultados obtenidos en campo se ingresaron a los modelos en donde se realizó la calibración y confirmación de los mismos para tener escenarios confiables y robustos. Las simulaciones obtenidas en el presente estudio determinaron que la calidad del agua del río Molino se encuentra en condiciones críticas y necesita ser intervenida para mejorar su calidad, estableciendo mediante escenarios que se debe coleccionar los dos vertimientos que descargan sobre el río Molino para su respectivo tratamiento.

Palabras clave: Calidad del agua, Escenarios, Modelación, Qual2kw y Streeter & Phelps.

ABSTRACT

The modeling of water quality of the Molino River was carried out through the Qual2kw and Streeter & Phelps models in the urban area of the city of Popayán, Department of Cauca, whose water course receives direct discharges of wastewater from some sectors of the city, degrading its biological diversity and generating problems such as the proliferation of vectors and the generation of bad odors.

An alternative to improve this situation is the implementation of mathematical models such as Qual2kw and Streeter & Phelps which, from scenarios or recreated simulations, allow to make appropriate decisions for the management and planning of natural resources, as well as intervention in sanitation works with the purpose of giving an adequate management to wastewater discharges.

Information on climatological conditions was collected, in turn, historical data of physicochemical parameters of the river Molino from 2005 to 2016 was taken into account and monitoring campaign was carried out in the year 2017, considering a length of 10 km in 7 sampling points in this way: 3 on the water source (high, medium and low), 2 tributaries and 2 dumpings, in which a statistical analysis was made to reduce the margin of error and to compare the OD and DBO5 results of the Qual2kw model with respect to the Streeter & Phelps.

Subsequently, the results obtained in the field were input the models where the calibration and confirmation of them were carried out in order to have reliable and comprehensive scenarios. The simulations obtained in this study determined that the water quality of the Molino River is in critical conditions and needs to be intervened to improve its quality, establishing by means of scenarios that the two discharges that discharge over the Molino River should be collected. its respective treatment

Key words: Water quality, Scenarios, Modeling, Qual2kw y Streeter & Phelps.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, a nivel global el recurso hídrico es de gran importancia para el suministro de agua doméstica, industrial y agropecuaria que dependen de un agua segura tanto en calidad como en cantidad [1]. Por otra parte, las intervenciones antrópicas de una ciudad que presentan descargas de vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, sin ningún tratamiento en un receptor de agua a lo largo de su trayectoria, generan cambios o alteraciones en sus características hidráulicas y físico-químicas. Estos cambios se ven reflejados en las diferentes variaciones de cada parámetro de calidad del agua, manifestando un interés científico por predecir el comportamiento del agua, dando lugar a que se iniciaran los primeros estudios para conocer la dinámica de los diferentes procesos en una fuente hídrica [2].

Estas predicciones son posibles mediante estudios de modelos matemáticos de calidad del agua que deben ser vistos como una herramienta importante para evaluar las alternativas propuestas por los planificadores del recurso hídrico [3], a su vez, refleja la capacidad de asimilación y dilución de contaminantes del cuerpo receptor, permitiendo realizar una evaluación de las descargas de aguas residuales [4], lo que se constituye en una herramienta muy útil en la planificación de estrategias de saneamiento y manejo de vertimientos [5]. Este tipo de modelos generalmente son los más implementados debido a que entregan mayor facilidad de incluir nuevos vertimientos o disminuciones de otros permitiendo además la creación de escenarios a futuro.

Actualmente en Colombia el Decreto 3930 de 2010 en sus Artículos 6 y 7 plantea la necesidad y pertinencia de usar modelos de simulación de la calidad del agua, que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables [6].

Es así, como se presenta en el caso del río Molino que en su recorrido atraviesa la ciudad de Popayán y durante su transcurso recibe descargas de

vertimientos directos de agua residual doméstica, de esta manera se llevó a cabo la modelación de calidad del agua aplicando los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps, en donde a través de las simulaciones obtenidas se pudo evaluar la concentración de algunos parámetros de calidad del agua a lo largo del tramo, logrando alcanzar resultados satisfactorios.

CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia cerca del 90% de los ríos se encuentran contaminados [7]; se estima que 756.945 t/año de materia orgánica biodegradable son vertidas a los sistemas hídricos, mientras que la materia orgánica no biodegradable, es decir sustancias químicas se estima en 918.670 t/año [8].

En el departamento del Cauca en su Plan Departamental de Aguas y Saneamiento Básico (PDASB) estableció que el 67% de los municipios tienen un manejo inadecuado de las aguas residuales municipales y las fuentes receptoras se encuentran en un estado crítico [9].

La cuenca del río Cauca y las subcuencas Molino y Ejido que pasan por la ciudad de Popayán reciben directamente la disposición final de las aguas residuales domésticas y comerciales [10], con una carga contaminante de 48,23% de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Sólidos Suspendido Totales (SST) según el PDASB, alterando la composición hidrológica, físico-química y biológica de los cuerpos de agua [9].

Entidades gestoras como la empresa prestadora del servicio de Acueducto y Alcantarillado (planificación y gestión) y la alcaldía (recursos) del municipio de Popayán tienen proyectada la implementación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para tratar las descargas de vertimientos de aguas residuales domésticas [11].

La falta de esta tecnología en la ciudad implica que la autodepuración del río Molino tenga mayores inconvenientes, causando problemas como degradación del ecosistema para las generaciones presentes y futuras, así como la generación de malos olores, proliferación de vectores, cambio de color y de temperatura, enturbiamiento, disminución de la concentración necesaria de oxígeno para la vida acuática, pérdida de la diversidad biológica y la producción de enfermedades patógenas en el hombre [12]. Dadas estas circunstancias se

requiere realizar la modelación de la calidad del agua con los software Qual2kw y Streeter & Phelps, que permitan plantear soluciones para mejorar su calidad.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La normatividad de Colombia plantea en el Decreto 3930 de 2010, la necesidad y pertinencia de formular los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) [6]. Para esto actualmente se desarrollan simulaciones por medio de un modelo matemático. Esto se da, porque estos modelos facilitan la determinación de escenarios futuros para el manejo de calidad del agua de las corrientes superficiales, y no en las pruebas analíticas que se deben hacer a menudo para establecer las condiciones en las que se encuentra, teniendo en cuenta también que esto genera unos costos elevados [13].

En el departamento del Cauca, la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) en sus programas de Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) cuenta con una proyección de objetivos a corto, mediano y largo plazo de calidad del agua de sus cuerpos hídricos. Por lo anterior, en el acuerdo 0015 del 25 de noviembre del 2014, establece proyecciones de metas de reducción en cargas contaminantes en el transcurso del periodo 2015 – 2019 [14], con el propósito de cuidar y proteger la diversidad biológica de los afluentes, como también la planificación de usos potenciales [3].

Para la Autoridad Ambiental es importante conocer la capacidad de autodepuración de las corrientes hídricas e identificar la calidad del agua que generan los vertimientos de aguas residuales en las fuentes receptoras [15]. De esta manera, la CRC en sus proyecciones de metas establece que se controlarán las descargas de carga contaminante en el río Molino en los años 2015 – 2019 [14].

En octubre del año 2015 La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán (AAP) desarrolló un conversatorio en torno a la presentación de las

diferentes acciones realizadas con base al Plan Operativo en pro de la conservación y protección del río Molino, se obtuvo como resultado la ejecución del Proyecto Ciudadano de Educación Ambiental (PROCEDA) financiado por la CRC y AAP [16].

Con las simulaciones de los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps se evaluaron escenarios que permiten analizar soluciones que contribuyan al mejoramiento de la calidad del agua del río Molino. De modo que sea una herramienta de gestión para el cumplimiento de parámetros de calidad del agua establecidos en diferentes normativas, que garanticen condiciones de calidad para el medio ambiente y la comunidad [17].

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Modelar la calidad del agua del río Molino en el área urbana de la ciudad de Popayán por medio de los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps.

1.3.2. Objetivos específicos

- Aplicar los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps temporalmente para determinar la calidad del agua del río Molino.
- Proyectar la calidad del agua del río Molino contemplando obras de saneamiento en su área de influencia urbana.
- Comparar los resultados de Oxígeno Disuelto (OD) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) con el modelo Qual2kw con respecto al modelo Streeter & Phelps.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES

2.1. ANTECEDENTES

Existen diferentes autores que han realizado modelaciones de calidad del agua en ríos y que en sus estudios destacan la aplicabilidad del Qual2k y Qual2kw, afirmando que los parámetros calibrados son muy fiables. En el año 2006 Pelletier confirmó la flexibilidad y aplicabilidad de este modelo para la simulación de la calidad del agua de los ríos [18]. Domínguez en el año 2003 en la ciudad de La Habana establece que el modelo Streeter & Phelps se puede emplear para describir el comportamiento del OD y DBO para valorar alternativas de saneamiento [5].

En China, en el año 2012 Zhang aplicó el modelo Qual2k para calibrar los parámetros de calidad del agua en el río Hongqi, simuló la capacidad de recuperación del agua, estableciendo que la concentración de la DBO aumentó ligeramente a una distancia de 0,9 km debido al vertido de las aguas residuales locales, lo que ayudó a la entidad ambiental a formular normas para la gestión ambiental de la calidad del agua. Posteriormente los valores modelados fueron confirmados el siguiente año, mostrando la confirmación de los resultados verificando que los parámetros calibrados son acertados [19].

Cunha en el año 2015, en la ciudad de Lavras estado de Minas Gerais en Brasil, implementó el modelo Streeter & Phelps con el fin de evaluar el impacto de contaminación de materia orgánica en el río Vermelho, los resultados indicaron problemas ambientales potenciales que ocurren por las descargas de efluentes de esta zona urbana, concluyendo que los modelos son fiables para la gestión de los recursos hídricos [20].

En Timón Brasil, en un estudio desarrollado por Souza en el año 2003, el modelo Qual2k permitió evaluar los cambios en la calidad del agua e identificar los impactos ambientales que se producen en el río Meio; se concluyó la necesidad de una PTAR con un nivel secundario, con una eficiencia del 76%

de remoción de DBO, para que el afluente permanezca con una concentración de OD mayor a 5 mg/L, valor recomendado de la norma [21].

En el río Aburrá de la ciudad de Medellín (Colombia), Prada y Valencia implementaron en el año 2011 los modelos Qual2k y Qual2kw, reportando la necesidad de continuar con las obras de recolección de las aguas residuales proyectadas en el PSMV y la construcción de una PTAR, con el fin de reducir las cargas contaminantes. De igual modo se debe emprender acciones en otras micro cuencas con aporte de carga orgánica, como consecuencia de los vertimientos de aguas residuales domésticas [22].

La Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) en el año 2015 utilizó el modelo Qual2kw para realizar la modelación de la calidad del agua en la quebrada Florida, de la ciudad de Armenia con el fin de identificar el impacto ambiental que se genera por los vertimientos que está recibiendo, se obtuvo como resultado la necesidad de planificar o diseñar obras de tratamiento que reduzcan estos contaminantes a un nivel aceptable [15].

Holguín en el año 2014, en el río Palo departamento del Cauca, implementó y calibró el modelo de simulación Qual2kw en la parte baja del mismo, en el tramo comprendido entre la estación del Puente vía Guachene y la desembocadura al río Cauca. Los resultados de la calibración y verificación del modelo de simulación, muestran un buen ajuste entre los valores calculados por el modelo y los medidos en campo, especialmente el OD y la DBO, de esta forma, se evaluó la capacidad predictiva del modelo ratificando que el modelo de simulación de la calidad del agua del río Palo es robusto y confiable [6].

2.2. BASES TEORICAS

2.2.1. Parámetros de medición

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** corresponde a la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia y se expresa en unidades de mg/L. Esta demanda es ejercida por las sustancias carbonadas, las nitrogenadas y ciertos

compuestos químicos reductores. Es una prueba que reduce a números un fenómeno natural, muy sencillo en teoría, pero en esencia muy complejo. El cálculo se efectúa mediante la determinación del contenido inicial de oxígeno de una muestra dada y lo que queda después de cinco días en otra muestra semejante, conservada en un frasco cerrado a 20 °C. La diferencia entre los dos contenidos corresponde a la DBO₅ [23].

- **Oxígeno Disuelto (OD):** su presencia es esencial en el agua; proviene principalmente del aire. Niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua puede indicar contaminación elevada, condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa; por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación. La presencia de oxígeno disuelto en el agua cruda depende de la temperatura, la presión y la mineralización del agua, se expresa en unidades de mg/L [23].
- **Potencial de Hidrogeno (pH):** influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección. Se considera que el pH de las aguas tanto crudas (no contaminadas) como tratadas debería estar entre 5,0 y 9,0. Por lo general, este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua [23].
- **Conductividad:** la conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, de su carga y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura, expresada en S/cm [23].
- **Temperatura:** es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración. Múltiples factores,

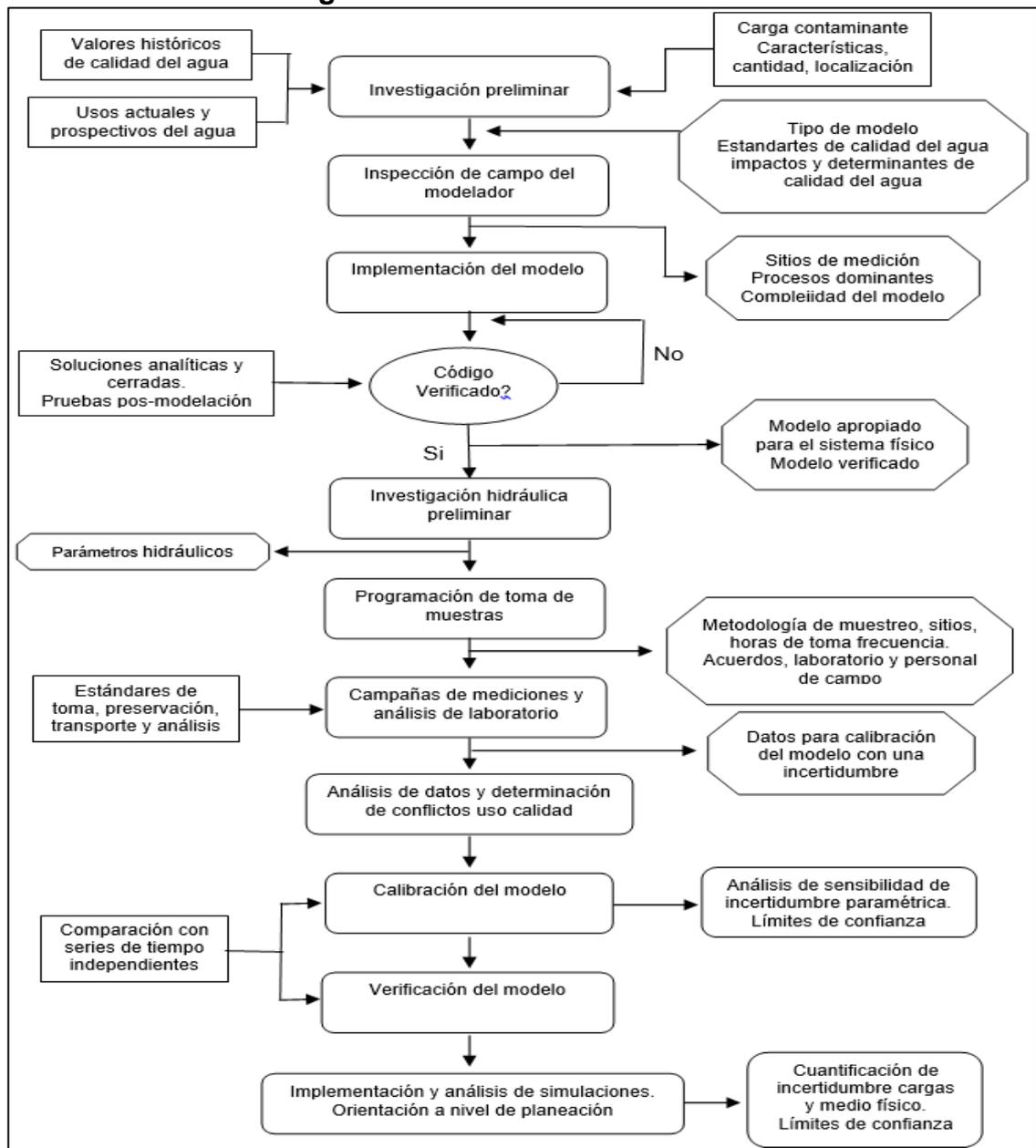
principalmente ambientales, pueden hacer que la temperatura del agua varíe continuamente, expresada en °C [23].

- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio. Es importante como indicador puesto que su presencia disminuye el paso de la luz a través de agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno, se expresa en mg/L [23].
- **Caudal:** en dinámica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo (L/seg) [24].
- **Coliformes:** la denominación genérica coliformes designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos. Coliforme significa con forma de coli, refiriéndose a la bacteria principal del grupo la *Escherichia coli*, descubierta por el bacteriólogo alemán Theodor von Escherichia en 1860, el resultado se expresa en UFC/100 mL [24].
- **Nitritos y Nitratos:** en los sistemas acuáticos y terrestres, los materiales nitrogenados tienden a transformarse en ion nitrato (NO_3^{-1}) muy soluble en el agua. El ion nitrito (NO_2^{-1}) se transforma naturalmente a partir de los nitratos, ya sea por oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en los sistemas acuáticos y terrestres o por reducción bacteriana. El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato, es muy reactivo y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que solo se lo encuentra en cantidades apreciables en condiciones de baja oxigenación. El NO_3^{-1} es la especie derivada del nitrógeno más importante, suponen una fuente de nutrientes importantes para ciertos organismos autótrofos.

Una alta concentración de nitratos puede originar el llamado fenómeno de eutrofización, se expresa en mg/L [24].

2.2.2. Protocolo de modelación. Para obtener una modelación precisa existen diferentes protocolos de modelación, por lo tanto, en este estudio de modelación de calidad del agua en el río Molino se tendrá en cuenta el protocolo de modelación propuesto por Camacho y Díaz [25] como se indica en la figura 1.

Figura 1. Protocolo de modelación.



Fuente: Camacho y Díaz [25].

2.2.3. Selección de modelos. La selección del modelo conlleva analizar las características del modelo en sí (calidad del agua o prevención del riesgo de desastres, versión libre y entre otros), como también las características hidráulicas, fisicoquímicas y/o bacteriológicas de la corriente superficial a modelar; entonces el modelo seleccionado será aquel que se ajuste a las necesidades que pretenda realizar el modelador. En el cuadro 1 se indican las características de algunos modelos, incluyendo los aplicados en el río Molino, el Qual2kw y Streeter & Phelps.

2.2.4. Descripción del modelo Qual2kw. Es un modelo de calidad de agua de ríos y arroyos que pretende representar una versión modernizada del modelo QUAL2E (o Q2E). QUAL2Kw está adaptado del modelo QUAL2K que fue desarrollado originalmente por el Dr. Steven C. Chapra de la Universidad de Tufts [29]. Q2K es similar a Q2E en los siguientes aspectos:

- **Unidimensional:** el canal está bien mezclado vertical y lateralmente.
- **Sistema hidráulico en estado estacionario:** se simula flujo no uniforme y constante.
- **Diel calor presupuesto:** el presupuesto de calor y la temperatura son simulados como una función de la meteorología en una escala de tiempo diel.
- **Cinética de la calidad del agua Diel:** todas las variables de calidad del agua se simulan en una escala de tiempo diel.
- **Entradas de calor y masa:** las cargas puntuales y no puntuales y las abstracciones son simuladas.

El marco QUAL2Kw incluye los siguientes elementos nuevos:

- **El entorno de software e interfaz:** Q2Kw es implementado en el entorno de Microsoft Windows. Está programado en el lenguaje de macros de Windows: Visual Basic para aplicaciones (VBA). Excel se utiliza como la interfaz gráfica de usuario [29].

Cuadro 1. Tipos de modelos y sus características.

Modelo	Características
Quasar	<p>Descripción: Modela un río como una serie de tramos definidos por confluencias de tributarios, vertederos, fuentes de abastecimiento de agua y puede ser corrido en dos modos diferentes: modo planificación y modo dinámico.</p> <p>Parámetros modelados: Caudal, amoníaco, pH, nitratos, temperatura, E. Coli, DBO₅, OD [26].</p> <p>Implementado en: Cuenca El Virrey (Colombia).</p> <p>Desarrollado por: Whitehead, P.E., William, R.J. and Lewis, D.R., 1997.</p>
Mike 11	<p>Descripción: Simula los procesos de reacción de sistemas multicompuestos incluyendo la degradación de la materia orgánica, la fotosíntesis y respiración de las plantas, la nitrificación y el intercambio de oxígeno con la atmósfera. El modelo se acopla al modelo básico de advección - dispersión, lo cual significa que simula los procesos de transformación de diferentes compuestos [26].</p> <p>Parámetros modelados: Temperatura, OD, DBO₅, amoníaco/amonio, fósforo, nitratos, coliformes totales y fecales.</p> <p>Implementado en: Río Cauca (Colombia), río Magdalena (Colombia).</p> <p>Desarrollado por: Instituto de Calidad del Agua de Dinamarca (DHI), 1999.</p>
Streeter & Phelps	<p>Descripción: Es aplicable a ríos con condiciones aerobias, flujo con superficie libre, flujo permanente, unidimensional y que relaciona el abastecimiento de oxígeno disuelto en una corriente de agua, cuando ésta recibe descarga de materia orgánica.</p> <p>Parámetros modelados: OD y DBO₅</p> <p>Implementado en: Río: Vermelho (Brasil), Ubaté (Colombia) y Almendares (Cuba)</p> <p>Desarrollado por: Harold Warner Streeter y Earle Bernard Phelps [27].</p>
Qual2kw	<p>Descripción: Tiene la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, las cuales pueden ser manejadas de manera independiente o integrarse a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario.</p> <p>Parámetros modelados: Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, OD, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal [27].</p> <p>Implementado en: Río: Cauca, Bogotá, Chinchiná, Palo, Sinú, Aburrá y quebrada Manizales (Colombia).</p> <p>Desarrollado por: Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), 2008.</p>
HEC – RAS 4.1	<p>Descripción: Permite pronosticar la dinámica de los niveles de agua en los eventos hidro-meteorológicos extremos de inundación, definiendo las cotas de inundación a través de perfiles transversales, simulando de manera aproximada el comportamiento de la dinámica del recurso hídrico y del cauce con características de: Secciones mojadas variables con cualquier geometría a lo largo del cauce.</p> <p>Tipo de modelación: Este programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 3 tipos de análisis en ríos permite realizar la modelación en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelización de flujo en régimen permanente y no permanente. • Modelización del transporte de sedimentos. <p>Implementado en: Río Bogotá (cuenca media y alta).</p> <p>Desarrollado por: Hydrologic Engineering Center del United Army Corps of Engineering and el Environmental System Research Institute (ESRI) [28].</p>

Fuente: Elaboración propia.

- **Segmentación del modelo:** Q2E segmenta el sistema en tramos del río compuestos de elementos equidistantes. Mientras que el Q2Kw los tramos se pueden distribuir en diferentes distancias. Además permite la inclusión de múltiples cargas y abstracciones del sistema [29].
- **Especiación de DBO carbonosa:** Q2Kw utiliza dos formas de DBO carbonosa para representar el carbono orgánico. La primera es de forma lentamente oxida (CBOD₂₀) y la segunda es de forma rápidamente oxida (CBOD₅) [29].
- **Anoxia:** Q2Kw ajusta el oxígeno reduciendo reacciones de oxidación de cero a niveles bajos de oxígeno. Además, la des nitrificación se modela como una reacción de primer orden que llega a ser pronunciada a bajas concentraciones de oxígeno [29].
- **Sedimento agua interacciones:** los flujos de sedimento de oxígeno disuelto y nutriente son simulados internamente en lugar de ser prescrito. Es decir, son simulados como función de solución de materia orgánica particulada, reacciones dentro de los sedimentos y las concentraciones de formas solubles en las aguas supra yacentes.
- **Algas de fondo:** explícitamente, el modelo simula algas de Fondo Unido. Estas algas tienen estequiometría variable [29].
- **Extinción de luz:** se calcula como una función de sólidos inorgánicos, detritus y algas [29].
- **pH:** la alcalinidad y carbono inorgánico total son simuladas. El pH del río es entonces simulado basado en estas dos cantidades [29].
- **Patógenos:** se simula un patógeno genérico. La eliminación de patógenos se determina en función de la temperatura, la luz y la sedimentación [29].
- **Metabolismo hiperporico:** se simula el intercambio higrorcheico y la calidad del agua de los poros sedimentarios, incluyendo la simulación opcional del metabolismo de las bacterias heterotróficas en la zona hiporréica [29].
- **Calibración automática:** se incluye un algoritmo genético para determinar los valores óptimos para los parámetros de velocidad cinética

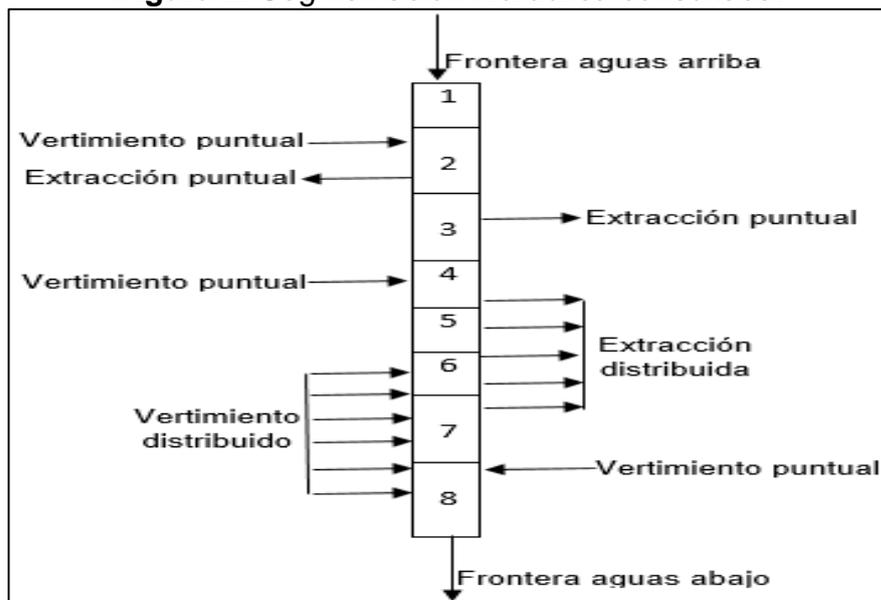
para maximizar la bondad de ajuste del modelo en comparación con los datos medidos [29].

Una vez identificado los elementos anteriores del modelo, se procede a reconocer las demás características que determinan la modelación.

2.2.4.1. Segmentación hidráulica. La representación del tramo que se va a modelar en la corriente superficial corresponde como el tallo principal y se caracteriza por tener fronteras externas e internas. Las fronteras externas consisten en las estaciones de monitoreo de aguas arriba y aguas abajo, mientras que las fronteras internas representan los puntos de salidas (extracción de flujo del tallo principal) y los puntos de entradas (tributarios y vertimientos de flujo que entran al tallo principal).

Además, el modelo incluye si los puntos de entrada son puntos puntuales o fuente difusas, la diferencia radica en que los puntos puntuales son de fácil acceso para tomar las muestras que recibe en el tallo principal y las fuentes difusas consiste en que los vertimientos o extracción son distribuidos, es decir, son de difícil acceso para tomar las muestras y que se las realiza en el tallo principal aguas abajo del vertimiento o extracción figura 2 [29].

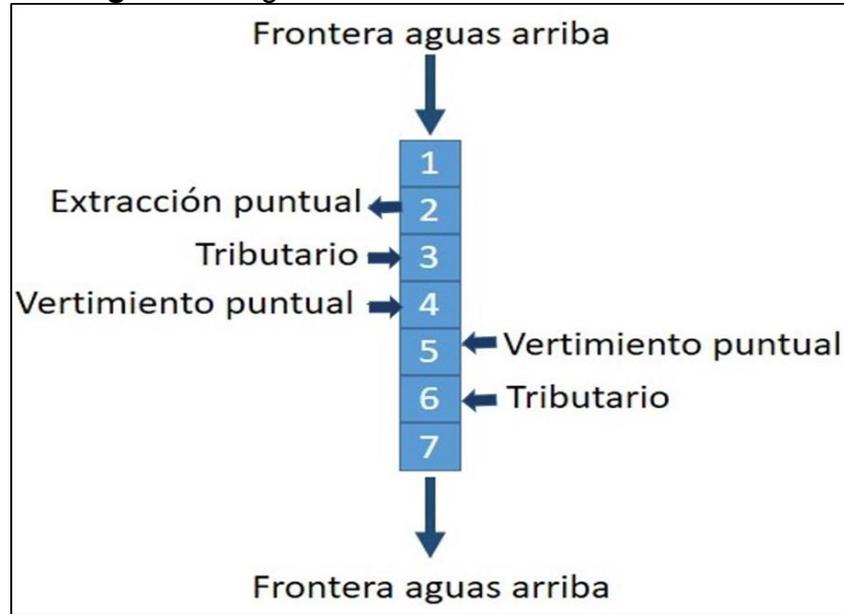
Figura 2. Segmentación hidráulica consultada.



Fuente: Qual2kw user manual [29].

La segmentación hidráulica del río Molino está representada en una extracción, dos vertimientos puntuales y dos tributarios como se observa en la figura 3.

Figura 3. Segmentación hidráulica del río Molino.



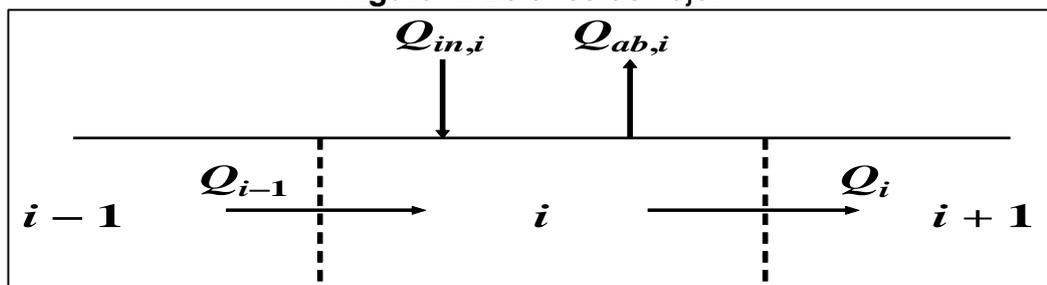
Fuente: Elaboración propia.

2.2.4.2. Balance de flujo. Para el balance de flujo el modelo Qual2kw toma en cuenta la corriente superficial en estado estacionario (los flujos de entrada y salida son constantes en el tiempo) y en estado no uniforme (el caudal varía en su trayecto, en la medida que recibe y/o extraen los aportes de flujo de entrada y salida), como se expresa en la ecuación 1 y figura 4 [29].

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde, Q_i = Caudal de salida de la corriente principal (m^3/d), Q_{i-1} = Caudal de entrada de la corriente principal (m^3/d), $Q_{in,i}$ = Caudal de entrada de las fuentes puntuales y fuentes no puntuales (m^3/d), y $Q_{ab,i}$ = Caudal de las salidas a las extracciones puntuales y no puntuales (m^3/d).

Figura 4. Balance de flujo.



Fuente: Qual2kw user manual [29].

2.2.4.3. Definición de arranque. Para correr el modelo primeramente se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- **Open old files (Abrir archivos antiguos):** cuando se hace clic en este botón, el navegador de archivos se abrirá automáticamente para permitirle acceder a un archivo de datos. Todos los archivos de datos QUAL2Kw tienen la extensión .Q2K [29].
- **Run VBA (Ejecutar VBA):** para ejecutar la versión de VBA del modelo y automáticamente crea un archivo de datos que contiene los valores de entrada. El archivo de datos se puede acceder más tarde usando el botón Abrir archivo antiguo [29].
- **Run Fortran (Ejecutar Fortran):** para ejecutar la versión de Fortran del modelo y crea un archivo de datos que contiene los valores de entrada. El archivo de datos se puede acceder más tarde usando el botón Abrir archivo antiguo. El Fortran y versiones de VBA dan resultados idénticos, salvo la versión en Fortran corre mucho más rápido porque es un programa ejecutable compilado [29].

2.2.4.4. Información general hojas de Excel. Para entender el modelo Qual2kw se necesita comprender las celdas de colores que maneja.

- **Celdas azules:** designa variables y valores de los parámetros que deben ser introducidos por el usuario.
- **Celdas amarillas:** son datos medidos en campo que el usuario introduce. Estos datos se muestran en los gráficos generados por Q2Kw.
- **Celdas verdes:** designa los valores de salida generados por Q2Kw.
- **Celdas oscurecidas:** se utiliza para las etiquetas o títulos y no deben cambiarse.

Para realizar la modelación de calidad del agua, se debe introducir la información básica como datos de entrada en las hojas de Excel. A continuación se especifica cada hoja:

- **Qual2kw (Información del río a modelar):** se introduce información general a modelar como el nombre del río, fecha, zona horaria entre otras.
- **Headwater (Cabecera de la corriente o aguas arriba):** se coloca la información de la calidad del agua inicial o condiciones iniciales de aguas arriba.
- **Reach (Alcance):** se usa para ingresar los datos de cada tramo previamente seleccionados, con sus respectivas coordenadas geográficas en decimales y en grados, minutos y segundos, su elevación, ancho del canal, y permite dos opciones de cálculo las curvas de calificación o la ecuación de maning.
- **Reach rates (Alcance de tasas):** tiene carácter optativo para introducir la información relacionada con llegar a las constantes de velocidad. Los parámetros de tipo en esta hoja son opcionales.
- **Initial conditions (Condiciones iniciales):** las condiciones iniciales especificadas en la presente ficha son opcionales. Si no se especifican a continuación, las condiciones iniciales en la columna de agua para cada alcance se supone que son los mismos datos que los de la cabecera o de aguas arriba.
- **Air temperature (Temperatura del aire):** se introduce la temperatura del aire en grados centígrados por hora para cada uno del alcance del sistema. Si los valores son constantes a lo largo del ciclo diario, se coloca el valor medio.
- **Dew point temperature (Temperatura del punto de rocío):** se utiliza para introducir la temperatura del punto de rocío en grados centígrados para cada uno del alcance del sistema. Si los valores son constantes a lo largo del ciclo diario, se coloca el valor medio.
- **Wind speed (Velocidad del viento):** se introduce la velocidad del viento por hora en metros por segundo para cada uno del alcance del sistema. Si los valores son constantes a lo largo del ciclo diario. Se registra el valor medio.

- **Cloud cover (Nubosidad):** se coloca el porcentaje de nubosidad del cielo cubierto por cada hora. Si los valores son constantes a lo largo del ciclo diario. Se introduce el valor medio.
- **Shade (Sombra):** se registra la sombra en porcentaje que cubre al río a causa de la topografía y vegetación durante cada hora hasta el alcance del sistema. Si los valores son constantes a lo largo del ciclo diario, Se coloca el valor medio.
- **Solar (Radiación solar):** se introduce la radiación solar por hora para cada uno de alcance del sistema. El uso de esta hoja es opcional y los valores introducidos sólo serán utilizados si el usuario selectes "observado" en la celda B16 de la "Hoja de luz y calor".
- **Light and heat (Luz y calor):** se utiliza para introducir la información relacionada con la luz del sistema y los parámetros de calor.
- **Point sources (Fuentes del punto):** se coloca la información de los vertimientos puntuales que recibe el afluente. Se caracterizan por ser fácil de identificar y accesibilidad para tomar las muestras.
- **Diffuse sources (Fuentes difusas):** se ingresa la información difusa relacionada con los vertimientos, es decir, aguas abajo del vertimiento sobre el afluente ya que el acceso resulta difícil para realizar la toma de muestras.
- **Rates (Tasa):** se coloca los parámetros de velocidad del modelo y las opciones para la calibración automática. Q2Kw tiene la capacidad para calibrar automáticamente los parámetros de tipo seleccionado.

El usuario tiene la opción de especificar los valores para cada tipo de parámetro que se utilizarán, ó el Q2Kw permite auto-calibrar los parámetros seleccionados. En la columna E se utiliza para seleccionar "Sí" o "No" para seleccionar "Si" el parámetro de tipo específico se calibra automáticamente. Si "No" está seleccionada en la columna E para un parámetro de tipo específico, los valores consignados en la columna B serán utilizados para la simulación.

Los valores en la columna B, siempre se usan cuando uno de los " Run Fortran ó Run VBA" o se hace clic en los botones. Columnas E, F, G, y

sólo se utilizan si el programa de calibración automática Q2Kw se ejecuta con la "Run Auto-Cal". Utilice la columna E para seleccionar si se debe incluir un tipo específico constante en la calibración automática.

- **Warnings (Advertencias):** se indica las advertencias que se producen cuando se ejecuta el modelo. Es una buena idea inspeccionar la Hoja de Avisos después de ejecutar el modelo. Si las entradas están mal detectadas en algunas de las hojas de entrada a continuación advertencias pueden ser proporcionados.
- **Hydraulics data (Datos hidráulicos):** se ingresan los datos relacionados con las características hidráulicas del sistema.
- **Temperature data (Datos de temperatura):** se introducen los datos de temperatura del agua del río a modelar.
- **WQ data (Datos de calidad del agua):** se registran los valores medios diarios para los datos de calidad del agua del río a modelar.
- **WQ data min (Datos de calidad del agua mínima):** se introduce los valores mínimos diarios para los datos de calidad del agua. Estos datos son opcionales.
- **WQ data max (Datos de calidad del agua máxima):** se ingresan los valores máximos diarios para los datos de calidad del agua. Estos datos son opcionales.
- **Diel data (Datos diel):** se utiliza para introducir datos Diel para un alcance seleccionado, dentro del tramo seleccionado es decir a un nuevo alcance (opcional).

2.2.4.5. Monitoreo de calidad del agua. Para el funcionamiento del modelo, se necesitarán datos medidos en campo de calidad del agua en los tramos a estudiar de fronteras externas e internas, en donde se representan respectivamente:

- Las condiciones de aguas arriba y/o aguas debajo de la corriente superficial.
- Las condiciones de extracciones (salida de flujo) y/o vertimientos (entrada de flujo) del río a modelar.

2.2.4.6. Constantes hidráulicas. El modelo Qual2kw maneja dos formas para calcular las constantes hidráulicas, mediante las curvas de relaciones hidráulicas y mediante la Ecuación de Manning. La elección de los métodos se deberá a la disponibilidad de información del autor. A continuación se describe cada método:

- **Rating curves (Curvas de relaciones hidráulicas):** las ecuaciones 2 y 3 se pueden utilizar para relacionar la velocidad y la profundidad media con el flujo.

$$U = aQ^b \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$H = \alpha Q^\beta \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde a , b , α y β son coeficientes empíricos que se determinan a partir de las curvas de velocidad, velocidad (U), profundidad (H) y caudal (Q).

- **Ecuación de Manning:** en condiciones de estado estable, la ecuación de Manning puede usarse para expresar la relación entre flujo y profundidad como se observa en la ecuación 4.

$$Q = \frac{S_0^{\frac{1}{2}} \times A_c^{\frac{5}{3}}}{nP^{\frac{2}{3}}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde, caudal (Q), pendiente del fondo (S_0), coeficiente de rugosidad de manning (n), área transversal (A_c) y perímetro mojado (P).

2.2.4.7. Constantes cinéticas. El modelo Qual2kw tiene una gran variedad de constantes cinéticas que definen las reacciones y disoluciones de los contaminantes en el tramo a estudiar, los cuales representan los parámetros de calibración. Estos parámetros dependen exclusivamente de la necesidad que requiera el autor a modelar, por lo tanto, no es necesario determinar todos los parámetros de calibración que arroja el modelo como se indica en el cuadro 2.

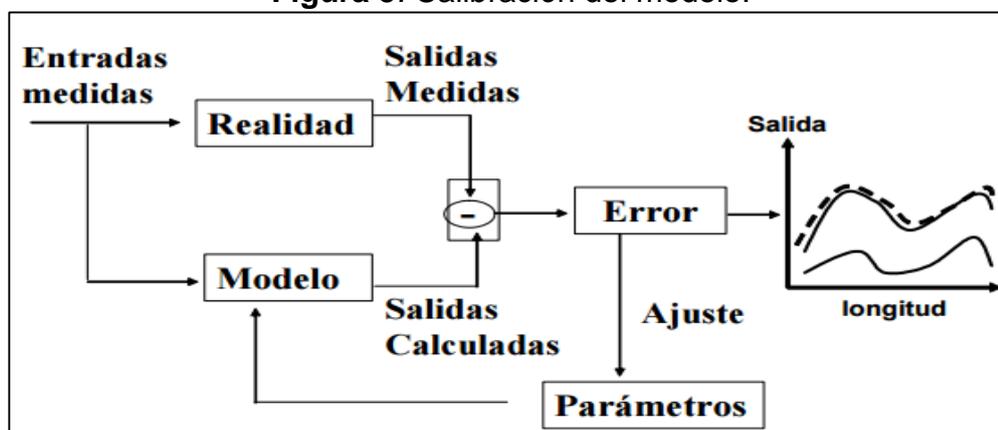
2.2.4.8. Calibración del modelo. La modelación de la calidad del agua en las aguas superficiales con el modelo Qual2kw depende previamente de realizar la calibración que implica un proceso complejo en el que se obtiene como resultado un margen de error mínimo entre los datos calculados por el modelo y los datos recolectados en campo figura 5. Posteriormente se procede a realizar simulaciones hasta reproducir con precisión los datos recolectados en campo en el tramo de estudio [13].

Cuadro 2. Constantes cinéticas de calibración en el modelo Qual2Kw.

Parámetros de Calibración	Abreviación	Unidades	Rango de calibración
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d	0 – 2
Tasa de re-aireación, descrita por la ecuación de re-aireación	Ka	1/d	Auto-selección
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO _{slow}	1/d	0 – 5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación DBO - DBO _{slow}	1/d	0 – 0.5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO _{fast}	1/d	0 – 5
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d	0 – 2
Tasa de nitrificación de amonio	T. Nitrificación	1/d	0 – 10
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	T. Desnitrificación	1/d	0 – 2
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimento	CT-Desnitrificación Sed.	m/d	0 – 1
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	VS – PO	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	VS - PI	m/d	0 – 2
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Vel. Sedimentación POM	1/d	0 – 5
Tasa de decaimiento de los patógenos	T. Decaimiento Patógenos	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación de los patógenos	VS - Patógenos	m/d	0 – 2
Constante α para mortalidad de los patógenos por luz solar	Constante α Mortalidad-Patógenos	1/d per y/hr	0 – 1

Fuente: Qual2kw user manual [29].

Figura 5. Calibración del modelo.



Fuente: Simulación de la calidad del agua en la quebrada Chapal [13].

2.2.4.9. Confirmación del modelo. Luego del proceso de calibración del modelo Qual2k es necesario someterlo a una confirmación y/o verificación, de tal modo, que los resultados de escenarios que se proyecten tengan mayor confiabilidad a la realidad estudiada. Por otro lado, es necesario mantener las constantes fijas y suministrar nueva información al modelo en los puntos usados para calibración, de tal manera, que los rangos de error sean bajos y por consiguiente se acepte o no la confirmación del modelo [30]. De ahí la importancia para que la modelación sea una herramienta útil para la gestión del recurso hídrico.

2.2.5. Descripción del modelo Streeter & Phelps. Es un modelo matemático unidimensional de calidad del agua aplicable en aguas superficiales, también llamado modelo de disminución de oxígeno, que predice los cambios en el déficit de oxígeno por la descomposición de la materia orgánica como una función de la DBO ejercida y la re-aireación de oxígeno de la corriente [31]. Para realizar la modelación se empezará con la ecuación 5 mostrada a continuación para calcular los balances de masas.

$$L_0 = \frac{Q_w L_w + Q_r L_r}{Q_w + Q_r} \quad \text{Ecuación (5)}$$

En donde: L_0 = Concentración inicial; Q_w = Caudal del río; L_w = Concentración del río; Q_r = Caudal del vertimiento; L_r = Concentración del vertimiento.

Se debe seleccionar una de las tres ecuaciones empíricas, como se detalla a continuación:

Owens and Gibbs $Ka = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$ Ecuación (6)

Churchill $Ka = 5.03 \frac{U}{H^{1.67}}$ Ecuación (7)

Oconor Dobbins $Ka = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$ Ecuación (8)

En donde: U = Velocidad (m/s); H = Profundidad (m).

Para corregir la variación de la temperatura que presenta en el flujo se realiza mediante la ecuación 9:

$$k_a = k_{2(20)} \times 1.024^{(T-20)} \quad \text{Ecuación (9)}$$

En donde: k_a = Coeficiente de re-aireación; T = Temperatura (°C); $k_{2(20)}$: Coeficiente de re-aireación a 20°C.

Para calcular la tasa de re aireación, se desarrolla la siguiente ecuación 10:

$$k_r = k_d + k_s \quad \text{Ecuación (10)}$$

En donde: k_r = Tasa de re aireación; k_d = Tasa de desoxigenación; k_s = Tasa de sedimentación.

Una vez que se obtienen todos los datos se procede a desarrollar la ecuación 11:

$$D_{(t)} = D_0 e^{-k_a t} + \frac{k_d L_0}{k_r - k_a} (e^{-k_a t} - e^{-k_r t}) \quad \text{Ecuación (11)}$$

En dónde; L_0 = Concentración de la materia orgánica inicial dada por la DBO; D_0 = Déficit inicial de oxígeno disuelto; t = Tiempo.

2.3. BASES LEGALES

Debido a la degradación de los afluentes y ecosistemas por las actividades antrópicas en Colombia, el estado empezó a regular estas problemáticas ambientales de tal manera que se crearon distintas normas para proteger los recursos hídricos [32], las cuales regulan la calidad del agua en las corrientes superficiales como se observa en el cuadro 3.

Cuadro 3. Normatividad ambiental relacionada con la calidad del agua.

Identificación	Temática
Decreto 1594 de 1984	Uso del agua y residuos líquidos.
Decreto 475 de 1998	Normas técnicas de calidad del agua potable.
Decreto 3100 de 2003	Reglamentación de tasas retributivas por la utilización directa del agua como cuerpo receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.
Decreto 1575 de 2007	Sistema de protección y control de la calidad del agua para consumo humano.
Decreto 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
Decreto 3930 de 2010	Uso del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1076 de 2015	Reglamenta del sector ambiente y desarrollo sostenible
Resolución 0631 de 2015	Establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado.

Fuente: Elaboración propia.

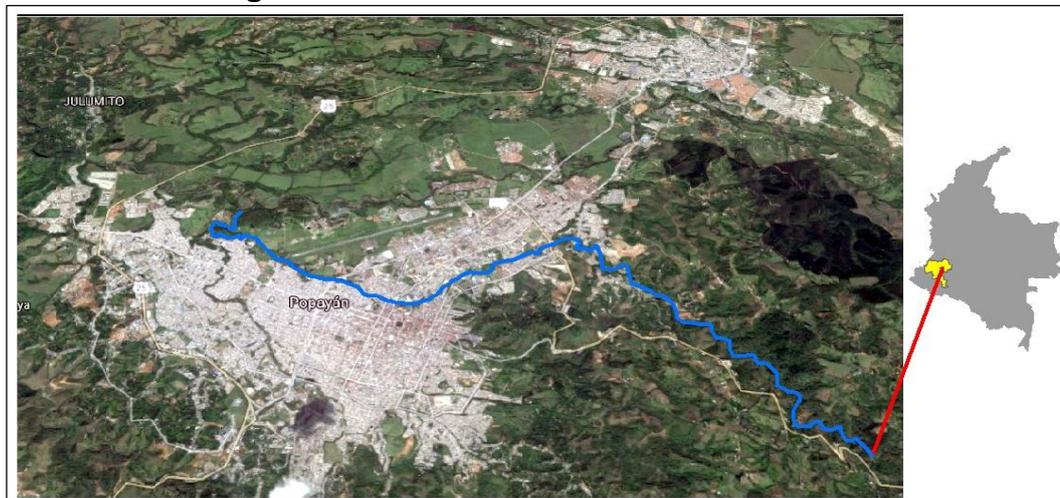
CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 FASE I

En esta fase se realiza una explicación de la zona de estudio donde se realizó la campaña de monitoreo y adicionalmente se recopiló información para correr los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps en el río Molino como se menciona a continuación.

3.1.1. Descripción sub-cuenca río Molino. La sub-cuenca río Molino se encuentra localizada al suroeste de Colombia, en el centro del departamento del Cauca y hacia el este del municipio de Popayán como se observa en la figura 6, su nacimiento se ubica en la parte alta de la vereda Santa Elena en las coordenadas $2^{\circ}25'32.6''N$, $76^{\circ}33'48.6''W$, es típicamente un clima ecuatorial de montaña con pisos térmicos, como: templado, frío y de páramo, y de los pisos bioclimáticos sub-andino, andino y alto-andino [33].

Figura 6. Ubicación micro cuenca río Molino.



Fuente: Elaboración propia.

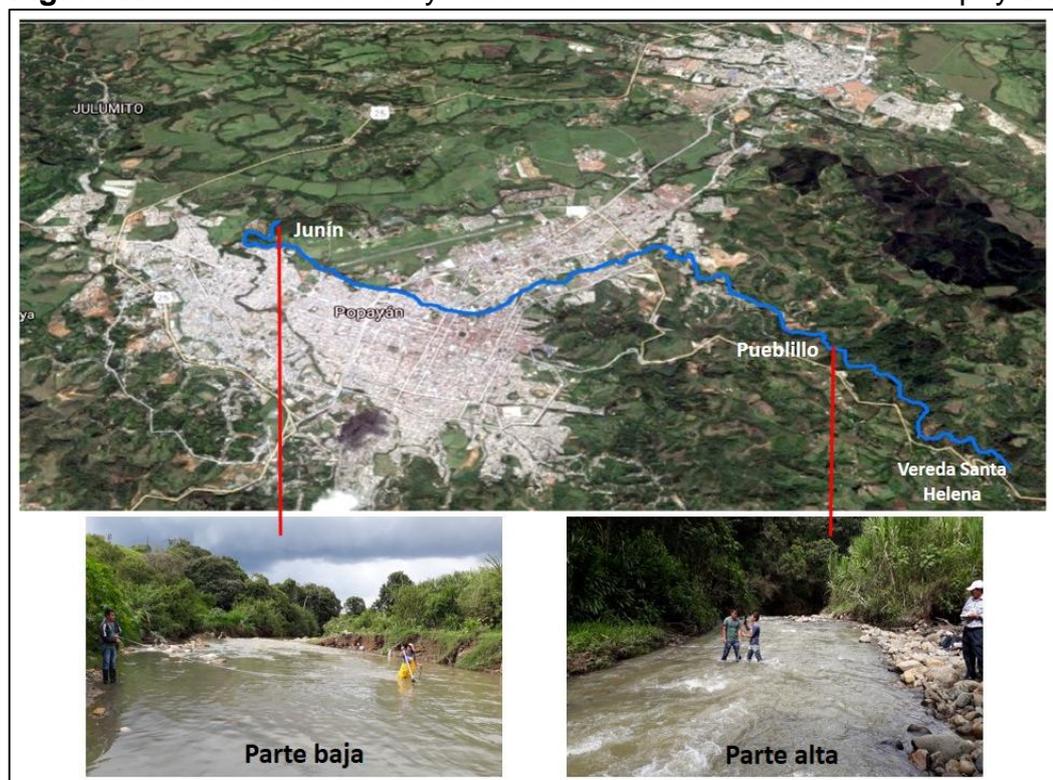
En la sub-cuenca parte alta se caracteriza por su uso en ganadera y agricultura, donde se utilizan técnicas tradicionales, predomina el monocultivo con incorporación de fertilizantes químicos en exceso, deforestación para obtener leña de combustible y viviendas sin saneamiento básico. La precipitación media por el método de curvas Isoyetas es de 1977 mm. El promedio de los valores de la humedad relativa medios máximos es 87.5% y el

de mínimos de 73.1% [33]. En la zona urbana parte media se usa como fuente abastecedora y en su tramo final parte baja recibe las descargas de aguas residuales domesticas provenientes de sectores de la ciudad de Popayán.

Se debe mencionar que la variación altitudinal de la sub-cuenca se encuentra entre los 2880 a 1680 msnm, siendo esto por su clasificación como dos pisos térmicos de templado y frío. La pendiente es de 0.35 m/m y varía desde suaves a fuertes pendientes, influye en la velocidad del flujo y juega un papel importante en la forma del hidrograma [33].

3.1.2. Localización. El río Molino tiene un área de 67.87 Km² desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Cauca, en su transcurso de su área de influencia cuenta con 8 corregimientos, 10 veredas y 4 comunas urbanas de la ciudad Popayán atravesándola de este a oeste, teniendo como punto de entrada en la vereda Pueblillo con coordenadas 2°26'23.1"N, 76°34'27.3"W y punto de salida en el barrio Junín con coordenadas 2°27'33.7"N, 76°37'29.1"W como se observa en la figura 7 [33].

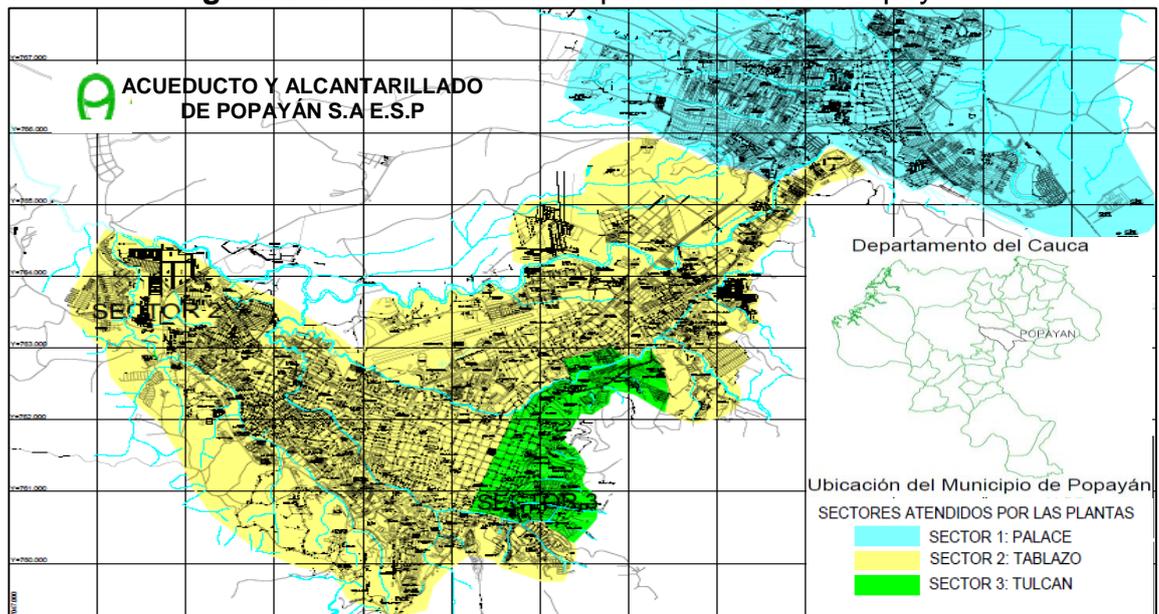
Figura 7. Puntos de entrada y salida río Molino en la ciudad de Popayán.



Fuente: Elaboración propia.

Este afluente abastece de agua potable al 10% de la población urbana figura 8, su proceso de potabilización se hace en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Tulcán figura 9 la cual fue construida en 1928 y optimizada en 1987 y suministra al suroriente de la ciudad [10].

Figura 8. Sectores atendidos por las PTAP en Popayán.



Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán.

Figura 9. Planta de tratamiento de agua potable Tulcán.



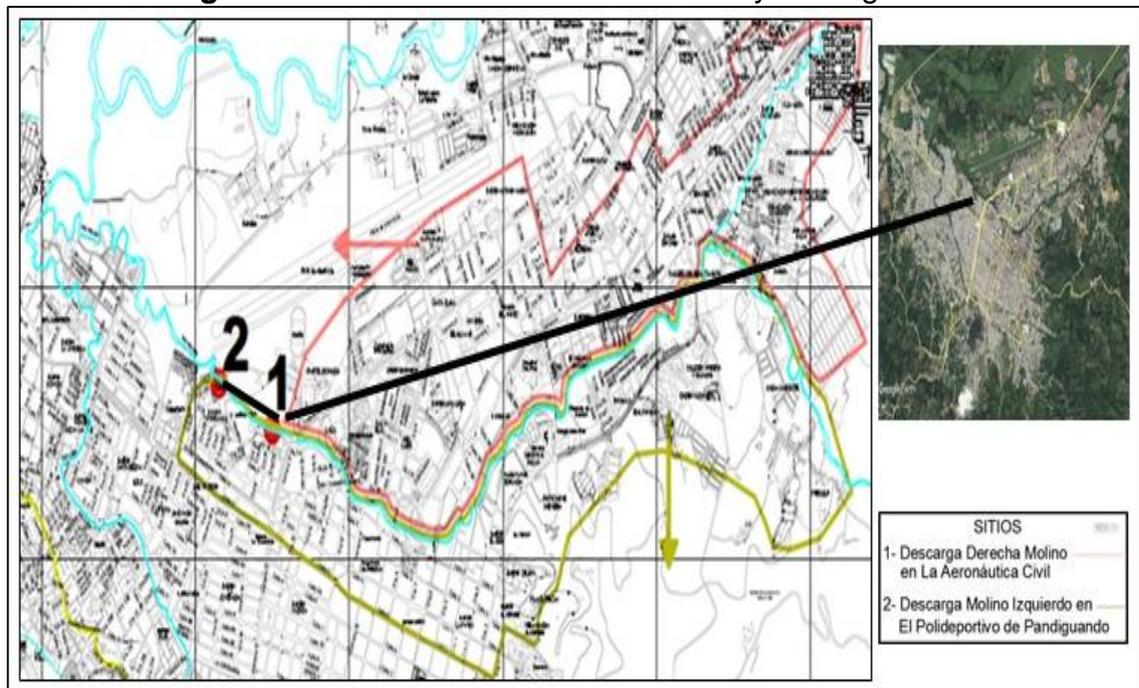
Fuente: Elaboración propia.

- **Usos potenciales del río Molino:** la sub-cuenca Río Molino se encuentra ordenada y en constante planificación bajo procesos

institucionales y comunitarios que la posicionan como modelo integral de desarrollo regional, fundamentado en la sostenibilidad ambiental y equidad social. El río Molino se ha consolidado no solo como fuente abastecedora del acueducto sino también como espacios paisajísticos articuladores de dinámicas socio-ambientales rurales y urbanas [33].

- **Estado actual río Molino:** la calidad del río Molino se ve afectada en su recorrido por los vertimientos directos de agua residual doméstica en la ciudad de Popayán, principalmente por las comunas 1, 3 y parte de la 4 y 8, concentrando los cabezales de descarga en el vertimiento Aeronáutica Civil y vertimiento Pandiguando [33] figura 10.

Figura 10. Vertimiento Aeronáutica Civil y Pandiguando.



Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán.

3.1.3. Información existente. La Empresa AAP y la CRC en sus planes de gestión ambiental realizan campañas de monitoreo para la toma de muestras fisicoquímicas y bacteriológicas en el cuerpo receptor con el fin de conocer la calidad del agua en la que se encuentra el río. De modo que, en el río Molino se tiene un historial de datos de la calidad del agua desde el año 2005 hasta el 2016 como se observa en el cuadro 4, estos datos seleccionados para este trabajo fueron tomados en el último trimestre por año.

Cuadro 4. Datos históricos de parámetros para modelación en el río Molino.

AÑO	SITIO	PARAMETROS							
		Ph	T °C	Conductividad μS/cm	OD mg/L	NO ₃ ⁻¹ mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	SST mg/L
2005	Bocatoma	6.72	18.6	52.0	5.98	0.4	0.2	4.0	29.0
	P. Negret	6.62	18.1	75.0	5.47	0.6	2.2	11.0	49.0
	Antes de Ejido	6.76	19.2	136.0	3.82	0.6	6	62.0	58.0
2006	Bocatoma	7.45	19.2	61.6	6.29	0.41	0.3	5.3	6.6
	P. Negret	6.89	19.1	90.0	5.64	0.85	1.7	11.6	14.8
	Antes de Ejido	7.09	18.9	162.8	4.94	0.78	9.2	30.8	11.7
2007	Bocatoma	8.07	16.7	97.8	6.84	0.36	0.9	4.0	11.3
	P. Negret	7.56	17.4	74.1	3.27	1.19	1.9	9.3	17.3
	Antes de Ejido	7.71	19.5	145.2	2.75	2.4	7.3	34.6	33.3
2008	Bocatoma	6.68	19.9	50.9	5.62	0.82	<0.5	<4	55.7
	P. Negret	6.55	21.4	74.9	3.48	1.5	4.6	<4	37.5
	Antes de Ejido	5.28	18.6	149.4	1.93	2.62	4.1	34.8	54.5
2009	Bocatoma	7.17	16.6	40.9	7.36	0.53	<0.5	6.4	25.0
	P. Negret	7.17	17.6	64.5	6.82	1.26	2	12.1	19.3
	Antes de Ejido	7.34	18.3	82.9	5.92	1.61	1.8	14.4	18.6
2010	Bocatoma	7.56	16.9	45.0	6.93	0.5	<0.5	31.0	45.8
	P. Negret	7.90	17.3	61.0	6.19	1.0	1.2	18.0	129.0
	Antes de Ejido	6.37	17.5	82.0	6.22	0.77	5.5	38.0	81.17
2011	Bocatoma	6.67	16.9	56.9	8.35	1.26	2.1	4.0	70.0
	P. Negret	6.87	17	52.8	8.09	1.77	0.5	4.0	93.0
	Antes de Ejido	7.31	17.5	76.0	7.92	2.18	1.9	4.0	76.3
2012	Bocatoma	7.37	16.9	73.4	7.28	1.81	0.5	<10	25.6
	P. Negret	7.36	17.9	92.7	6.43	4.98	5.7	<10	337
	Antes de Ejido	7.49	18.5	106.9	5.41	2.61	7.8	15.6	146
2013	Bocatoma	7.05	16	69.9	7.51	0.71	0.5	10.0	55
	P. Negret	-	-	-	-	-	-	-	-
	Antes de Ejido	7.14	18.8	189.0	4.03	1.12	5.8	10.0	44.6
2014	Bocatoma	7.66	14.6	73.0	8.7	1.29	0.8	22.0	122.0
	P. Negret	-	-	-	-	-	-	-	-
	Antes de Ejido	7.38	21.2	261.3	2.5	2.19	33.7	56.0	42.5
2016	Bocatoma	7.1	17.3	89.9	7.68	0.71	0.6	10.0	35.0
	P. Negret	-	-	-	-	-	-	-	-
	Antes de Ejido	7.56	21.5	486.0	0.3	4.43	177	252.0	96.0

Nota: 1. Los valores de los parámetros del año 2015 que compartió la CRC está repetida al del año 2014, por lo cual el año 2015 no se tiene en cuenta como datos históricos. **2.** (-) no hay reporte del laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, la autoridad ambiental CRC se ha visto en la necesidad de tomar medidas preventivas para proteger el río Molino, para esto se tomó como

iniciativa de crear el acuerdo 0015 del 25 de noviembre del 2014, que en sus proyecciones de metas establece que no se permite descargas de carga contaminante en el río Molino en el transcurso de los años 2015 – 2019 [14].

3.1.4. Recopilación de información. Se empezó con la revisión bibliográfica con el fin de mejorar los conocimientos previos con respecto a la modelación de calidad del agua, a su vez, se investigó diferentes modelos dependiendo de lo que se requiera realizar, de manera que, fueron seleccionados los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps debido a sus características y accesibilidad que se ajustan a los requerimientos de este trabajo.

Posteriormente estudiado el tema, se determinó el río a modelar teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: 1. Captación de agua para procesos de potabilización con la finalidad de abastecer a los habitantes de algunos sectores de la ciudad de Popayán, 2. Pertenezca a la zona de influencia de la ciudad y por último, 3. El caudal sea propicio para realizar monitoreo en campo y no caudales altos ya que puede dificultar la toma de datos en campo.

De esta manera, se llegó a la conclusión de realizar la modelación del río Molino ya que cumple satisfactoriamente con las consideraciones mencionadas como se observa en el cuadro 5, iniciando desde la parte alta en la vereda Pueblillo hasta terminar en la convergencia con el río Cauca con una longitud de 10 Km. Una vez que se identificó el río, se buscó información en la Empresa de AAP y la CRC, referente a parámetros fisicoquímicos – bacteriológicos y características hidráulicas.

Cuadro 5. Consideraciones para seleccionar el río a modelar.

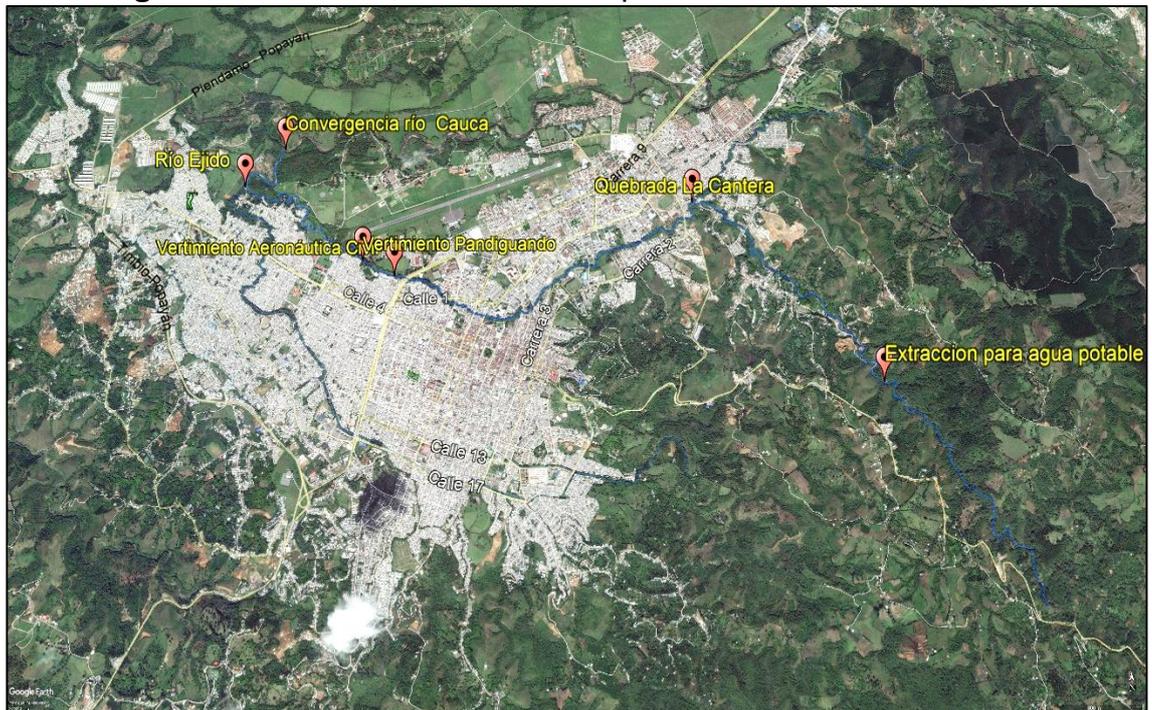
Río Cauca	Río Molino	Río Ejido
Presenta caudales medios y bajos (No)	Presenta caudales medios y bajos (Si)	Presenta caudales medios y bajos (Si)
Hace parte de la zona urbana (Si)	Hace parte de la zona urbana (Si)	Hace parte de la zona urbana (Si)
Se capta agua para procesos de potabilización (No)	Se capta agua para procesos de potabilización (Si)	No se capta agua para procesos de potabilización (No)

Nota: Si cumple, no cumple.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5. Identificación de fuentes puntuales. En el monitoreo del río Molino se identificaron 5 fuentes puntuales: 2 tributarios (Quebrada La Cantera y Río Ejido), 2 vertimientos (Vertimiento Aeronáutica civil y vertimiento Pandiguando) y 1 extracción para agua potable, en donde se midieron variables hidráulicas y se tomaron muestras a excepción de la extracción debido a que no es de interés del proyecto conocer la calidad del agua en la que se encuentra, si no de la empresa que hace esta captación figura 11.

Figura 11. Identificación de fuentes puntuales sobre el río Molino.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.6. Monitoreo de calidad del agua. Se realizó un monitoreo de calidad del agua en el año 2017 con el apoyo de la CRC y la AAP, en el cuadro 6 se indican las coordenadas de los lugares georeferenciados desde la subcuenca parte media hasta la parte baja del río Molino, se utilizó algunos equipos y materiales (Anexo 1) para aforar en diferentes puntos del río Molino, tributarios y vertimientos cuyas característica hidráulicas se observan en el cuadro 7. El recorrido se inició desde la parte media antes de bocatoma ubicado en el sector de Pueblillo hasta finalizar en la parte baja, barrio Junín donde convergen el río Ejido y el río Molino en un tramo de recorrido de 9.3 Km de los

10 Km que se pretende modelar. Cabe resaltar que este monitoreo se realizó en época de invierno.

Cuadro 6. Sitios de aforo y muestreo sobre el río Molino.

Sitio	Altitud (msnm)	COORDENADAS		Distancia (km)
		N	W	
Río Molino – Pueblillo (antes de bocatoma)	1823	2°26'22.83"	76°34'24.91"	0.0
Extracción para procesos de agua potable	1818	2°26'22.7"	76°34'27.57"	0.12
Tributario Quebrada Cantera	1751	2°27'16.60"	76°35'20.01"	3.11
Río Molino – Puente Barrio Bolívar	1734	2°26'44.69"	76°36'09.47"	5.11
Vertimiento Aeronáutica Civil	1725	2°26'53.18"	76°36'51.86"	6.66
Vertimiento Pandiguando	1724	2°26'57.59"	76°37'01.34"	6.98
Tributario Río Ejido – Desembocadura en Barrio Junín	1698	2°27'19.14"	76°37'39.52"	9.24
Río Molino – Convergencia río Ejido Barrio Junín	1697	2°27'21.34"	76°37'39.34"	9.30

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Características hidráulicas de los sitios de aforo.

LUGAR	RESULTADO			
	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho(m)
Río M -Pueblillo	1.701	0.73	0.28	7.1
Queb. La Cantera	0.270	0.49	0.23	2.85
Río M - Puente Bolívar	1.808	0.54	0.30	11.86
Vert. Aeronáutica	0.117	1.30	0.15	1.44
Vert. Pandiguando	0.081	1.50	0.14	0.68
Río Ejido	1.377	0.68	0.23	9.23
Unión Molino - Ejido	6.366	1.10	0.43	10.90

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 8 se muestran los resultados de las pruebas fisicoquímicas, para la DBO₂₀ se realizó usando una aproximación para calcular la misma, debido a que no se entregaron resultados de este parámetro.

3.1.7. Definición de constantes hidráulicas. Como se mencionó anteriormente, el modelo Qual2kw maneja dos formas para calcular las constantes hidráulicas, de este modo se seleccionó mediante la ecuación de Manning, donde se le asignó un valor dependiendo de las características del cauce basándose en el manual de USGS Science para estimar la n de Manning [34], a su vez se tuvo en cuenta las pendientes, taludes y ancho del fondo en cada tramo del río a modelar cuadro 9.

Cuadro 8. Resultados del laboratorio de la CRC.

UNIDADES DE LECTURA	Pueblillo	Quebrada La Cantera	Puente Bolívar	Vert. Aeronáutica	Vert. Pandiguando	Río Ejido	Unión Molino - Ejido
DBO ₅	< 0.9	< 0.9	1.0	169.0	176.0	55.2	47.4
DBO ₂₀	1.08	1.08	1.20	203.61	212.05	66.51	57.10
DQO	< 15.0	< 15.0	29.8	280.0	342.0	149.0	234.0
SST	61.1	29.2	88.7	85.0	82.0	80.0	68.6
Nitritos	0.02	0.02	0.02	-	-	0.06	0.05
Nitratos	0.8	0.6	0.6	-	-	0.4	0.7
Nitrógeno amoniacal	< 0.01	0.02	< 0.01	5.78	4.72	10.1	7.59
Orto fosfatos	< 0.02	0.03	0.03	2.71	3.36	0.06	0.4
Col. Totales	13400	370000	596000	2.5E6	3.3E6	6.7E6	8.9E6
Conductividad	47.9	38.4	94.2	415.0	541.0	272.5	394.8
pH	7.5	7.4	7.47	7.93	7.7	7.5	7.59
OD	9.64	8.2	4.3	1.18	0.55	0.31	2.22
Temperatura	16.8	18.2	18.4	19.4	20.9	20.7	21.2

Nota: (-) no hay reporte de análisis de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9. Constantes hidráulicas para n de Manning.

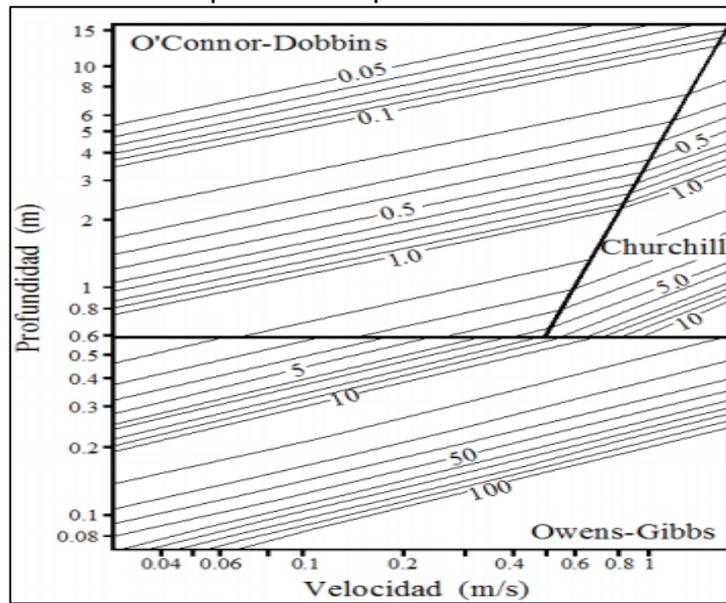
Chanel Slope	Manning n	Bot Width m	Side Slope	Side Slope
0.0231	0.0750	2.90	0.19	0.19
0.0231	0.0600	1.15	0.38	0.38
0.0085	0.0600	8.14	0.17	0.17
0.0058	0.0110	1.20		
0.0031	0.0110	1.10		
0.0115	0.0750	4.77		
0.0167	0.0750	5.02	0.13	0.13
0.0084	0.0750	7.34	0.23	0.23

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del modelo Streeter & Phelps se tuvo en cuenta las variables hidráulicas de velocidad y profundidad media para cada tramo, con la finalidad de definir la ecuación más adecuada mencionadas anteriormente ecuación 2, 3 y 4 y para calcular la tasa de re aireación se debe corregir previamente la variación de temperatura a 20°C ecuación 5 y 6 con la ayuda del gráfico dado por Steven Chapra de ecuaciones predictivas figura 12 [35].

3.1.8. Definición de variables meteorológicas. Para el modelo Qual2kw se debe recopilar información de variables meteorológicas en la estación más cercana de la zona de estudio como: temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad, sombra de la cobertura vegetal al río y brillo solar. En el modelo Streeter & Phelps no es imprescindible tener estos datos ya que en la ecuación no integra variables externas.

Figura 12. Ecuaciones predictivas para calcular tasas de re aireación.



Fuente: Surface water Quality modeling [35].

3.1.9. Datos de entrada del modelo. Después de recibir los resultados de las muestras de calidad del agua por el laboratorio de CRC y de recopilar información climatológica de la estación Universidad del Cauca, se procede a ingresar los mismos que serán datos de entrada en las hojas de Excel del modelo Qual2kw y Streeter & Phelps como se indica a continuación cuadro 10-16.

Cuadro 10. Datos de entrada en el modelo Qual2kw.

System ID	
River name	Río Molino (Popayán)
Saved file name	Río Molino
Month	7
Day	12
Year	2017
Local standard time zone relative to UTC	-5 hour
Simulation and output options	
Calculation step	1.40625 minutes
Number of days	5 days
Solution method (integration)	Euler
Solution method (pH)	Brent
State variables for simulation	All
Program determined calc step	1.040625 minutes
Time elapsed during last model run	2.13 minutes
Time of sunrise	6:04 am
Time solar noon	12:12 pm
Time sunset	6:19 pm
Photoperiod	12.25 hours

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 11. Datos de entrada modelo Qual2kW.

Parámetro	Qinicial	T	Conduc	ISS	OD	DBOrapida	DBOlenta	NH ₄	PI	Patogen	pH	NO ₃ ⁻¹
Unidades	m ³ /s	°C	umhos	mg/L	mg/L	mgO ₂ /L	mgO ₂ /L	ugN/L	ugP/L	cfu/100mL	s.u	ugN/L
Valor	1.701	16.80	47.90	61.10	9.64	0.90	0.18	0.01	0.02	13400.00	7.50	0.80

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 12. Datos de entrada hoja reach modelo Qual2kW.

Reach	Downstream	Num	Reach	Downstream		Downstream	Elevation		Downstream					
			Lengh	Downstream		Location	Upstream	Downstream	Latitude			Longitude		
Label	End of reach label		Km	Lat	Long	km	m	m	deg	min	sec	deg	min	sec
	Antes de bocatoma	0	0	2.44	76.57	0.0	-	1823.0	2	26	23	76	34	25
Antes de bocatoma	Tributario Cantera	1	3.11	2.45	76.59	3.110	1823.0	1751.0	2	27	17	76	35	20
Tributario Cantera	Puente Bolívar	2	2.00	2.45	76.60	5.110	1751.0	1734.0	2	26	45	76	36	9
Puente Bolívar	Ver Aeronáutica c.	3	1.55	2.45	76.61	6.660	1734.0	1725.0	2	26	53	76	36	52
Ver Aeronáutica c.	Ver. Pandiguando	4	0.32	2.45	76.62	6.980	1725.0	1724.0	2	26	58	76	37	1
Ver. Pandiguando	Tributario río Ejido	5	2.26	2.46	76.63	9.240	1724.0	1698.0	2	27	19	76	37	40
Tributario río Ejido	Unión Ejido-Molino	6	0.06	2.46	76.63	9.300	1698.0	1697.0	2	27	21	76	37	39
Unión Ejido-Molino	Desembocadura	7	0.71	2.46	76.62	10.010	1697.0	1691.0	2	27	32	76	37	27

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 13. Datos de entrada hoja point sources modelo Qual2kW.

Name	Location	Point Abstraction	Point Inflow	Temp	Cond	ISS	DO	CBODs	CBODf	Ammonia N	Inorg P	Pathogens	pH
	km	m ³ /s	m ³ /s	°C	umhos	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	ug/L	ug/L	cfu/100mL	s.u.
Bocatoma	0.12	0.1000	0.0000										
Tributario Q. Cantera	3.11	0.0000	0.2700	18.20	38.40	29.20	8.20	0.18	0.90	0.02	0.03	370000.00	7.40
Ver. Aeronáutica Civil	6.66	0.0000	0.1170	19.40	415.00	85.00	1.18	34.61	169.00	5.78	2.71	2500000.00	7.93
Ver. Pandiguando	6.98	0.0000	0.0810	20.90	541.00	82.00	0.55	36.05	176.00	4.72	3.36	3300000.00	7.70
Tributario Río Ejido	9.27	0.0000	1.3770	20.70	272.50	80.00	0.31	11.31	55.20	10.10	0.06	6700000.00	7.50

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14. Datos de entrada hoja wq data modelo Qual2kw.

Distance	Temp	Cond	ISS	DO	CBDOs	CBDOf	Ammonia N	NO ₃ ⁻¹	Inorg P	Pathogens	pH
km	°C	umhos	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	ug/L	ug/L	ug/L	cfu/100mL	s.u.
0.000	16.80	47.90	61.10	9.64	0.18	0.90	0.01	0.80	0.02	13400.00	7.50
5.110	18.40	94.20	88.70	4.30	0.20	1.00	0.01	0.60	0.03	596000.00	7.47
9.300	21.20	394.80	68.60	2.22	9.70	47.40	7.59	0.70	0.04	8900000.00	7.59

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 15. Datos de entrada hoja hydraulics data modelo Qual2kw.

Distance	Q	H	U
km	m ³ /s	m	m/s
0.000	1.701	0.287	0.728
5.110	1.808	0.300	0.542
9.300	6.366	0.424	1.054

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 16. Datos entrada puntos de monitoreo modelo Streeter & Phelps.

PUNTOS DE MONITOREO	Distancia	Q	Temperatura	CDBOf	CDBOu	OD	Velocidad	Profundidad	Altitud
	m	m ³ /s	°C	mg/L	mg/L	mg/L	m/s	m	kmsnm
Río Molino – Antes de bocatoma	0	1.701	16.80	0.90	1.08	9.64	0.73	0.28	1.823
Extracción para procesos de agua potable	120	0.100							1.818
Quebrada La cantera – Tributario	3110	0.270	18.20	0.90	1.08	8.20	0.49	0.23	1.751
Ver. Aeronáutica Civil – Río Molino	6660	0.117	19.40	169.00	203.61	1.18	1.30	0.15	1.725
Ver. Pandiguando – Río Molino	6980	0.081	29.80	176.00	212.05	0.55	1.50	0.14	1.724
Río Ejido - Tributario	9270	1.377	20.70	55.20	66.51	0.31	0.68	0.23	1.698
Río Molino - Desembocadura	10010								1.691

Fuente: Elaboración propia.

3.1.10. Calibración de los modelos. Las cinéticas de reacciones son particulares para cada tipo de río y dependen en gran parte de la turbulencia de la corriente [25]. Teniendo en cuenta lo anterior, en el río Molino se ingresaron los datos para el modelo Qual2kw en las respectivas hojas de Excel. Existen diferentes maneras para calibrar el modelo Qual2kw, entre las más usadas están: 1. Método de ajuste de alineación, 2. Algoritmos genéticos y 3. Método de Montecarlo; el uso de uno de estos métodos dependen de la magnitud a modelar, para este trabajo la calibración se realizó con el método de ajuste de alineación de tal modo que se acerque a los resultados de la realidad que se midieron en campo, los valores de calibración se observan en el cuadro 17 y 18.

Cuadro 17. Constantes cinéticas de calibración en el modelo Qual2Kw.

Abreviación	Unidades	Calibración
VS – SSI	m/d	1.24
Ka	1/d	Internal
Tasa hidrólisis DBO _{slow}	1/d	2.31
Tasa oxidación DBO - DBO _{slow}	1/d	0.15
T. Oxidación DBO _{fast}	1/d	4.83
T. Nitrificación	1/d	5.27
T. Desnitrificación	1/d	1.48
CT-Desnitrificación Sed.	m/d	0.15
VS – PI	m/d	0.095

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 18. Datos de entrada hoja rates modelo Qual2kw.

Inorganic suspended solids	
Settling velocity	1.24
Oxygen	
Reaeration model	Internal
Slow CDOD	
Hydrolysis rate	2.31
Oxidation rate	0.15
Fast CBOD	
Oxidation rate	4.83
Ammonium	
Nitrification	5.27
Temp correction	1.07
Nitrate	
Denitrification	1.48
Sed denitrification transfer coeff	0.15
Inorganic P.	
Settling velocity	0.095
Sed P oxygen attenuation half sat constant	0.112817496

Fuente: Modelo Qual2kw.

Para la calibración del modelo Streeter & Phelps en el cuadro 11 se asignó diferentes valores de tasas de re aireación en cada tramo de manera de ajuste de alineación, mientras que la tasa de sedimentación se tomó el mismo valor para todos los tramos ya que su variación no influye en el resultado para este trabajo debido a que al aumentar o disminuir esta tasa de sedimentación la gráfica no presenta cambios, por este motivo se dejó el mismo valor para todos los tramos. A su vez, se tuvo en cuenta las correcciones de temperatura, la elevación del terreno, balance de masas y la ecuación empírica de Owens and Gibbs (1964) (Ecuación 6) con el propósito de tener todos los datos que se necesita para utilizar la ecuación de Streeter & Phelps. Al obtener los resultados de la última ecuación se ajustó mediante una corrección de longitud

Cuadro 19. Constantes cinéticas de calibración modelo Streeter & Phelps.

Tramo	Unidades	Tasa desoxigenación	Tasa sedimentación
Río Molino bocatoma hasta antes de Q. La Cantera	d ⁻¹	0.25	0.1
Q. La Cantera hasta antes de la Aeronáutica Civil	d ⁻¹	0.29	0.1
Aeronáutica Civil hasta antes de Barrio Pandiguando	d ⁻¹	0.38	0.1
Barrio Pandiguando hasta antes de Río Ejido	d ⁻¹	0.54	0.1
Río Ejido hasta antes de desembocadura Río Cauca	d ⁻¹	0.45	0.1

Fuente: Elaboración propia.

Con esta información recolectada se aplicó temporalmente en los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps para determinar la calidad actual del río Molino.

3.1.11. Confirmación de los modelos. Como se aclaró inicialmente, para la calibración de los modelos en este trabajo se tuvo en cuenta una campaña de monitoreo, mientras que para la confirmación se asumió datos históricos presentados anteriormente en el cuadro 4.

Después de tener definidas las constantes cinéticas de calibración se procede a realizar la confirmación, sin antes de hacer los respectivos cálculos de promedio y de desviación estándar, de tal manera, que los datos ingresados sean válidos por medio de un análisis estadístico.

- **Promedio:** con los datos históricos de cada parámetro se realizó el promedio que representa el valor característico mediante la ecuación 12:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde, promedio (\bar{x}), valor del dato $x_1 + x_2 + \dots + x_n$ y número total de datos (n).

- **Desviación estándar:** se tuvo en cuenta los datos históricos para obtener el resultado de la desviación estándar por medio de la ecuación 13:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde, desviación estándar (S)

Los datos obtenidos de la desviación estándar se indican en el cuadro 20, en donde se observa que en los parámetros de pH, temperatura, OD y NO_3^{-1} presentan una dispersión mínima de error, mientras que en algunos puntos de parámetros de DBO_5 , DQO, SST y conductividad muestran diferencias altas entre los valores de los anteriores años, debido a que pudo haber errores como en la toma de muestras, en los equipos, en la digitación de resultados y demás, alterando la variabilidad de los cálculos.

Cuadro 20. Desviación estándar (S) de parámetros históricos a modelar.

SITIO	PARÁMETROS							
	pH	T (°C)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	OD (mg/L)	NO_3^{-1} (mg/L)	DBO_5 (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
Bocatoma	0.45	1.49	18.11	0.94	0.57	0.51	8.74	32.40
P. Negret	0.47	1.43	13.68	1.63	1.40	1.67	4.54	108.8
Antes de Ejido	0.70	1.30	117.85	2.20	1.13	51.61	69.38	38.40

Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener los cálculos de la desviación estándar se analiza que los resultados en general no están dispersos con respecto al promedio como se observa en el cuadro 21. Posteriormente, estos promedios se toman como datos entrada para la confirmación de los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps.

Cuadro 21. Promedio de parámetros históricos a modelar en el río Molino.

AÑO	SITIO	PARÁMETROS							
		pH	T (°C)	Conductividad (μS/cm)	OD (mg/L)	NO ₃ ⁻¹ (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
Promedio	Bocatoma	7.23	17.24	64.66	7.14	0.8	0.74	10.74	43.73
	P. Negret	7.11	18.22	73.12	5.67	1.64	2.47	11.0	87.11
	Antes de Ejido	7.07	19.22	178.23	4.02	1.94	24.45	50.68	58.76

Nota: Los valores de parámetros medidos en el Puente Negret se tiene información hasta el año 2012.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. FASE II

Los planteamientos de escenarios están articulados con los objetivos de calidad del agua de la fuente dentro de un plan de descontaminación de la corriente, con base a esto, la Empresa de AAP en sus proyecciones de gestión ambiental toma como iniciativa implementar la PTAR (obra de saneamiento) en la ciudad de Popayán, la cual conectará los vertimientos del margen derecho e izquierdo del río Molino Aeronáutica Civil y Pandiguando respectivamente y los interceptará hasta llegar a la ubicación de la planta de tratamiento. Por tanto, los dos vertimientos puntuales mencionados anteriormente sobre esta fuente quedarán eliminados, de esta manera, se pretende recuperar la calidad del agua del río Molino.

Al no implementarse la PTAR se aumentarán las cargas contaminantes de agua residual doméstica en un 40%, con el fin de establecer cuál es el comportamiento que tiene el río Molino al recibir estas descargas de vertimientos, se proyectaron dos escenarios que se indican a continuación.

3.2.1. Planteamiento de escenarios

- Simulación de los modelos incluyendo el funcionamiento de la PTAR, es decir que se tiene en cuenta la eliminación de agua residual doméstica de los vertimientos de Pandiguando y Aeronáutica civil donde se elimina la carga contaminante para el río Molino. De esta manera se pretende llevar al río a un criterio de calidad del agua admisible para la preservación de flora y fauna.

- Simulación de los modelos al aumentar las cargas contaminantes de los vertimientos en un 40%, con el objeto de analizar la conducta del río Molino aguas abajo debido a que las descargas domésticas se encuentran ubicadas en la parte baja de la sub-cuenca.

3.3. FASE III

Una vez que se corrieron todas las simulaciones se procede a comparar los resultados obtenidos de OD y DBO₅ en calibración y confirmación de los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps, en donde se toma datos aleatorios de longitud vs concentración de la gráfica 1, 2,3 y 4 con estos datos se procede a utilizar el método estadístico Hipótesis para dos medias: comparación de dos modelos que consiste en tomar unos datos aleatorios de la concentración del parámetro [36].

De lo anterior, se busca investigar si las medias de dichos modelos pueden considerarse estadísticamente iguales. Para ello se plantean las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_x = \mu_y$$

$$H_A: \mu_x \neq \mu_y$$

Que se puede reescribir como:

$$H_0: \mu_x - \mu_y = 0$$

$$H_A: \mu_x - \mu_y \neq 0$$

Para probar H₀ o H_a se toman dos muestras aleatorias, como ambos modelos siguen una distribución normal y son independientes entre ellos, para probar la hipótesis de igualdad de medias está dado por [36]:

$$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde, tstudent (t₀), promedio de datos (\bar{X})(\bar{Y}), estimador de varianza muestral (S_p) y número de datos (n_x) (n_y).

El cual sigue una distribución T de Student con $n_x + n_y - 2$ grados de libertad, con un nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), S_p^2 es un estimador de la varianza muestral común, y se calcula como [36]:

$$S_p^2 = \frac{(n_x-1)S_x^2 + (n_y-1)S_y^2}{n_x + n_y - 2} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Se rechaza H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2, g}$, cuando la hipótesis alternativa es de la forma $H_A: m_x > m_y$, se rechaza $H_0: m_x = m_y$ si $t_0 > t_{\alpha}$, y si es de la forma $H_A: m_x < m_y$, se rechaza si $t_0 < -t_{\alpha}$. En forma equivalente, se rechaza H_0 si el valor-p $< \alpha$ para la pareja de hipótesis de interés.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Los resultados de calibración muestran un ajuste modesto en algunos parámetros mientras que en la confirmación se asimila a unos resultados más robustos, debido a que los datos históricos fueron tomados en temporada de baja pluviosidad y por tanto los valores calculados por los modelos se ajustan a los valores medidos en campo de las diferentes variables. Es así que se puede analizar los resultados de los diferentes parámetros y simulaciones arrojados por los modelos, en donde primeramente se harán los respectivos análisis obtenidos en ambos modelos en cuanto a OD y DBO₅, posteriormente se seguirá con los parámetros más relevantes solo con el modelo Qual2kw dado que el modelo Streeter & Phelps no tiene en cuenta las demás variables para modelar, como se menciona a continuación:

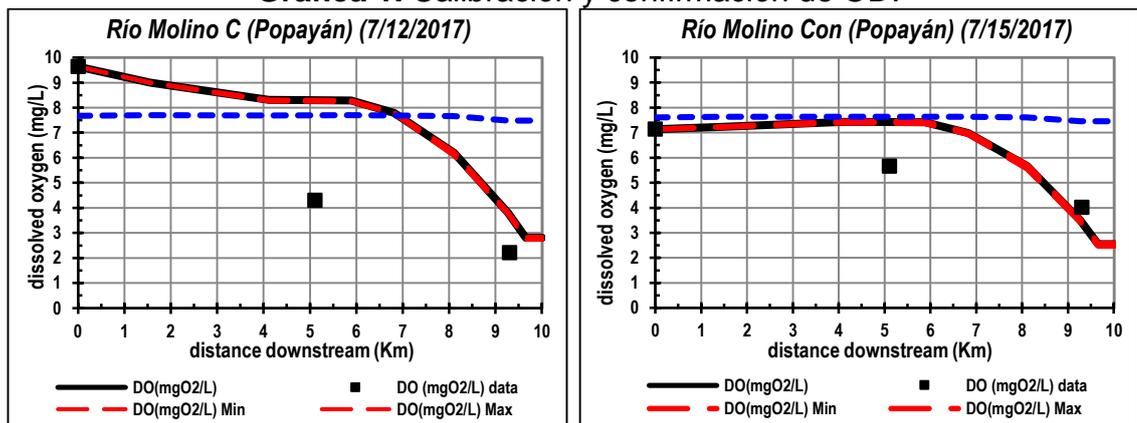
4.1. FASE I: CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DE LOS MODELOS

Los datos usados para la calibración de los modelos son los resultados del monitoreo realizado y cuyos valores se observan en el cuadro 8, como desarrollo de este proceso se obtuvo una serie de graficas calculadas que se presentan a continuación. Luego de ingresar los promedios de datos históricos y correr el programa se generaron las gráficas, en los cuales se evidencia que los parámetros de confirmación se ajustan más en relación con las gráficas del proceso de calibración, indicando que se ha llevado a cabo un buen proceso de calibración y confirmación en los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps.

Se observa que para el parámetro OD, en los modelos Qual2kw gráfica 1 y Streeter & Phelps gráfica 2 se establece que en la calibración y confirmación a partir del km 7 la calidad del mismo se encuentra en condiciones críticas aguas abajo dado que el OD empieza a disminuir considerablemente por las descargas de vertimientos domésticos que se encuentran llegando a una concentración entre 2.3 a 2.7 mgO₂/L antes de converger al río Cauca, esto coincide con la teoría de Chapra, quien establece que las tasas de degradación más altas en una corriente de agua se encuentran inmediatamente después de una descarga con contenido de materia orgánica [35]. Por otra parte es de

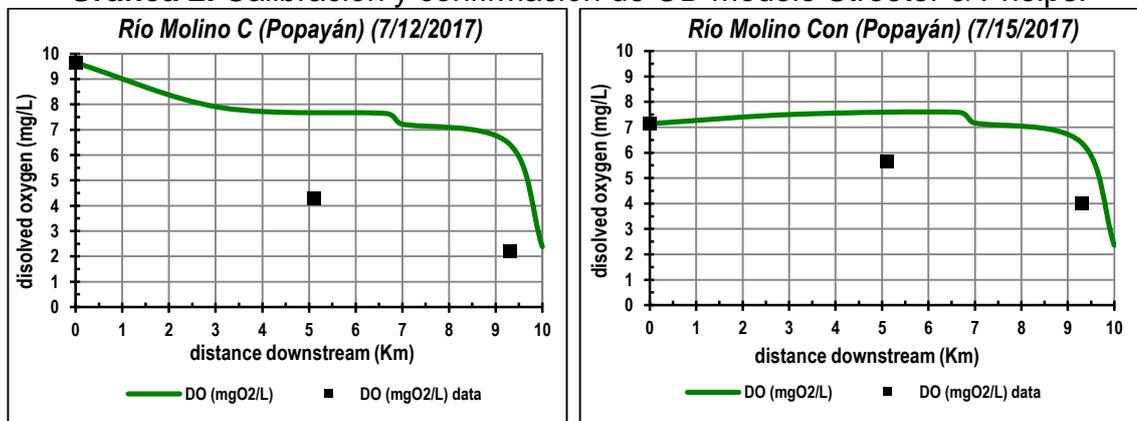
resaltar que en la validación los datos tomados en la parte inicial aguas arriba de OD es bajo en comparación a la calibración; por lo cual el OD se encuentra por debajo de 8 mg/L durante todo el tramo de estudio, debido a que al tomar los datos en épocas de verano se presenta menores caudales, por efecto a esto se presenta menor velocidad y consecuentemente la re aireación y el intercambio atmosférico es escaso como se ve representado en las gráficas.

Gráfica 1. Calibración y confirmación de OD.



Fuente: Modelo Qual2kw.

Gráfica 2. Calibración y confirmación de OD modelo Streeter & Phelps.

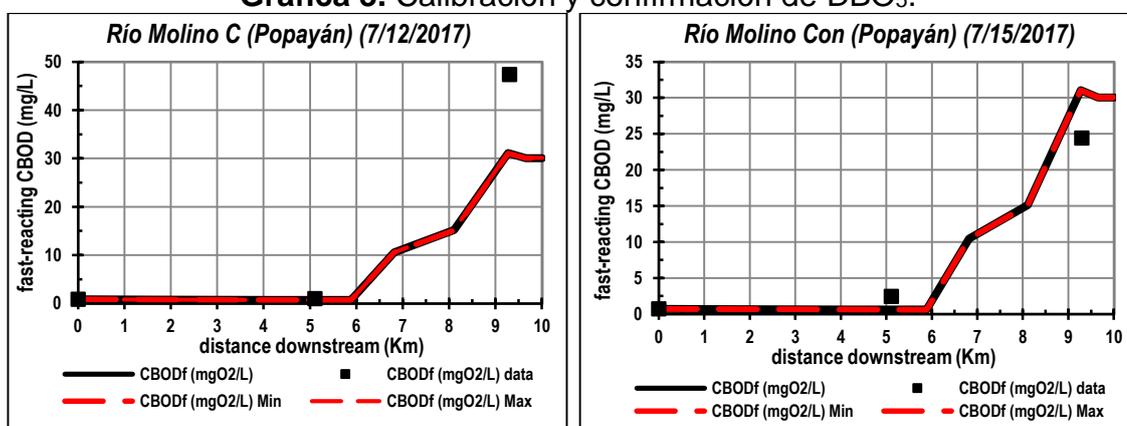


Fuente: Modelo Streeter & Phelps.

En el caso del parámetro DBO₅, en el modelo Qual2kw se presenta en la calibración y confirmación gráfica 3 que la DBO₅ empieza a incrementar a partir del Km 6 del tramo de estudio hasta finalizar en la convergencia con el río Cauca, debido a que en este sector se encuentran los vertimientos de agua residual doméstica, además en la confirmación el resultado calculado por el modelo sobrepasa al resultado obtenido del laboratorio a partir del Km 9 con

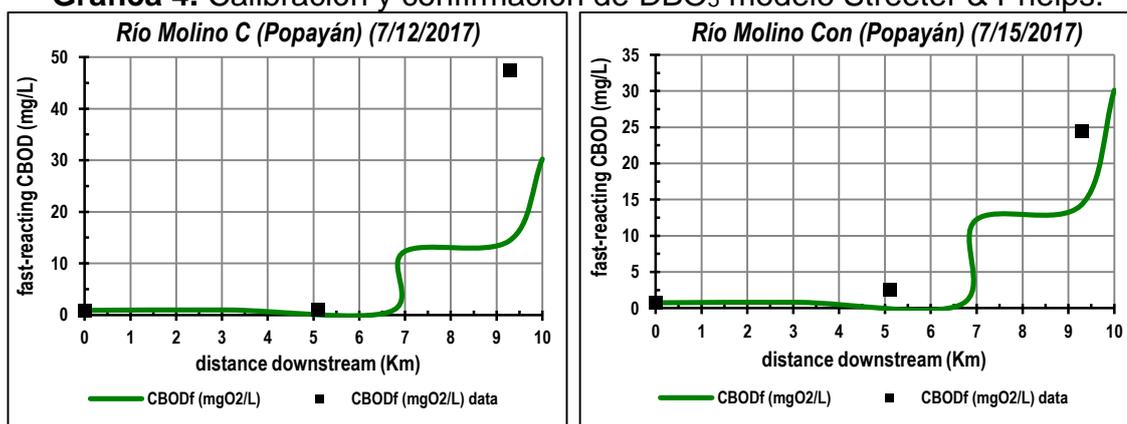
una concentración menor a los 35 mg/L y se mantiene estable hasta la desembocadura al río Cauca, a comparación con el modelo Streeter & Phelps que tiende a incrementar la misma a partir del Km 7 y que además en la confirmación el resultado calculado por el modelo también sobrepasa al resultado de laboratorio con una concentración menor a los 35 mg/L finalizando en el Km 10 donde se une con el río Cauca, los resultados se presentan en la gráfica 4, por otra parte se encuentran diferencias en los datos monitoreados in situ, donde se obtiene en la calibración un resultado cercano a los 50 mg/L con respecto a los resultados obtenidos en la confirmación de 25 mg/L.

Gráfica 3. Calibración y confirmación de DBO₅.



Fuente: Modelo Qual2kw.

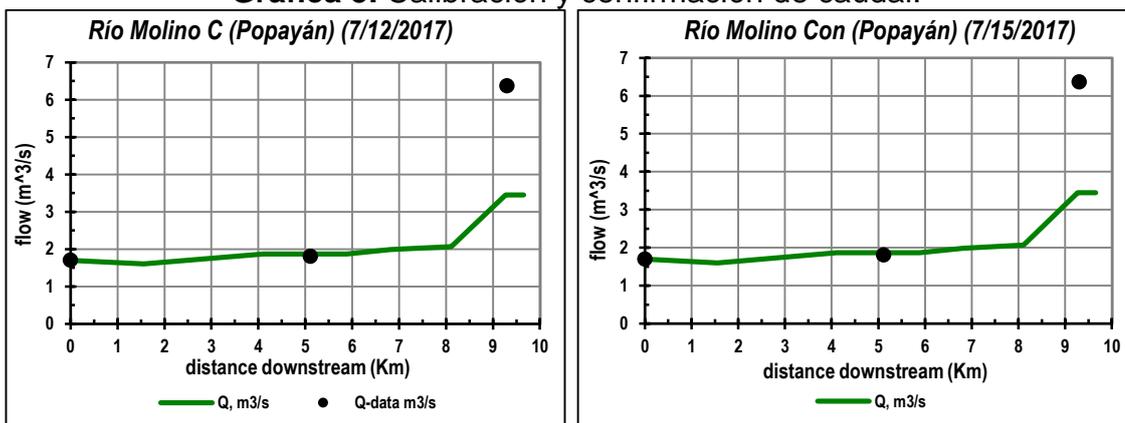
Gráfica 4. Calibración y confirmación de DBO₅ modelo Streeter & Phelps.



Fuente: Modelo Streeter & Phelps.

Se observa que en la gráfica 5 de caudal tanto en la calibración como en la confirmación muestran resultados similares debido a que en los datos históricos no se tienen reportes de aforos de caudal, por lo cual se corrieron los modelos con los datos hidráulicos medidos en campo para la calibración.

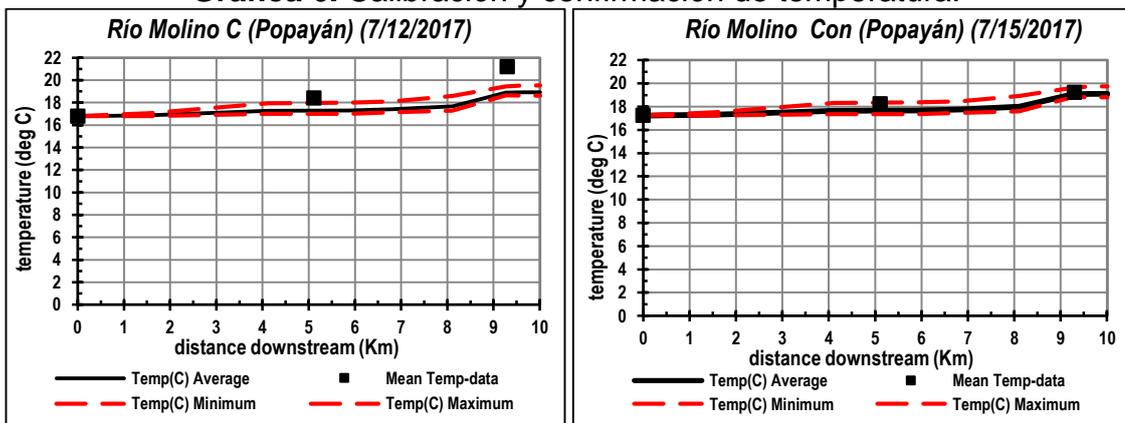
Gráfica 5. Calibración y confirmación de caudal.



Fuente: Modelo Qual2kw.

Para el parámetro de la Temperatura, se refleja que los valores de la misma en calibración y confirmación son idóneos en la fuente debido a la elevación y la presión a la que se encuentra, siendo este uno de los parámetros que más se ajustó como se ve reflejado en la gráfica 6.

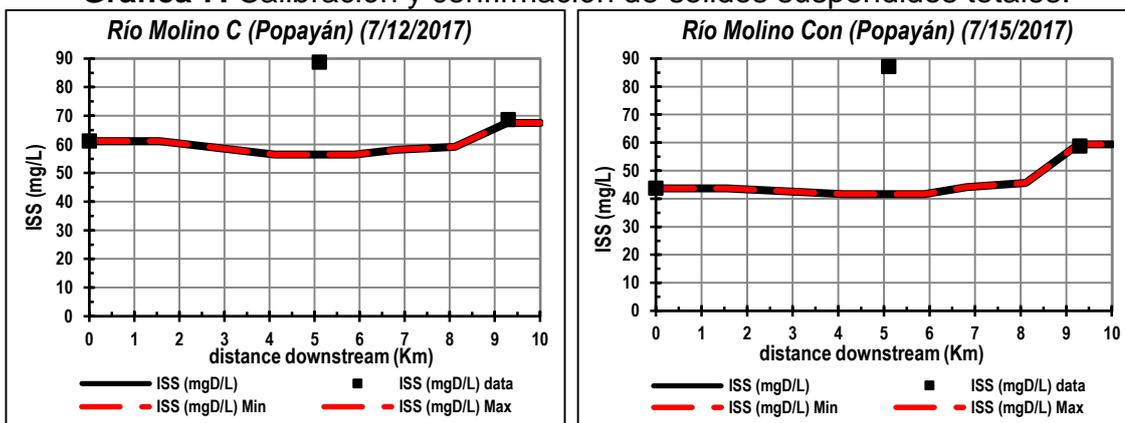
Gráfica 6. Calibración y confirmación de temperatura.



Fuente: Modelo Qual2kw.

En el parámetro SST se analiza en la gráfica 7 que en la calibración los valores son altos desde la parte de inicio aguas arriba y se mantiene así durante el tramo dado que el monitoreo se realizó en invierno, época en la que se presenta incremento de caudal generando una mayor turbiedad, de manera contraria pasa en la confirmación donde los datos fueron tomados en época de verano.

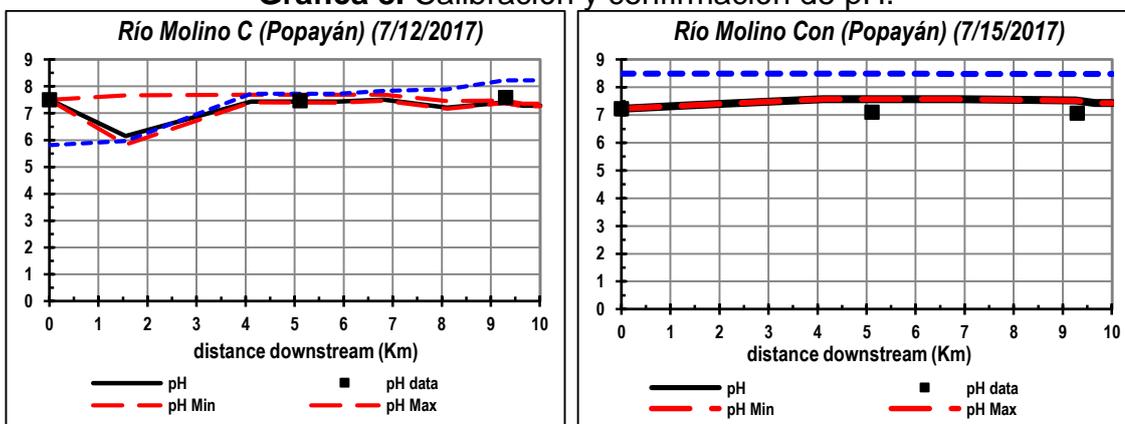
Gráfica 7. Calibración y confirmación de solidos suspendidos totales.



Fuente: Modelo Qual2kw.

Los resultados visualizados en la gráfica 8 se observa que el pH presenta en todas las corridas del modelo un ajuste confiable, debido a que en todo el tramo de estudio tanto en la corriente receptora como en los vertimientos los valores obtenidos en campo no muestran variaciones y esto facilita lo mencionado anteriormente.

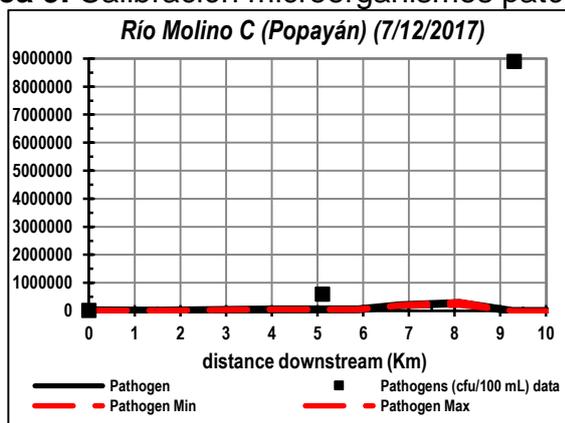
Gráfica 8. Calibración y confirmación de pH.



Fuente: Modelo Qual2kw.

Para los microorganismos patógenos no se pudo realizar la confirmación por falta de información de los datos históricos, en el proceso de calibración se puede observar en la gráfica 9 que no hay un buen ajuste entre los datos calculados por el modelo y los datos medidos en campo, de igual forma sucede en la simulación al aumentar las cargas contaminantes con respecto al eliminar los vertimientos se ve reflejado que los microorganismos disminuyen en la corriente pero falta un mayor ajuste para que los datos del modelo concuerden con los resultados de laboratorio.

Gráfica 9. Calibración microorganismos patógenos.



Fuente: Modelo Qual2kw.

4.2. FASE II: PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS

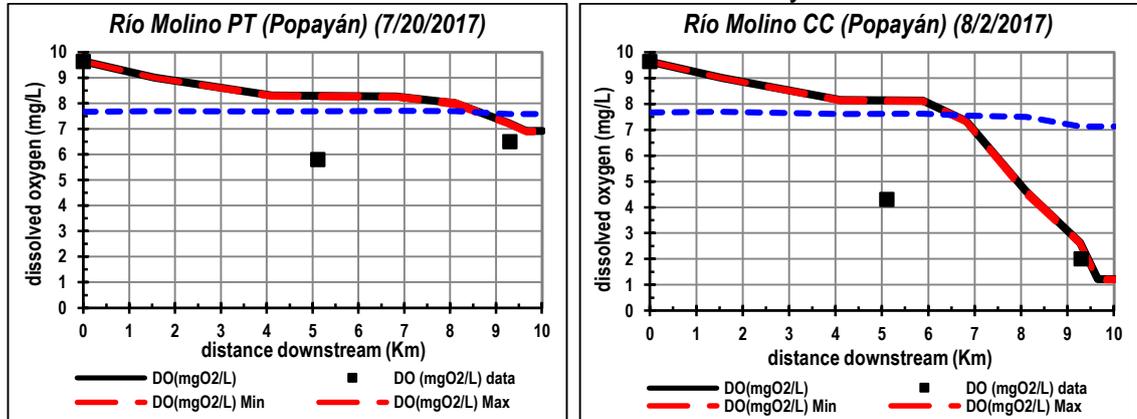
Como se mencionó anteriormente los planteamientos de escenarios están proyectados como:

- **Escenario 1:** implementación de la PTAR.
- **Escenario 2:** aumento de las cargas contaminantes.

Para el parámetro OD al eliminar los vertimientos de agua residual domestica con la implementación de la PTAR se determina que el comportamiento del río aguas abajo se encuentra en condiciones adecuadas y óptimas para la preservación y conservación de la diversidad biológica con un valor que se mantiene durante los primeros 8 Km sobre 8.0 mgO₂/L en el modelo Qual2kw gráfica 10; en el modelo Streeter & Phelps el parámetro no disminuye de 7.8 mgO₂/L en la misma distancia gráfica 11, presentando su valor más bajo después de la unión con el río Ejido Km 9.3 con 6.7 mgO₂/L en ambos modelos. En el segundo escenario al aumentar las cargas contaminantes se observa que las variaciones afectan significativamente la calidad del agua en el tramo de estudio aguas abajo de los vertimientos, sobre todo en el modelo Qual2kw donde a partir de la primera descarga el OD decae notablemente hasta terminar con una concentración final de 1.25 mgO₂/L a comparación con el modelo Streeter & Phelps que después del Km 9.0 el parámetro empieza a disminuir hasta finalizar con una concentración de 1.3 mgO₂/L, a esto se le

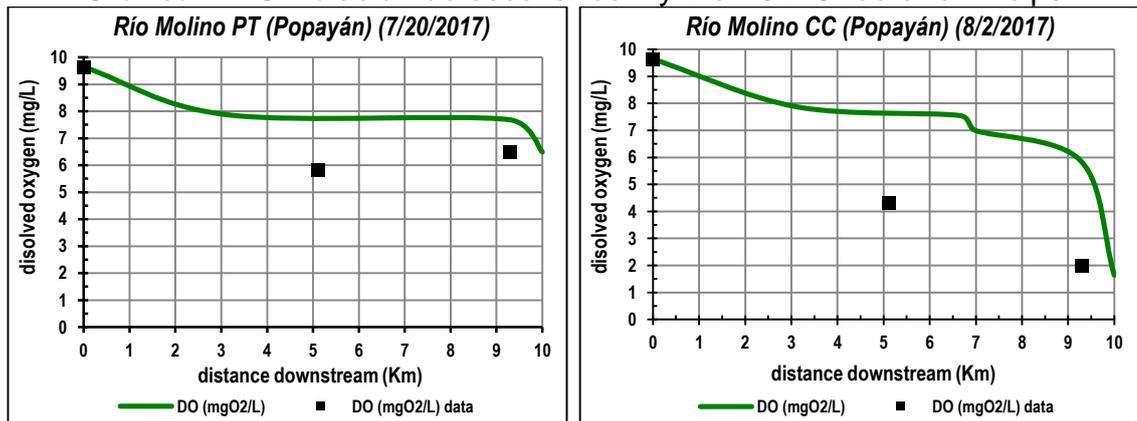
suma la disminución de velocidad por la poca pendiente que presenta el río en este tramo y por ende la oxigenación es poca.

Gráfica 10. Simulación de escenarios 1 y 2 en OD.



Fuente: Modelo Qual2kw.

Gráfica 11. Simulación de escenarios 1 y 2 en OD Streeter & Phelps.

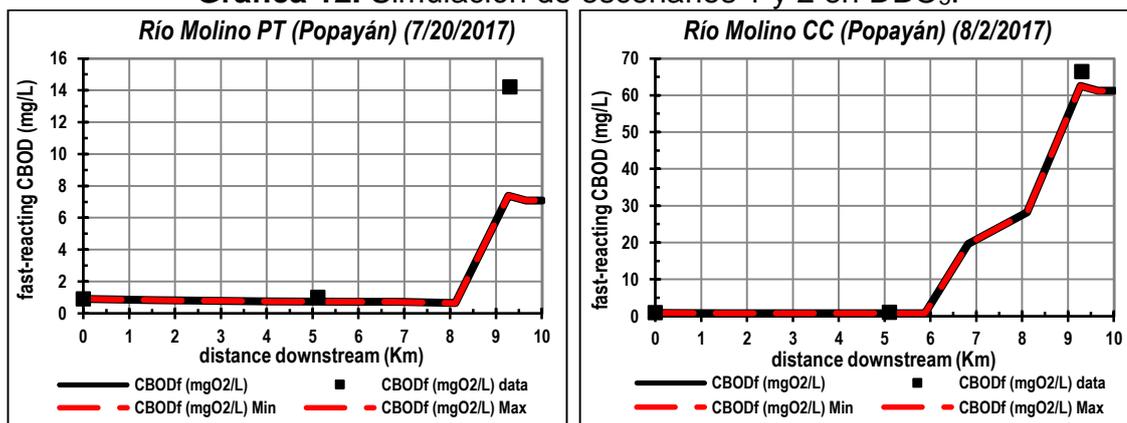


Fuente: Modelo Streeter & Phelps.

El parámetro DBO_5 en los escenarios planteados se presenta gran diferencia en el punto final del monitoreo en donde al implementar la PTAR en el modelo Qual2kw gráfica 12 reduce considerablemente la DBO_5 iniciando desde el tramo Km 0 hasta el Km 8, con un valor que no sobrepasa de 2 mg/L y a partir del Km 8 aumenta sin exceder los 8 mg/L en el punto final Km 10, el cual es un valor característico de aguas con poco contenido de materia orgánica, de igual manera pasa con el modelo Streeter & Phelps gráfica 13 en el tramo inicial donde la BDO_5 no pasa de 2 mg/L desde el Km 0 hasta el Km 9, a partir de esta distancia empieza a incrementarse hasta desembocar al río Cauca donde termina con una concentración no superior a 8 mg/L. En el otro escenario al incrementar las cargas contaminantes en ambos modelos la concentración de

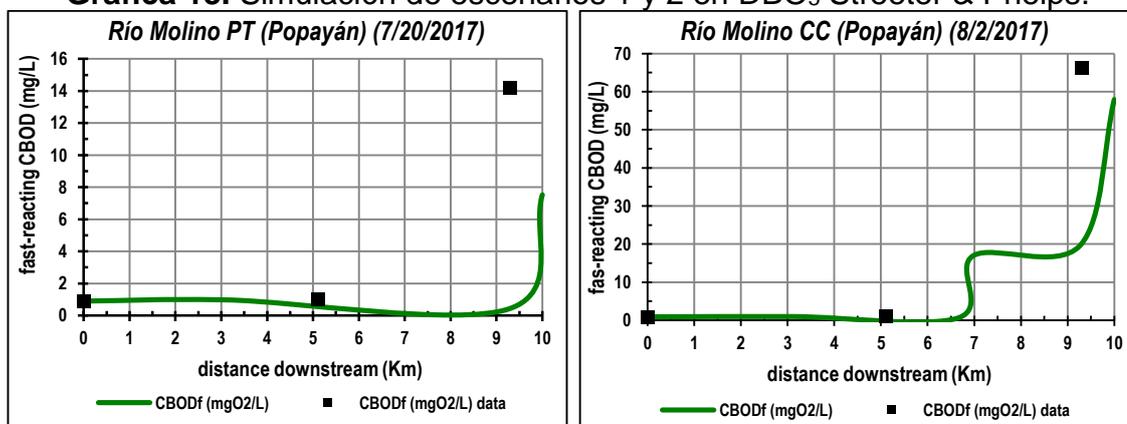
la misma aumenta afectando la calidad del río Molino, a partir del Km 6 hasta finalizar al Km 10 con una concentración que no excede los 40 mg/L de DBO₅ en el modelo Streeter & Phelps, mientras que en el modelo Qual2kw empieza a incrementar en la misma distancia pero alcanza una concentración de 66 mg/L en el tramo final.

Gráfica 12. Simulación de escenarios 1 y 2 en DBO₅.



Fuente: Modelo Qual2kw.

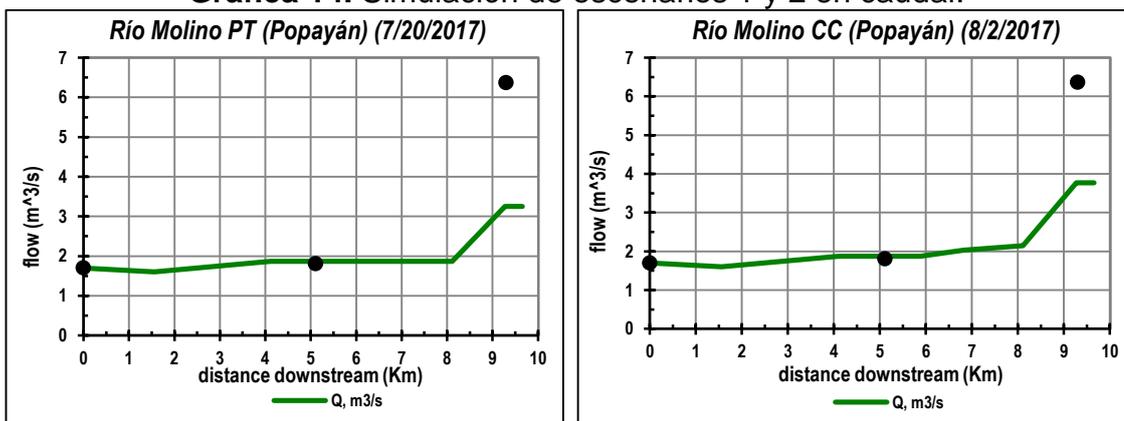
Gráfica 13. Simulación de escenarios 1 y 2 en DBO₅ Streeter & Phelps.



Fuente: Modelo Streeter & Phelps.

En los escenarios a futuro se analiza en la gráfica 14 del parámetro caudal que hay un incremento de caudal a partir del Km 8, la diferencia entre las dos simulaciones es que en el segundo escenario termina con un caudal de 3.8 m³/s mientras que en el primero el caudal disminuye hasta 3.2 m³/s debido a que en este escenario los vertimientos no se dispondrán en la fuente receptora.

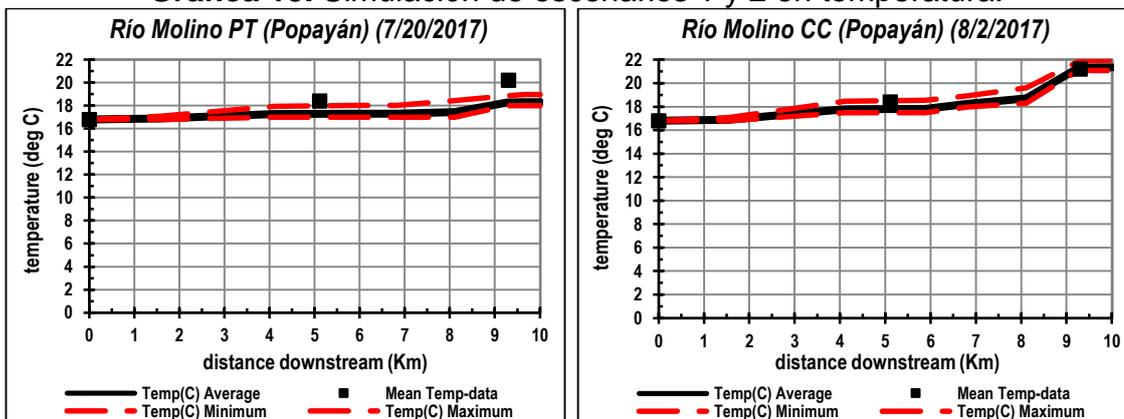
Gráfica 14. Simulación de escenarios 1 y 2 en caudal.



Fuente: Modelo Qual2kw.

Para las simulaciones proyectadas en el parámetro temperatura gráfica 15 la variación de rangos no es significativa, debido a que la temperatura de los vertimientos no se ve afectada, pues en la ciudad no se encuentra ningún tipo de industrias que alteren este parámetro.

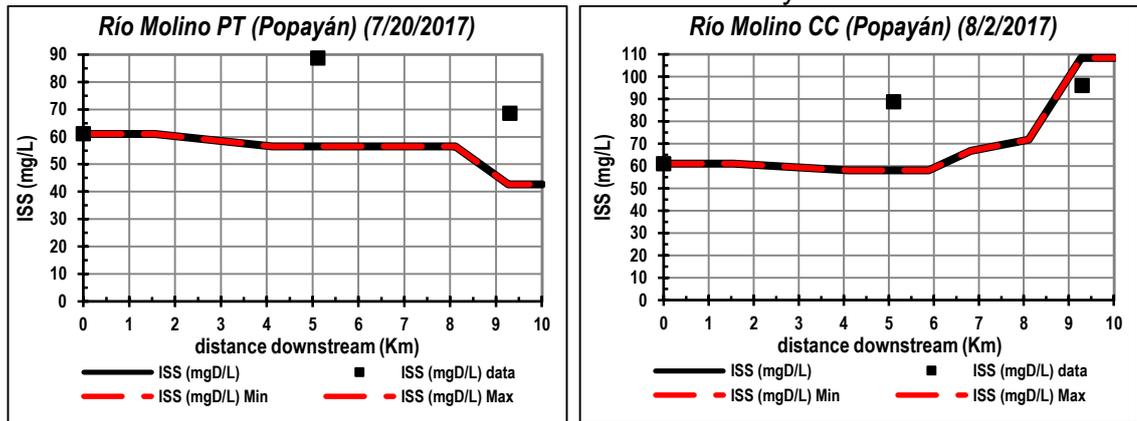
Gráfica 15. Simulación de escenarios 1 y 2 en temperatura.



Fuente: Modelo Qual2kw.

En la gráfica 16 los SST las proyecciones a futuro se observa que en el primer escenario al no tener descargas de vertimientos domésticos aguas abajo el parámetro disminuye en la corriente sobre el final del tramo de estudio con una concentración máxima de 61 mg/L y final de 42 mg/L, lo contrario sucede en el otro escenario donde el parámetro viene estable y al aumentar las cargas contaminantes de los vertimientos en el punto donde se realizan las descargas se incrementa considerablemente hasta llegar a una concentración de 108 mg/L.

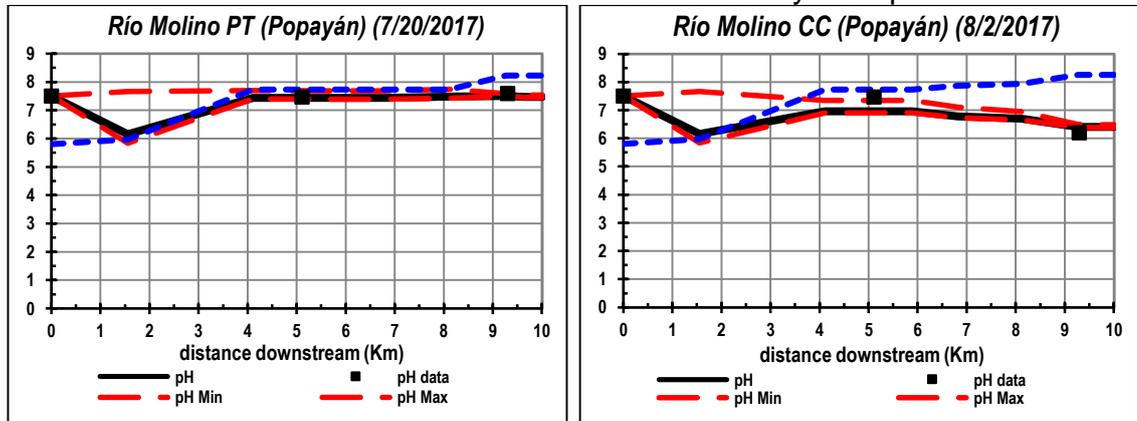
Gráfica 16. Simulación de escenarios 1 y 2 en SST.



Fuente: Modelo Qual2kw.

En la gráfica 17 se observa en los análisis de escenarios al contar con una PTAR el pH se mantiene estable aguas abajo, a diferencia de aumentar las cargas contaminantes termina con una tendencia de neutro a acidez, esto debido a que en la ciudad no hay ningún tipo de industrias que afecten significativamente este parámetro en las aguas residuales y por consecuente en el río.

Gráfica 17. Simulación de escenarios 1 y 2 en pH.

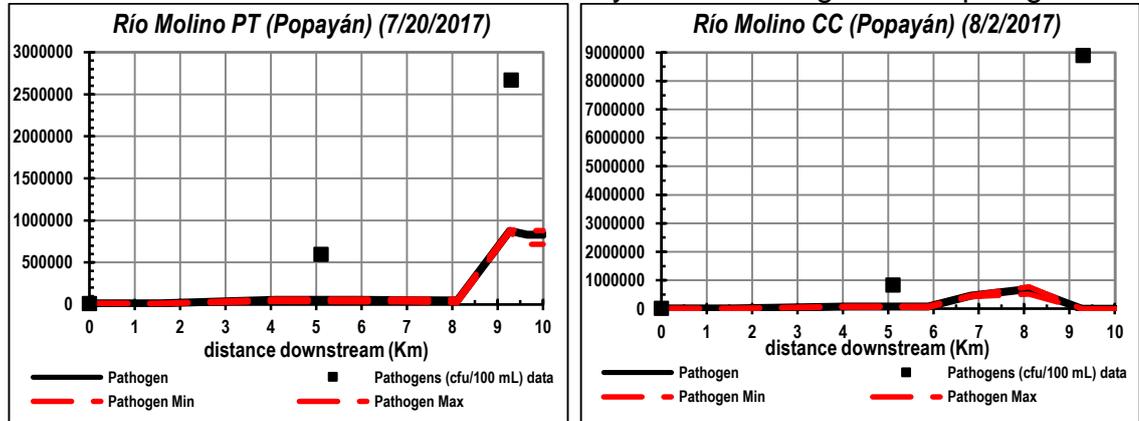


Fuente: Modelo Qual2kw.

Para los microorganismos patógenos no se pudo realizar la confirmación por falta de información de los datos históricos, en el proceso de calibración se puede observar en la gráfica 9 que no hay un buen ajuste entre los datos calculados por el modelo y los datos medidos en campo, de igual forma sucede en la simulación al aumentar las cargas contaminantes con respecto al eliminar los vertimientos se ve reflejado que los microorganismos disminuyen en la

corriente pero falta un mayor ajuste para que los datos del modelo concuerden con los resultados de laboratorio, los resultados se observan en la gráfica 18.

Gráfica 18. Simulación de escenarios 1 y 2 en microorganismos patógenos.



Fuente: Modelo Qual2kw.

4.3. FASE III: COMPARACIÓN DE LOS MODELOS

Para comparar los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps con los resultados obtenidos que se observan en los cuadros 22 y 23 de las gráficas de OD y DBO₅ en calibración y confirmación, se utilizó las ecuaciones 14 y 15.

Cuadro 22. Resultados obtenidos de las gráficas de OD (mg/L).

Distancia	Calibración		Confirmación	
	Qual2kw	Streeter & Phelps	Qual2kw	Streeter & Phelps
0	9.6	9.6	7.1	7.1
1	9.2	9	7.1	7.2
2	8.8	8.4	7.2	7.3
3	8.6	7.9	7.2	7.4
4	8.3	7.8	7.3	7.5
5	8.2	7.7	7.4	7.5
6	8.1	7.7	7.4	7.7
7	7.6	7.2	6.8	7
8	6.1	7.1	5.7	7
9	4.3	6.8	3.9	6.8
10	2.8	2.4	2.5	2.5

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 23. Resultados obtenidos de las gráficas de DBO₅ (mg/L).

Distancia	Calibración		Confirmación	
	Qual2kw	Streeter & Phelps	Qual2kw	Streeter & Phelps
0	1	1	1	1
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	11	13	11	12
8	15	14	14	13
9	28	14	28	14
10	30	30	30	30

Fuente: Elaboración propia.

Después de obtener los datos se procede a realizar los cálculos estadísticos con el objeto de comparar las medias en ambos modelos, se plantea la hipótesis de igualdad de medias, puesto que no hay ninguna conjetura de cuál de los dos modelos puede reportar valores mayores, luego el planteamiento es: H_0 que las medias de ambos modelos sean iguales o H_A que las medias de ambos modelos sean diferentes, es decir:

$$H_0: \mu_x = \mu_y$$

$$H_A: \mu_x \neq \mu_y$$

A continuación se desarrolla un ejemplo con los datos de calibración del OD en los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps cuadro 22. Se tiene los siguientes valores calculados:

$$\mu_x = \text{media Qual2kw}$$

$$n_x = 11$$

$$S_x^2 = 4.59$$

$$\bar{X} = 7.42$$

$$\alpha = 0.05$$

$$\mu_y = \text{media Streeter \& Phelps}$$

$$n_y = 11$$

$$S_y^2 = 3.45$$

$$\bar{Y} = 7.42$$

$$gl = 11+11-2 = 20$$

Con estos datos se procede a calcular el estimador de varianza y posteriormente la t student, como se muestra a continuación:

$$S_p^2 = \frac{(n_x - 1)S_x^2 + (n_y - 1)S_y^2}{n_x + n_y - 2} = \frac{(11 - 1) \times 4.59 + (11 - 1) \times 3.45}{11 + 11 - 2}$$

$$S_p^2 = 4.02$$

$$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}} = \frac{7.42 - 7.42}{4.02 \sqrt{\frac{1}{11} + \frac{1}{11}}}$$

$$t_0 = 0$$

Como se tiene que $gl=20$ y $\alpha/2 = 0.025$ como se observa en el anexo 18 los puntos críticos para la distribución t de Student, de esta manera se obtiene que $t_{0.025,20} = 2.08$, se debe rechazar H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2, gl}$. Como $|t_0| = 0 < 2.08 = t_{0.025,20}$, no se rechaza.

Se realiza el mismo procedimiento para la confirmación de OD donde se obtiene los siguientes resultados:

$\mu_x =$ media Qual2kw
 $n_x = 11$
 $S_x^2 = 2.71$
 $\bar{X} = 6.33$
 $\alpha = 0.05$

$\mu_y =$ media Streeter & Phelps
 $n_y = 11$
 $S_y^2 = 2.12$
 $\bar{Y} = 6.82$
 $gl = 11 + 11 - 2 = 20$

$t_{0.025,20} = 2.08$ el resultado es el mismo para todos ya que se tiene la misma cantidad de datos, posteriormente se calcula el estimador de varianza y t student.

$$S_p^2 = 2.42 \quad t_0 = | - 0.47 | = 0.47$$

De esta manera se obtiene que $t_{0.025,20} = 2.08$, se debe rechazar H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2, gl}$. Como $|t_0| = 0.47 < 2.08 = t_{0.025,20}$, no se rechaza.

Para desarrollar el ejemplo de la DBO_5 se cuenta con la siguiente información:

$\mu_x =$ media Qual2kw
 $n_x = 11$
 $S_x^2 = 128.42$
 $\bar{X} = 8.27$
 $\alpha = 0.05$

$\mu_y =$ media Streeter & Phelps
 $n_y = 11$
 $S_y^2 = 91.49$
 $\bar{Y} = 7.09$
 $gl = 11 + 11 - 2 = 20$

Posteriormente se calcula el estimador de varianza y t student.

$$S_p^2 = 109.9 \quad t_0 = 0.025$$

De esta manera se obtiene que $t_{0.025,20} = 2.08$, se debe rechazar H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2, gl}$. Como $|t_0| = 0.025 < 2.08 = t_{0.025,20}$, no se rechaza.

Para desarrollar el ejemplo de la DBO_5 se cuenta con la siguiente información:

$\mu_x =$ media Qual2kw
 $n_x = 11$
 $S_x^2 = 127.16$
 $\bar{X} = 8.18$
 $\alpha = 0.05$

$\mu_y =$ media Streeter & Phelps
 $n_y = 11$
 $S_y^2 = 89.09$
 $\bar{Y} = 6.91$
 $gl = 11+11-2 = 20$

Posteriormente se calcula el estimador de varianza y t student.

$$S_p^2 = 108.13 \quad t_0 = 0.027$$

De esta manera se obtiene que $t_{0.025,20} = 2.08$, se debe rechazar H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2, gl}$. Como $|t_0| = 0.027 < 2.08 = t_{0.025,20}$, no se rechaza.

Como todos los resultados de OD y DBO_5 tanto en calibración como en confirmación de ambos modelos fue $|t_0| < t_{0.025,20}$ esto significa que H_0 no se rechaza, se acepta por lo que se concluye que los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps reportan resultados similares en estos parámetros. Es decir, los modelos son estadísticamente iguales en cuanto a sus medias de calibración y confirmación.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se aplicaron los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps temporalmente en donde se determinó que la calidad del agua del río Molino aguas abajo después del Km 6 se encuentra en condiciones por debajo de lo exigido en la normatividad reafirmando la necesidad y pertinencia que se adelanten procesos de Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCH), para recuperar la calidad de esta.

Se proyectó la calidad del agua del río Molino contemplando dos escenarios, el primer escenario al implementar una obra de saneamiento PTAR, en donde se refleja que el río tiene unas características óptimas de calidad para garantizar la diversidad biológica. El segundo escenario planteado al no tener una planta de tratamiento y al aumentar las cargas contaminantes de los vertimientos se determina que la fuente hídrica a partir del km 6 se encontraría en condiciones muy preocupantes en cuanto a su contaminación, demostrando la necesidad de planificar y diseñar obras de tratamiento que reduzcan estos contaminantes a un nivel aceptable y así mejorar la calidad del agua.

Se determinó que los parámetros que más se ajustan a la realidad fue el pH y la temperatura, en ambos casos se tiene como similitud que los valores no varían notablemente a lo largo del tramo de estudio y por ende los resultados del modelo.

Se estableció que los resultados de las gráficas de la confirmación son más robustos que la calibración, lo cual de acuerdo a la revisión bibliográfica consultada es lo más coherente.

Se verificó que los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps son una herramienta útil y válida para modelar en las corrientes superficiales, por consiguiente es preciso emprender acciones de modelación en las otras fuentes de la ciudad que presentan aportes de carga orgánica, pues su uso es necesario para la planificación y/o gestión del recurso hídrico.

Se determinó que los modelos se pueden ajustar a nuevos y múltiples vertimientos y/o tributarios de manera que se tome las mejores decisiones para minimizar los costos de inversiones en obras de saneamiento y a su vez cause el menor impacto negativo en la fuente receptora.

El modelo Qual2kw es más completo dado que tiene en cuenta otras variables que permiten analizar con mayor profundidad el estado actual de la calidad del agua de manera que se puede analizar alternativas de saneamiento y su efecto en la misma a diferencia del Streeter & Phelps.

Se compararon los resultados de OD y DBO₅ en ambos modelos de acuerdo a un análisis estadístico concluyendo que los resultados arrojados no presentan diferencias significativas en este sistema, por lo tanto los resultados son confiables y adecuados para realizar esta modelación de calidad del agua, sin embargo es de resaltar que el modelo Qual2kw representa mejor las gráficas al aumentar o disminuir la concentración del parámetro en la distancia.

5.2. RECOMENDACIONES

Para realizar campañas de monitoreo en campo se debe contar con equipos apropiados para minimizar el margen de error, de igual forma se debe garantizar lo máximo posible una buena toma y preservación de las muestras con el propósito de tener una modelación de mayor peso.

Por los resultados obtenidos en el trabajo es recomendable el uso de estos modelos en las demás sub-cuencas de la zona urbana de Popayán y en los municipios del departamento.

Según la magnitud y complejidad a realizar dicha modelación se recomienda usar el modelo Qual2kw el cual cumple satisfactoriamente con las necesidades que el proyecto requiera.

El modelo Streeter & Phelps es recomendable para proyectos de mínima cuantía en donde solo se requiera modelar OD y DBO₅ que también cumplen satisfactoriamente los resultados.

En general la calibración y confirmación de los modelos en condiciones de baja y alta pluviosidad afirman que los parámetros pueden ser usados para tener una aproximación de la calidad del agua cercana, sin embargo es recomendable mejorar el ajuste en parámetros como patógenos teniendo en cuenta las unidades y la forma de cada especie química a evaluar.

Para la recuperación del río Molino aguas abajo después de la descarga de agua residual doméstica de la Aeronáutica Civil es necesario eliminar los vertimientos de agua residual doméstica así como también intervenir en los tributarios que recibe, en este caso mejorar el río Ejido que se encuentra seriamente contaminado.

Se debe considerar que al realizar un trabajo como de este tipo es necesario recoger la mayor cantidad de parámetros para el modelo Qual2kw de manera que se tenga una apropiada calibración y confirmación.

Para realizar una modelación de calidad del agua con el modelo Streeter & Phelps se debe determinar la constante de desoxigenación con una prueba de trazadores para mayor exactitud en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Lora, J. M. Arnal, F. Lopez y M. C. Leon, «Depuración de aguas residuales por proceso de membrana,» *Dyna*, vol. 88, pp. 99-104, Enero 2013.
- [2] J. V. Almeida, «Modelo para simular la evolución del oxígeno disuelto en embalses,» *Ingeniería del agua*, vol. 3, nº 2, pp. 63-74, Junio 1996.
- [3] Corporación Autónoma regional de nariño, «Plan de ordenamiento del recurso hídrico,» Pasto, 2011.
- [4] R. Montelongo, A. J. Gordillo, E. M. Otazo, J. R. Villagomez, O. A. Acevedo y F. Prieto, «Modelacio de la calidad del agua del río Tula, estado de Hidalgo, México,» *Dyna*, vol. III, nº 154, pp. 5-18, Marzo 2008.
- [5] J. Domínguez , J. Borroto y A. Hernández, «Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río Almendares,» *Cenic*, vol. 36, nº 2, pp. 63-75, 2003.
- [6] Corporación Autónoma Regional del Cauca, «Calibración del medelo de simulación de la calidad del agua Qual2kw del río Palo con fines de ordenamiento del recurso hídrico,» Popayán, 2014.
- [7] R. Peña, «RR Ingeniería,» 23 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://www.rringenieria.com/blog1/34-contaminaci%C3%B3n-de-r%C3%ADos-en-colombia.html>. [Último acceso: 14 Mayo 2016].
- [8] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Estudio nacional del agua,» Panamericana Formas e Impresos, Bogotá, 2015.
- [9] Corporación Autonoma Regional del Cauca, «Caracterizacion ambiental, plan departamental de aguas y saneamiento básico,» Popayán, 2010.
- [10] Acueducto y Alcantarillado de Popayán, «Manual para la cosntrucción de redes de acueducto y alcantarillado en el municipio de Popayán,» 18

- Noviembre 2009. [En línea]. Available: <http://acueductopopayan.com.co/wp-content/uploads/2012/08/manual-para-construccion-de-redes1.pdf>. [Último acceso: 2 Septiembre 2016].
- [11] Acueducto y Alcantarillado de Popayán, «Socialización planta de tratamiento de aguas residuales,» 17 Junio 2016. [En línea]. Available: <http://www.acueductopopayan.com.co/wp-content/uploads/2016/06/Ayuda-de-memoria-17-de-Junio-2016.pdf>. [Último acceso: 19 Agosto 2016].
- [12] Acueducto y Alcantarillado de Popayán, «Popayán necesita una planta de tratamiento de aguas residuales,» 2 Agosto 2016. [En línea]. Available: <http://www.acueductopopayan.com.co/informese/noticias/popayan-necesita-una-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales/>. [Último acceso: 12 Octubre 2016].
- [13] G. L. Cárdenas, F. Mafla, M. L. López y C. L. Duque, «Simulación de la calidad del agua en la quebrada Chapal,» *Unimar*, vol. 1, n° 27, pp. 11-24, 2009.
- [14] Corporación Autónoma Regional del Cauca, «Acuerdo N° 0015, Reduccion de cargas contaminantes en DBO y SST,» 25 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.crc.gov.co/index.php/quienes-somos/historia/47-gestion-corporativa/noticias-eventos/noticias/181-acuerdo-no-0015-del-25-de-noviembre-de-2014>. [Último acceso: 16 Agosto 2016].
- [15] Corporación Autónoma regional de Quindío, «Modelación de la calidad del agua quebrada La Florida municipio de Armenia Quindío,» Armenia, 2015.
- [16] Acueducto y Alcantarillado de Popayán, «Acuerdo de voluntades del río Molino,» 21 octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.acueductopopayan.com.co/informese/comunicados/conversato>

rio-acuerdo-de-voluntades-del-rio-molino/. [Último acceso: 24 Septiembre 2016].

- [17] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, «Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico,» Nuevas ediciones, Bogotá, 2010.
- [18] J. G. Pelletier y S. C. Chapra, «Qual2Kw, A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration,» *Scencedirect*, vol. 21, nº 3, pp. 419-425, March 2006.
- [19] R. Zhang, X. Qian, X. Yuan, R. Ye, B. Xia y Y. Wang, «Simulation of Water Environmental Capacity and Pollution Load Reduction Using QUAL2K for Water Environmental Management,» *Environmental reseach and public health*, vol. 9, December 2012.
- [20] J. P. Cunha, R. P. Bittencourt, M. De Sá Farias, I. Pinheiro, L. F. Coutinho y R. Fia, «Deoxygenation rate, reaeration and potential for self-purification of a small tropical urban stream,» *Scielo*, vol. 10, nº 4, December 2015.
- [21] D. De Souza, F. Tomazini , A. Donizetti , A. Silveira, M. De Julio y J. C. De Souza , «Avaliação da qualidade da água e autodepuração do ribeirão do meio, Leme,» *Scielo*, vol. 13, nº 3, December 2008.
- [22] Area Metropolitana del Valle de Aburra, «Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá en jurisdicción del área metropolitana,» Medellín , 2009.
- [23] A. Aznar J, «Determinación de los parámetros fisico-químicos de calidad las aguas,» *Gestión Ambiental*, vol. 3, nº 23, pp. 12-19, 2000.
- [24] Corporación Autónoma Regional del Cauca, «Informe de caracterización de aguas superficiales y vertimientos líquidos de la ciudad de Popayán,» Popayán, 2017.

- [25] L. A. Camacho y M. Díaz, «Metodología para la obtención de un método predictivo de transporte de solutos y de calidad del agua en ríos: caso río Bogotá,» de *Usos Múltiples del Agua, para la Vida y el Desarrollo Sostenible*, Cartagena, 2003.
- [26] M. Castro, «Aplicación del Qual2kw en la modelación de la calidad del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia,» Manizales, 2015.
- [27] F. Santamaría, «Análisis simplificado de oxígeno disuelto en el río Ubaté por el modelo Qual2k,» Bogota , 2013.
- [28] E. Torres Q y E. Gonzales, «Aplicacion del modelo de simulacion hidráulica Hec-Ras para la emisión de pronosticos hiroológicos de inundaciones en tiempo real en la cuenca media del río Bogota,» Bogotá, 2012.
- [29] Washington State Department of Ecology, Qual2kw user manual, Washington, 2008.
- [30] I. L. Vera, «Aplicación de técnica de optimización mediante Algoritmos geneticos para la 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,» Bogotá, 2007.
- [31] R. Montes, I. Navarro, R. Dominguez y B. Jiménez, «Modificación de la capacidad de autodepuración del río Magdalena ante el cambio climático,» *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 4, nº 5, pp. 71-83, Noviembre 2013.
- [32] M. Hidalgo y E. Mejía, «Diagnóstico de la contaminación por aguas residuales domésticas, cuenca baja de la quebrada la macana, San Antonio de prado. Municipio de Medellín,» Medellín, 2010.
- [33] Acueducto y Alcantarillado de Popayán, «Información micro cuenca río Molino,» [En línea]. Available:

<http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-molino/>.

[Último acceso: 5 Octubre 2016].

- [34] Usgs Science for a changing world , «Surface water field techniques verified roughness characteristics natural chanel,» Middletown, New York , 2001.
- [35] S. C. Chapra, Surface water Quality modeling, Chicago: Waveland Press, 2008.
- [36] H. Gutierrez P y R. De La Vara S, Análisis y diseño de experimentos, Mexico D.F: Mc Grawll Hill.

ANEXOS

Anexo 1. Equipos y materiales para la toma de muestras.

Equipos y Materiales	Cantidad
Balde de 12 L	1
Bolígrafo	1
Botas de caucho	2 pares
Cámara	1
Cinta de enmascarar	1
Cinta métrica	1
Formatos de captura de datos en campo	7
Frasco lavador con agua destilada	1
GPS	1
Guantes	2 pares
Molinete	1
Equipo multiparamente	1
Equipo phmetro	1
Nevera de icopor con suficiente hielo	2
Overol	1
Recipientes (vidrio y/o plástico) para muestreo	1
Varillas	1

Anexo 2. Aforo y toma de muestras Pueblillo.



Anexo 3. Aforo y toma de muestras Tributario Cantera.



Anexo 4. Aforo y toma de muestras Pte. Bolívar.



Anexo 5. Aforo y toma de muestras Vertimiento Aeronáutica Civil.



Anexo 6. Aforo y toma de muestras Vertimiento Pandiguando.



Anexo 7. Aforo y toma de muestras Tributario río Ejido.



Anexo 8. Aforo y toma de muestras unión Molino y Ejido.



Anexo 9. Formato para recolección de datos en campo del río.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN

TRABAJO DE GRADO MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MOLINO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE POPAYÁN – CAUCA.

Guía de trabajo para la recolección de datos en campo.
 Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Fecha: _____ Hora: _____
 Sitio de Muestreo: _____ Punto N°: _____
 Condiciones climatológicas: _____
 Observaciones del entorno: _____

1. Datos Geográficos: _____
 1.1. Coordenadas Geográficas: _____
 1.2. Altitud: _____

2. Características hidráulicas en el río.

Sección	Ancho (m)	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
Total			

3. Parámetros tomados in situ.

Conductividad (µS/cm)	pH	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)

Anexo 10. Formato para recolección de datos en campo de vertimientos.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN

TRABAJO DE GRADO MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MOLINO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE POPAYÁN – CAUCA.

Guía de trabajo para la recolección de datos en campo.
 Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Fecha: _____ Hora: _____
 Sitio de Muestreo: _____ Punto N°: _____
 Condiciones climatológicas: _____
 Observaciones del entorno: _____

1. Datos Geográficos: _____
 1.1. Coordenadas Geográficas: _____
 1.2. Altitud: _____

2. Características Hidráulicas del vertimiento.

Diámetro (m)	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)	Q (m ³ /s)

3. Parámetros tomados in situ.

Conductividad (µS/cm)	pH	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)

Anexo 11. Resultados en puntos de monitoreo sobre el río.

Reporte N° 145		Código: FT-PDPA-LA027
	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL	Fecha: 13/02/2013
	REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA-	Versión: 3 Página 1 de 2
Fecha: Mayo 8 de 2017.		
Cliente: Subdirección Defensa del Patrimonio Ambiental		Solicitud N°: 103
Dirección: Carrera 7 N° 1N-28, Popayán		Teléfono: 8203232
Municipio de muestreo: Popayán	Fecha de Recepción: Abril 24 de 2017.	
	Fecha de Análisis: Abril 24 a mayo 8.	
Muestreo:		
Plan de Muestreo N°	N/A	
Fecha de Muestreo	Abril 24 de 2017	
Lugar de Muestreo	Río Molino	
Procedimiento de muestreo	N/A	
Condiciones ambientales	N/A	
Identificación de la muestra		
Código Muestra	Sitio de Muestreo	
0292	Río Molino, Pueblillo	
0293	Quebrada La Cantera	
0294	Río Molino, puente Bolívar	
0297	Río Ejido, barrio Junín	
0298	Río Molino- Ejido, barrio Junín	
Variable/Método/Unidad:		
Variable	Método	Unidad
DBO ₅	SM5210B/SM4500-OG	mg/L
DQO	SM5220D, modificado	mg/L
DQO Filtrada	SM5220D, modificado	mg/L
SST	SM2540D	mg/L
Color	SM 2120 C	UPC
Turbiedad	SM 2130 B	UNT
Dureza	SM 2340C	mgCaCO ₃ /L
Nitritos	SM 4500-NO ₂ -B	mg NO ₂ -N/L
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg NO ₃ -N/L
Nitrógeno amoniacal	SM 4500-NH ₃ F, modificado	mg NH ₄ -N/L
Ortofosfatos	SM4500-P E, Modifica	mg PO ₄ -P/L
Coliformes Totales	SM 9223 B	Ufc/100ml
Coliformes Fecales	SM 9223 B	Ufc/100ml
<p>Carrera 7 # 1N - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas Pbx: 8203232 fax: 092 - 8203251 Línea verde: 018000932855 www.crc.gov.co</p>		
Laboratorio Ambiental: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8245602		

Anexo 11. Continuación.

Reporte N° 145		Código: FT-PDPA-LA027	
	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL		Fecha: 13/02/2013
	REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA-		Versión: 3 Página 2 de 2

Resultados laboratorio:

Variable	Resultados				
	0292	0293	0294	0297	0298
DBO ₅	< 0.9	< 0.9	1.0	55.2	47.4
DQO	< 15	< 15	29.8	149	234
DQO Filtrada	< 15	< 15	< 15	78.8	42.1
SST	61.1	29.2	88.7	80.0	68.6
Color	131	82	99	195	219
Turbiedad	27.4	25.6	24.9	26.1	26.6
Dureza	28.6	33.8	38.6	46.1	43.8
Nitritos	0.02	0.02	0.02	0.06	0.05
Nitratos	0.8	0.6	0.6	0.4	0.7
Nitrógeno amoniacal	< 0.01	0.02	< 0.01	10.1	7.59
Ortofosfatos	< 0.02	0.03	0.03	0.06	0.04
Coliformes Totales	13400	370000	596000	6.7E6	8.9E6
Coliformes Fecales	800	74000	180000	1.9E6	2.1E6

Observaciones:

-Los resultados que se relacionan en este informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas. -Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.



DIEGO ZULUAGA VERA
Responsable Laboratorio Ambiental

Carrera 7 # 1N - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas
 Pbx: 8203232 fax: 092 - 8203251
 Línea verde: 018000932855
 www.crc.gov.co

Laboratorio Ambiental: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8245602



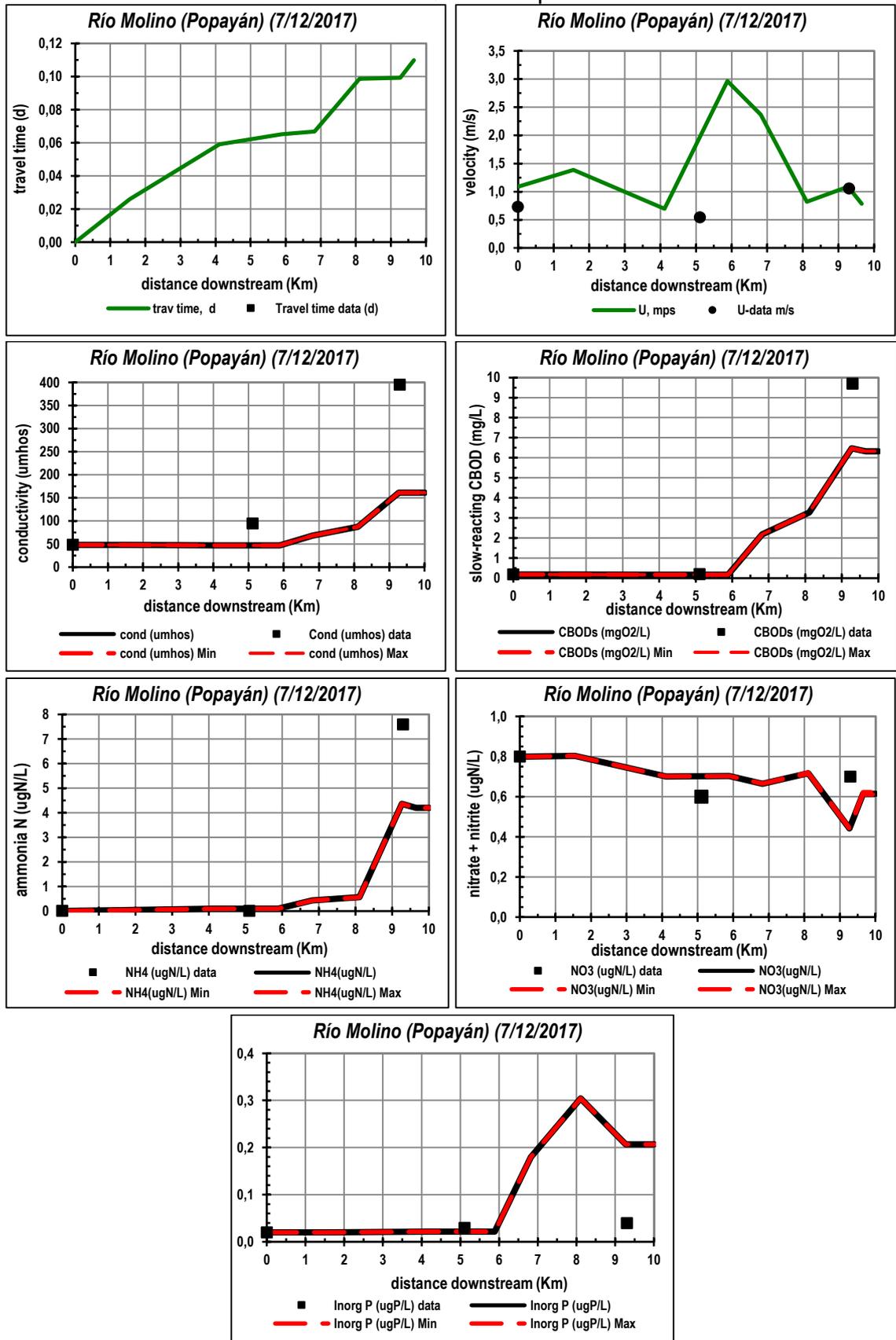
Anexo 12. Resultados en puntos de monitoreo en vertimientos entregados.

Reporte N° 146		Código: FT-PDPA-LA027		
	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL	Fecha: 13/02/2013		
	REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA-	Versión: 3 Página 1 de 1		
Fecha: Mayo 8 de 2017.				
Cliente: Subdirección Defensa del Patrimonio Ambiental		Solicitud N°: 103		
Dirección: Carrera 7 N° 1N-28, Popayán		Teléfono: 8203232		
Municipio de muestreo: Popayán	Fecha de Recepción: Abril 24 de 2017.			
Fecha de Análisis: Abril 24 a mayo 8.				
Muestreo:				
Plan de Muestreo N°	N/A			
Fecha de Muestreo	Abril 24 de 2017			
Lugar de Muestreo	Rio Molino			
Procedimiento de muestreo	N/A			
Condiciones ambientales	N/A			
Identificación de la muestra				
Código Muestra	Sitio de Muestreo			
0295	Vertimiento aeronáutica			
0296	Vertimiento Pandiguando			
Resultados laboratorio:				
Variable	Método	Unidad	Resultados	
			0295	0296
DBO ₅	SM5210B/SM4500-OG	mg/L	169	176
DQO	SM5220D, modificado	mg/L	280	342
DQO Filtrada	SM5220D, modificado	mg/L	152	187
SST	SM2540D	mg/L	85.0	82.0
Ortofosfatos	SM4500-P E, Modifica	mg PO ₄ -P/L	2.71	3.36
Nitrógeno amoniacal	SM 4500-NH ₃ F, modificado	mg NH ₄ -N/L	5.78	4.72
Coliformes Totales	SM 9223 B	Ufc/100ml	2.5E6	3.3E6
Coliformes Fecales	SM 9223 B	Ufc/100ml	1.1E6	1.6E6
Observaciones:				
-Los resultados que se relacionan en este informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas. -Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.				
DIEGO ZULUAGA VERA Responsable Laboratorio Ambiental				
Carrera 7 # 1N - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas Pbx: 8203232 fax: 092 - 8203251 Línea verde: 018000932855 www.crc.gov.co				
Laboratorio Ambiental: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8245602				

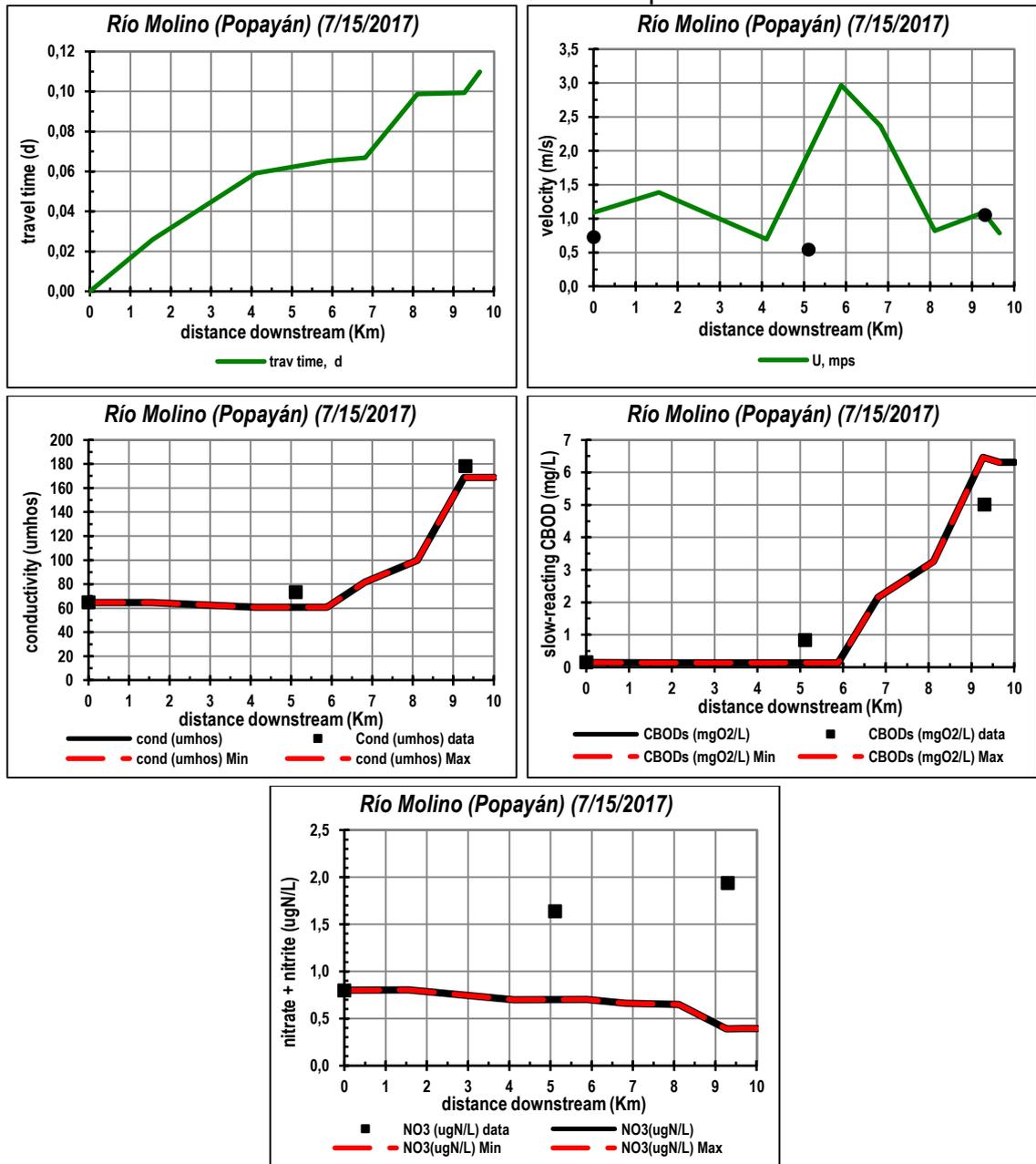
Anexo 13. Datos de entrada modelo Qual2kw.

			Upstream	Downstream	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM
Reach	Downstream	Reach	Distance	Distance								
Label	Label	Number	km	km	used to estimate values between the hourly inputs.)							
Antes de bocatoma	Tributario Cantera	1	0.00	3.11	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70
Tributario Cantera	Puente Bolivar	2	3.11	5.11	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70
Puente Bolivar	Ver. Aeronautica Civ	3	5.11	6.66	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70
Ver. Aeronautica Civ	Ver. Pandiguando	4	6.66	6.98	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70
Ver. Pandiguando	Tributario Rio Ejido	5	6.98	9.24	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70
Tributario Rio Ejido	Union Ejido - Molino	6	9.24	9.30	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70
Union Ejido - Molino	Desembocadura	7	9.30	10.01	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70	15.70
			Upstream	Downstream	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM
Reach	Downstream	Reach	Distance	Distance								
Label	Label	Number	km	km	used to estimate values between the hourly inputs.)							
Antes de bocatoma	Tributario Cantera	1	0.00	3.11	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Tributario Cantera	Puente Bolivar	2	3.11	5.11	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Puente Bolivar	Ver. Aeronautica Civ	3	5.11	6.66	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Ver. Aeronautica Civ	Ver. Pandiguando	4	6.66	6.98	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Ver. Pandiguando	Tributario Rio Ejido	5	6.98	9.24	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Tributario Rio Ejido	Union Ejido - Molino	6	9.24	9.30	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Union Ejido - Molino	Desembocadura	7	9.30	10.01	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
			Upstream	Downstream	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM
Reach	Downstream	Reach	Distance	Distance								
Label	Label	Number	km	km	rates at each time. Linear interpolation is used to estimate values between the hourly inputs.)							
Antes de bocatoma	Tributario Cantera	1	0.00	3.11	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%
Tributario Cantera	Puente Bolivar	2	3.11	5.11	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%
Puente Bolivar	Ver. Aeronautica Civ	3	5.11	6.66	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%
Ver. Aeronautica Civ	Ver. Pandiguando	4	6.66	6.98	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%
Ver. Pandiguando	Tributario Rio Ejido	5	6.98	9.24	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%
Tributario Rio Ejido	Union Ejido - Molino	6	9.24	9.30	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%
Union Ejido - Molino	Desembocadura	7	9.30	10.01	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%	57.0%
			Upstream	Downstream	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM
Reach	Downstream	Reach	Distance	Distance								
Label	Label	Number	km	km	station. Hourly values are applied as integrated values for each hour, e.g. the value at 12:00 AM is							
Antes de bocatoma	Tributario Cantera	1	0.00	3.11	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%
Tributario Cantera	Puente Bolivar	2	3.11	5.11	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%
Puente Bolivar	Ver. Aeronautica Civ	3	5.11	6.66	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%
Ver. Aeronautica Civ	Ver. Pandiguando	4	6.66	6.98	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%
Ver. Pandiguando	Tributario Rio Ejido	5	6.98	9.24	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%
Tributario Rio Ejido	Union Ejido - Molino	6	9.24	9.30	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%
Union Ejido - Molino	Desembocadura	7	9.30	10.01	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%
			Upstream	Downstream	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM
Reach	Downstream	Reach	Distance	Distance								
Label	Label	Number	km	km	used to estimate values between the hourly inputs.)							
Antes de bocatoma	Tributario Cantera	1	0.00	3.11	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20
Tributario Cantera	Puente Bolivar	2	3.11	5.11	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20
Puente Bolivar	Ver. Aeronautica Civ	3	5.11	6.66	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20
Ver. Aeronautica Civ	Ver. Pandiguando	4	6.66	6.98	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20
Ver. Pandiguando	Tributario Rio Ejido	5	6.98	9.24	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20
Tributario Rio Ejido	Union Ejido - Molino	6	9.24	9.30	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20
Union Ejido - Molino	Desembocadura	7	9.30	10.01	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20	217.20

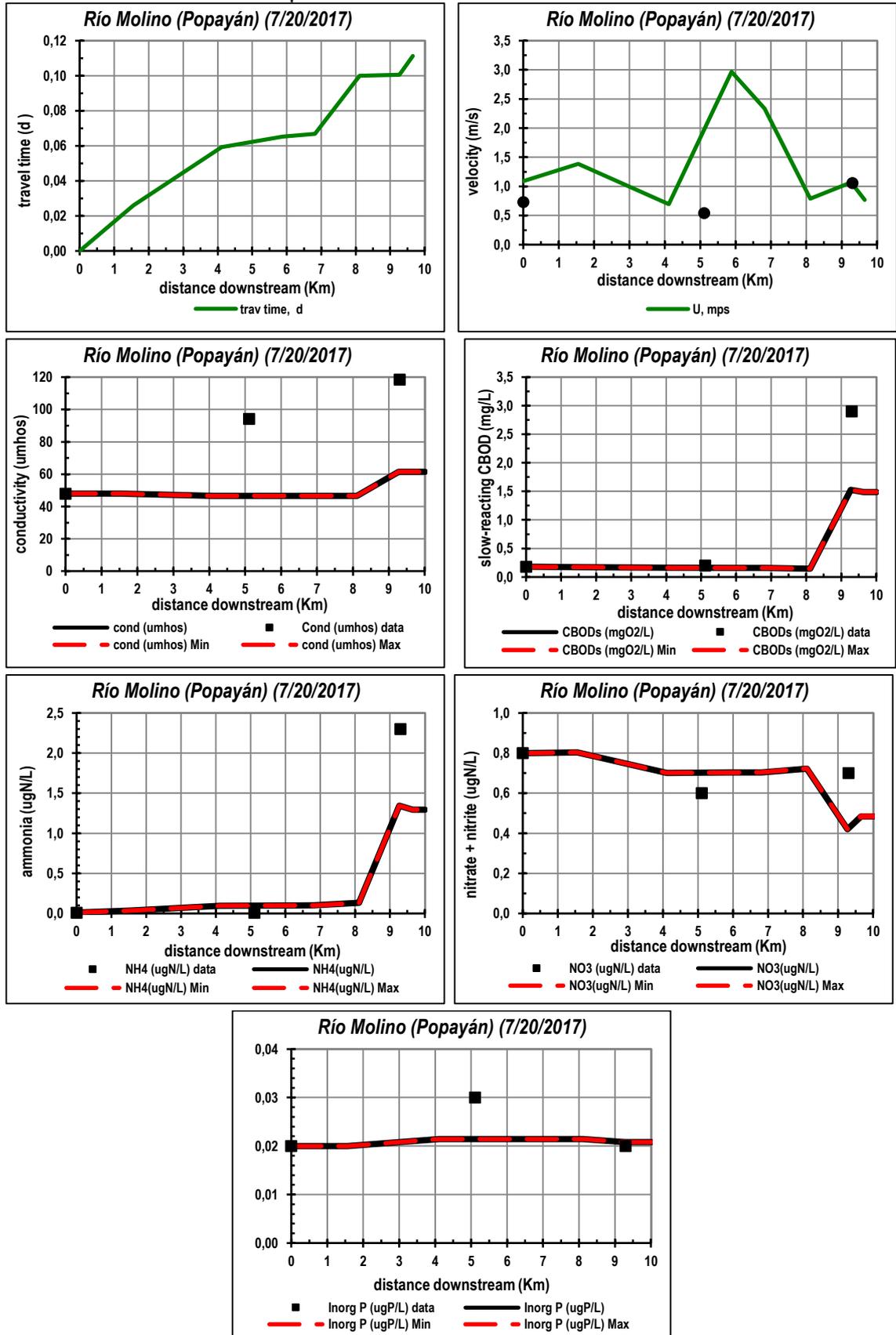
Anexo 14. Calibración en el modelo Qual2kw época de invierno.



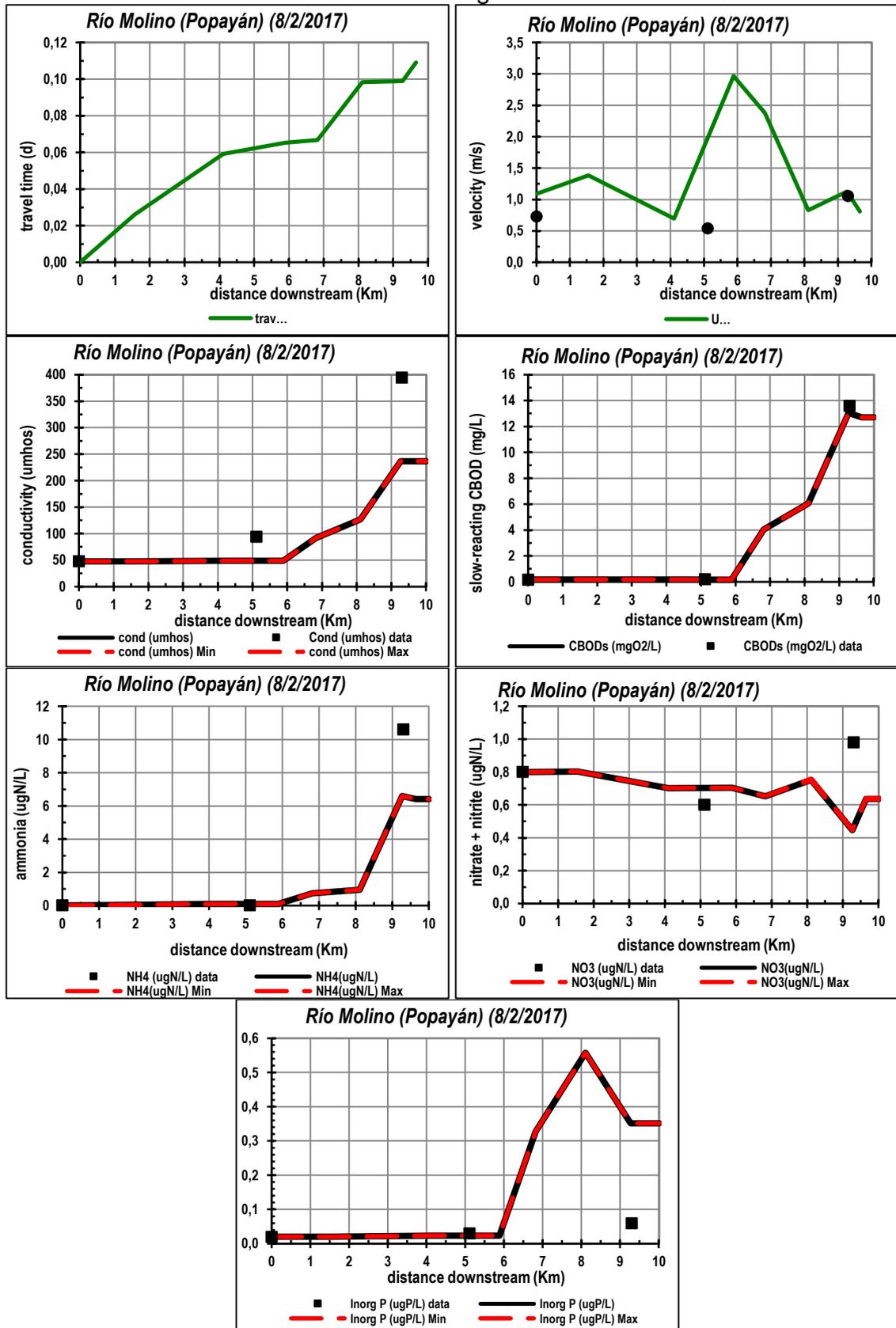
Anexo 15. Confirmación en el modelo Qual2kw época de verano.



Anexo 16. Simulación implementando la PTAR en el modelo Qual2k.



Anexo 17. Simulación aumentando la carga contaminante en Qual2kw.



Anexo 18. Puntos críticos para la distribución de t de student.

Grados de libertad	Área a la derecha de los puntos, $P(X > x)$			
	0.10	0.05	0.025	0.015
1	3.0776835	6.3137515	12.706205	21.204949
2	1.8856181	2.9199856	4.3026527	5.6427784
3	1.6377444	2.3533634	3.1824463	3.8960459
4	1.5332063	2.1318468	2.7764451	3.2976297
5	1.475884	2.0150484	2.5705818	3.002875
6	1.4397557	1.9431803	2.4469119	2.8289279
7	1.4149239	1.8945786	2.3646243	2.714573
8	1.3968153	1.859548	2.3060041	2.6338144
9	1.3830287	1.8331129	2.2621572	2.573804
10	1.3721836	1.8124611	2.2281389	2.5274842
11	1.3634303	1.7958848	2.2009852	2.4906639
12	1.3562173	1.7822876	2.1788128	2.4607002
13	1.3501713	1.7709334	2.1603687	2.4358452
14	1.3450304	1.7613101	2.1447867	2.4148977
15	1.3406056	1.7530504	2.1314495	2.397005
16	1.3367572	1.7458837	2.1199053	2.3815454
17	1.3333794	1.7396067	2.1098156	2.3680548
18	1.3303909	1.7340636	2.100922	2.35618
19	1.3277282	1.7291328	2.0930241	2.3456475
20	1.3253407	1.7247182	2.0859634	2.3362422
21	1.3231879	1.7207429	2.0796138	2.3277923
22	1.3212367	1.7171444	2.0738731	2.3201596
23	1.3194602	1.7138715	2.0686576	2.313231
24	1.3178359	1.7108821	2.0638986	2.3069134
25	1.3163451	1.7081408	2.0595386	2.3011295
26	1.3149719	1.7056179	2.0555294	2.2958145
27	1.3137029	1.7032884	2.0518305	2.2909136
28	1.3125268	1.7011309	2.0484071	2.2863802
29	1.3114336	1.699127	2.0452296	2.2821746
30	1.310415	1.6972609	2.0422725	2.2782623