

**Modelación de la calidad del agua en el río molino de la ciudad de Popayán –
Cauca en relación con la variabilidad climática en la zona de estudio**

Juan Manuel Collazos Muñoz



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

2026

**Modelación de la calidad del agua en el río molino de la ciudad de Popayán –
Cauca en relación con la variabilidad climática en la zona de estudio**

Juan Manuel Collazos Muñoz

Trabajo de grado modalidad pasantía para optar el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director
Arnold Arias Hoyos



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

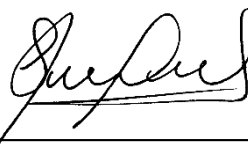
2026

Nota de Aceptación

El director y evaluadores del trabajo de grado, en modalidad pasantía titulado: “Modelación de la calidad del agua en el río molino de la ciudad de Popayán – Cauca en relación con la variabilidad climática en la zona de estudio”, realizado por Juan Manuel Collazos Muñoz. Una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar el título profesional en Ingeniería Ambiental y Sanitaria.



Director: MSc. Arnol Arias Hoyos



Jurado: MSc. Juan Pablo Prado Medina



Jurado: MSc Edwin Fernando Sierra Gaviria

Popayán-Cauca, 2026

Dedicatoria

A toda mi familia que fue un pilar fundamental durante toda mi etapa universitaria que año tras año, me brindaron su apoyo incondicionalmente.

A mis padres Luder Ferley Collazos y Mileidy Muñoz porque gracias a su esfuerzo, confianza y acompañamiento todo esto fue posible. su sacrificio y dedicación fueron la base para alcanzar este logro. Por otro lado, quiero dedicar este logro a mis abuelos paternos Héctor Collazos y Lucy Adiella Narvaez, así como también a mi abuela materna Nancy Castillo, que, aunque ya no se encuentre en este plano terrenal siempre estará presente en mi corazón. Cada uno de ellos ha sido y seguirá siendo la razón de mi lucha en el logro de mis objetivos.

Finalmente, me dedico este logro a título personal, como reconocimiento al esfuerzo y perseverancia que fueron necesarios para alcanzarlo. A lo largo de este proceso hubo retos, sacrificios y momentos de duda, pero también crecimiento y aprendizaje. Todos suelen preguntarse qué habría hecho si no hubiese logrado este objetivo. Supongo que nunca lo sabremos.

Agradecimientos

Primero que todo, agradezco al todo poderoso por darme fortaleza y no permitirme desfallecer en los momentos más difíciles de mi vida. Gracias por guiarme y bendecirme con tu preciosísima sangre. Hoy puedo dar fe de que con esfuerzo, perseverancia y fe todo se puede lograr.

Agradezco profundamente a mi familia, mis padres, mis abuelos, mi tía Daniela Alejandra Collazos y a mi Hermana María Paula Collazos por su apoyo incondicional durante toda mi formación académica, por motivarme y acompañarme en cada etapa de este proceso.

Asimismo, extendiendo mi agradecimiento a todas las personas, compañeros y a cada uno de los profesores que hicieron parte de este proceso académico, especialmente a mi director de grado Arnold Arias Hoyos quien antes de ser mi tutor fue una gran persona, aportando enseñanzas, experiencias y conocimientos que contribuyeron significativamente a mi crecimiento personal y profesional.

De manera especial, agradezco a la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) por brindarme la oportunidad de realizar la pasantía y permitirme fortalecer mis conocimientos académicos y profesionales a través de esta experiencia. Por otra parte, también agradezco a la universidad Autónoma del Cauca por haberme formado como una persona integra y humana. Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, aportaron su granito de arena para que este logro pudiera hacerse realidad.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract.....	12
Introducción	13
CAPÍTULO I. PROBLEMA	15
1.1 Planteamiento del Problema.....	15
1.2 Justificación.....	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	18
2.1 Antecedentes	18
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	18
2.1.2 Antecedentes Nacionales	19
2.1.3 Antecedentes Regionales	20
2.2 Marco Teórico	21
2.2.1 Dinámica y Componentes de la Calidad del Agua en Fuentes Superficiales.....	21
2.2.2 Procesos de Autodepuración y Presión Urbana en Fuentes Hídricas	21
2.2.3 Influencia de la Variabilidad Climática en Fuentes Hídricas Superficiales	22
2.2.4 Modelación Matemática de la calidad del agua y Software Qual2k	22
2.3 Marco normativo.....	25
Capítulo III. Aspectos Metodológicos	26
3.1 Fase 1. Recopilación y consolidación de Información.....	26
3.1.1 Descripción de la cuenca Molino.....	27
3.1.2 Localización del tramo de estudio	27
3.1.3 Estructuración del sistema hídrico	27
3.1.4 Recopilación y consolidación de información	28
3.1.5 Esquematización y configuración en Qual2k.....	28
3.2 Fase 2. Calibración y validación del modelo	28
3.2.1 Elección del coeficiente de reaireación	28
3.2.2 Validación y calibración del Modelo	29
3.3 Fase 3. Simulación de escenarios de variabilidad climática.....	29
3.3.1 Definición de variables meteorológicas	29

3.3.2 Ejecución de simulaciones y perfiles longitudinales	30
3.4 Fase 4. Formulación de adaptación y mitigación	30
3.4.1 Identificación de tramos críticos y comportamiento en temporadas modeladas	30
3.4.2 Definición de medidas y soluciones	31
Capítulo IV. Resultados	32
4.1 Fase 1. Recopilación y consolidación de Información.....	32
4.1.1 Descripción de la cuenca Molino.....	32
4.1.2 Localización del tramo de estudio	34
4.1.3 Estructuración del sistema hídrico.....	35
4.1.4 Recopilación y consolidación de Información.....	36
4.1.5 Esquematización y configuración en Qual2k.....	39
4.2 Fase 2. Calibración y validación del modelo	42
4.2.1 Elección del coeficiente de reaireación	43
4.2.2 Validación y calibración del modelo	44
4.3 Fase 3. Simulación de escenarios de variabilidad climática.....	47
4.3.1 Definición de variables meteorológicas	48
4.3.2 Ejecución de simulaciones y perfiles longitudinales	50
4.3.3 Análisis de resultados de modelación	68
4.4 Fase 4. Formulación de adaptación y mitigación	69
4.4.1 Identificación de tramos críticos y comportamiento en temporadas modeladas	70
4.4.2 Definición de medidas y soluciones	71
Conclusiones	74
Recomendaciones	75
Referencias.....	76
Anexos.....	83

Lista de Tablas

Tabla 1. Modelos comerciales para la calidad de agua.....	24
Tabla 2. Normativa vigente del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	25
Tabla 3. Ubicación de los puntos de monitoreo y vertimientos.....	35
Tabla 4. Descripción de tramos del río Molino	36
Tabla 5. Headwater - Calidad Del Agua.....	37
Tabla 6. Point Sources – Vertimientos	39
Tabla 7. Coeficientes de reaireación – Manual Qual2k	43
Tabla 8. Calidad del agua “WQ data” – Sequía.....	45
Tabla 9. Calidad del agua “WQ data” – Lluvias.....	45
Tabla 10. Datos meteorológicos - Época de sequía (mayo - agosto).....	49
Tabla 11. Datos Meteorológicos - Época de lluvias (diciembre).....	49

Lista de Figuras

Figura 1. Elementos que componen la terminología adoptada de modelación	23
Figura 2. Esquema general del software Qual2K	23
Figura 3. Proceso metodológico	26
Figura 4. Cuenca del Rio Molino	33
Figura 5. Ubicación de los puntos de monitoreos y vertimientos.	34
Figura 6. Esquemmatización Rio Molino - Época de sequía.....	40
Figura 7. Esquemmatización Rio Molino - Época de lluvias	40
Figura 8. Tramos “Reach” - Épocas de sequía	41
Figura 9. Tramos “Reach” - Épocas de lluvias.....	42
Figura 10. Selección de modelo de reaireación.....	44
Figura 11. Hydraulics Data – Sequia	45
Figura 12. Hydraulics Data – Lluvias	46
Figura 13. Esquemmatización del proceso de calibración y validación del modelo	47
Figura 14. Precipitación - Popayán Cauca 2015.....	48
Figura 15. Caudal – Sequia.....	51
Figura 16. Caudal – Lluvias.....	51
Figura 17. Conductividad – Sequia.....	52
Figura 18. Conductividad – Lluvias.....	53
Figura 19. Oxígeno Disuelto – Sequia.....	54
Figura 20. Oxígeno Disuelto – Lluvias	55
Figura 21. Demanda biológica de oxígeno (DBO) – Sequia	57
Figura 22. Demanda biológica de oxígeno (DBO) – Lluvias	57
Figura 23. Nitrógeno Total – Sequia.....	59
Figura 24. Nitrógeno Total – Lluvias.....	60
Figura 25. Amonio (NH ₄) – Sequia	61
Figura 26. Amonio (NH ₄) – Lluvias	62
Figura 27. Nitratos (NO ₃) – Sequia	63
Figura 28. Nitratos (NO ₃) – Lluvias	64
Figura 29. Alcalinidad – Sequia.....	66
Figura 30. Alcalinidad – Lluvias.....	66

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Coeficiente de reaireación.	28
--	----

Lista de anexos

Anexo 1. Datos Calidad Agua in Situ – Sequia	83
Anexo 2. Reporte de laboratorio – Sequia.....	85
Anexo 3. Datos de calidad del agua in Situ – Lluvias	87
Anexo 4. Reporte de laboratorio – Lluvias.....	89
Anexo 5. Reporte de laboratorio – Vertimientos.....	91
Anexo 6. Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV).....	94

Resumen

La presente pasantía aborda la problemática asociada al deterioro de la calidad del agua del río Molino en el tramo urbano del municipio de Popayán – Cauca, mediante la aplicación del modelo matemático QUAL2K bajo escenarios representativos de sequía y lluvias en función del caudal característico de cada época.

El estudio se enfocó en analizar el comportamiento de los principales parámetros fisicoquímicos del río y evaluar la influencia de los vertimientos sobre el sistema hídrico. La metodología empleada integró información secundaria de las jornadas de monitoreo, resultados de laboratorio y vertimientos correspondientes a cada escenario planteado. A partir de la modelación se identificaron los sectores con mayor vulnerabilidad hídrica y la respuesta del afluente durante las temporadas de sequía y lluvias.

Los resultados mostraron que los vertimientos generan una alta carga de materia orgánica y nutrientes, superando la capacidad natural de autodepuración del afluente. Durante la temporada de sequía se identificó una limitada capacidad de dilución debido a los bajos caudales, favoreciendo la concentración de contaminantes dentro del sistema. Por otra parte, en la temporada de lluvias, aunque se presenta un incremento del caudal, el arrastre de sedimentos y materia orgánica provenientes de la escorrentía urbana, junto con el alcantarillado combinado, incrementa la demanda de oxígeno (DBO) y ocasiona condiciones críticas de oxígeno disuelto (OD) en los tramos finales del río.

Finalmente, se plantearon lineamientos orientados al fortalecimiento y estrategias de recuperación ecológica del río Molino, con el propósito de aportar herramientas técnicas para la gestión, conservación y planificación del recurso hídrico en el municipio de Popayán – Cauca.

Palabras clave: QUAL2K, calidad del agua, modelación matemática, oxígeno disuelto, DBO, vertimientos, variabilidad climática, autodepuración

Abstract

This internship addresses the problem associated with the deterioration of water quality in the urban section of the Molino River in the municipality of Popayán – Cauca, through the application of the QUAL2K mathematical model under representative drought and rainy season scenarios based on the characteristic flow conditions of each period.

The study focused on analyzing the behavior of the main physicochemical parameters of the river and evaluating the influence of wastewater discharges on the aquatic system. The methodology integrated secondary information obtained from monitoring campaigns, laboratory results, and discharge records corresponding to each proposed scenario. Through the modeling process, the sectors with the greatest water vulnerability and the river response during drought and rainy seasons were identified.

The results showed that wastewater discharges generate a high load of organic matter and nutrients, exceeding the natural self-purification capacity of the river. During the drought season, a limited dilution capacity was identified due to low flow conditions, favoring the concentration of pollutants within the system. On the other hand, during the rainy season, although flow increases, the transport of sediments and organic matter from urban runoff, together with the combined sewer system, increases the biochemical oxygen demand (BOD) and causes critical dissolved oxygen (DO) conditions in the final sections of the river.

Finally, guidelines focused on strengthening ecological recovery strategies for the Molino River were proposed, with the purpose of providing technical tools for the management, conservation, and planning of water resources in the municipality of Popayán – Cauca.

Keywords: QUAL2K, water quality, mathematical modeling, dissolved oxygen, BOD, wastewater discharges, climatic variability, autodepuration.

Introducción

El agua es un recurso fundamental que constituye la vida y el desarrollo de las actividades humanas, desempeñando un papel esencial en la salud pública, la producción de alimentos y el mantenimiento del equilibrio de los ecosistemas. Sin embargo, en la actualidad las ciudades latinoamericanas y particularmente colombianas, los cuerpos hídricos que atraviesan zonas urbanas han experimentado procesos progresivos de deterioro asociados al crecimiento poblacional, la expansión urbana y la intervención de sus riberas, factores que limitan sus usos potenciales, ambientales y sociales [1].

Dentro de este escenario, los ríos urbanos cumplen funciones ecológicas y socioeconómicas estratégicas; no obstante, suelen convertirse en receptores directos de cargas contaminantes provenientes de actividades domésticas, comerciales e industriales. Estas presiones antrópicas generan alteraciones en las condiciones físicas, químicas y biológicas del agua, afectando la estabilidad de los ecosistemas acuáticos y reduciendo su capacidad natural de autodepuración [2].

En la ciudad de Popayán, departamento del Cauca, el río Molino representa uno de los principales afluentes que atraviesa el casco urbano y forma parte del sistema hídrico que estructura el entorno ambiental del municipio. A lo largo de su recorrido, el afluente se encuentra expuesto a diversas presiones derivadas del uso del suelo en su cuenca, la presencia de vertimientos y la transformación progresiva de sus zonas ribereñas, condiciones que influyen directamente sobre su calidad hídrica [3].

Adicionalmente, la variabilidad climática constituye un factor que modifica la dinámica natural de los sistemas fluviales, debido a que las fluctuaciones en los patrones de precipitación y temperatura inciden sobre el régimen de caudales, la capacidad de dilución de contaminantes y los procesos fisicoquímicos asociados al oxígeno disuelto y la degradación de materia orgánica [4].

Estas condiciones generan escenarios hidrológicos que requieren herramientas técnicas capaces de analizar el comportamiento del recurso hídrico bajo diferentes condiciones ambientales. Por eso, la modelación matemática de la calidad del agua se consolida como una herramienta técnica que permite integrar información hidráulica, meteorológica y fisicoquímica para representar el comportamiento de los ríos y evaluar su respuesta ante distintos escenarios [5].

En el presente estudio se emplea el modelo unidimensional QUAL2K para la simulación de la calidad del agua del río Molino en su paso por la zona urbana de Popayán, considerando condiciones representativas de variabilidad climática asociadas a periodos de alta y baja pluviosidad; con el propósito de aportar herramientas de evaluación que contribuyan a la gestión del recurso hídrico en el área de estudio [6].

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de la presente pasantía se orientó al análisis de la calidad del agua del río Molino mediante herramientas de modelación matemática, con el fin de evaluar el comportamiento de los principales parámetros fisicoquímicos bajo diferentes condiciones hidrológicas asociadas a las temporadas de sequía y lluvias en función del caudal. Para ello, se integró información de campo, resultados de laboratorio y variables hidráulicas dentro del modelo QUAL2K, permitiendo representar la dinámica del sistema hídrico en el tramo urbano.

Asimismo, la pasantía permitió identificar los sectores con mayor vulnerabilidad frente a la incorporación de cargas contaminantes, capacidad de autodepuración del río y plantear lineamientos orientados a la mitigación de los impactos generados sobre el recurso hídrico. De esta manera, el estudio busca contribuir técnicamente a los procesos de gestión y conservación del recurso hídrico del río Molino frente a las presiones urbanas y la variabilidad climática en el municipio de Popayán.

CAPÍTULO I. PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

El deterioro de la calidad del agua constituye uno de los principales desafíos ambientales asociados al crecimiento urbano y al incremento de las actividades antrópicas sobre los recursos hídricos. A nivel global, la expansión demográfica, el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento y las alteraciones derivadas del cambio climático genera consecuencias significativas sobre los ecosistemas acuáticos, comprometiendo la seguridad hídrica y la conservación de la biodiversidad [7].

En el departamento del Cauca, la subcuenca del río Molino, cuyo nacimiento se localiza en la vereda Santa Elena, representa un sistema hídrico de alta importancia ambiental y social para el municipio de Popayán [8]. No obstante, a lo largo de su recorrido por la zona urbana, el afluente recibe aportes contaminantes asociados a actividades agrícolas, transformación del uso del suelo y descargas de aguas residuales de origen doméstico y comercial [3].

Esta situación se ve intensificada debido a limitaciones en la infraestructura de saneamiento básico del municipio, ya que para el periodo 2025–2026 no se contará con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) plenamente operativa, condición que favorece la descarga directa en las diferentes fuentes hídricas de la ciudad, como consecuencia, se generan alteraciones en las características fisicoquímicas y biológicas del río, afectando su funcionalidad ecológica y sus usos potenciales [9].

Por otro lado, la variabilidad climática influye directamente sobre el comportamiento del Río, dado que las variaciones en los patrones de precipitación modifican los caudales disponibles y, por ende, la capacidad de dilución y transporte de contaminantes. Asimismo, los cambios en la temperatura atmosférica inciden en procesos determinantes como la concentración de oxígeno disuelto y la autodepuración natural del sistema fluvial [10].

A pesar de la existencia de programas de monitoreo y seguimiento ambiental, el comportamiento del río Molino frente a escenarios climáticos resulta limitada sin el apoyo de herramientas de simulación que permitan analizar de manera integrada las condiciones actuales. En consecuencia, surge la necesidad de aplicar modelos matemáticos de calidad del agua, que permitan representar el comportamiento del afluente bajo diferentes condiciones de caudales y aportar información técnica que fortalezca los procesos de planificación, toma de decisiones y gestión ambiental [11].

1.2 Justificación

La evaluación de la calidad del agua mediante herramientas de modelación matemática constituye un elemento fundamental para el fortalecimiento de la gestión integral del recurso hídrico, especialmente en sistemas fluviales urbanos sometidos a presiones antrópicas y climáticas. En este sentido, el análisis del río Molino es de suma relevancia debido a su importancia ambiental, social y urbana dentro del municipio de Popayán [12].

La aplicación del modelo QUAL2K permite integrar información hidráulica, meteorológica y fisicoquímica proveniente de fuentes oficiales, facilitando la simulación del comportamiento del afluente bajo escenarios representativos de alta y baja pluviosidad. Este enfoque posibilita comprender la respuesta del sistema frente a variaciones en el caudal y evaluar su influencia sobre parámetros críticos de calidad del agua como el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno y compuestos nitrogenados [6].

Desde la parte técnica, este estudio aporta una herramienta de análisis que contribuye a la interpretación del comportamiento del río bajo condiciones actuales y potenciales, sirviendo como apoyo para la priorización de estrategias de seguimiento y control ambiental. Asimismo, los resultados derivados de la modelación constituyen un insumo para la toma de decisiones orientadas a la protección del recurso hídrico y la planificación de medidas de adaptación frente a la variabilidad climática [13].

El desarrollo del presente trabajo en articulación con la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), aborda la contaminación que presenta el río Molino; que a su vez influye directamente en la calidad de vida de los habitantes y del ecosistema. Dimensionar la magnitud del problema hará que las autoridades ambientales puedan priorizar la toma de decisiones e implementar medidas de mitigación efectivas en cuanto a la problemática al fenómeno de épocas de lluvia y épocas de sequía; promoviendo el uso de herramientas de modelación contempladas en la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico [14]. De esta manera, el estudio contribuye al soporte técnico necesario para la gestión sostenible del río Molino y al mejoramiento de las condiciones ambientales del entorno urbano de la ciudad de Popayán.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Modelar la calidad del agua mediante el software Qual2k del río molino en la zona urbana de la ciudad de Popayán-Cauca en épocas de variabilidad climática.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Calibración del modelo Qual2k con datos de los parámetros hidrológicos y fisicoquímicos de calidad del agua del río molino en el municipio de Popayán-Cauca.
- Modelar 2 escenarios de variabilidad climática (Alta y baja pluviosidad) en Qual2k y analizar los efectos en la calidad de agua del río molino.
- Proponer posibles alternativas de adaptación y/o mitigación basándose en los resultados de la modelación de la calidad del agua del río molino.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

Este apartado comprende los principios y conceptos relacionados con el software de modelación matemática de la calidad del agua. Posteriormente se establecen distintos marcos para el desarrollo de la presente pasantía.

2.1 Antecedentes

Para la ejecución de dicha pasantía se apoyó en la revisión de diversos proyectos enfocados en la modelación de la calidad del agua a través del modelo matemático Qual2k, como parte fundamental de los antecedentes de la pasantía o temas que se ajusten a relacionado.

2.1.1 Antecedentes Internacionales

A nivel internacional, la modelación matemática ha sido ampliamente utilizada como herramienta para evaluar el impacto de actividades antrópicas sobre los cuerpos hídricos.

La primera investigación denominada ***Modelación de la calidad del agua en el del Río Han***. Lee y Park [15] aplicaron el modelo Qual2k en el río Han, ubicado en Corea del Sur. Este estudio consistió analizar la influencia de descargas de aguas residuales domésticas. La investigación se centró en la división del cauce por tramos y la simulación de parámetros críticos como oxígeno disuelto y coliformes, permitiendo identificar sectores críticos de contaminación y proponer estrategias de saneamiento mediante control de vertimientos y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Este estudio es de suma importancia por su enfoque y la identificación de sectores críticos y estrategias alternativas para el saneamiento.

La segunda investigación denominada ***Evaluación y modelación de la tasa de reaireación en el Río Periyar – India***, Kumar y Sinha [16] emplearon el modelo Qual2k en el río Bagmati, ubicado en la India. La investigación se orientó en el análisis del oxígeno disuelto, haciendo un énfasis especial en el cálculo de las tasas de reaireación (K_2); donde se enfocaron en comparar diversas ecuaciones predictivas para determinar cuál se ajustaba mejor a las condiciones hidráulicas del río, considerando variables como la velocidad y profundidad del cauce. Mejorando la precisión de las simulaciones en modelos de calidad del agua. Por otra parte, se logró evidenciar disminuciones significativas del oxígeno disuelto asociadas a las elevadas cargas orgánicas. Comportamiento que refleja problemáticas comunes en ríos urbanos sometidos a presión antrópica por descargas directas al afluente.

Este estudio es relevante y de gran aporte para la presente pasantía en obtener un modelo confiable determinando por las tasas de reaeración según las características del río en un contexto urbano.

En la tercera y última investigación denominada ***Modelación de la calidad del agua en el estero Aguas Claras***. Rodríguez y Zambrano [17] aplicaron el modelo Qual2k En la ciudad de Ecuador. Este trabajo consistió en simular el comportamiento de la carga orgánica y el oxígeno disuelto en periodos de estiaje y periodos lluviosos. La metodología incluyó recolección de datos físicoquímicos en campo e información secundaria para alimentar el modelo. El análisis se enfocó en como la temperatura y el régimen de flujo condicionan la degradación de contaminantes determinando la capacidad de autodepuración del sistema fluvial mediante procesos de reaeración natural. El estudio se vincula con la pasantía ya que tiene que ver con diferentes épocas relacionado con el régimen de flujo para el análisis de la calidad del agua.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

La primera investigación denominada ***Implementación del modelo de calidad del agua Qual2k – sobre un tramo del río Pamplonita***. Donde Rodríguez Azmequita [18] demostró la utilidad del modelo para la planificación ambiental en Norte de Santander. Donde se recopiló información de calidad de la cabecera e información hidráulica para la simulación de escenarios de saneamiento, facilitando la identificación de zonas vulnerables y el fortalecimiento del control de vertimientos por parte de autoridades ambientales. Este estudio es de gran importancia para la pasantía ya que resalta la utilidad del software como soporte técnico dentro de una entidad ambiental en este caso la Corporación Autónoma del Cauca (CRC) lugar donde se realizó la presente pasantía.

La segunda investigación denominada ***Modelación de la calidad del agua en un río de montaña colombiano – Quebrada La Lejía***. Donde Arenas Faura [19] demostró que la investigación se basó en la recopilación de datos históricos permitiendo estimar la capacidad asimilativa de la quebrada que se encuentra en el municipio Arbelaez ubicado en el departamento de Cundinamarca. El análisis se enfocó en adaptar un modelo norteamericano como Qual2k a las condiciones de alta pendiente de los ríos colombianos, logrando conocer la capacidad de asimilación frente a cargas contaminantes municipales. Este estudio esta alineado con la pasantía en curso, ya que busca conocer la capacidad de asimilación de la fuente receptora en relación a contaminantes municipales.

La tercera investigación denominada ***Modelación de la calidad del agua de la fuente Río Lengupá***. Esta investigación consistió en recopilar información secundaria con datos de monitoreo del río llamado Lengupá ubicado en el departamento de Boyacá en el año 2018. Naranjo [20] logra evidenciar que la calibración del modelo se logra haciendo una validación de variables independientes ya que la precisión en los datos nos da la certeza en las futuras predicciones. Por ello, es de vital importancia una calibración precisa para asegurar que las simulaciones reflejen la realidad del afluente. Esta investigación se vincula con la pasantía debido al rigor requerido en la fase de calibración para obtener un ajuste óptimo de los datos.

Por último, la cuarta investigación denominada ***Aplicación de Qual2k en la modelación de la calidad del río Guacaica***. Huertas Castro [21] orientó en la predicción del modelo bajo diferentes escenarios de descargas de aguas residuales industriales y domésticas. Mostrando la asimilación y degradación de varios parámetros fisicoquímicos bajo diferentes condiciones de descarga en el río, donde se evaluaron los efectos de un posible escenario de saneamiento y se recomendó, que para validar la información se utilizarán tasas de desoxigenación y campañas de monitoreo para la validación del modelo. El estudio presenta una relevancia importante para la pasantía ya que analiza el impacto de vertimientos específicos en distintas zonas.

2.1.3 Antecedentes Regionales

La primera investigación denominada ***Modelación de la calidad del agua del río Molino en el área urbana de la ciudad de Popayán***. Este trabajo consistió en modelar la calidad hídrica mediante aplicativos Qual2k y Street & Phelps para comparar resultados de OD y DBO5. Zambrano y Erazo [22] permitieron proyectar que, sin una planta de tratamiento (PTAR) en el Municipio de Popayán Cauca, la fuente hídrica alcanzaría condiciones preocupantes de contaminación a partir del kilómetro 6. Este antecedente es el más cercano a la presente pasantía, aportando una necesidad de planificar obras o alternativas de saneamiento en el casco urbano.

La segunda y última investigación denominada ***Evaluación de escenarios de la calidad del agua del río Palace usando el modelo Qual2k***. Muñoz Urrea [23] evaluó diferentes tramos desde totora hasta la bocatoma de la planta de tratamiento de Palace, ubicado en Gabriel López. La metodología permitió evidenciar que la actividad ganadera es el factor determinante en la disminución de la calidad del agua. Este estudio es de gran aporte para la pasantía al demostrar como el modelo puede enriquecerse con campañas de monitoreo adicionales para mejorar la conservación del recurso hídrico.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 *Dinámica y Componentes de la Calidad del Agua en Fuentes Superficiales*

La calidad del agua corresponde al conjunto de características físicas, químicas biológicas y ecologías que determinan las condiciones de un cuerpo hídrico y su capacidad para sostener diferentes usos como lo es el abastecimiento a comunidades, conservación de ecosistemas, recreación y actividades productivas. Estas condiciones pueden verse alteradas por factores ya sea naturales o actividades antrópicas, especialmente en sistemas fluviales urbanos donde los vertimientos de tipo industrial, domésticos y escorrentía superficial generan procesos de contaminación que afecta el equilibrio ecológico del sistema acuático [24].

Según la Política Nacional para la Gestión integral del Recurso hídrico (PNGIRH) uno de los principales objetivos ambientales en Colombia consiste en mejorar la calidad del agua y reducir los niveles de contaminación mediante el monitoreo, seguimiento y control de los cuerpos hídricos superficiales. En este sentido, la evaluación de la calidad del agua constituye a una herramienta fundamental para la determinación del estado ambiental de los ecosistemas acuáticos y establecer estrategias orientadas a la protección y recuperación del recurso hídrico [25].

La calidad del agua de las fuentes superficiales va a depender de múltiples factores asociados a las condiciones hidráulicas, climáticas y geomorfológicas a lo largo de su recorrido, y actividades antropogénicas presentes en su cuenca hidrográfica. Los cuales influyen directamente sobre la capacidad de recuperación natural de los afluentes determinando el comportamiento que ocurren dentro del sistema [26].

2.2.2 *Procesos de Autodepuración y Presión Urbana en Fuentes Hídricas*

Por otra parte, se encuentra la autodepuración que hace referencia a la capacidad natural que poseen los ríos para reducir, transformar y estabilizar contaminantes mediante mecanismos como la sedimentación de partículas, degradación biológica de materia orgánica, transformación de nutrientes y reaeración [27]. La eficiencia de estos procesos depende de características hidráulicas como, el caudal, la turbulencia del flujo y la disponibilidad de oxígeno disuelto, las cuales favorecen la recuperación de las condiciones ambientales del cuerpo hídrico.

Sin embargo, en sistemas altamente intervenidos por actividades urbanas, la capacidad natural de autodepuración puede verse limitada debido al ingreso continuo de cargas

contaminantes provenientes de vertimientos domésticos, industriales y escorrentía superficial. Cuando las cargas orgánicas exceden la capacidad de recuperación del sistema, se generan procesos progresivos de deterioro de la calidad del agua, afectando la estabilidad ecológica y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos [28].

2.2.3 *Influencia de la Variabilidad Climática en Fuentes Hídricas Superficiales*

En este sentido, la variabilidad climática constituye uno de los factores más importantes en el comportamiento hidrológico y en el comportamiento de la calidad del agua de los ríos. La variabilidad climática hace referencia a las fluctuaciones naturales de variables meteorológicas como la precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento en diferentes escalas temporales. Estas alteraciones modifican el régimen hidrológico de los ríos, afectando directamente el transporte de contaminantes, la capacidad de dilución y los procesos de autodepuración [4].

En Colombia, las temporadas de lluvias y sequía se encuentran influenciadas principalmente por la dinámica atmosférica tropical y por fenómenos climáticos como El Niño y La Niña asociados al ENOS. Durante periodos de sequía, la disminución del caudal genera una menor capacidad de dilución de contaminantes y favorece el incremento de concentraciones de materia orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos en los cuerpos hídricos. Por el contrario, en temporadas de lluvias se presentan procesos de escorrentía superficial y arrastre de sedimentos que modifican las condiciones fisicoquímicas del agua y aumentan las cargas contaminantes provenientes de áreas urbanas y rurales [29].

2.2.4 *Modelación Matemática de la calidad del agua y Software Qual2k*

La modelación matemática del recurso hídrico corresponde a una representación simplificada de los procesos físicos, químicos y biológicos anteriormente mencionados, que ocurren en un sistema natural, permitiendo analizar sus variaciones bajo diferentes condiciones ambientales.

Dentro de los modelos más utilizados para el análisis de calidad del agua en ríos se encuentra Qual2k. Este software se destaca por ser un modelo adecuado y preciso que permite observar el comportamiento del flujo a lo largo de un río o en sistemas donde la variación principal ocurre en una sola dirección (unidimensional). El software es una herramienta informática creado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA); que estudia y evalúa variables de la calidad del agua como la cantidad de oxígeno disuelto, los nutrientes y el

crecimiento de algas a lo largo del cauce [30]. Este aplicativo requiere estructurar un modelo conceptual solido basado en la realidad del rio Como se muestra en la Figura 1.

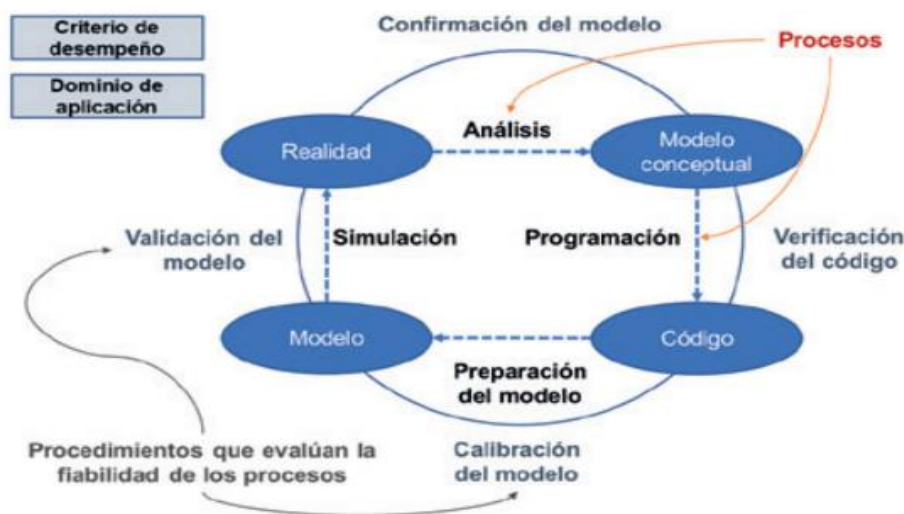


Figura 1. Elementos que componen la terminología adoptada de modelación

Fuente: [14]

La aplicación del modelo requiere la esquematización del río mediante segmentos homogéneos, delimitados por condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, garantizando que las características hidráulicas y geométricas permanezcan relativamente constantes en cada tramo; como se muestra en la Figura 2. Permitiendo simular con mayor fidelidad la realidad del sistema fluvial, facilitando procesos que le ocurren al cauce y datos para su validación, simulación y análisis ambiental [6].

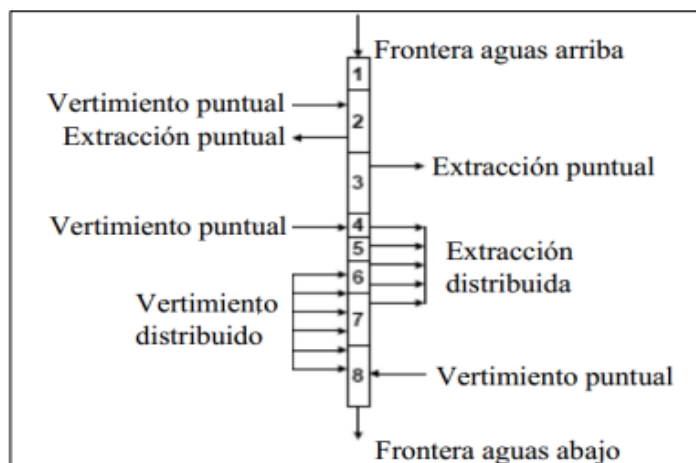


Figura 2. Esquema general del software Qual2K

Fuente: [21]

La selección del modelo de calidad del agua constituye una etapa fundamental dentro del proceso de modelación, ya que debe garantizar la adecuada representación de las condiciones hidráulicas y fisicoquímicas del objeto de estudio.

En este sentido, se realizó una comparación entre diferentes modelos ampliamente utilizados en la simulación de calidad del agua, tales como QUASAR, MIKE 11 y RIOS, los cuales presentan capacidades robustas para el análisis de sistemas fluviales como lo muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.
Modelos comerciales para la calidad de agua.

Modelo	Descripción general	Parámetros modelados	Implementación	Desarrollador	Año
QUASAR	Modela ríos como series de tramos, con opciones de planificación y dinámica.	Q (caudal), amoníaco, pH, Nitratos, T°, E. Coli, DBO, OD	Cuenca el Virrey (Colombia)	Whitehead, P.E. et al.	1997
MIKE 11	Simula procesos de reacción advección-dispersión.	T° OD, MO orgánica, NH ₃ , F, NO ₃ , Coliformes	Río Cauca, río Magdalena (Colombia)	DHI	1999
RIOS	Método estándar para manejo de cuencas,	Oxígeno disuelto, DBO, coliformes, sustancias tóxicas.	Río Acelhuate, Sucio, y Suquiapa (El Salvador)	CEPIS	1995
QUAL2K	Modelo gratuito para simular una corriente principal y redes secundarias.	Sólidos Suspendidos (SST), OD, DBO, DQO nitrógeno, fósforo, fitoplancton, y alcalinidad.	Río Cauca, río Bogotá, río Chinchiná, quebrada Manizales, río Palo, río Sinú, río Aburrá (Colombia)	EPA	2001

Fuente: [14]

Asimismo, la comparación evidenció que el modelo QUAL2K fue seleccionado debido a su uso gratuito y a las ventajas asociadas a su acceso libre, facilidad de implementación, menor complejidad computacional y facilidad de calibración. Su adecuada adaptación a ríos urbanos colombianos lo convierte en una herramienta confiable y ampliamente validada en investigaciones nacionales orientadas a la evaluación de impactos por vertimientos y gestión del recurso hídrico. Lo que permite su aplicación eficiente en ríos con disponibilidad limitada de información hidrológica, meteorológica y de calidad del agua.

2.3 Marco normativo

Tabla 2.

Normativa vigente del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Norma	Enfoque Principal	Aplicación y Descripción
Decreto 1594 de 1984	Usos y Vertimientos	Regulación de los usos del agua y control de vertimientos líquidos [31].
Decreto 1575 de 2007	Agua Potable	Lineamientos para el control, vigilancia y calidad del agua de las autoridades ambientales y prestadores de servicio de acueducto [32].
Resolución 2115 de 2007	Agua Potable	Establece los valores máximos permisibles para la calidad del agua potable [33].
Decreto 3930 de 2010	Usos y Residuos	Disposiciones sobre el uso del recurso hídrico y manejo de residuos líquidos [34].
Decreto 1076 de 2015	Sector Ambiente	Decreto Único Reglamentario que compila la normativa de desarrollo sostenible [35].
Resolución 0631 de 2015	Límites Permisibles de Vertimientos	Parámetros y valores máximos para vertimientos puntuales a cuerpos de agua [36].
Resolución 0958 de 2018	PORH y Modelación Hídrica	Guía para el ordenamiento del Recurso Hídrico [37].

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

Capítulo III. Aspectos Metodológicos

La metodología del presente estudio se desarrolló con el propósito de modelar la calidad del agua del río Molino en su recorrido por la zona urbana en el municipio de Popayán -Cauca, bajo escenarios de variabilidad climática mediante la aplicación del modelo matemático unidimensional QUAL2K.

Para el desarrollo del estudio y con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados, el proceso se estructuró en cuatro (4) fases, las cuales permitieron transformar la información recopilada en una herramienta, para el análisis de la fuente y la toma de decisiones, tal como se detalla en el siguiente esquema en la Figura 3.



Figura 3. Proceso metodológico

Fuente: Elaboración propia

3.1 Fase 1. Recopilación y consolidación de Información

Para dar cumplimiento a esta fase, inicialmente se realizó una recopilación y sistematización de información secundaria suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), correspondiente al año 2024. A partir de estos datos, se estructuró una línea

base sobre la calidad del agua y vertimientos que recibe el Río Molino, empleando las técnicas y herramientas de análisis documental que se detallan en los siguientes apartados.

3.1.1 Descripción de la cuenca Molino

Para la contextualización geográfica de la cuenca Molino, se utilizó una base cartográfica de la subcuenca del río Molino suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) a través del aplicativo de información geográfica ArcGIS.

3.1.2 Localización del tramo de estudio

Posteriormente, utilizando los datos técnicos de la corporación, se georreferenciaron los puntos priorizados sobre el río Molino, mediante el uso de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) como Google Earth. Esta herramienta permitió trazar el perfil longitudinal del área de interés y delimitar espacialmente el tramo de estudio comprendido entre el sector de Pueblillo y el sector de la desembocadura del río Ejido.

3.1.3 Estructuración del sistema hídrico

La representación del sistema se estructuró definiendo condiciones de frontera junto con la ubicación de las estaciones de monitoreo y vertimientos puntuales distribuidos a lo largo del cauce aguas arriba, aguas abajo, y la subdivisión por tramos, conforme al esquema requerido por el modelo.

El procedimiento contempló 2 etapas claves:

- **Delimitación del perfil longitudinal.** Esta etapa, consistió en determinar y asignar las coordenadas geográficas junto a las cotas de elevación para las estaciones de monitoreo y vertimientos a lo largo del cauce. Este paso fue necesario para delimitar las fronteras del sistema físico.
- **Tipología y segmentación de tramos.** En esta etapa, el tramo de estudio se segmentó y se clasificó por las distancias entre cada punto. A cada segmento se le asignó una tipología según lo requerido por el software para simular correctamente el transporte de contaminantes.

3.1.4 *Recopilación y consolidación de información*

Esta actividad se desarrolló mediante revisión documental de informes técnicos, reportes de laboratorio, campañas de monitoreo y bases de datos. Se consolidaron los registros de calidad del agua en los puntos priorizados del río Molino del año 2024, incluyendo variables como temperatura del agua, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), y nutrientes. Paralelamente, se recopilaron datos asociados a los vertimientos puntuales registrados sobre el cauce a lo largo del tramo modelado.

3.1.5 *Esquematización y configuración en Qual2k*

Una vez estructurada la geometría del río, se procedió a la configuración del modelo en la plataforma QUAL2K permitiendo transformar un sistema físico a un software para entender sus procesos. Ingresando parámetros hidráulicos como la pendiente del canal, profundidad media estimada, ancho del cauce y coeficientes de rugosidad de Manning por cada tramo de los escenarios planteados.

3.2 **Fase 2. Calibración y validación del modelo**

En esta segunda fase, representa el ajuste y verificación del modelo qual2k, con el fin de garantizar que el software sea una representación fiel a la realidad mediante el ajuste de parámetros cinéticos y el contraste con los datos de campo bajo los lineamientos de la guía nacional de modelación.

3.2.1 *Elección del coeficiente de reaeración*

Para la estimación del coeficiente de reaeración (K_2) se adoptó la ecuación de Owens–Gibbs, seleccionada en función de las características hidráulicas del río Molino, particularmente su baja profundidad y régimen de flujo. La expresión empleada fue:

$$K_a = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$$

Ecuación 1. Coeficiente de reaeración [6]

Donde:

U: Velocidad media del flujo

H: Profundidad del cauce.

Esta ecuación permitió estimar el intercambio de oxígeno entre la atmósfera y la columna de agua, parámetro fundamental para la simulación de procesos de autodepuración.

3.2.2 Validación y calibración del Modelo

La calibración del modelo se desarrolló mediante un ajuste de parámetros cinéticos y condiciones hidráulicas dentro de rangos técnicamente aceptables, hasta lograr que el comportamiento simulado reprodujera de manera coherente las condiciones registradas en las campañas de monitoreo.

Asimismo, la validación del modelo permitió evaluar la capacidad predictiva del software al contrastar los resultados simulados con los datos observados en escenarios independientes como estiaje y lluvias en base a su régimen de caudales.

Este procedimiento adopto los lineamientos establecidos en la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas superficiales continentales (2018), aplicando la metodología descrita en el apartado número 4 para el correspondiente al análisis de sensibilidad, calibración de constantes cinéticas, y validación del modelo bajo el marco legal de la resolución 0958 de 2018 expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenibles (MADS).

3.3 Fase 3. Simulación de escenarios de variabilidad climática

Esta fase se realizó con el modelo previamente calibrado y validado, procediendo a la ejecución de escenarios basados en la estacionalidad hidro-climática (épocas de sequía y lluvias) en el municipio de Popayán Cauca. Resaltando que estos escenarios no se determinaron mediante registros cuantitativos de pluviosidad si no a través de la delimitación de periodos temporales, los cuales coinciden estrictamente con los meses en que la CRC ejecuto las campañas de monitoreo de calidad del agua.

3.3.1 Definición de variables meteorológicas

Para cada escenario se ingresaron los datos meteorológicos representativos que requiere el modelo, como: La temperatura del aire, punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y porcentaje de sombra suministrados por la CRC.

La diferencia principal entre escenarios radicó en la variación de los caudales característicos de cada temporada, mientras que los parámetros geométricos del canal, la

segmentación definida y los coeficientes de Manning (n) por tramo, se mantuvieron constantes para cada una de las temporadas.

Asimismo, los valores de vertimientos puntuales registrados se mantuvieron iguales en ambos escenarios, permitiendo evaluar la capacidad de dilución del sistema bajo diferentes condiciones de caudal.

3.3.2 Ejecución de simulaciones y perfiles longitudinales

En cuanto se configuraron las variables para cada uno de los escenarios, se procedió a la ejecución del modelo mediante el componente *Run fortran* del software Qual2k. Esta acción permitió procesar los balances de masa y transporte de contaminantes obteniendo el comportamiento del río en su paso por el casco urbano de la ciudad de Popayán.

A través de esta actividad se generaron los resultados comparativos de la concentración de oxígeno disuelto (OD), demanda biológica de oxígeno (DBO), y la dinámica de nutrientes a lo largo de los 8,82 km del tramo de estudio.

Mediante esta simulación se permitió valorar el impacto que tiene la reducción del caudal sobre la capacidad de asimilación de cargas orgánicas, estableciendo un contraste entre las dos temporadas, para su respectivo análisis.

3.4 Fase 4. Formulación de adaptación y mitigación

En esta fase se analizaron los datos obtenidos en la simulación del modelo de la calidad del agua; durante las temporadas de estiaje y precipitaciones. Esto permitió identificar los puntos vulnerables y plantear medidas alternativas, que respondan como lineamientos orientados a la recuperación de la fuente y la preservación del ecosistema hídrico. basándose en el comportamiento del río Molino ante la presencia de vertimientos y variabilidad climática del municipio de Popayán – Cauca.

3.4.1 Identificación de tramos críticos y comportamiento en temporadas modeladas

En esta actividad, a partir de los resultados de las simulaciones obtenidas por el software QUAL2K se realizó la identificación de los puntos donde hay mayor influencia por el deterioro de la calidad del agua permitiendo priorizar sectores de mayor vulnerabilidad hídrica en función del caudal del río en cada una de las temporadas planteadas.

3.4.2 Definición de medidas y soluciones

Una vez se logró identificar los puntos críticos, se propusieron alternativas enfocadas en el fortalecimiento de mejorar la calidad del agua. Estas se basan en el control de vertimientos, priorización de monitoreo en temporadas críticas y posibles estrategias de gestión del recurso hídrico. Estas alternativas fueron planteadas y se sustentan en la modelación matemática previamente desarrollada.

Capítulo IV. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la implementación de la ruta metodológica propuesta se encuentran y se analizan a continuación.

4.1 Fase 1. Recopilación y consolidación de Información

4.1.1 Descripción de la cuenca Molino

La subcuenca del río Molino se localiza al suroccidente de Colombia, en el departamento del Cauca, hacia el sector oriental del municipio de Popayán. Este sistema hídrico constituye una fuente estratégica para el abastecimiento de agua potable del municipio y un eje ambiental fundamental dentro del desarrollo urbano y rural del territorio.

Posee un área aproximada de 67,87 km² y presenta una variación altitudinal entre 1680 y 2880 msnm, característica de cuencas de montaña andina. Hidrológicamente, el río presenta un comportamiento torrencial en su parte alta debido a las fuertes pendientes y cortas vertientes, generando respuestas rápidas ante eventos de precipitación. En contraste, en la parte baja, dentro del valle de Pubenza, el río adopta características con menores pendientes y mayor estabilidad hidráulica [8].

En la subcuenca se encuentran asentadas poblaciones rurales y urbanas distribuidas en corregimientos, veredas y comunas del municipio de Popayán, con una población estimada de 53.329 habitantes. Las actividades predominantes corresponden a la ganadería extensiva y agricultura tradicional, las cuales, junto con procesos de expansión urbana y limitaciones en saneamiento básico, ejercen presión sobre la calidad del recurso hídrico [8]. El clima corresponde a un sistema ecuatorial de montaña con pisos térmicos templado y frío, registrando una precipitación media anual cercana a 1977 mm y valores de humedad relativa entre 73 % y 87 %, condiciones que influyen directamente en la dinámica hidrológica y los procesos de autodepuración del río [8].

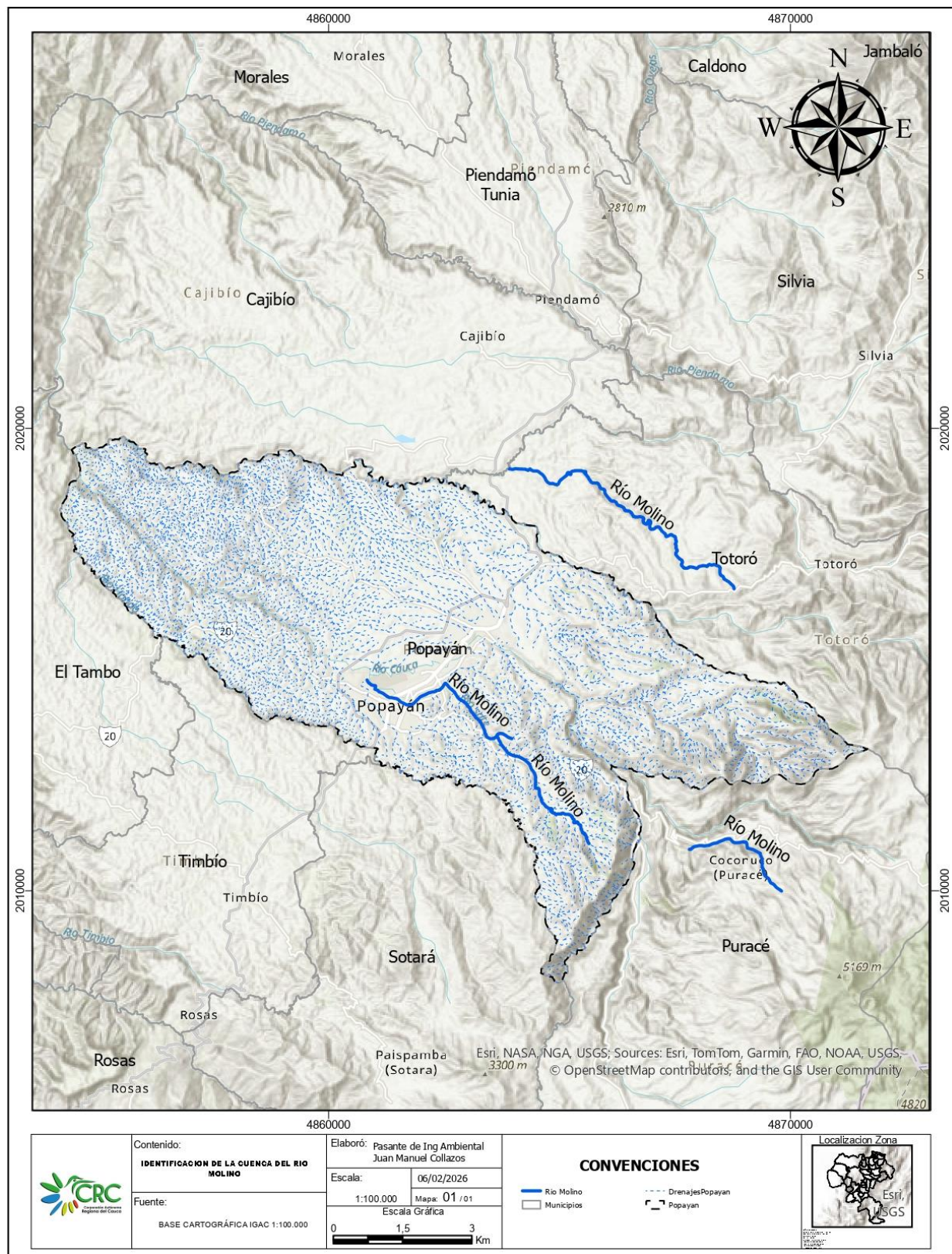


Figura 4. Cuenca del Río Molino

Fuente: Corporación Autónoma del Cauca (CRC)

4.1.2 Localización del tramo de estudio

Para la localización y delimitación del área de interés, se realizó a partir de la información técnica secundaria suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). Identificando los puntos priorizados de manera estratégica a lo largo del Río Molino. Estas estaciones están distribuidas de manera que permiten evaluar la calidad del recurso hídrico en su paso por la zona urbana del municipio, considerando los vertimientos que le caen al afluente y mirar el cumplimiento de la normatividad ambiental.

A partir de estos puntos críticos identificados, se trazó la ruta a modelar a través de la herramienta de sistema de información geográfica Google Earth. El tramo seleccionado comprende una longitud total de 8.82 km, iniciando en el sector Pueblillo (Zona alta) y finalizando aguas abajo en el punto después de río Ejido (Zona baja) del municipio de Popayán – Cauca.

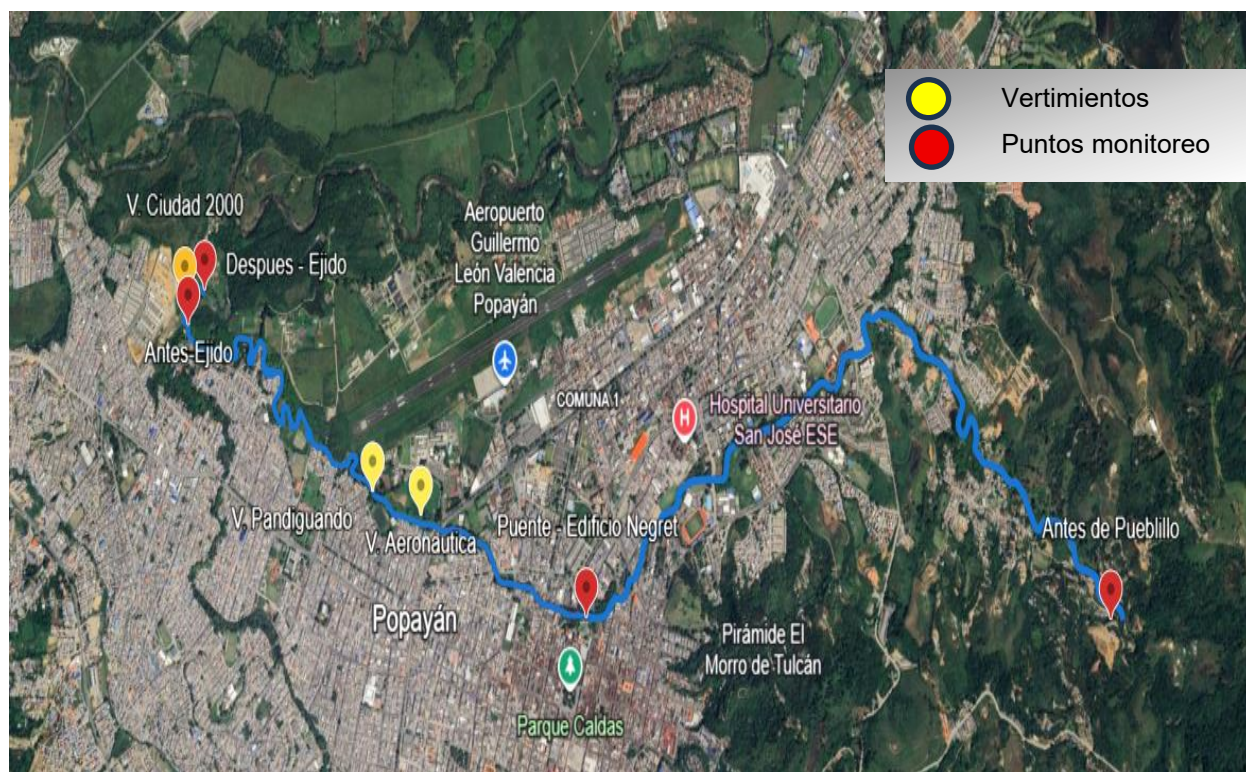


Figura 5. Ubicación de los puntos de monitoreos y vertimientos.

Fuente: Google Eart.

4.1.3 Estructuración del sistema hídrico

- Delimitación del perfil longitudinal

Como parte fundamental de la consolidación, se definieron las coordenadas geográficas y las cotas de elevación para los puntos de monitoreo y los vertimientos principales del tramo de estudio. Esta delimitación fue necesaria para la configuración del perfil longitudinal en el software QUA2K, permitiendo establecer distancias reales y pendientes entre cada nodo como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3.

Ubicación de los puntos de monitoreo y vertimientos

Ubicación geográfica			
Puntos monitoreo	Coordenadas		Elevación (msnm)
	Latitud (N)	Longitud (W)	
Antes de Pueblillo	2° 26' 34.8"	76° 34' 6.827"	1782
Puente Edificio Negret	2° 26' 40.6"	76° 36' 18.7"	1725
Antes de río Ejido	2° 27' 19.9"	76° 37' 38.6"	1688
Después de río Ejido	2 °27' 24"	76° 37' 35"	1686
Vertimientos	Coordenadas		Elevación (msnm)
	Latitud (N)	Longitud (W)	
Aeronáutica	2°26'53"	76°36'51"	1720
Pandiguando	2°26'57"	76°37'00"	1717
Ciudad 2000	2°27'23"	76°37'39"	1691

Fuente: Elaboración propia

El punto aguas arriba se localiza en las coordenadas Latitud 2°26'34.802" N y Longitud 76°34'36.827" W, a una elevación aproximada de 1782 msnm, mientras que el punto aguas abajo se ubica en Latitud 2°27'24" N y Longitud 76°37'35" W, con una elevación cercana a 1686 msnm.

- Tipología y segmentación de tramos

Al lograr ubicar los puntos a través del recorrido; el sistema hídrico fue segmentado en seis (6) tramos permitiendo una representación más precisa del comportamiento de la fuente en su ruta de 8.82 km. Esta segmentación por tramos sirve para la implementación al modelo Qual2k, representando de manera adecuada el transporte y transformación de contaminantes (Tabla 4).

Tabla 4.
Descripción de tramos del río Molino

TRAMO	INICIO	FIN	INICIO (km)	FINAL (km)	LONGITUD (km)	TIPOLOGIA QUAL2K (Km)
1	Estacion Pueblillo	Estacion Puente Edificio Negret	0	4.7	4.7	8.82
2	Estacion Puente Edificio Negret	Vertimiento Aeronáutica	4.7	5.82	1.14	4.12
3	Vertimiento Aeronáutica	Vertimiento Pandiguando	5.84	6.16	0.32	3.00
4	Vertimiento Pandiguando	Estacion Antes de Rio Ejido	6.16	8.56	2.40	2.66
5	Estacion antes de Rio Ejido	Vertimiento Ciudad 2000	8.56	8.68	0.12	0.14
6	Vertimiento Ciudad 2000	Estacion. después de R. Ejido	8.68	8.82	0.14	0.0

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Recopilación y consolidación de Información

Los resultados obtenidos en esta actividad constituyen una base técnica para la alimentación del modelo; la recopilación y consolidación permitió estructurar una base de datos que diferencia el comportamiento del río molino bajo condiciones de diferentes caudales. Para la obtención de estos datos, se analizaron las campañas de monitoreo de calidad de agua en la época de sequía y lluvias del año 2024; lo que garantiza la representatividad frente a la variabilidad climática de la zona de estudio.

Es importante señalar que la definición de los escenarios de simulación no se fundamentó en el análisis de registros pluviométricos ni en la cuantificación de precipitaciones. No obstante, la selección de dichos escenarios fue contrastada con el régimen pluviométrico característico de la ciudad de Popayán, permitiendo asociar la campaña de mayo a una condición de transición

con una menor disponibilidad hídrica y la campaña de diciembre con una mayor disponibilidad hídrica.

- Escenario de estiaje

La toma de muestras de los parámetros in situ fueron registrados el día 07 mayo de 2024 (Ver anexo 1). Por otra parte, el reporte del laboratorio de los parámetros fisicoquímicos fue entregado el día 20 mayo de 2024 (Ver Anexo2). Esta campaña refleja las condiciones críticas de flujo y una menor capacidad de dilución de la fuente.

- Escenario de lluvias

Los datos de los parámetros y aforos en campo se llevaron a cabo el día 12 de diciembre de 2024 (Ver Anexo 3). Posteriormente la entrega de los resultados del laboratorio Ambiental, Vivero CRC, Vereda González, Popayán, se entregaron el día 23 de diciembre de 2024 (Ver Anexo 4). Permitiendo evaluar el impacto y comportamiento de los vertimientos bajo regímenes de caudales altos.

Datos - Calidad del agua

La caracterización fisicoquímica en la cabecera del Rio molino constituye al punto de partida para la alimentación del modelo en los dos escenarios planteados. A continuación, se presenta en la Tabla 5 donde se consolidaron los valores de entrada para el modelo en la pestaña *Headwater* del software.

Tabla 5.
Headwater - Calidad Del Agua

Parámetros	Cabecera (Headwater) - QUAL2K	
	Sequia	Lluvias
CAUDAL (m3/seg)	0.248	0.426
Temperatura (°C)	17.63	18.3
CONDUCTIVIDAD (uhmhos)	84.64	49.30
SST	20	48
OXIGENO DISUELTO (mg/L)	5.06	5.56
DBO (mg/l)	10	10
NITRATOS (ug/l NO3)	100	180
COLIFORMES TOTALES (CFU/100)	10500	15100

ALCALINIDAD (mg/l CaCO ₃ /)	24.2	27.6
PH	7.3	7.0

Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar y recalcar que la información suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) presenta ciertas limitaciones para una modelación integral, dado que el monitoreo en los puntos priorizados no contempla la totalidad de las variables cinéticas y fisicoquímicas que requiere el modelo QUAL2K de manera predeterminada. Aun así, la entrada de datos en su cabecera (Headwater) se ajustó a los parámetros disponibles más representativos, tales como su caudal, temperatura, oxígeno disuelto, DBO5 y nutrientes; garantizando así una coherencia para representar un modelo técnico a pesar de las limitaciones presentadas.

Datos - Vertimientos

En la hoja llamada fuentes puntuales o “*Point Sources*” del software, se ingresó la información técnica de las descargas que recibe el río Molino. Los datos fisicoquímico e in situ se estructuraron a partir de un promedio de tres (3) jornadas de monitoreo realizadas entre el 12 y el 16 de marzo del año 2024, reportadas en la caracterización oficial de agua residuales domésticas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S. P ([Ver Anexo 5](#)).

Cabe resaltar que dicha consolidación de los datos se ejecuta con fines regulatorios para la liquidación de la tasa retributiva del municipio ante la autoridad ambiental (CRC). Razón por la cual los reportes de vertimientos se presentan de manera anual. En consecuencia, se emplearon estos mismos datos para ambas temporadas planteadas tal como se muestra en la (Tabla 6). Lo cual permite evaluar la capacidad de la asimilación y autodepuración del río en función de la variación de su régimen de caudal.

Tabla 6.
Point Sources – Vertimientos

Parámetro	Unidad	Vertimientos		
		Vertimiento Aeronáutica	Vertimiento Pandiguando	Vertimiento Ciudad 2000
pH	Numero	7.59	7.72	7.78
Temperatura	(°C)	21.42	20.73	21.21
Conductividad	µS/cm	614.67	465.00	516.41
Solidos sedimentables	mg/L	2.46	3.07	2.21
Caudal	L/s	103.70	49.75	115.57
DBO5	Mg/L O2	242.33	123.63	213.33
Fosforo total	ug/L P	3580.00	31933.33	3773.00
Alcalinidad	mg /L CaCO3	186.67	126.33	157.33
Nitritos + nitritos	ug/L	1018.70	1010.59	1088.93
Nitrógeno amoniacal	ug/L NH3	21867	12217	14097
Nitrógeno total	ug/L N	31233.33	20266.67	22366.70

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Esquematización y configuración en Qual2k

Como resultado de este proceso, se logró segmentar el río en criterios físicos e hidráulicos. Adicionalmente, se logró caracterizar la distribución espacial de los vertimientos, en el sector urbano. Esta esquematización permitió mantener parámetros como la pendiente, ancho del canal, número de Manning, caudal relativamente constantes por cada tramo como lo muestran las (Figuras 6 y 7).

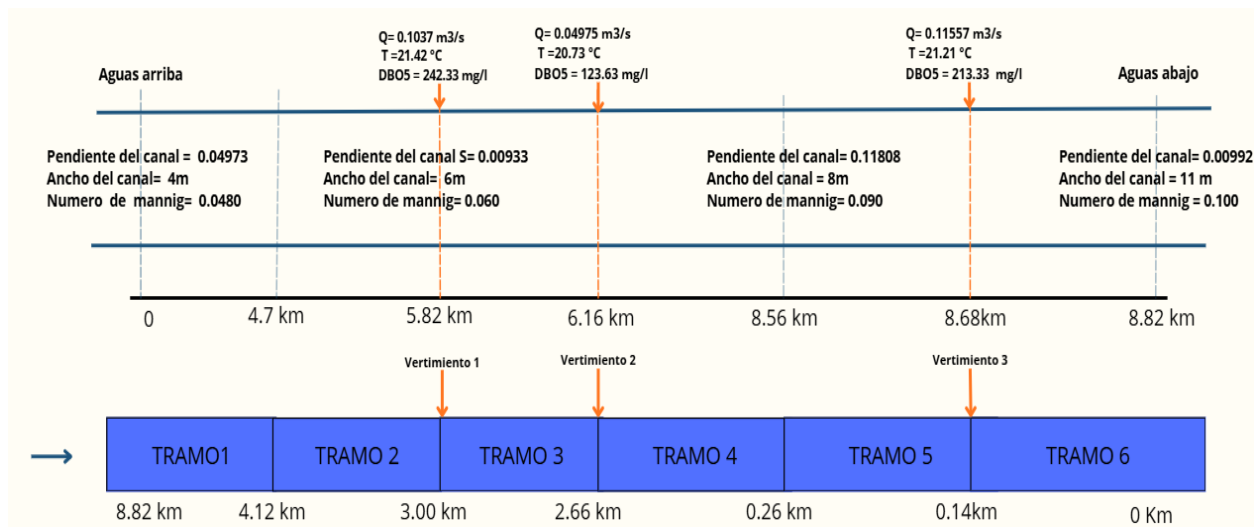


Figura 6. Esquematización Río Molino - Época de sequía

Fuente: Elaboración propia.

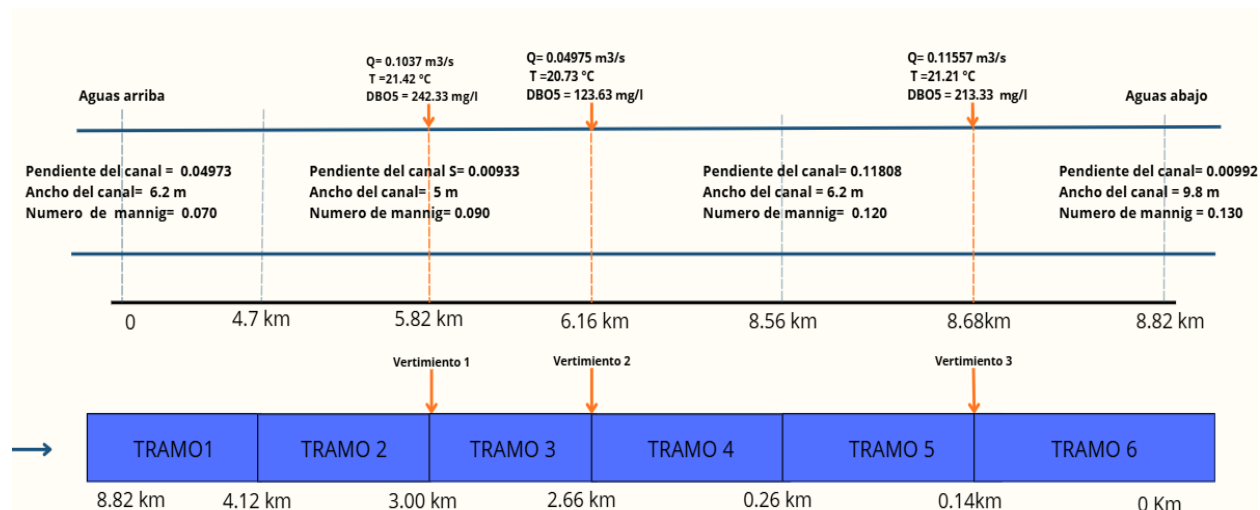


Figura 7. Esquematización Río Molino - Época de lluvias

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 6 y 7 presentan la esquematización del río Molino utilizada para la construcción del modelo Qual2k en los escenarios planteados. En ambos casos se mantuvo la misma segmentación longitudinal del cauce, con una longitud total de 8,82 km y dividida en seis tramos, así como la ubicación de los tres (3) vertimientos identificados a lo largo del recorrido. Esta configuración permitió garantizar que las diferencias observadas en los resultados de la simulación estuvieran asociadas a las condiciones hidráulicas y de calidad del agua de cada campaña de monitoreo y no a modificaciones en la estructura del modelo.

Un aspecto particularmente representativo de la esquematización corresponde al sector comprendido entre los Tramos 4 y 5; donde se registra la mayor pendiente longitudinal del cauce ($S = 0.11808$). Esta condición se mantiene igual en ambos escenarios y evidencia la presencia de un tramo con características hidráulicas distintas de las demás secciones modeladas cuyas pendientes oscilan entre (0.00933 y 0.04973).

Una vez logrado segmentar el río en tramos, esta actividad permitió ingresar las características físicas e hidráulicas del área de estudio. En las siguientes figuras se presentan los valores ingresados al modelo en la pestaña “reach” del software en las (figuras 8 y 9).

Reach	Reach	Downstream		Location		Elevation		Downstream						Manning Formula				
	length			Upstream	Downstream	Upstream	Downstream	Latitude			Longitude			Channel	Manning	Bot Width	Side	Side
Number	(km)	Latitude	Longitude	(km)	(km)	(m)	(m)	Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	Slope	<i>n</i>	<i>m</i>	Slope	Slope
1	4.70	2.44	76.61	8.820	4.120	1782.000	1725.000	2.00	26	41	76.00	36	18.7	0.0497	0.0480	4.00	2.0000	2.0000
2	1.12	2.45	76.61	4.120	3.000	1725.000	1720.000	2.00	26	53	76.00	36	51	0.0093	0.0600	6.00	2.0000	2.0000
3	0.34	2.45	76.62	3.000	2.660	1720.000	1717.000	2.00	26	57	76.00	37	0	0.0093	0.0600	6.00	2.0000	2.0000
4	2.40	2.46	76.63	2.660	0.260	1717.000	1688.000	2.00	27	20	76.00	37	38.6	0.0093	0.0600	6.00	2.0000	2.0000
5	0.12	2.46	76.63	0.260	0.140	1688.000	1691.000	2.00	27	23	76.00	37	39	0.1181	0.0900	8.00	2.0000	2.0000
6	0.14	2.46	76.63	0.140	0.000	1691.000	1686.000	2.00	27	24	76.00	37	35	0.0099	0.1000	11.00	2.0000	2.0000

Figura 8. Tramos “Reach” - Épocas de sequía

Fuente: Interfaz del aplicativo Qual2k

Reach	Reach	Downstream		Location		Elevation		Downstream						Manning Formula				
Number	length			Upstream	Downstream	Upstream	Downstream	Latitude			Longitude			Channel	Manning	Bot Width	Side	Side
	(km)	Latitude	Longitude	(km)	(km)	(m)	(m)	Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	Slope	n	m	Slope	Slope
1	4.70	2.44	76.61	8.820	4.120	1782.000	1725.000	2.00	26	41	76.00	36	18.7	0.0497	0.0700	6.20	2.0000	2.0000
2	1.12	2.45	76.61	4.120	3.000	1725.000	1720.000	2.00	26	53	76.00	36	51	0.0093	0.0900	5.00	2.0000	2.0000
3	0.34	2.45	76.62	3.000	2.660	1720.000	1717.000	2.00	26	57	76.00	37	0	0.0093	0.0900	5.00	2.0000	2.0000
4	2.40	2.46	76.63	2.660	0.260	1717.000	1688.000	2.00	27	20	76.00	37	38.6	0.0093	0.0900	5.00	2.0000	2.0000
5	0.12	2.46	76.63	0.260	0.140	1688.000	1691.000	2.00	27	23	76.00	37	39	0.1181	0.1200	6.20	2.0000	2.0000
6	0.14	2.46	76.63	0.140	0.000	1691.000	1686.000	2.00	27	24	76.00	37	35	0.0099	0.1300	9.80	2.0000	2.0000

Figura 9. Tramos “Reach” - Épocas de lluvias

Fuente: Interfaz del aplicativo Qual2k.

La información general para la configuración inicial del sistema fue diligenciada en la hoja “QUAL2K” del modelo. El tiempo de cálculo seleccionado para lluvias y sequía es de 0.1 horas para lograr la estabilidad numérica de la simulación de los elementos computacionales resultantes de la discretización de los 8.82 km de los 6 tramos de simulación. El método de integración seleccionado de los subtramos o “Reach” fue Brent para el pH y Euler para todas las demás variables.

4.2 Fase 2. Calibración y validación del modelo

Una vez consolidada la línea base de recopilación y validación sobre caracterización de calidad del agua, presencia de vertimientos, y la esquematización el cuerpo de agua en la fase anterior. La segunda etapa de este estudio se centró en la calibración y validación del modelo, donde se obtuvieron los parámetros definitivos que permitieron la estabilización del modelo matemático Qual2k. Los resultados mostraron que el software logro una representación adecuada a la realidad de la fuente, tras ajustar las constantes cinéticas y contrastarlas con los datos de campo recolectados, cumpliendo con los criterios de la única guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales mediante la resolución 958 del año 2018.

4.2.1 Elección del coeficiente de reaireación

Tabla 7.

Coeficientes de reaireación – Manual Qual2k

Autores	Ka (d^{-1} a $20^{\circ}C$)	Rango	Unidades
O'Connor – Dobbins	$Ka = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$	U: 0.15m/s - 0.49m/s	U = m/s
		H: 0.305 m - 9.14m	H = m
		$d^{-1} \leq Ka \leq 12.2d$	
Churchill et al.	$Ka = 5.32 \frac{U}{H^{1.67}}$	U: 0.55 m/s - 1.5 m/s	U = m/s
		H: 0.61m - 3.35m	H = m
		S : 0.000126 m/m - 0.002351 m/m	S = m/m
Owens – Gibbs	$Ka = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$	$0.122 \text{ m} \leq H \leq 3.35 \text{ m}$	
		U: 0.0305 m/s - 1.52 m/s	U = m/s
		S: 0.000156 m/m - 0.0106 m/m	H = m
		$0.31 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 49.17 \text{ d}^{-1}$	S = m/m

Fuente: [6]

En la estimación del coeficiente de reaireación (K_a) se adoptó la ecuación de Owens-Gibbs, considerando su aplicabilidad en corrientes con características hidráulicas y morfológicas similares a las del Río Molino, tales como una baja profundidad y un régimen de flujo relativamente uniforme, como se muestra en la (Figura 10).

QUAL2K
Stream Water Quality Model
Rio molino (11/27/2025)
Water Column Rates

Open Old File Run Fortran

Parameter	Value	Units	Symbol
Stoichiometry:			
Carbon	40	gC	gC
Nitrogen	7.2	gN	gN
Phosphorus	1	gP	gP
Dry weight	100	gD	gD
Chlorophyll	1	gA	gA
Inorganic suspended solids:			
Settling velocity	0.1	m/d	v_i
Oxygen:			
Reaeration model	Owens-Gibbs		
User reaeration coefficient α	5.32		α
User reaeration coefficient β	0.67		β
User reaeration coefficient γ	1.85		γ
Temp correction	1.024		θ_a
Reaeration wind effect	None		
O2 for carbon oxidation	2.69	gO ₂ /gC	r_{oc}
O2 for NH ₄ -N oxidation	4.57	gO ₂ /gN	

Figura 10. Selección de modelo de reaireación

Fuente: Interfaz del aplicativo Qual2k.

La selección de este modelo resulto adecuada para las condiciones del afluente, ya que los valores de profundidad y velocidad registrados en las campañas de monitoreo, tanto en época de sequía como de lluvias, se encuentran dentro de los rangos de validez de dicha ecuación, lo que garantiza su aplicabilidad y confiabilidad. En consecuencia, este parámetro contribuyo significativamente a la correcta simulación de los procesos de autodepuración en los diferentes tramos modelados.

4.2.2 Validación y calibración del modelo

Para la confirmación y validación del modelo, es necesario evitar la incertidumbre y a la vez ajustar el código con datos obtenidos del rio molino, datos de otros estudios relacionado a la obtención de conjuntos de valores de calibración que minimicen la diferencia de error entre los datos medidos de campo y los calculados por el modelo [20].

Para ello, se ingresaron los registros de calidad de agua obtenidos en los puntos de monitoreo dentro de la pestaña denominada "WQ Data" (Tabla 8 y 9) junto con la información hidráulica característica de cada una de estas estaciones en la pestaña "Hydraulics Data" (Ver Figura 11 y 12) en el software Qual2k.

Tabla 8.
Calidad del agua “WQ data” – Sequía

<i>Distance</i> (km)	<i>Cond</i> (umhos)	<i>ISS</i> (mgD/L)	<i>DO</i> (mgO2/L)	<i>CBODf</i> (mgO2/L)	<i>NO3</i> (ugN/L)	<i>Pathogen</i> (cfu/100)	<i>Alk</i> (mgCaCO3/L)	<i>pH</i>
8.82	49.30	48.00	5.56	10.00	0.18	15100.00	27.60	7.42
4.12	98.36	41.30	4.48	10.00	0.62	176000.00	29.60	7.33
0.26	241.30	18.60	3.75	10.00	0.63	75000.00	49.60	7.35
0.00	212.40	65.00	2.71	21.60	1.15	900000.00	108.00	7.45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.
Calidad del agua “WQ data” – Lluvias

<i>Distance</i> (km)	<i>Cond</i> (umhos)	<i>ISS</i> (mgD/L)	<i>DO</i> (mgO2/L)	<i>CBODf</i> (mgO2/L)	<i>NO3</i> (ugN/L)	<i>Pathogens</i> (cfu/100)	<i>Alk</i> (mgCaCO3/L)	<i>pH</i>
8.82	84.64	20.00	5.56	10.00	20.00	10500.00	24.20	7.30
4.12	127.00	23.30	4.64	10.00	20.00	8600.00	32.00	7.23
0.26	269.10	34.20	3.80	10.00	210.00	34900.00	56.30	7.12
0.00	290.60	113.00	2.75	46.60	20.00	588000.00	84.00	7.72

Fuente: Elaboración propia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	QUAL2K									
2	Stream Water Quality Model									
3	Rio Molino (10/29/2025)									
4	Hydraulics Data:									
5										
6										
7	Tributary	Distance	Q-data	H-data	U-data	Travel time				
8	No.	x(km)	m3/s	m	m/s	data (d)				
9	0	8.820	0.248	4.000	1.850					
10	0	4.120	0.754	6.000	4.000					
11	0	0.260	1.007	8.000	2.400					
12	0	0.000	1.687	11.000	4.000					
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										

Open Old File

Run Fortran

Hydraulics Data

Temperature Data

WQ Data

WQ Data Min

WQ Data Max

Diel Data

Figura 11. Hydraulics Data – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	QUAL2K									
2	Stream Water Quality Model									
3	Rio molino (11/27/2025)									
4	Hydraulics Data:									
5										
6										
7	Tributary	Distance	Q-data	H-data	U-data	Travel time				
8	No.	x(km)	m³/s	m	m/s	data (d)				
9	0	8.820	0.426	2.120	1.500					
10	0	4.120	0.606	1.190	2.200					
11	0	0.260	0.736	1.900	2.200					
12	0	0.000	1.523	3.990	3.900					
13	0									
14	0									
15	0									
16	0									
17	0									
18	0									
19	0									
20	0									
21	0									
22	0									
23	0									

Open Old
File

Run Fortran

Figura 12. Hydraulics Data – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k.

A partir de esta configuración, se ejecutó un ajuste iterativo de los coeficientes del modelo con el fin de reducir el error entre los perfiles simulados y las mediciones reales. De este modo, se buscó que el software representara con precisión la realidad física y bioquímica del cuerpo hídrico; replicando tanto su comportamiento hidráulico como la dinámica de los constituyentes de calidad del agua del Rio Molino. Siguiendo la metodología propuesta por la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico del año 2018 (Ver Figura 13).

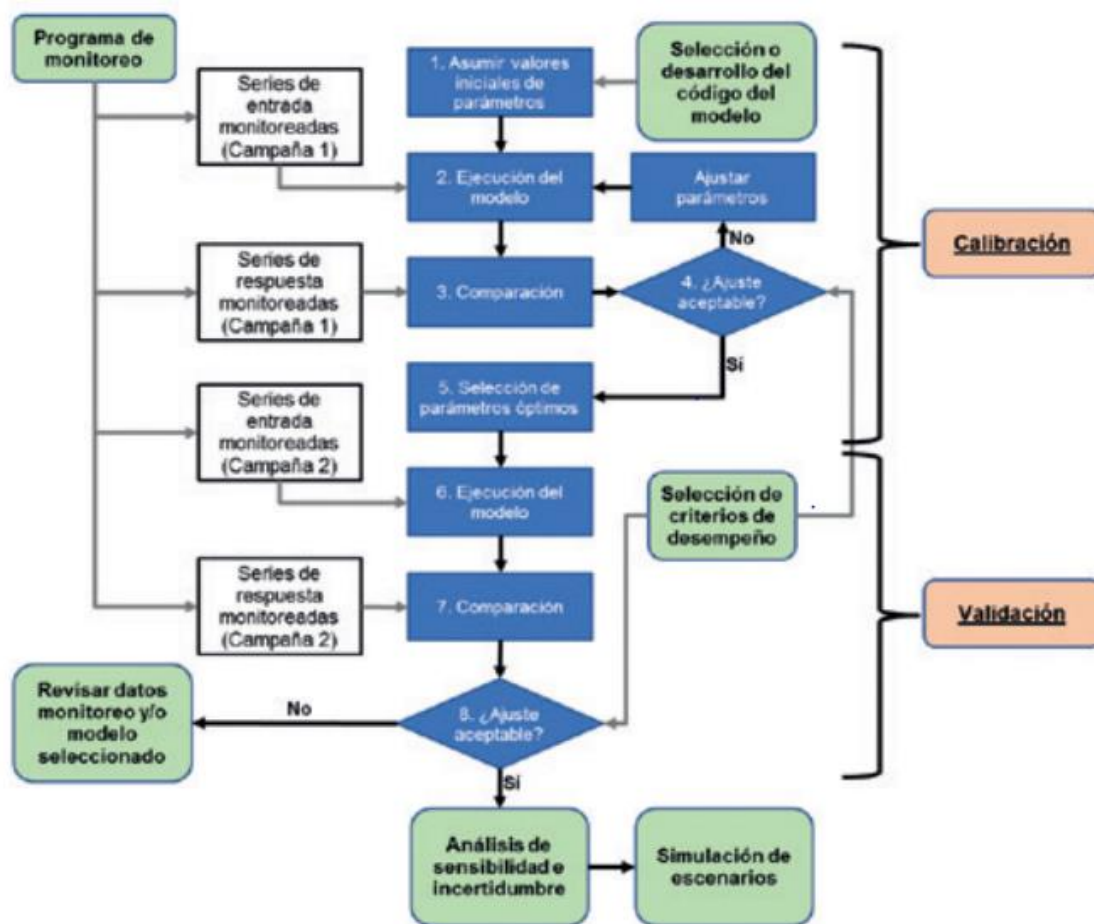


Figura 13. Esquematización del proceso de calibración y validación del modelo

Fuente: [14]

4.3 Fase 3. Simulación de escenarios de variabilidad climática

Una vez consolidada la validación y calibración del modelo, esta fase procedió a la ejecución de (2) dos escenarios a modelar; permitiendo hacer un paralelo bajo diferentes estados dinámicos de la zona de estudio, basados en el régimen pluviométrico bimodal de la ciudad como se muestra en la (Figura 14).

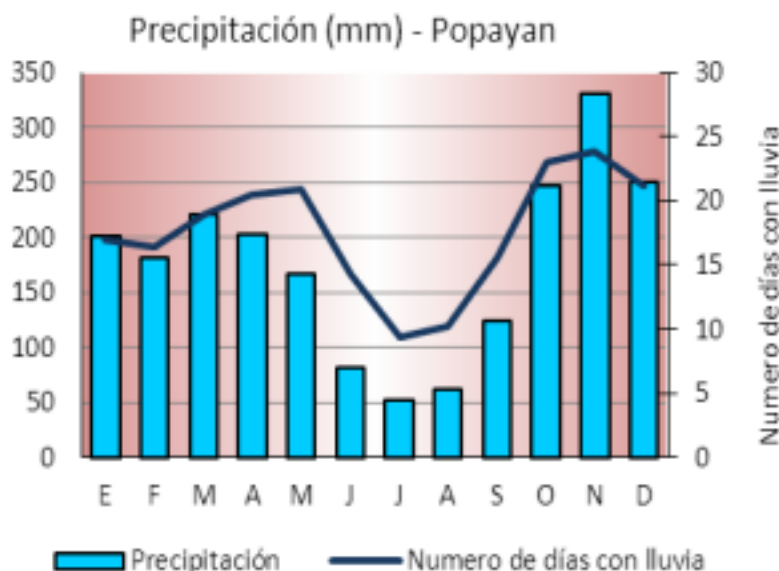


Figura 14. Precipitación - Popayán Cauca 2015

Fuente: [38]

Considerando que el clima en Colombia presenta variaciones significativas por los fenómenos ENNOS, fase de sequía (Niño) y fase de lluvias (niña), el modelo contempló estas condiciones para garantizar una representación de los datos monitoreados el mes de mayo de 2024, aprovechando descenso en la curva de precipitación hacia un periodo de estiaje (junio – agosto) representando un periodo crítico. Por otra parte, el mes diciembre refleja el comportamiento de lluvias; permitiendo evaluar el impacto sobre la concentración de contaminantes en función del caudal.

4.3.1 Definición de variables meteorológicas

En esta actividad se consolidaron los parámetros específicos que el software Qual2k requiere para procesar los balances de masa y energía. Se ingresaron datos representativos de la zona suministrados por la CRC, tales como temperatura del aire, punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y porcentaje de sombra promediando valores del año 2017.

Tabla 10.
Datos meteorológicos - Época de sequía (mayo - agosto)

Sequía					
PUNTO DE MONITOREO	T Aire °C	T Punto de Rocío °C	Velocidad del viento (m/s)	Nubosidad %	Sombra %
Antes de Pueblillo	20.3	12.24	4	0.3	0.2
Puente Edificio Negret	20.3	12.24	4	0.3	0.2
Antes de río Ejido	20.3	12.24	4	0.3	0.2
Después de río Ejido	20.3	12.24	4	0.3	0.2

Fuente: CRC

Tabla 11.
Datos Meteorológicos - Época de lluvias (diciembre)

Lluvias					
PUNTO DE MONITOREO	T Aire °C	T Punto de Rocío °C	Velocidad del viento (m/s)	Nubosidad %	Sombra %
Antes de Pueblillo	18.4	16.36	2	0.3	0.1
Puente Edificio Negret	18.4	16.36	2	0.3	0.1
Antes de río Ejido	18.4	16.36	2	0.3	0.1
Después de río Ejido	18.4	16.36	2	0.3	0.1

Fuente: CRC

Estas variables meteorológicas, al interactuar con los datos de caudal registrados in situ por parte de las jordanas de monitoreo en el año 2024 para cada escenario, permitieron modelar con precisión la cinética de las reacciones químicas y el intercambio de gases en la interfaz agua-aire, asegurando que la simulación responda a las condiciones climáticas locales y a los regímenes térmicos propios de cada temporada [6].

La adopción de estos datos meteorológicos de referencia del año 2017 corresponde a la disponibilidad de un registro técnico completo y orientado a la modelación por parte de la autoridad ambiental CRC. Esto garantiza que la simulación responda fielmente a los regímenes

de caudales propios de cada temporada ante la ausencia de registros meteorológicos para el periodo modelado (2024).

4.3.2 Ejecución de simulaciones y perfiles longitudinales

Con el fin de verificar la correcta implementación del modelo, se corroboró las variables ingresadas al software Qual2k. En este orden de ideas se evidenció que se encuentran consideradas las variables necesarias para correr el modelo. Dicho esto, se menciona un énfasis en la ausencia de la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea (DBOC) la cual es el resultado de eliminar la demanda nitrogenácea de oxígeno en el procedimiento de demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

El modelo requiere ingresar (DBOC de rápida absorción) y la (DBOC de lenta absorción), para lo cual es importante verificar que dentro de los análisis y reportes de laboratorio se presenten la DBO5 filtrada que se asemeja a la DBOC rápida y la DBO20 para hacer los cálculos respectivos, lo anterior, hace referencia de que se trata de aguas residuales de tipo doméstico.

Teniendo en cuenta estas limitaciones de información y la carencia de este tipo de variables, es necesario justificar de manera concreta la ausencia de algunos parámetros y su incidencia en la ejecución final del modelo. Así mismo, se realizó el análisis correspondiente de cada una de las variables, como la concentración del Oxígeno disuelto (OD), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), alcalinidad y la dinámica de nutrientes (NT, NH₄, NO₃) a lo largo de los en los 6 tramos comprendidos en una distancia de 8.82 Km y sus implicaciones en la calidad del agua del río molino.

A continuación, se presentan las gráficas arrojadas por el modelo en la ejecución de los dos escenarios planteados a través de la opción Run Fortran del software, con los datos de entrada y salida en las hojas seleccionadas mencionadas anteriormente; al terminar la corrida se obtuvieron las gráficas con los resultados que arroja el programa. A su vez se hace su respectivo análisis por cada parámetro modelado (Ver figuras 15 a 30).

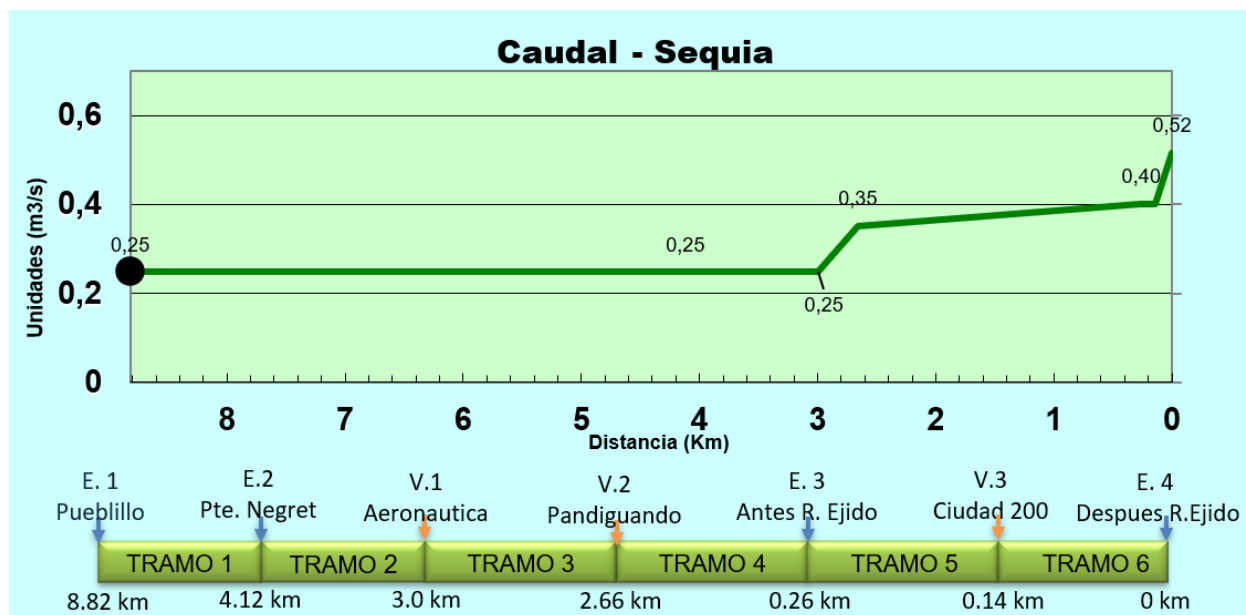


Figura 15. Caudal – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k.

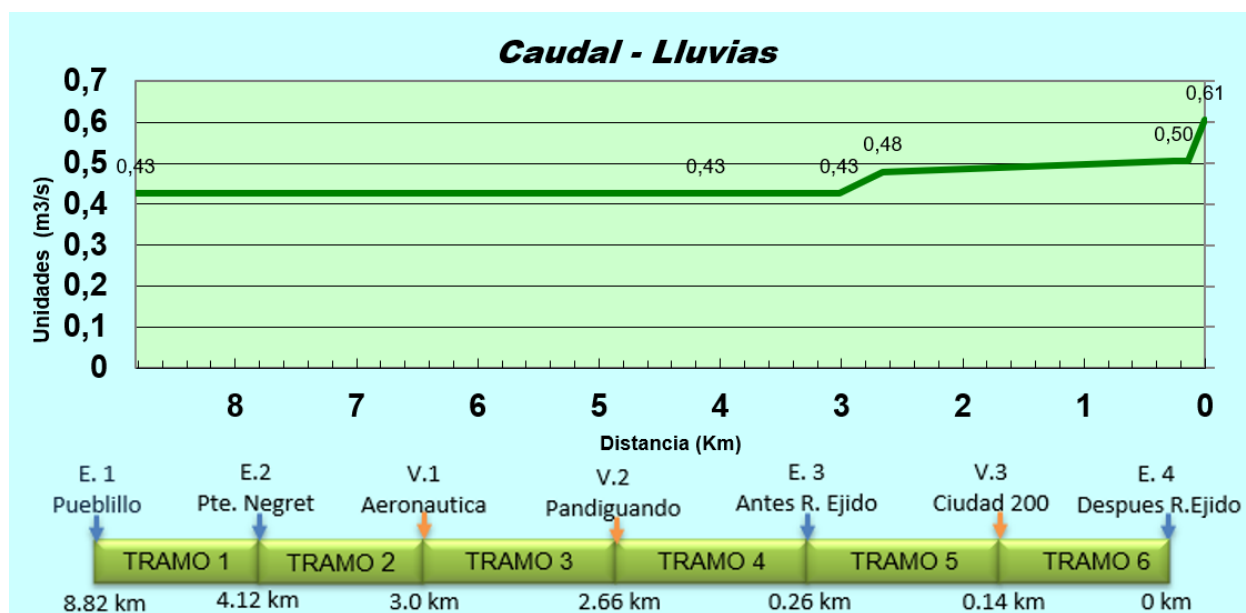


Figura 16. Caudal – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k.

4.3.2.1 Caudal.

Las figuras 15 y 16 presentan el comportamiento del caudal a lo largo del tramo modelado para las condiciones de sequía y lluvia, respectivamente. En Ambos escenarios se observa que el caudal se mantiene relativamente constante en los primeros tramos del río, desde el tramo 1

ubicado en el km 8.82 hasta el tramo 2 ubicado en el km 3.0, debido a la ausencia de aportes significativos. Sin embargo, a partir de este último punto (km 3.0) se evidencia un incremento progresivo del caudal, producto de la incorporación de vertimientos considerados en la discretización del modelo.

Para la época de sequía el caudal inicial es de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ manteniéndose constante hasta el tramo 2, donde aumenta a $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ y posteriormente alcanza a un valor final de $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ aguas abajo debido a la incorporación del vertimiento 3 ubicado en el km 0.14.

Por su parte durante la época de lluvias el caudal inicial es de $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ incrementándose hasta $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$ en el tramo 3 comprendido entre el km 3.0 y km 2.66. Finalmente, el valor se incrementa aguas abajo en el tramo 6 hasta $0.61 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que refleja el efecto de los mayores aportes hídricos característicos de esta temporada.

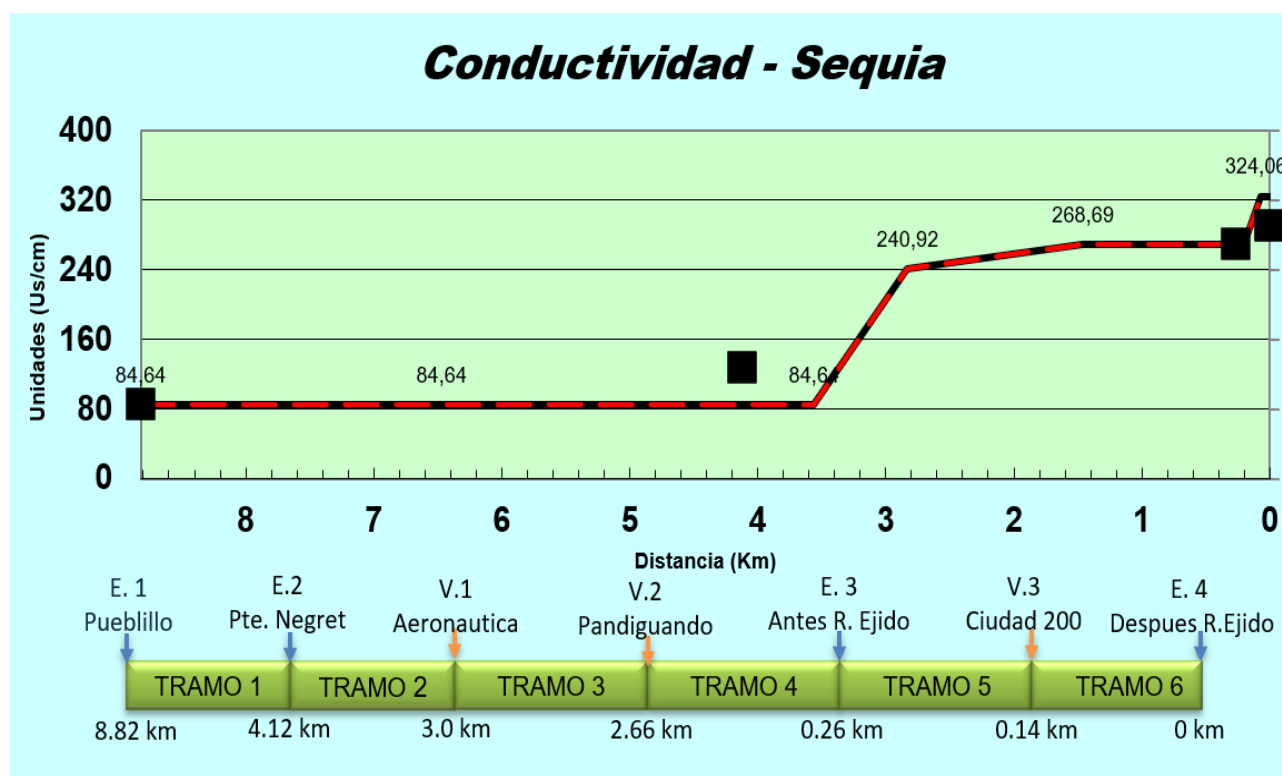


Figura 17. Conductividad – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k

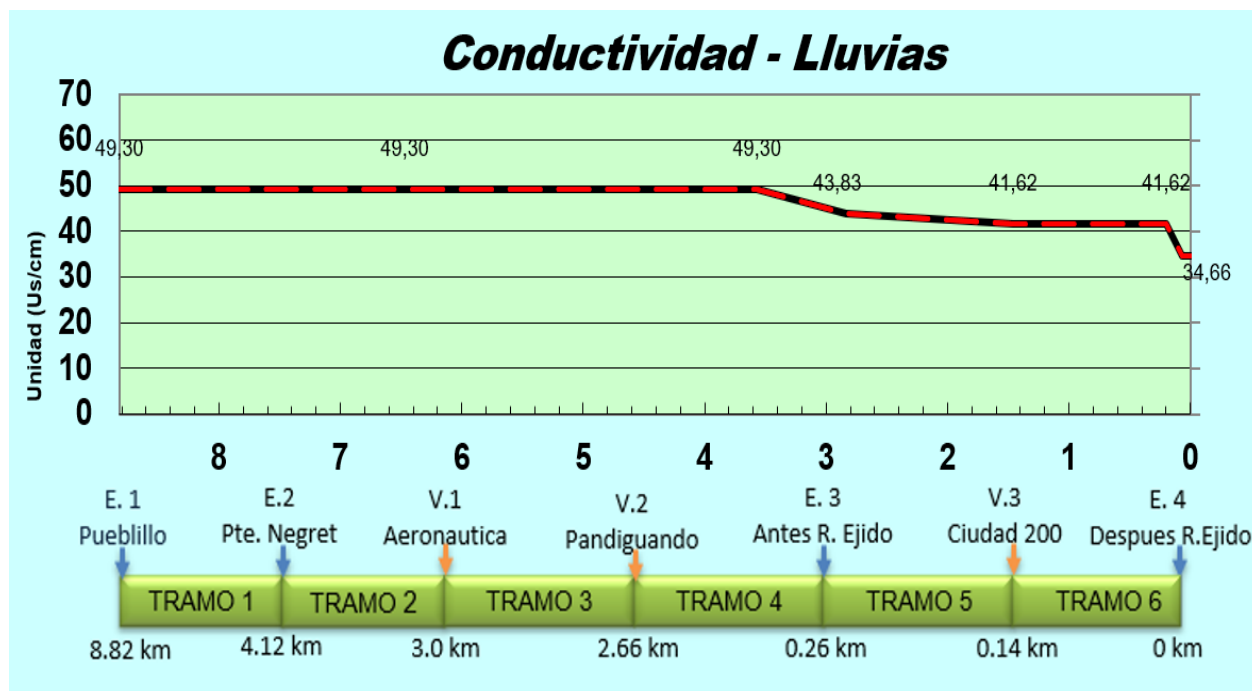


Figura 18. Conductividad – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k

4.3.2.2 Conductividad.

Durante la temporada de sequía (Figura 17) la conductividad presenta un incremento a partir del vertimineto Aeronautica ubicado en el k.m 3.0 Pasando de 240.92 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta alcanzar un valor de 324.06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la estacion ubicada despues de Rio Ejido en el k.m 0.0 (Tramo 6). Este comportamiento indica una alta concentración de sólidos disueltos en el agua; asociadas a la baja disponibilidad de caudal durante la la temporada de sequia, lo que limita la capacidad de dilución del río y favorece la acumulación de sales, compuestos inorgánicos y contaminantes provenientes de actividades antrópicas. Entre estas se destacan los vertimientos domesticos, la esorrentia urbana y el arrastre de residuos, detergentes y aceites que ingresan al cauce desde las zonas urbanizadas a la ribera del rio.

Cabe destacar que el Rio molino, atraviesa la parte urbana de la ciudad de popayan, en el inicio del tramo 2 hasta llegar al tramo 6; un sector caracterizado por una baja permeabilidad debdio a que predomina las vias en concreto y superficies impermeables. Si bien la modelación en condiciones críticas como la epoca de sequia (Figura 17) la dinámica hidroclimatológica local puede presentar eventos de lluvia aislados durante esta época. Al contar con un sistema de alcantarillado combinado finalmente estas descargan caen a la fuente, generando un arrastre de

material, lo que puede provocar picos en los valores de conductividad aun mas severos que los proyectados por el modelo.

En la temporada de lluvias (Figura 18), el comportamiento es opuesto al de sequia. Registrando un descenso continuo, debido al efecto de dilucion generado por el aumento de caudal. La conductividad del rio presenta un valor inicial de 49.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el tramo 1, debido al lavado natural de los suelos y al arrastre de minerales en la parte alta. No obstante, al ingresar al tramo urbano el perfil no sufre incrementos, sino que decae de forma progresiva hacia los 43.83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el tramo 3 y finaliza con valor minimo de 34.66 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tramo 6 en su desembocadura.

Esta tendencia indica una mejora relativa en la calidad del agua, sin embargo, esta disminuci3n no implica la eliminaci3n de los contaminantes, sino su dispersi3n aguas abajo a partir de los cargas puntuales. Si bien valores bajos favorecen condiciones adecuadas para la biota, la particularidad del casco urbano puede hacer que este par3metro se vuelva a incrementar en condiciones de menor caudal. Este incremento representa un deterioro, ya que altera la composici3n natural del sistema y puede llegar a afectar a los organismos acu3ticos, especialmente aquellos sensibles a cambios en la salinidad.

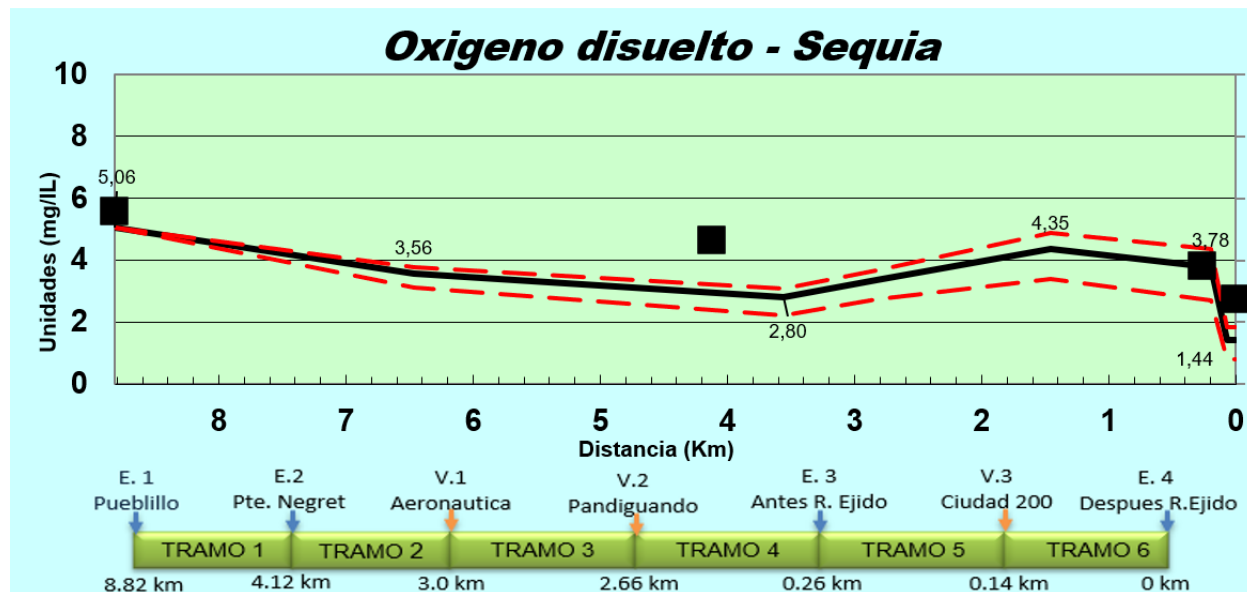


Figura 19. Oxígeno Disuelto – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k

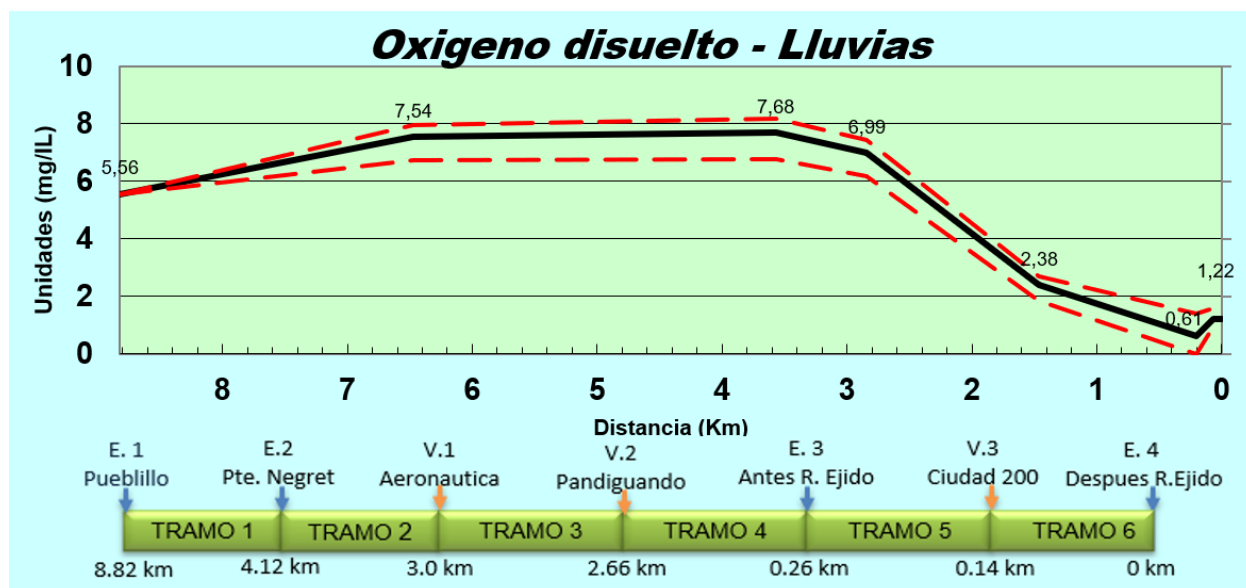


Figura 20. Oxígeno Disuelto – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k.

4.3.2.3 Oxígeno Disuelto (OD).

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros más importantes para evaluar la calidad del agua en ecosistemas fluviales, ya que refleja la capacidad del sistema para sostener vida acuática y el equilibrio entre los procesos de reaeración y el consumo de oxígeno asociado a la de degradación de materia orgánica [39]. A lo largo del tramo evaluado del río Molino, el comportamiento del oxígeno disuelto presenta una tendencia de disminución progresiva hacia los tramos finales del río en ambas temporadas, esto se debe a las cargas contaminantes que recibe el afluente en su recorrido por la zona urbana del municipio, evidenciando un deterioro de la calidad del agua.

Durante la época de sequía (Figura 19) las concentraciones de oxígeno disuelto presentan una disminución progresiva desde los 5.06 mg/l en la estación pueblillo hasta los 2.80 mg/l después de inicio del tramo 1 ubicado en el k.m 4.12 Este comportamiento se debe principalmente a la reducción del caudal característica de esta temporada, lo cual limita los procesos de reaeración natural del río. Además, la acumulación de materia orgánica genera un mayor consumo de oxígeno por parte de los microorganismos encargados de su degradación [40]. Posteriormente, se observa una recuperación parcial del oxígeno disuelto en los tramos 4 y 5 alcanzando valores de 4.35 mg/ y disminuyendo a 3.78 mg/l respectivamente. Este

comportamiento puede estar asociado a las condiciones hidráulicas presentes en este sector, donde la pendiente longitudinal ($S = 0,11808$) favorece a una mayor turbulencia del flujo y, por consiguiente, incrementa los procesos naturales en la oxigenación del río. Finalmente, en el (tramo 6) lugar donde recibe su tercer vertimiento el valor cae drásticamente hasta llegar a un valor de 1.44 mg/l.

Estas concentraciones indican una condición de hipoxia severa, bajo estas condiciones, la capacidad del río para sostener la biota se ve comprometida. En consecuencia, pueden presentarse afectaciones a la supervivencia de especies alterando el equilibrio ecológico y limitando su capacidad natural de recuperación del cuerpo hídrico [41].

Durante la época de lluvias (Figura 20), El incremento del caudal favorece las concentraciones de oxígeno disuelto, las cuales presentan una tendencia ascendente con valores desde de 5.56 mg/l en la estación Pueblillo hasta alcanzar 7.68 mg/l entre el tramo 2 y tramo 3.

Este comportamiento es influenciado por el aumento de la capacidad de dilución de contaminantes y la reaeración natural del río. Lo anteriormente mencionado, indica que en los sectores aguas arriba y antes de la influencia de los vertimientos principales que recibe el sistema, el río Molino conserva una mejor capacidad para mantener condiciones favorables y mantener un equilibrio ecológico del río.

A partir del Vertimiento 1 (Aeronáutica), ubicado en el km 3.0 se evidencia un cambio en la tendencia del oxígeno disuelto, iniciando una disminución progresiva de sus concentraciones; pasando de 7.68 mg/l a 6.99 mg/l. Sin embargo, el deterioro más significativo ocurre después del Vertimiento 2 (Pandiguando) ubicado en el k.m 2.66 donde continúa la tendencia descendente del parámetro.

En la gráfica se puede observar una caída negativa, donde las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyen abruptamente desde los 6.99 mg/L hasta 2.38 mg/l en el tramo 4; posteriormente esta tendencia continua hasta alcanzar un valor un mínimo de 0.61 mg/l tras recibir su tercer vertimiento ubicado en k.m 0.14 en el tramo 6. Esto sugiere a una limitación en su capacidad natural de autodepuración del río, ya que, una vez se incorporan los vertimientos provenientes de la zona urbana del municipio, no se evidencia una recuperación significativa de este parámetro a lo largo del tramo modelado.

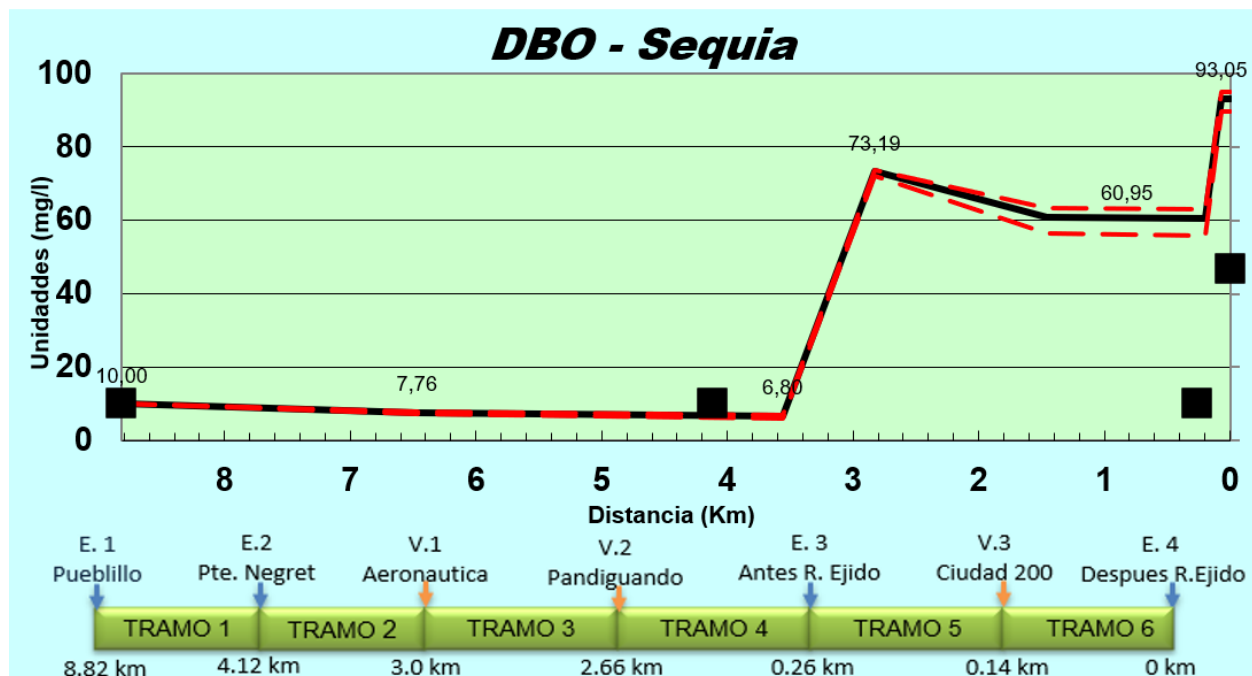


Figura 21. Demanda biológica de oxígeno (DBO) – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k

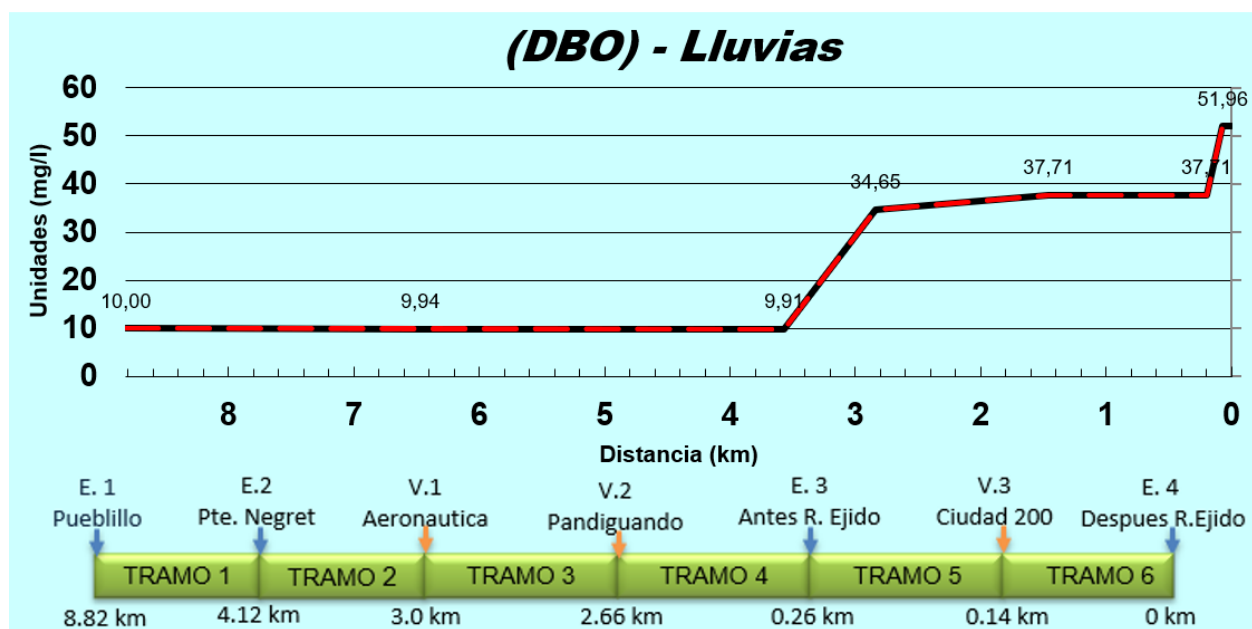


Figura 22. Demanda biológica de oxígeno (DBO) – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k.

4.3.2.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es un indicador fundamental de la presencia de materia orgánica biodegradable en el agua, ya que representa la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer los compuestos orgánicos presentes en el sistema [42]. A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos para las 2 temporadas modeladas.

Durante la temporada de sequía (Figura 21) inicialmente las concentraciones se mantienen bajas aguas arriba en el tramo 1, con valores 10 mg/l y 6.80 mg/l. Sin embargo, hay un incremento significativo a partir de los vertimientos Aeronautica, Pandiguando y Ciudad 2000, ubicados puntos km 3.0, km 2.66, y km 0,14 respectivamente. Después de recibir los dos vertimientos en el tramo 3, se observa un aumento abrupto hasta los 73.19 mg/l. Posteriormente a partir de este punto a lo largo del tramo aguas abajo tras recorrer 1 km, el valor disminuye y se logra mantener hasta 60.95 mg/l. Luego la presencia del vertimiento 3 (Ciudad 2000) la concentración se vuelve a incrementar alcanzado un máximo de 93.95 mg/l en el (tramo 6). Este comportamiento evidencia una importante incorporación de materia orgánica biodegradable proveniente de las descargas urbanas en el tramo modelado.

Al comparar estos resultados con el comportamiento del oxígeno disuelto, se observa una relación inversamente proporcional entre ambos parámetros. El incremento de la DBO coincide con la disminución de las concentraciones de OD en el (tramo 3) y (tramo 6) debido a que los microorganismos utilizan oxígeno para degradar la materia orgánica presente en el agua. Como consecuencia, en los sectores donde se registran las mayores concentraciones de DBO se presentan las menores concentraciones de oxígeno disuelto, alcanzando valores críticos de hasta 1.44 mg/L en el tramo final durante la época de sequía [22].

En la temporada de lluvias (Figura 22) las concentraciones de DBO permanecen relativamente estables en los sectores aguas arriba del río al igual que en la época de sequía, con valores cercanos a los 10 mg/l en el tramo 1 comprendido por una distancia de 4.7 km. Sin embargo, después de este punto se evidencia un incremento significativo alcanzado un valor de 34.65 mg/l en el tramo 3 ubicado en el k.m 2.66. A partir de este punto, entre el tramo 4 y 5 se mantiene un valor estable de 37.71 mg/l antes de llegar al k.m 0.14, donde el sistema recibe el vertimiento 3 (Ciudad 2000) alcanzando un máximo de 51.96 mg/l en la estación 4 (Después de Río Ejido).

Al relacionar estos resultados con el comportamiento del oxígeno disuelto, se observa una respuesta inversamente proporcional entre ambos parámetros al igual que en la época de sequía. Mientras la DBO permanece cercana a 10 mg/L, el oxígeno disuelto alcanza concentraciones favorables de hasta 7.68 mg/L en el sector aguas arriba comprendido en el tramo 1; sin embargo, aguas abajo en los sectores finales del río, el oxígeno disuelto disminuye progresivamente hasta alcanzar valores críticos de 0.61 mg/L.

Los incrementos observados en la DBO indican la presencia de materia orgánica biodegradable provenientes de los vertimientos identificados en el tramo urbano del río Molino. La degradación de esta materia orgánica requiere cantidades significativas de oxígeno disuelto, lo que provoca una disminución del oxígeno disuelto (OD). En consecuencia, cuando la demanda de oxígeno supera la capacidad natural de reaeración y autodepuración del río, se produce un deterioro de la calidad del agua que afecta las condiciones necesarias para el sostenimiento de la vida acuática [22].

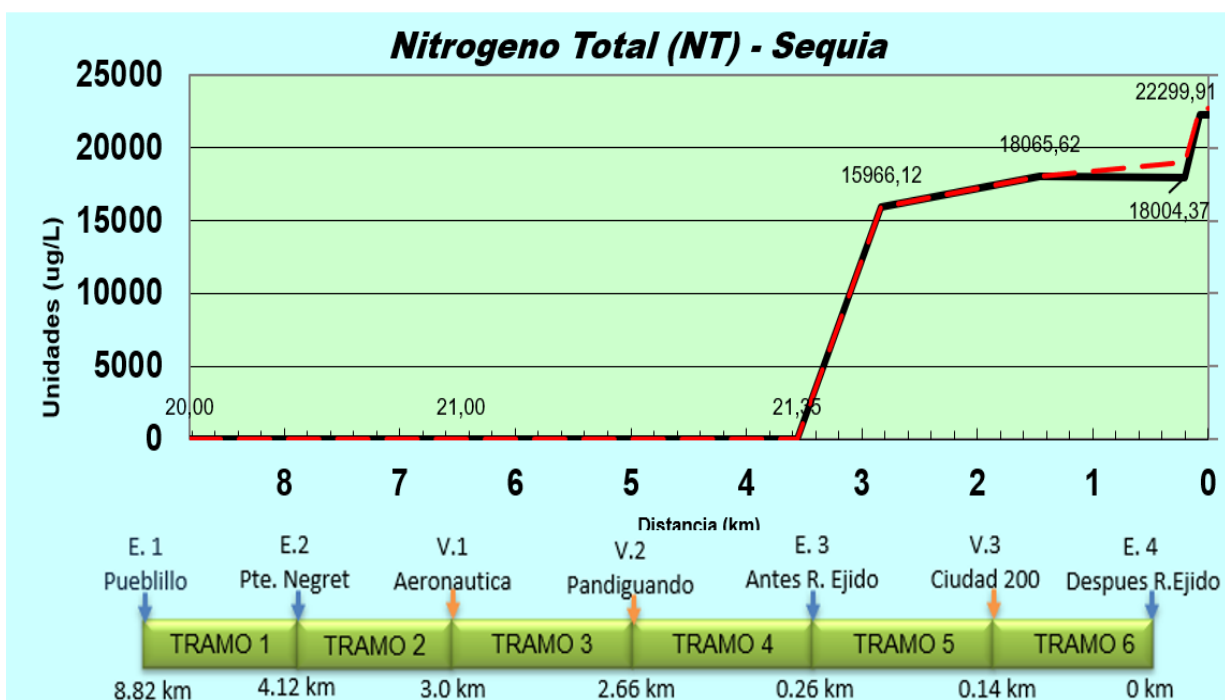


Figura 23. Nitrógeno Total – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k

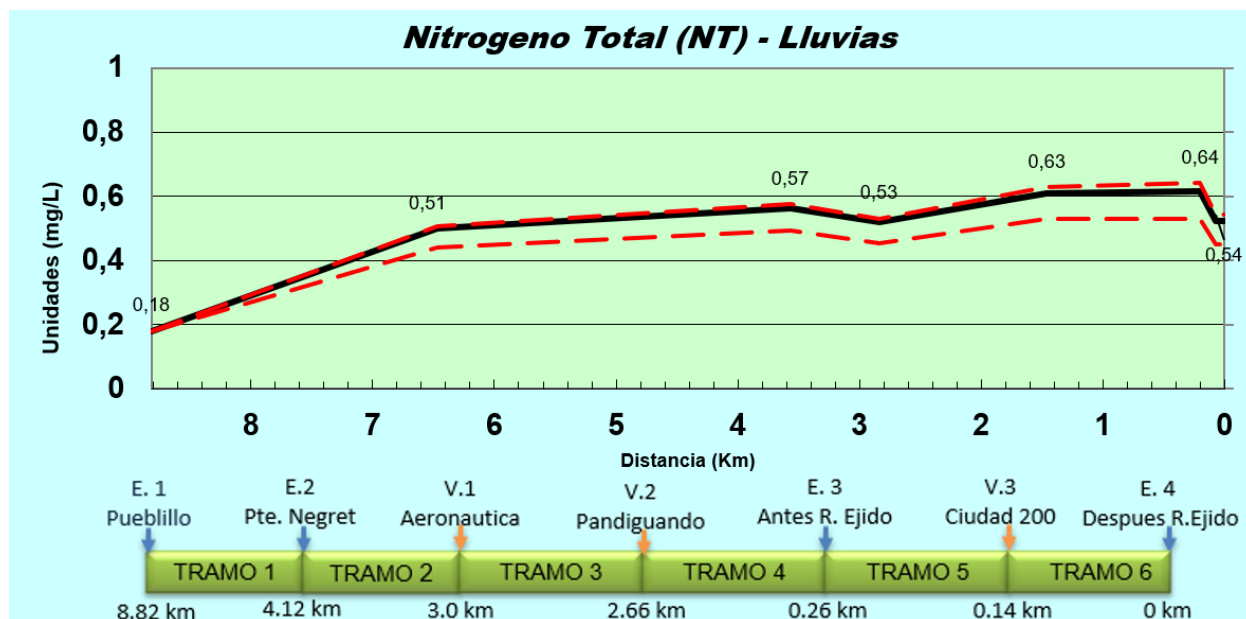


Figura 24. Nitrógeno Total – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k.

4.3.2.5 Nitrógeno total (NT).

El Nitrógeno Total (NT) es un indicador que integra las diferentes especies nitrogenadas presentes en el agua incluyendo nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. Este nutriente es esencial para el crecimiento de algas y vegetación acuática. La presencia de concentraciones moderadas forma parte de los procesos naturales de los ecosistemas fluviales. Sin embargo, cuando estas concentraciones se encuentran en exceso favorecen a fenómenos de eutrofización o enriquecimiento de nutrientes, alterando el equilibrio ecológico del sistema [43].

Durante la temporada de sequías (Figura 23) las concentraciones en los puntos iniciales del río, aguas arriba, se mantiene relativamente bajo y estable, registrando valores cercanos a 0.02 mg/L lo que indica una baja carga de nutrientes y condiciones favorables para el sistema. Sin embargo, aguas abajo a partir del tramo 3, el valor alcanza 15.95 mg/l por la presencia de los vertimientos cercanos en los puntos ubicados en los k.m 3.0 (Aeronautica) y k.m 2.66 (Pandiguando). Finalmente, el mayor incremento comienza después del vertimiento 3 ubicado entre tramo 5 y el tramo 6 ubicado en el k.m 0.26 y k.m 0.0 respectivamente. Donde se presentan concentraciones máximas de 22.30 mg/l durante la temporada de sequía, lo que favorece a un exceso de nutrientes presentes en el sistema.

Este comportamiento está asociado a la reducción del caudal, condición que disminuye la capacidad de dilución del río y favorece la concentración de contaminantes. Adicionalmente los valores entre 15.95 mg/l del primer vertimiento y 22.30 mg/l en la desembocadura del río en el último tramo, superan ampliamente el criterio de referencia de 2.2 mg/L asociado al riesgo de eutrofización [44]; alcanzando concentraciones superiores a la norma. Esto indica un enriquecimiento excesivo de nutrientes y favoreciendo a procesos de eutrofización.

En contraste, durante la temporada de lluvias (Figura 24) el comportamiento del nitrógeno total presento concentraciones menores en comparación con la temporada de sequía, registrando valores entre 0.18 mg/l y 0.64 mg/l. Este comportamiento es consistente con el incremento del caudal característico de esta época; generando así una mayor dilución de este parámetro. Aunque se mantiene una tendencia de aumento hacia los tramos finales del río, los valores se mantienen muy por debajo del valor de referencia de 2.2 mg/L indicando una menor acumulación de compuestos nitrogenados.

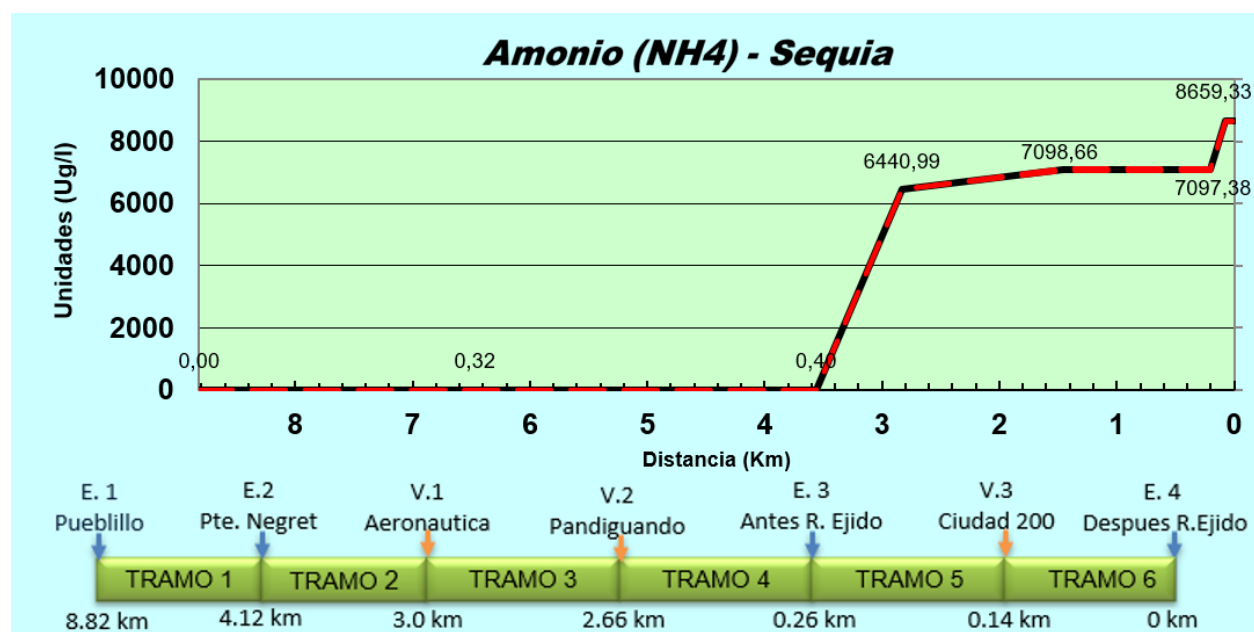


Figura 25. Amonio (NH₄) – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k

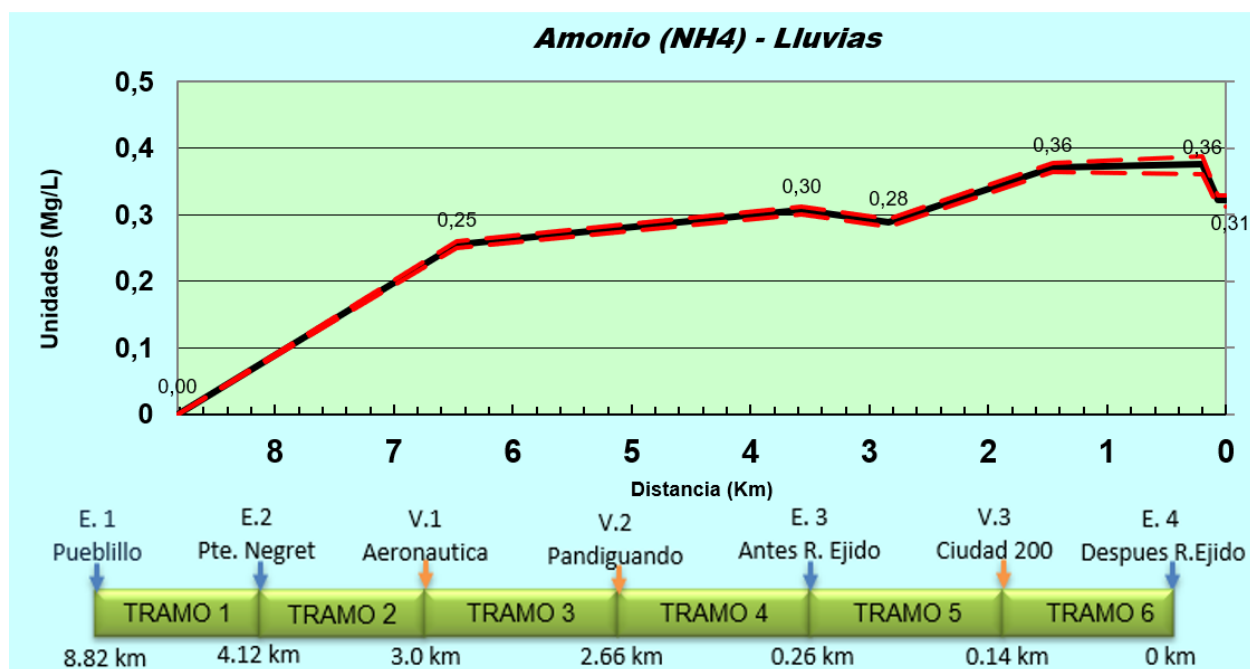


Figura 26. Amonio (NH₄) – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k.

4.3.2.6 Amonio (NH₄⁺).

El amoniaco representa una de las formas más reducidas del nitrógeno presente en los cuerpos de agua y generalmente se asocia a procesos de descomposición de materia orgánica reciente o a la descarga directa de aguas residuales domésticas. En sistemas fluviales, concentraciones elevadas de amonio suelen indicar la presencia de contaminación orgánica fresca y un proceso de degradación biológica activo [45].

En la temporada de sequía (Figura 25) las concentraciones de amonio en los sectores aguas arriba permanecen prácticamente nulas registrando valores cercanos a los 0.00032 mg/L, lo cual indica una baja influencia de fuentes contaminantes y condiciones favorables en el tramo 1. A partir de los tramos 3 y 4 ubicados en el k.m 3.0 y 0.26 k.m se evidencia un incremento abrupto de las concentraciones, alcanzando valores entre a 6.44 mg/L y 7.1 mg/l respectivamente. Posteriormente en el tramo 6, continua su ascenso hasta 8.66 mg/L en la desembocadura del rio ubicado en el k.m 0.0 Estacion 4 (Después Río Ejido).

En este análisis se logra observar que hay un mayor impacto en el comportamiento del amonio, ya que muestra una tendencia de incremento en los tramos donde recibe directamente los vertimientos ubicados en los puntos k.m 3.0 (Aeronautica), k.m 2.6 (Pandiguando) y k.m 0.14

(Ciudad 2000). En estos tramos se presentan y se evidencian mayores cargas de materia orgánica, donde se incrementan los valores hasta 8.66 mg/L superado la normatividad para prevenir procesos de eutrofización con un valor límite de los 2.0 mg/l [44]. Lo cual sugiere que el afluente está recibiendo aportes significativos de residuos orgánicos; generando una fuerte influencia de aportes de origen doméstico sobre la calidad del agua, lo que genera un riesgo alto de eutrofización junto a la alta carga de nitrógeno total [45].

En la temporada de lluvias como se evidencia en la (Figura 26) las concentraciones del amonio presentan valores considerablemente menores en comparación con la época de sequía, registrando concentraciones entre 0.25 mg/L y 0.38 mg/L a lo largo del tramo modelado. Al comparar los resultados con el valor de referencia de 2.0 mg/l, se evidencia que todas las concentraciones registradas durante esta temporada se mantienen muy por debajo del límite establecido para prevenir procesos de eutrofización. Lo anterior indica que, bajo condiciones de mayor disponibilidad hídrica, el amonio no representa una fuente significativa de enriquecimiento de nutrientes dentro del río Molino, evidenciando una menor acumulación de este parámetro en contraste a las condiciones observadas durante la época de sequía.

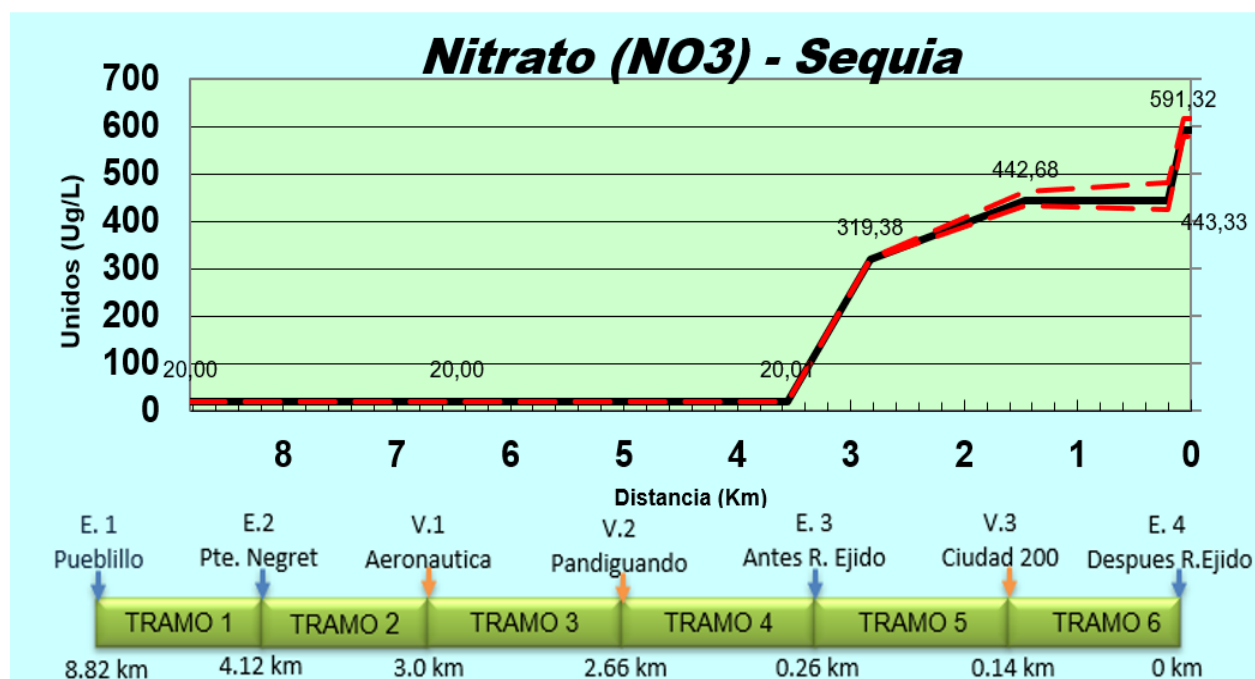


Figura 27. Nitratos (NO₃) – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k.

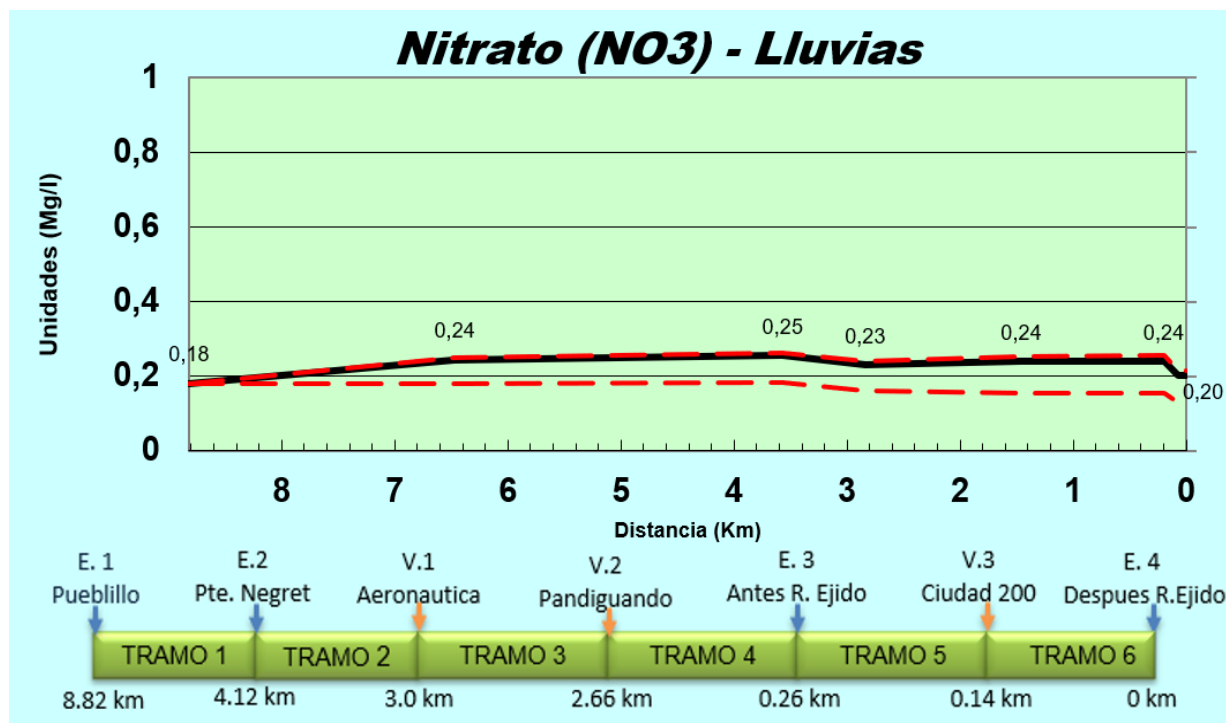


Figura 28. Nitratos (NO₃) – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k.

4.3.2.7 Nitratos (NO₃⁻).

Los nitratos (NO₃⁻) corresponden a la forma más oxidada y estable del nitrógeno presente en los ecosistemas acuáticos. Su presencia en el agua es el resultado de procesos naturales y antrópicos, principalmente de la nitrificación, mediante la cual el nitrógeno amoniacal es transformado sucesivamente en nitritos y nitratos por la acción de microorganismos especializados. Debido a que constituyen una fuente importante de nutrientes para algas y plantas acuáticas, pero concentraciones elevadas de nitratos pueden contribuir a procesos de eutrofización y alterar el equilibrio ecológico de los cuerpos de agua. Por esta razón, el análisis de este parámetro permite evaluar la dinámica de transformación del nitrógeno y la influencia de las cargas contaminantes sobre la calidad del recurso hídrico [46].

Durante la temporada de sequía (Figura 27) las concentraciones aguas arriba se mantienen bajas y completamente estables en el tramo 1 y tramo 2 antes de llegar al k.m 3.0 con valores de 0.02 mg/L. Sin embargo, estos valores se ven influenciados por las descargas domésticas en los puntos V.1 (vertimiento Aeronáutica) ubicado en el km 3.0 y V.2 (vertimiento Pandiguando) ubicado en el km 2.66, desde los 0.319 mg/l hasta 0.442 mg/L respectivamente. Finalmente, el mayor incremento se consolida en el tramo final del recorrido, tras la influencia del

vertimiento V.3 (Ciudad 2000) ubicado en el km 0.14. los nitratos continúan su ascenso progresivo hasta registrar una concentración máxima 0.59 mg/L en la desembocadura del río, correspondiente a la estación E.4 (Después Río Ejido).

Este incremento progresivo confirma la presencia activa del ciclo del nitrógeno dentro del sistema. En conjunto con las altas concentraciones registradas para el nitrógeno total y el amonio, durante la temporada de sequía. Además se evidencia una elevada disponibilidad de nutrientes en los tramos finales del río, condición que incrementa la susceptibilidad del sistema a fenómenos de enriquecimiento excesivo de nutrientes y deterioro de la calidad del agua [46].

A diferencia de los parámetros como el nitrógeno Total (NT) y el amonio (NH_4) analizados previamente para esta misma temporada el perfil longitudinal de los nitratos no presenta picos abruptos como los anteriores parámetros mencionados. El modelo muestra una curva ascendente y progresiva observada a lo largo de los tramos modelados. En este contexto, los nitratos confirman la transformación progresiva del nitrógeno dentro del sistema mediante procesos de nitrificación presente a los 3 vertimientos domésticos en la zona urbana, lo cual es transformado paulatinamente en nitrato (NO_3) por la actividad microbiana gracias a las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* [45]. Posteriormente también contribuye al enriquecimiento nutricional del cuerpo hídrico y aumentando su susceptibilidad a fenómenos de eutrofización.

Durante la temporada de lluvias (Figura 28) las concentraciones de nitratos presentan valores considerablemente menores en comparación con la época de sequía, registrando concentraciones mínimas entre 0.18 mg/L en el k.m 8.82 y máximas hasta los 0.25 mg/L en el k.m 3.0 aproximadamente, del tramo modelado. En esta época, las concentraciones permanecen relativamente homogéneas a lo largo del recorrido evidenciando una menor acumulación de nutrientes dentro del sistema.

Adicionalmente, los bajos niveles de nitratos observados reflejan una reducción significativa en la acumulación de compuestos nitrogenados dentro del río. Esta condición disminuye la probabilidad de alteraciones asociadas al enriquecimiento de nutrientes y coincide con los bajos valores registrados para el nitrógeno total y el amonio durante la misma temporada. Lo anterior sugiere que la dinámica del nitrógeno se encuentra fuertemente por el incremento del caudal, el cual favorece los procesos de dilución y transporte de los nutrientes, contribuyendo a mantener una mejor calidad del agua respecto a este parámetro en comparación con las condiciones observadas durante la época de sequía.

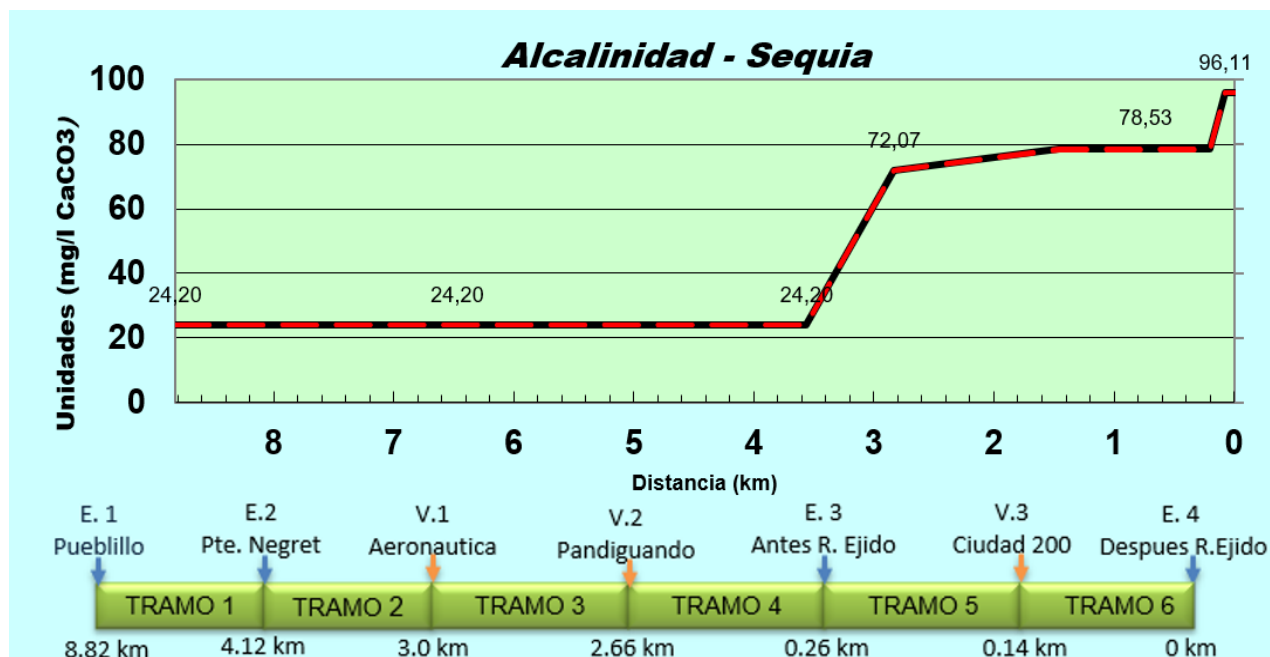


Figura 29. Alcalinidad – Sequia

Fuente: Interfaz Qual2k

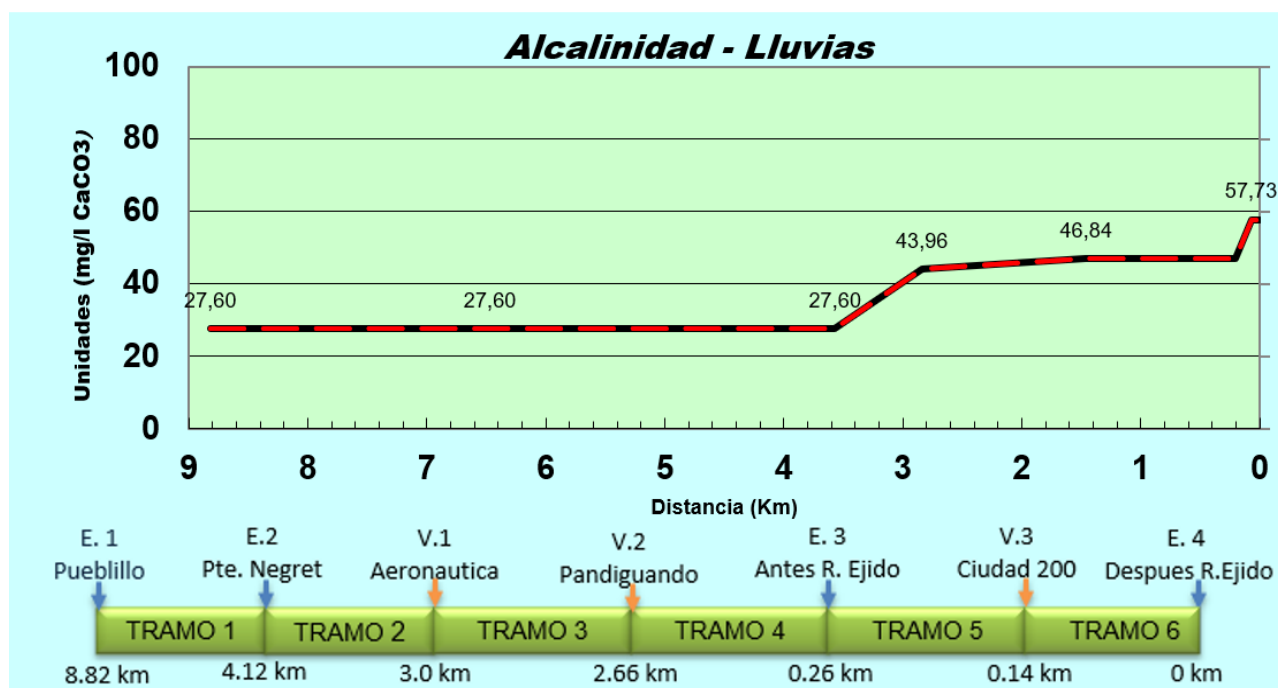


Figura 30. Alcalinidad – Lluvias

Fuente: Interfaz Qual2k

4.3.2.8 Alcalinidad.

La alcalinidad representa la capacidad del agua para neutralizar ácidos y está asociada principalmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos en el agua. Este parámetro cumple un papel importante en los sistemas acuáticos ya que actúa como un sistema amortiguador, permitiendo que el agua mantenga condiciones relativamente estables frente a procesos biológicos y reacciones químicas que pueden alterar la acidez [47].

Durante la temporada de sequía (Figura 29) aguas arriba y antes de ingresar a la zona influenciada por los vertimientos, la alcalinidad se mantiene relativamente estable en 24.20 mg/L. Posteriormente, después del km 3.0 las concentraciones aumentan hasta alcanzar 72.07 mg/L. A lo largo del tramo, el parámetro continúa incrementándose y se estabiliza alrededor de 78.53 mg/L antes de llegar a la desembocadura. Finalmente en el tramo 6, después del vertimiento ubicado en el km 0.14, la alcalinidad alcanza su valor máximo de 96.11 mg/L.

Este comportamiento refleja una mayor acumulación de compuestos carbonatados y sustancias disueltas durante la temporada de sequía, condición asociada a la reducción del caudal y a la menor capacidad de dilución del sistema. Adicionalmente, el incremento de la alcalinidad en los sectores influenciados por los vertimientos ubicados en los km 3.0, km 2.66 y km 0.14 evidencia una alteración en la composición química natural del río. Estas condiciones favorecen el desarrollo de procesos como la nitrificación y la transformación de compuestos nitrogenados dentro del sistema acuático, con el incremento observado en las concentraciones de nitrógeno y nitratos durante esta temporada [48].

Durante la temporada de lluvias (Figura 30), la alcalinidad presenta una tendencia de incremento gradual hacia los tramos finales del río Molino. En los sectores aguas arriba, las concentraciones tienen valores cercanos a 27.60 mg/L, indicando una composición química relativamente estable antes de la influencia de las descargas urbanas. Sin embargo, a medida que el río avanza las concentraciones comienzan a aumentar progresivamente hasta alcanzar 43.96 mg/L en el tramo 4 y 46.84 mg/L en el tramo 5, finalizando con un valor máximo de 57.73 mg/L en la desembocadura del río ubicado en el tramo 6 k.m 0.0.

Aunque durante esta temporada se evidencia un incremento de la alcalinidad hacia los tramos finales del sistema, las concentraciones registradas son considerablemente menores en comparación con la época de sequía. La disminución de la alcalinidad durante la temporada de lluvias está asociada principalmente al efecto de dilución generado por el incremento del caudal.

Por otra parte, el agua lluvia suele presentar condiciones ligeramente ácidas debido a la interacción de compuestos de nitrógeno y azufre presentes en la atmósfera. Adicionalmente, el ingreso de aguas de escorrentía y el arrastre de material proveniente del sistema de alcantarillado combinado, presenta menores concentraciones de carbonatos y bicarbonatos, lo cual contribuyen a disminuir la alcalinidad dentro del sistema. Influyendo sobre la conductividad y la composición química del sistema acuático [49].

4.3.3 Análisis de resultados de modelación

El análisis de las gráficas brindadas por el modelo QUAL2K revela un deterioro progresivo de la calidad del agua del río Molino y una capacidad limitada de recuperación frente a los vertimientos recibidos a lo largo de la zona urbana del tramo modelado de 8.82 km. El Oxígeno Disuelto (OD), considerado uno de los indicadores más importantes para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos [39], presenta un déficit en ambas temporadas, evidenciando que la carga contaminante supera la capacidad natural de reaireación del cauce.

La ausencia de una recuperación significativa del OD aguas abajo de los vertimientos refleja una disminución en la capacidad de autodepuración del sistema. En condiciones naturales, un río con adecuada capacidad de resiliencia presenta procesos de recuperación progresiva después de recibir cargas contaminantes [27]. Sin embargo, el río Molino presenta concentraciones bajas de oxígeno a partir del k.m 3.0 hasta la desembocadura ubicada en el k.m 0.0, alcanzando valores mínimos de 2.70 mg/L en sequía y 1.44 mg/L en temporada de lluvias. Estas condiciones representan un ambiente desfavorable para el sostenimiento de organismos acuáticos aerobios y evidencian un fuerte deterioro ecológico del sistema.

La disminución del oxígeno disuelto se encuentra directamente relacionada con el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), parámetro que representa el consumo de oxígeno requerido por los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua. Las elevadas concentraciones de DBO observadas en los tramos influenciados por los vertimientos y el alcantarillado combinado indican una importante carga orgánica dentro del sistema, generando un consumo acelerado del oxígeno disponible [22].

Adicionalmente, el análisis conjunto del Nitrógeno Total (NT), el amonio (NH_4^+) y los nitratos (NO_3^-) evidencia una alteración importante en la dinámica del nitrógeno dentro del río. Las concentraciones elevadas de amonio, con valores de hasta 8.66 mg/L, indican aportes recientes de contaminación orgánica y aguas residuales domésticas. De manera simultánea, los nitratos (NO_3^-) presentan un incremento progresivo a lo largo del tramo modelado, reflejando la

transformación parcial del amonio mediante procesos de nitrificación favorecidos por la acción bacteriana [45].

Este comportamiento evidencia una interrupción parcial del ciclo del nitrógeno dentro del río, favoreciendo la acumulación de amonio en el agua, compuesto que puede generar efectos tóxicos sobre los organismos acuáticos y afectar directamente la calidad de la fuente hídrica. Simultáneamente, las elevadas concentraciones de nitrógeno total reflejan una acumulación importante de nutrientes dentro del sistema, favoreciendo procesos de eutrofización y el crecimiento excesivo de biomasa algal [46].

En conjunto, estos procesos contribuyen al agotamiento progresivo del oxígeno disuelto y guarda relación con el incremento de la alcalinidad, la cual alcanzó valores cercanos a 98 mg/L durante la temporada de sequía. Estas concentraciones reflejan una mayor acumulación de compuestos carbonatados y sustancias disueltas provenientes de vertimientos urbanos domésticos, favoreciendo alteraciones en la composición química natural del río y generando condiciones asociadas a procesos de eutrofización dentro del sistema acuático [50].

Finalmente, al contrastar ambas temporadas, se observa que durante la época de lluvias el oxígeno disuelto (OD) alcanza su concentración mínima de 1.44 mg/L, evidenciando condiciones críticas para el sostenimiento de la biota acuática. Sin embargo, el aumento del caudal característico de esta temporada, no logra compensar el aumento masivo de descargas de vertimientos y escorrentía, lo cual favorece el arrastre y movilización de contaminantes acumulados de la zona urbana, incorporando mayores cargas de materia orgánica y nutrientes al sistema hídrico. En conclusión, el río Molino presenta un importante deterioro de la calidad del agua debido a las altas concentraciones de DBO y nutrientes. La interacción entre la elevada alcalinidad, la saturación nitrogenada y la disminución del oxígeno disuelto a través de todo el recorrido modelado, evidencia que la carga orgánica mantiene al sistema hídrico en un estado de deterioro, ejerciendo una presión sobre su capacidad de autodepuración bajo las condiciones actuales de los vertimientos.

4.4 Fase 4. Formulación de adaptación y mitigación

En esta fase se analizaron los datos obtenidos en la simulación del modelo durante los dos escenarios planteados, temporadas de sequía y lluvias. Esto permitió identificar los puntos vulnerables y plantear medidas alternativas, que respondan como lineamientos orientados a la recuperación de la fuente y la preservación del ecosistema hídrico, basándose en el

comportamiento del río Molino ante la presencia de vertimientos y variabilidad climática del municipio de Popayán – Cauca.

4.4.1 Identificación de tramos críticos y comportamiento en temporadas modeladas

El análisis de los perfiles permitió analizar los resultados obtenidos en la modelación, evidenciando que el comportamiento del río Molino está condicionado por la disponibilidad hídrica y variaciones de caudal en la zona de estudio de la ciudad de Popayán.

- **Punto Inicial - Vertimiento 1 (Km 3.0)**

Es la primera descarga del sistema; en este punto, el río recibe el impacto directo de la carga sanitaria. Las gráficas evidencian el inicio del deterioro de la calidad del agua asociado al ingreso de cargas contaminantes. En las dos temporadas las concentraciones de nitrógeno total comienzan su incremento progresivo, mientras que el oxígeno disuelto presenta una disminución significativa debido al ingreso de vertimiento y aguas residuales transportadas por el alcantarillado combinado de la ciudad Popayán.

- **Saturación del sistema Vertimiento 2 (Km 2.66)**

Ubicado a corta distancia del primer punto de descarga, este vertimiento intensifica el deterioro de la calidad del agua dentro del sistema. El río no alcanza a recuperar condiciones adecuadas de oxigenación ni a estabilizar biológicamente la carga contaminante incorporada por el vertimiento anterior antes de recibir una nueva descarga. Como consecuencia, se genera un tramo con contaminación persistente, donde las concentraciones de nutrientes y materia orgánica permanecen elevadas, limitando la capacidad natural de recuperación y autodepuración del río.

- **Acumulación final - Vertimiento 3 (Km 0.14)**

Este punto corresponde al último aporte de aguas residuales antes de la desembocadura del río Molino. Debido a que el sistema de alcantarillado es combinado, durante eventos de lluvia se incorpora escorrentía urbana y material de arrastre desde la zona urbana, aumentando la carga contaminante y limitando significativamente la capacidad de recuperación del río en su tramo final.

- **Comportamiento en Temporada de Sequía**

Durante la temporada de sequía, el río Molino presenta un caudal inicial aproximado de 0.25 m³/s en la parte alta del tramo modelado, manteniéndose relativamente constante hasta el

km 3.0. A partir de este punto, el caudal incrementa progresivamente debido al ingreso de vertimientos y aportes urbanos, alcanzando valores cercanos a 0.52 m³/s en la desembocadura.

A pesar de este incremento, el sistema presenta una limitada capacidad de dilución frente a las cargas contaminantes incorporadas. Como consecuencia, se evidencia un aumento significativo en las concentraciones de nitrógeno y amonio en los sectores influenciados por los vertimientos, reflejando una acumulación de nutrientes y materia orgánica dentro del cauce.

Durante este periodo, la reducción del aporte hídrico natural favorece la concentración de sales, minerales y sustancias disueltas, alterando el equilibrio fisicoquímico del ecosistema acuático y limitando los procesos naturales de autodepuración del río [41].

- **Comportamiento en Temporada de Lluvias**

Durante la temporada de lluvias, el río presenta un incremento general del caudal a lo largo del tramo modelado, iniciando con valores cercanos a 0.43 m³/s y alcanzando aproximadamente 0.61 m³/s en la desembocadura. Este aumento favorece parcialmente la dilución de algunos compuestos nitrogenados; sin embargo, también incrementa el arrastre de sedimentos, residuos y materia orgánica provenientes de la escorrentía urbana y del sistema de alcantarillado combinado.

Como consecuencia, se genera un aumento importante en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), elevando el consumo de oxígeno requerido para los procesos de degradación biológica de la materia orgánica y transformación de compuestos nitrogenados.

Durante la temporada de lluvias, aunque el incremento del caudal favorece parcialmente la dilución de compuestos como nitratos y amonio, también aumenta el aporte de materia orgánica proveniente de la escorrentía urbana y del sistema de alcantarillado combinado. El arrastre de sedimentos, residuos y desechos hacia el cauce incrementa la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), generando un mayor consumo de oxígeno durante los procesos de degradación biológica de la materia orgánica y transformación de compuestos nitrogenados [42]. Como consecuencia, se presenta una disminución significativa del oxígeno disuelto en los tramos finales del río, evidenciando una limitada capacidad de recuperación frente a las cargas contaminantes incorporadas al sistema.

4.4.2 Definición de medidas y soluciones

La importancia de la conservación del río molino radica en que constituye una de las principales es una fuente abastecedora de la PTAP de Tulcán, la cual suministra agua potable a

gran parte de la zona centro del casco urbano de la ciudad de Popayán. Si bien es cierto que el agua llega con una buena calidad al punto de extracción en la zona alta denominada pueblillo en el sector rural, el hecho de que el río pierda sus condiciones óptimas y de calidad, aguas abajo, revela un déficit en la gestión ambiental de la zona urbana de la ciudad.

Históricamente, la planta de Tulcán al ser la primera fuente abastecedora de la ciudad de Popayán – Cauca, el río Molino posee un valor patrimonial y ecológico; que contrasta drásticamente en su deterioro actualmente en el tramo urbano, donde la falta de realización legalmente del PORH ha dejado un vacío normativo [51].

Es fundamental entender que el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) de Popayán, aprobado mediante la Resolución 170 del 12 de febrero de 2021 por la CRC ([Ver anexo 6](#)); Establece la eliminación de vertimientos directos al río Molino lo que significa que las obras para los sectores críticos como Aeronáutica Civil y Pandiguando proyectada en el cronograma con una ejecución de 5 años a partir de 2021, requiere compromiso conjunto del municipio, la autoridad ambiental local (CRC) y la empresa Acueducto y Alcantarillado S.A E.SP, con el fin de cumplir las metas de reducción de carga contaminante sobre el afluente.

La unificación de estas dos descargas de vertimientos a través del cumplimiento de las fases del PSMV del municipio en su punto número 17 requiere abordar la mala calidad hídrica, contaminación visual, generación de malos olores y la proliferación de vectores que hoy degradan la ribera y afectan la salud pública. Sin la operación plena de estos sistemas de conducción de los vertimientos, la carga de DBO y nutrientes seguirá superando la capacidad de autodepuración del río, especialmente en las temporadas de lluvia donde la escorrentía urbana genera un arrastre de material y desechos sólidos a pesar de un mayor aumento de caudal.

Para fines de preservación y conservación se hace indispensable que el municipio adopte legalmente el plan de ordenamiento del recurso hídrico (PORH) para que la información técnica se convierta en una herramienta de control y seguimiento del afluente río Molino. Además de las obras de saneamiento, se requiere una intervención física en la ribera que incluya la recuperación de la zona y que detengan la contaminación visual, a través del cumplimiento de las fases del PSMV del municipio en su punto número 19, que establece la realización de jornadas de conservación, protección y mejoramiento de las fuentes hídricas, entre ellas el río Molino, evidenciando necesariamente una restauración ecológica y ecosistémica; garantizando que el lecho no continúe sometido a procesos persistentes de contaminación y degradación ambiental a través de los años. Así el río Molino podrá dejar de ser visto como una fuente de contaminación

urbana para volver a ser valorado como el recurso vital que históricamente permitió el nacimiento y sostenimiento de Popayán.

Conclusiones

La aplicación del modelo matemático QUAL2K permitió representar el comportamiento de la calidad del agua del río Molino en el tramo urbano de Popayán bajo condiciones hidrológicas contrastantes de sequía y lluvias, evidenciando la influencia directa de los vertimientos sobre la dinámica fisicoquímica del afluente.

Los resultados obtenidos permitieron identificar que los sectores ubicados aguas abajo de los puntos de descarga que recibe el río Molino presentan las mayores alteraciones en parámetros como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno y compuestos nitrogenados, reflejando un deterioro progresivo de la calidad del agua en el recorrido urbano del río.

Se evidenció que la variabilidad climática modifica el caudal y por ende el comportamiento de los contaminantes dentro del sistema. En temporada de sequía predominan procesos asociados a la concentración de contaminantes por la limitada capacidad de dilución, mientras que en lluvias el incremento de escorrentía urbana y aportes del alcantarillado combinado favorece el transporte de materia orgánica y sedimentos hacia el cauce.

La modelación desarrollada permitió reconocer que el río Molino presenta una capacidad limitada de recuperación frente a las cargas contaminantes incorporadas en el tramo especialmente en los sectores influenciados por vertimientos de tipo doméstico.

Este estudio permitió generar información técnica útil para fortalecer procesos de gestión y planificación ambiental relacionados con el control de vertimientos, monitoreo de calidad del agua y conservación del recurso hídrico en el municipio de Popayán – Cauca.

Finalmente, con base en los resultados de la modelación, se formularon alternativas de adaptación y mitigación orientadas a disminuir el impacto de los vertimientos sobre el río Molino. Entre las principales medidas propuestas se destacan el cumplimiento de las obras contempladas en el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), especialmente la eliminación de las descargas directas al río, junto a la adopción e implementación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) como instrumento para el seguimiento y control de la calidad del agua; así como el fortalecimiento de las acciones de restauración y conservación del cuerpo hídrico. En conjunto, estas medidas contribuyen al fortalecimiento de la gestión de recurso hídrico y constituyen a una base para la recuperación progresiva de la calidad del agua de río Molino.

Recomendaciones

Para futuras modelaciones de calidad del agua en el río Molino, se recomienda fortalecer la recopilación de información meteorológica durante las campañas de monitoreo, debido a que variables como, temperatura aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y porcentaje de sombra influyen en los procesos fisicoquímicos representados por el modelo Qual2k, por lo tanto, en la confiabilidad de las simulaciones.

Asimismo, se recomienda determinar con mayor precisión las tasas de reaeración en diferentes tramos del río mediante mediciones en campo o metodologías específicas para este parámetro. Esto permitirá mejorar la calibración del modelo y obtener una representación más ajustada de los procesos de oxigenación natural del afluente.

De igual manera, se recomienda una implementación de al menos dos campañas adicionales de contramuestreo y/o vertimientos en temporada de sequía como en temporada de lluvias, permitiendo comparar y validar los resultados obtenidos durante la modelación matemática. Estas campañas permitirán reducir la incertidumbre de los datos de entrada y mejorar la confiabilidad de las simulaciones realizadas por el modelo QUAL2K.

Por otra parte, se recomienda que las entidades responsables de la gestión del recurso hídrico, en articulación con la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), en el municipio de Popayán y la empresa de Acueducto y Alcantarillado S.A. E.S.P, continúen implementando acciones contempladas en el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) y promuevan la adopción e implementación del PORH con el fin de fortalecer la recuperación de la calidad del agua del río Molino y garantizar una gestión integral del recurso hídrico.

Referencias

- [1] UNESCO, «Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua; datos y cifras». Accedido: 01 de Mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_spa
- [2] IDEAM, «Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales». Accedido: 01 de Mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua>
- [3] M. J. Calvache Narvaez y A. Arias Hoyos, «Caracterización ambiental del río Molino en la zona urbana del municipio de Popayán, 1999 - 2000», trabajo de grado, Universidad del Cauca, Popayan, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unicauca.edu.co/handle/123456789/7373>
- [4] IPC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE, «CLIMATE CHANGE 2023 - Synthesis Report». Accedido: 01 de Mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- [5] C. A. Sierra Ramirez, *Calidad del agua: Evaluacion y diagnostico*. Medellin: Ediciones de la U, 2011.
- [6] S. Chapra, «Qual2K - Manual de usuario (Version 5.1)». Accedido: 01 de Mayo 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.academia.edu/34867566/MANUALQUAL2K>
- [7] R. Padilla, O. Parra, «Condiciones biológicas y fisicoquímicas de las aguas superficiales del río Cauca en el área urbana de Popayán, Colombia», *Revista de Ingenierias Universidad De Medellín*, pp. 263-2776, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14203/395>
- [8] Acueducto y Alcantarillado de Popayán, «Sub Cuenca - Rio Molino». Accedido: 04 de Mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://aapsa.com.co/ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-molino/>
- [9] Corporacion Autonoma Regional del Cauca - CRC, «Caracterizacion ambiental - plan departamental de aguas y saneamiento basico». Accedido: 12 de Mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/34455907/caracterizacion-ambiental-plan->

departamental-de-aguas-y-..

- [10] H. C. Avalos, A. Galindo Alcantar y I. D. Gonzales, «Cuencas hidrográficas - Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión». Accedido: 12 de Mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf
- [11] N. Jenagros Rodríguez, «Modelación de la calidad del agua del Río Bogotá en la cuenca alta incorporando incertidumbre - tramo Villapinzón - Tibitoc», Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Colombia, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/19483>
- [12] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Informe de gestión», Accedido: 12 de Marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/INFORME_GESTION_MINAMBIENTE_2020.pdf
- [13] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - (IDEAM), «Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua». Accedido: 10 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ideam.gov.co/nuestra-entidad/hidrologia/protocolo-de-monitoreo-y-seguimiento-del-agua>
- [14] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Guia nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales». Accedido: 10 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/15.-Anexo-15-Guia-Nacional-de-Modelacion-del-Recurso-Hidrico.pdf>
- [15] L. F. Tischle, R. M. Bradle, S. Park y D. Rhec, «Water quality modeling of the lower han river, korea», *Engineering-Science*, vol. 17, pp. 979-990, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.ircwash.org/sites/default/files/72-IAWPR84-1099-3.pdf#page=147>
- [16] E. Lakshmi y G. Madhu, «Evaluation and modelling of dissolved oxygen and re-aeration rate in river periyar, south india», *Indian Journal of Scientific Research*, vol. 10, n.º 2, p. 1, ene. 2020, doi: 10.32606/IJSR.V10.I2.00001.
- [17] J. C. Pazmiño- Rodríguez, G. L. Zambrano- -Ganchozo «Water quality modeling of the Aguas Claras stream, canton Quevedo, Ecuador», *Dyna*, vol 85, n.º204, p.p 204-214, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/65847>

- [18] D. N. Rodriguez Amezquita, «Implementación del modelo de calidad de agua qual2k, sobre un tramo del río pamplonita, para simulación de escenarios», trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/flip/?pdf=https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/3351f23f-4dc0-4e16-ba5c-72bdcbc9d761/content>
- [19] F. Arenas y G. Adolfo, «Modelacion de la calidad del agua en un rio de montaña colombiano (Quebrada La Lejía)», trabajo de grado, Universidad de los Andes, 2004. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/8458c7d5-b3fe-412c-bc88-d1313d300186>.
- [20] M. C. Naranjo, «Modelación de calidad de agua de la fuente Río Lengupá», Accedido: 12 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2021/12/Modelacion-de-calidad-de-agua-de-la-fuente-Rio-Lengupa.pdf..>
- [21] M. A. Huertas Castro, «Aplicacion del qual2k en la modelacion de la calidad del agua del rio guacaica, departamento de caldas, colombia», tesis de maestria, Universidad Nacional de Colombia, Manizalez, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/items/1745fb51-d302-4ebc-8f53-b85febba9d31>
- [22] D. R. Caicedo Zambrano y Y. Eraso Huertas, «Modelación de la calidad del agua del río molino en el área urbana de la ciudad de Popayán – Cauca». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniautonomia.edu.co/bitstream/handle/123456789/24/T%20IA-M%20058%202017.pdf?sequence>
- [23] D. A. Muñoz Urrea, «Evaluación de escenarios de calidad del agua del río palacé usando el modelo qual2k en el tramo comprendido entre el corregimiento de gabriel lópez (totoró) y la bocatoma de la planta de tratamiento palacé», trabajo de grado, Universidad del Cauca, Popayán, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unicauca.edu.co/handle/123456789/2277>
- [24] L. C. Wilches Orejuela, G. Saldarriaga y M. Garcia, «Capitulo 6 CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL EN COLOMBIA"». Accedido: 12 de Junio de 2026 [En línea]. Disponible en: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/publicaciones/capitulo_6_calidad_d_el_agua_superficial.pdf

- [25] Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda Y Desarrollo Territorial, «Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010». Accedido: 12 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>
- [26] Faculty of Food Engineering, Tourism and Environmental Protection, “Aurel Vlaicu” University of Arad, 2-4 Elena Drăgoi Str., 310330 Arad, Romania, «The impact of anthropogenic activities on the catchment’s water quality parameters». Accedido: 15 Junio 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/12/1791>
- [27] S. A. Chaparro Velez, «Determinacion de la capacidad de autodepuración de un tramo del rio tunjuelo respecto al ph y la demanda biologica de oxígeno (DBO)», trabajo de grado, Universidad catolica, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10983/24838>
- [28] W. Angarita Castilla, «Determinación del grado de autodepuración del rio algodonal, mediante la utilización de modelos de simulación Streeter & Phelps y Qual2k», Tesis de maestria, Universidad de Manizales, Manizales, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/4741>
- [29] M. Bedoya, C. Contreras y F. Ruiz, «Capítulo 7 - alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/publicaciones/capitulo_7_alteraciones_del_regimen_hidrologico_y_de_la_oferta_hidrica_por_varibilidad_y_cambio_climatico.pdf
- [30] L. Vargas, L. Angulo Argot y L. Diaz Megue, «Evaluacion del software Qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos liquidos en algunos puntos del río Cesar - Colombia impactados por la actividad minera», *multiciencias*, vol 16, n.º 1, pp.5-13, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/904/90450808002.pdf>
- [31] Gestor Normativo, «Decreto 1594 de 1984». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617>
- [32] Ministerio De La Proteccion Social, «Decreto 1575 de 2007». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp->

<content/uploads/2022/01/decreto-1575-de-2007.pdf>

- [33] Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial Y Ministerio De Protección Social, «Resolución 2115 del 2007- Valores máximos para la calidad del agua potable». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>.
- [34] Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, «Decreto 3930 2010». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/decreto-3930-de-2010/>
- [35] Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible, «Decreto 1076 del 2015». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>
- [36] Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible, «Resolución 0631 Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>
- [37] Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible Dirección De Gestión Integral Del Recurso Hídrico, «Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.andi.com.co/Uploads/GUIA%20PORH%202018%20Final_continental_superficial.pdf
- [38] IDEAM, «Características Climatológicas De Las Ciudades principales y municipios turísticos,». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc#:~:text=de%20501%20mm.-,La%20t>
- [39] Environmental Protection Agency, «Dissolved Oxygen». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/caddis/dissolved-oxygen?utm_source=chatgpt.com#tab-4
- [40] T. Montes Raquel, I. Navarro, R. Dominguez y B. Jimenez, «Modificación de la capacidad de autodepuración del río Magdalena ante el cambio climático», *tecnología ciencias del*

agua, vol 4, N.º 5, 2013. En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500005

- [41] A. CORTES, A. FORREST, SADRO, S. S, S. A.J y F. M, «Prediction of Hypoxia in Eutrophic Polymictic Lakes», *Water Resources Research*, vol 57, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2020WR028693>
- [42] TGI Grupo Energia - BOGOTA, «Calidad Del Agua - Ambiental 3.2.5». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.tgi.com.co/wp-content/uploads/2026/03/03.2.5.CALIDAD_AGUA.pdf
- [43] Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible - Republica De Colombia, «Promedio de Nitrógeno Total (PNT)». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://bart.ideam.gov.co/indiecosistemas/ind/agua/hm/HM_NT.pdf
- [44] Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias, «Rangos permisibles – Normatividad colombiana (Decreto 1594 de 1984)». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://observatorio.epacartagena.gov.co/indicadores/agua-2018/rangos-permisibles-normatividad-colombiana/>
- [45] Environmental Protection Agency, «Amoníaco,». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/caddis/ammonia>
- [46] Science for Changing the World (USGS), «Nitrogen and Water». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/water-science-school/science/nitrogen-and-water?>
- [47] M. Torres Becerril y G. Lopez Romero, «Estudio de la calidad del agua de los ríos de la microcuenca de Paso de Ovejas, Veracruz», *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol 21 n.º 1, pp.9-15, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/353/337>
- [48] M. T. Correa, «Determinacion de las constantes cineticas de nitrificacion en una agua residual mixta (domestica e industrial)», tesis de maestria, Universidad Autonoma de Nuevo Leon, Mexico, 2000. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/6588>
- [49] O. Ospina Zuñiga y H. Ramirez Arcila, «Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia», *revista ingeniería solidaria*, vol. 10, n.º 17, pp 125-137, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.812>

- [50] B. Buta, M. Wiatkowski, L. Grus, P. Tomczyk y R. Kasperek, «Spatio-temporal evolution of eutrophication and water quality in the Turawa dam reservoir, Poland», *Scientific Reports*, vol. 13, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36936-1>
- [51] Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P, «Historia y Filosofía – Acueducto y Alcantarillado de Popayán». Accedido: 26 Junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://aapsa.com.co/institucional/historia/>

Anexos

Anexo 1. Datos Calidad Agua in Situ – Sequia



CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA
SUBDIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL
EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
PARÁMETROS IN SITU

Fecha: 07 MAYO 2024

Campaña de monitoreo: PRIMERA CAMPAÑA

Responsables: Equipo de Calidad Recurso Hídrico SEA-CRC.

Equipos de muestreo: Multiparámetro UBEDA-4247

Flujómetro 5257

PUNTO	SITIO DE MONITOREO	HORA	pH Unidades	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	Oxígeno	
						mg/L	% Saturación
1	RIO BLANCO PUENTE PANAMERICANA	7:11 am	6,616	18,19	53,88	5,104	61,61
2	RIO BLANCO ANTES PENITENCIARIA SAN ISIDRO	8:23 am	6,9	17,28	57,63	5,033	59,98
3	RIO MOLINO ANTES DE PUEBILLO	10:28 am	7,3	17,63	84,64	5,064	59,97
4	RIO MOLINO PTE EDIFICIO EDGAR NEGRET	11:08 am	7,225	18,50	127,0	4,640	55,64
5	RIO MOLINO ANTES DE RIO EJIDO	12:11 pm	7,12	20,06	269,1	3,80	47,24
6	RIO MOLINO DESPUES DE RIO EJIDO	12:40 pm	7,171	20,12	290,6	2,751	33,24
7	RIO EJIDO ANTES DE RIO MOLINO	1:12 pm	7,17	20,73	166,3	2,66	33,41
8	RIO EJIDO BARRIO AVELINO ULL	1:55 pm	7,009	20,31	83,66	4,337	54,54
9							
10							



Corporación Autónoma Regional del Cauca

Cauca, Territorio Ambiental para la Paz

Punto de monitoreo: 3 Ancho del río (m): 4 metros

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0,3	0,26	0,50		
2	0,4	0,39	0,50		
3	0,3	0,31	0,50		
4	0,4	0,31	0,50		
5	0,2	0,10	0,50		
6	0,1	0,11	0,50		
7	0,1	0,10	0,50		
8	0,05	0,08	0,50		
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total				0,2480	

Punto de monitoreo: 4 Ancho del río (m): 6 METROS

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0,3	0,50	0,50		
2	0,5	0,45	0,50		
3	0,6	0,40	0,50		
4	0,5	0,45	0,50		
5	0,9	0,37	0,50		
6	0,4	0,36	0,50		
7	0,4	0,28	0,50		
8	0,1	0,19	0,50		
9	0,1	0,12	0,50		
10	0,1	0,10	0,50		
11	0,1	0,09	0,50		
12	0,1	0,08	0,50		
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total				0,7535	

Punto de monitoreo: 5 Ancho del río (m): 8 METROS

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0,3	0,53	1m		
2	0,3	0,58	1m		
3	0,2	0,54	1m		
4	0,3	0,52	1m		
5	0,4	0,43	1m		
6	0,4	0,33	1m		
7	0,3	0,26	1m		
8	0,2	0,14	1m		
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total				1,007	

Punto de monitoreo: 6 Ancho del río (m): 11 METROS

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0,1	0,41			
2	0,4	0,52			
3	0,6	0,66			
4	0,5	0,49			
5	0,4	0,42			
6	0,6	0,29			
7	0,3	0,40			
8	0,3	0,40			
9	0,3	0,23			
10	0,2	0,22			
11	0,3	0,14			
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total				1,687	

Anexo 2. Reporte de laboratorio – Sequia

Reporte N° 064

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS MUESTRA DE AGUA	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 01/02/2024 Versión: 5 Página 1 de 3
--	--	---

Fecha: Mayo 20 de 2024

Cliente: Subdirección de Gestión Ambiental Dirección: Carrera 7 N° 1N-28, Popayán	Solicitud N°:048 Teléfono: 83332326
Municipio de muestreo: Popayán	Fecha de Recepción: Mayo 7 de 2024

Muestreo:

Realizado por	SGA
Plan de Muestreo N°	No reportado
Fecha de Muestreo	Mayo 7 de 2024
Lugar de Muestreo	Ríos Blanco, Molino, Ejido
Procedimiento de muestreo	No reportado
Condiciones ambientales	No reportado

Identificación de la muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo	Coordenadas
0161	Río Blanco, puente panamericana	No reportado
0162	Río Blanco, antes de penitenciaría San Isidro	No reportado
0163	Río Molino, antes de Pueblillo	No reportado
0164	Río Molino, puente Negret	No reportado
0165	Río Molino, antes de Ejido	No reportado
0166	Río Molino, después de Ejido	No reportado
0167	Río Ejido, barrio Avelino	No reportado
0168	Río Ejido, antes de Molino	No reportado

Variable/Método/Unidad:

Variable	Método	Unidad
DBOs	SM5210B/SM4500-OG	mg/L
DQO	SM5220D	mg/L
SST	SM2540D	mg/L
Color	SM 2120 C	UPC
Turbiedad	SM 2130 B	UNT
Alcalinidad	SM 2320B	mgCaCO ₃ /L
Dureza Total	SM 2340C	mgCaCO ₃ /L
Ortofosfatos	Kit comercial	mg PO ₄ -P/L
Fósforo total	Kit comercial	mg P/L
Nitritos	Kit comercial	mg NO ₂ -N/L
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg NO ₃ -N/L
Nitrógeno total	Kit comercial	mg N/L
Coliformes Totales	SM 9222 B	Ufc/100ml
Coliformes Fecales	SM 9222 D	Ufc/100ml

Reporte N° 064

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS MUESTRA DE AGUA	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 01/02/2024 Versión: 5 Página 2 de 3
--	--	---

Resultados laboratorio:

Fecha de análisis (AAAA-MM-DD)	Variable	Resultados			
		0161	0162	0163	0164
2024-05-07	DBO ₅ *	< 10	< 10	< 10	< 10
2024-05-07	DQO	23.7	< 15	< 15	25.5
2024-05-07	SST*	17.3	17.3	20.0	23.3
2024-05-07	Color	83	40	52	80
2024-05-07	Turbiedad	6.7	4.0	5.6	7.3
2024-05-07	Alcalinidad	17.6	22.1	24.2	32.0
2024-05-07	Dureza Total	20.0	10.0	20.8	31.6
2024-05-07	Ortofosfatos	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
2024-05-08	Fósforo total	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
2024-05-07	Nitritos	0.04	< 0.02	< 0.02	0.03
2024-05-07	Nitratos	0.27	< 0.1	< 0.1	0.12
2024-05-08	Nitrógeno total	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
2024-05-07	Coliformes Totales	2600	1900	10500	8600
2024-05-07	Coliformes Fecales	600	0	0	300

*Variable acreditada por el IDEAM Resolución 1186 de 2021

Resultados laboratorio:

Fecha de análisis (AAAA-MM-DD)	Variable	Resultados			
		0165	0166	0167	0168
2024-05-07	DBO ₅ *	< 10	46.9	< 10	18.4
2024-05-07	DQO	34.2	113	24.8	72.7
2024-05-07	SST*	< 10	33.3	< 10	11.7
2024-05-07	Color	138	356	65	208
2024-05-07	Turbiedad	9.8	33.2	5.4	14.3
2024-05-07	Alcalinidad	56.3	84.0	21.0	86.0
2024-05-07	Dureza Total	40.0	48.4	14.4	44.0
2024-05-07	Ortofosfatos	0.25	0.63	< 0.1	0.61
2024-05-08	Fósforo total	0.57	1.02	< 0.1	1.38
2024-05-07	Nitritos	0.21	< 0.02	< 0.02	< 0.02
2024-05-07	Nitratos	0.32	0.83	< 0.1	0.55
2024-05-08	Nitrógeno total	0.66	1.12	< 0.5	0.62
2024-05-07	Coliformes Totales	34900	588000	6400	63200
2024-05-07	Coliformes Fecales	12000	264000	2500	31600

*Variable acreditada por el IDEAM Resolución 1186 de 2021

Anexo 3. Datos de calidad del agua in Situ – Lluvias



CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA C.R.C
SUBDIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL

MONITOREO RIO MOLINO

Fecha: 12 Diciembre 2024

Responsable: Andrés Felipe Santamaría - Harold Celler Pedro Ledezma
multíparámetros 5260, Flujo metro 5289

PUNTO	SITIO	HORA	pH	Temp	Cond (Us/cm)	Oxígeno	
						mg/l	% Saturación
1	R. Molino (Antes) en Pueblillo		7.42	18.3	49.3	5.56	67.30
2	R. Molino Puente Edificio Negret		7.33	18.9	98.36	4.48	53.10
3	R. Molino (Antes de R. Ejido)		7.35	19.2	241.3	3.75	47.31
4	R. Molino después de R. Ejido- desembocadura a Cauca.		7.45	20.1	212.4	2.71	36.82
5	R. BLANCO ANTES DE LAME		6.92	15.6	37.3	5.41	64.2
6	R. BLANCO PTE PANAMERICANA		6.98	16.7	51.5	4.40	53.6



Punto de monitoreo: 1

Ancho del río (m): 6.20

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0.2	0.15	1	0.15	0.03
2	0.1	0.33	1	0.33	0.033
3	0.2	0.44	1	0.44	0.088
4	0.3	0.47	1	0.47	0.084
5	0.3	0.41	1	0.41	0.1025
6	0.2	0.37	1.2	0.44	0.0888
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total					0.426

Punto de monitoreo: 2

Ancho del río (m): 5.0

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0.8	0.33	1	0.33	0.264
2	0.4	0.31	1	0.31	0.124
3	0.5	0.32	1	0.32	0.16
4	0.3	0.12	1	0.12	0.036
5	0.2	0.11	1	0.11	0.022
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total					0.608

Punto de monitoreo: 3 Ancho del río (m): 6.20

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0.2	0.39	1	0.39	0.078
2	0.5	0.45	1	0.45	0.225
3	0.4	0.43	1	0.43	0.172
4	0.5	0.34	1	0.34	0.172
5	0.3	0.21	1.2	0.21	0.063
6	0.3	0.08	1.2	0.096	0.0288
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total					0.737

Punto de monitoreo: 4 Ancho del río (m): 9.80

1	2	3	4	5	6
Sección	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área=3x4 (m²)	Caudal=2x5 (m³/s)
1	0.2	0.33	1	0.33	0.066
2	0.25	0.35	1	0.35	0.0875
3	0.4	0.34	1	0.34	0.136
4	0.5	0.46	1	0.46	0.23
5	0.4	0.43	1	0.43	0.172
6	0.5	0.47	1	0.47	0.21
7	0.4	0.42	1	0.42	0.168
8	0.35	0.46	1	0.46	0.161
9	0.4	0.47	1	0.47	0.136
10	0.5	0.31	0.8	0.32	0.16
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
Caudal total					1.523

Anexo 4. Reporte de laboratorio – Lluvias

Reporte N° 275

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS MUESTRA DE AGUA	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 01/02/2024 Versión: 5 Página 1 de 3
---	--	---

Fecha: Diciembre 23 de 2024

Cliente: Subdirección de Gestión Ambiental Dirección: Carrera 7 N° 1N-28, Popayán	Solicitud N°: 178 Teléfono: 8333232
Municipio de muestreo: Popayán	Fecha de Recepción: Diciembre 12 de 2024

Muestreo:

Realizado por	SGA
Plan de Muestreo N°	No reportado
Fecha de Muestreo	Diciembre 12 de 2024
Lugar de Muestreo	Ríos Molino, Ejido, Blanco
Procedimiento de muestreo	No reportado
Condiciones ambientales	No reportado

N/A: No aplica

Identificación de la muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo	Coordenadas
0647	Rio Molino, antes de Pueblillo	No reportado
0648	Rio Molino, puente Negret	No reportado
0649	Rio Molino, antes de Ejido	No reportado
0650	Rio Molino, desembocadura	No reportado
0651	Rio Ejido, barrio Avelino II	No reportado
0652	Rio Ejido, antes de Molino	No reportado
0653	Rio Blanco, antes de penitenciaría	No reportado
0654	Rio Blanco, puente Panamericana	No reportado

Variable/Método/Unidad:

Variable	Método	Unidad
DBO ₅	SM5210B/SM4500-OG	mg/L
DQO	SM5220D	mg/L
SST	SM2540D	mg/L
Color	SM 2120 C	UPC
Turbiedad	SM 2130 B	UNT
Alcalinidad	SM 2320B	mgCaCO ₃ /L
Dureza Total	SM 2340C	mgCaCO ₃ /L
Ortofosfatos	Kit comercial	mg PO ₄ -P/L
Fósforo total	Kit comercial	mg P/L
Nitritos	Kit comercial	mg NO ₂ -N/L
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg NO ₃ -N/L
Nitrógeno total	Kit comercial	mg N/L
Coliformes Totales	SM 9222 B	Ufc/100ml
Coliformes Fecales	SM 9222 D	Ufc/100ml

Reporte N° 275

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS MUESTRA DE AGUA	Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 01/02/2024 Versión: 5 Página 2 de 3
---	--	---

Resultados laboratorio:

Fecha de análisis (AAAA-MM-DD)	Variable	Resultados			
		0647	0648	0649	0650
2024-12-12	DBO ₅ *	< 10	< 10	< 10	21.6
2024-12-13	DQO*	18.8	17.5	< 15	44.3
2024-12-17	SST*	48.0	41.3	18.6	65.0
2024-12-12	Color	101	75	37	261
2024-12-12	Turbiedad	28.5	20.5	8.6	50.6
2024-12-12	Alcalinidad	27.6	29.6	49.6	108
2024-12-12	Dureza Total	26.4	28.8	32.8	46.0
2024-12-12	Ortofosfatos	< 0.1	0.15	0.25	1.28
2024-12-12	Fósforo total	< 0.1	0.18	0.32	2.40
2024-12-12	Nitritos	< 0.02	0.04	0.04	< 0.02
2024-12-12	Nitratos	0.18	0.62	0.63	1.15
2024-12-13	Nitrógeno total	< 0.5	0.70	0.80	1.80
2024-12-12	Coliformes Totales	15100	176000	75000	9.0E6
2024-12-12	Coliformes Fecales	100	5000	1000	1.0E6

*Variable acreditada por el IDEAM Resolución 0754 de 2024

Resultados laboratorio:

Fecha de análisis (AAAA-MM-DD)	Variable	Resultados			
		0651	0652	0653	0654
2024-12-12	DBO ₅ *	< 10	< 10	< 10	< 10
2024-12-13	DQO*	20.3	19.6	23.9	32.1
2024-12-17	SST*	20.7	18.0	16.7	13.5
2024-12-12	Color	65	61	37	52
2024-12-12	Turbiedad	10.9	8.2	4.6	6.0
2024-12-12	Alcalinidad	29.2	81.6	27.2	25.6
2024-12-12	Dureza Total	32.8	76.4	26.0	22.0
2024-12-12	Ortofosfatos	< 0.1	0.45	< 0.1	< 0.1
2024-12-12	Fósforo total	< 0.1	0.60	< 0.1	< 0.1
2024-12-12	Nitritos	< 0.02	0.02	< 0.02	0.02
2024-12-12	Nitratos	0.38	0.64	0.20	0.91
2024-12-13	Nitrógeno total	< 0.5	0.86	< 0.5	1.12
2024-12-12	Coliformes Totales	31800	57000	22100	11000
2024-12-12	Coliformes Fecales	1000	3000	700	300

*Variable acreditada por el IDEAM Resolución 0754 de 2024

Anexo 5. Reporte de laboratorio – Vertimientos

5.1 Vertimiento Aeronautica



INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL
VERTIMIENTOS
ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.
ESP



Tabla 7. Resultado in situ AERONAUTICA CIVIL

Aeronáutica civil J1 MD432673						Aeronáutica civil J2 MD432389						Aeronáutica civil J3 MD432387					
Hora	pH	Tempera tura muestra	Conductivi dad	Sólidos sedimen tables	Caudal	Hora	pH	Tempera tura muestra	Conductivi dad	Sólidos sedimen tables	Caudal	Hora	pH	Tempera tura muestra	Conductivi dad	Sólidos sedimen tables	Caudal
C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R
7:00	6,82	22	775	2	113,40	15:00	7,46	21,9	643	3	145,80	0:00	7,97	21,4	695	2,0	57,926
8:00	6,75	22,1	621	3	129,60	16:00	7,52	21,9	634	1,5	129,60	1:00	7,73	21,1	536	2,0	53,681
9:00	6,9	22,3	625	3	86,40	17:00	7,44	22	593	2,4	100,80	2:00	7,92	20,9	489	1,8	47,426
10:00	7,47	22,4	662	2,5	198,00	18:00	7,42	22,1	574	2,5	115,20	3:00	7,67	20,7	381	1,5	46,739
11:00	7,49	22,5	666	2,8	86,40	19:00	7,51	21,8	576	2,5	129,60	4:00	7,79	20,5	368	1,5	45,843
12:00	7,45	22,2	611	3,1	100,80	20:00	7,38	20,6	593	3,0	129,60	5:00	7,83	20,8	667	2,2	47,628
13:00	7,21	22,2	604	2,5	145,80	21:00	7,48	20,3	545	2,5	128,16	6:00	8,74	20,6	842	2,5	54,894
14:00	7,48	21,9	618	3	180,00	22:00	7,56	20,5	561	2,0	129,60	7:00	8,56	20,3	826	3,5	62,261
15:00	7,46	21,9	643	3	145,80	23:00	7,52	20,8	541	2,0	126,56	8:00	8,38	20,7	713	3,2	62,312
Prom.	7,23	22,17	647	2,77	131,80	Prom.	7,48	21,3	584	2,4	126,10	Prom.	8,07	20,8	613	2,2	53,19
Valor Min.	6,75	21,90	604	2,00	86,40	Valor Min.	7,38	20,3	541	1,5	100,80	Valor Min.	7,67	20,3	368	1,5	45,84
Valor Máx.	7,49	22,50	775	3,10	198,00	Valor Máx.	7,56	22,1	643	3,0	145,80	Valor Máx.	8,74	21,4	842	3,5	62,31
Res 0431/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---	Res 0431/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---	Res 0431/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---

*ChemiLab tiene estos parámetros acreditados.

(—) Parámetro no reglamentado por la norma de referencia.

(-) No es posible calcular el valor de incertidumbre, debido a que el parámetro evaluado registro el respectivo límite de cuantificación del método analítico empleado por el laboratorio



INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL
VERTIMIENTOS
ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.
ESP



Tabla 14. Resultado de laboratorio. Agua residual doméstica CÁMARA 32 – AERONÁUTICA CIVIL

Parámetro	Unidad	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Vertimiento cámara 23 J1 MD432673		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Vertimiento cámara 23 J2 MD433130		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Vertimiento cámara 23 J3 MD433128		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Vertimiento Aeronáutica civil J1 MD432065		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Vertimiento Aeronáutica civil J2 MD432389		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Vertimiento Aeronáutica civil J3 MD432387		Artículo 9 - Resolución 0431/2015 (MADS)
			C.R	I.C		C.R	I.C		C.R	I.C		C.R	I.C		C.R	I.C		C.R	I.C	
Acidez Total*	mg CaCO ₃ /L	2024-03-14	<5,00	—	2024-03-15	28,6	+/- 2,20	2024-03-12	8,11	+/- 0,621	2024-03-12	31,1	+/- 2,38	2024-03-13	10,4	+/- 0,797	2024-03-13	54,0	+/- 4,14	Análisis y Reporte
Alcalinidad total*	mg CaCO ₃ /L	2024-03-14	174 +/- 1,23	+/- 1,53	2024-03-15	216	+/- 1,53	2024-03-12	134	+/- 1,02	2024-03-12	187	+/- 1,32	2024-03-13	198	+/- 1,40	2024-03-13	175	+/- 1,24	Análisis y Reporte
Aluminio Total	mg Al/L	2024-03-21	1,40	+/- 0,134	2024-03-21	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	Análisis y Reporte
Cadmio Total*	mg Cd/L	2024-03-24	<0,010 0	—	2024-03-24	<0,010 0	—	2024-03-18	<0,010 0	—	2024-03-18	<0,01 00	—	2024-03-18	<0,010 0	—	2024-03-18	<0,010 0	—	0,1
Caudal*(volumétrico)	L/s	2024-03-13	62,38	—	2024-03-14	59,73	—	2024-03-11	53,19	—	2024-03-11	131,80	—	2024-03-11	126,10	—	2024-03-11	84,08	—	-
Cianuro Total*	mg CN-/L	2024-03-22	<0,010 0	—	2024-03-22	<0,010 0	—	2024-03-19	<0,010 0	—	2024-03-19	<0,01 00	—	2024-03-22	<0,010 0	—	2024-03-22	<0,010 0	—	0,50
Cloruros*	mg Cl-/L	2024-03-21	29,3	+/- 0,709	2024-03-22	76,0	+/- 1,84	2024-03-20	73,4	+/- 1,78	2024-03-20	61,9	+/- 1,50	2024-03-22	48,0	+/- 1,16	2024-03-22	73,4	+/- 1,78	Análisis y Reporte
Cobre Total*	mg Cu/L	2024-03-20	<0,100	—	2024-03-20	<0,100	—	2024-03-20	<0,100	—	2024-03-20	<0,10 0	—	2024-03-20	<0,100	—	2024-03-20	<0,100	—	1
Color Real* - 436 nm	m-1	2024-03-14	4,99	+/- 0,164	2024-03-15	9,88	+/- 0,324	2024-03-12	20,7	+/- 0,679	2024-03-12	13,3	+/- 0,436	2024-03-13	4,15	+/- 0,136	2024-03-13	5,21	+/- 0,171	Análisis y Reporte
Color Real* - 525 nm	m-1	2024-03-14	2,87	+/- 0,094 1	2024-03-15	6,58	+/- 0,216	2024-03-12	14,8	+/- 0,485	2024-03-12	8,91	+/- 0,292	2024-03-13	2,67	+/- 0,0876	2024-03-13	2,5	+/- 0,0820	Análisis y Reporte
Color Real* - 620 nm	m-1	2024-03-14	1,94	+/- 0,063 6	2024-03-15	4,93	+/- 0,162	2024-03-12	11,2	+/- 0,367	2024-03-12	6,54	+/- 0,215	2024-03-13	1,98	+/- 0,0649	2024-03-13	1,88	+/- 0,0617	Análisis y Reporte

5.2 Vertimiento Pandiguando

	INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL VERTIMIENTOS ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A. ESP		Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.ESP
---	--	---	---

Tabla 12. Resultado in situ PANDIGUANDO

PANDIGUANDO J1 MD432087						PANDIGUANDO J2 MD432391						PANDIGUANDO J3 MD432386					
Hora	pH	Temperatura muestra	Conductividad	Sólidos sedimentables	Caudal	Hora	pH	Temperatura muestra	Conductividad	Sólidos sedimentables	Caudal	Hora	pH	Temperatura muestra	Conductividad	Sólidos sedimentables	Caudal
	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R		C.R	C.R	C.R	C.R	C.R		C.R	C.R	C.R	C.R	C.R
7:00	7,93	22,1	514	4	38,25	15:00	7,73	21,6	580	3	75,00	23:00	7,52	20,1	433	2	31,5
8:00	7,98	22	518	4	54,00	16:00	7,78	21,2	532	3	54,00	0:00	7,50	20,0	409	2	31,5
9:00	7,96	21,8	528	4	67,50	17:00	7,90	20,0	575	3	54,00	1:00	7,46	19,8	384	1,5	29,3
10:00	8,00	21,6	577	3	71,25	18:00	7,84	21,2	541	3	54,00	2:00	7,43	19,7	325	2	27,0
11:00	8,03	21,4	582	5	75,00	19:00	7,91	21,2	570	3	54,00	3:00	7,37	19,6	272	1,5	12,0
12:00	7,92	21,6	576	7	99,00	20:00	7,80	20,7	517	3	51,00	4:00	7,40	19,4	265	1	13,5
13:00	7,85	21,7	579	6	94,50	21:00	7,76	20,6	504	2	45,00	5:00	7,46	19,4	241	1	16,5
14:00	7,77	21,4	571	4	90,00	22:00	7,64	20,4	489	2	31,50	6:00	7,51	19,5	234	1,2	31,5
15:00	7,73	21,6	580	3	75,00	23:00	7,52	20,1	433	2	31,50	7:00	7,64	19,6	229	1,5	36,0
Prom.	7,91	21,69	558	5	73,83	Prom.	7,76	20,8	527	2,7	50,00	Prom.	7,48	19,7	310	1,5	25,42
Valor Min.	7,73	21,40	514	3,00	38,25	Valor Min.	7,52	20,0	433	2,0	31,50	Valor Min.	7,37	19,4	229	1,0	12,00
Valor Máx.	8,03	22,10	582	7,00	99,00	Valor Máx.	7,91	21,6	580	3,0	75,00	Valor Máx.	7,64	20,1	433	2,0	36,00
Res 0631/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---	Res 0631/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---	Res 0631/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---

*ChemiLab tiene estos parámetros acreditados.

(---) Parámetro no reglamentado por la norma de referencia.

(--) No es posible calcular el valor de incertidumbre, debido a que el parámetro evaluado registro el respectivo límite de cuantificación del método analítico empleado por el laboratorio.

	INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL VERTIMIENTOS ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A. ESP		Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.ESP
---	--	---	---

Tabla 17. Resultado de laboratorio. Agua Residual Doméstica PANDIGUANDO

Parámetro	Unidad	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	PANDIGUANDO J1 MD432087		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	PANDIGUANDO J2 MD432391		PANDIGUANDO J3 MD432386		Artículo 8 - Resolución 0631/2015 (MADS)
			C.R	I.C		C.R	I.C	C.R	I.C	
Acidez Total*	mg CaCO ₃ /L	2024-03-13	<5,00	—	2024-03-13	<5,00	—	<5,00	—	Análisis y Reporte
Alcalinidad total*	mg CaCO ₃ /L	2024-03-13	127	+/- 0,897	2024-03-13	151 +/- 1,07	—	101	+/- 0,716	Análisis y Reporte
Aluminio Total	mg Al/L	2024-03-21	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	<1,00	—	Análisis y Reporte
Cadmio Total*	mg Cd/L	2024-03-18	<0,0100	—	2024-03-18	<0,0100	—	<0,0100	—	0,1
Caudal*(volumétrico)	L/S	2024-03-11	73,83	—	2024-03-11	50,00	—	25,4	—	-
Cianuro Total*	mg CN-/	2024-03-22	<0,0100	—	2024-03-22	<0,0100	—	<0,0100	—	0,50
Cloruros*	mg Cl-/L	2024-03-22	25,5	+/- 0,616	2024-03-22	66,0	+/- 1,60	21,4	+/- 0,518	Análisis y Reporte
Cobre Total*	mg Cu/L	2024-03-20	<0,100	—	2024-03-20	<0,100	—	<0,100	—	1
Color Real* - 436 nm	m-1	2024-03-13	5,03	+/- 0,165	2024-03-13	11	+/- 0,361	3,14	+/- 0,103	Análisis y Reporte
Color Real* - 525 nm	m-1	2024-03-13	3,29	+/- 0,108	2024-03-13	7,75	+/- 0,254	2	+/- 0,0656	Análisis y Reporte
Color Real* - 620 nm	m-1	2024-03-13	2,36	+/- 0,0774	2024-03-13	5,96	+/- 0,195	1,45	+/- 0,0476	Análisis y Reporte
Compuestos Fenólicos*										
2-clorofenol*	mg/L	2024-03-20	<0,002	—	2024-03-20	<0,002	—	<0,002	—	Análisis y Reporte
2,6-Diclorofenol*	mg/L	2024-03-20	<0,002	—	2024-03-20	<0,002	—	<0,002	—	Análisis y Reporte

5.3 Vertimiento Ciudad 2000



INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL
VERTIMIENTOS
ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.
ESP



Acueducto y
Alcantarillado de
Popayán S.A.ESP

Tabla 8. Resultado in situ Ciudad 2000

ciudad 2000 J1 MD432380						ciudad 2000 J2 MD432665						ciudad 2000 J3 MD432666					
Hora	pH	Tempera tura muestra	Conductivi dad	Sólidos sedimen tantes	Cauda l	Hora	pH	Tempera tura muestra	Conductivi dad	Sólidos sedimen tantes	Caudal	Hora	pH	Tempera tura muestra	Conductivi dad	Sólidos sedimen tantes	Cauda l
	C.R	C.R	C.R	C.R	C.R		C.R	C.R	C.R	C.R	C.R		C.R	C.R	C.R	C.R	C.R
8:00	8,06	21	740	4,2	110,23	16:00	7,74	22,2	543	2	118,44	0:00	7,75	20,0	535	1,5	93,76
9:00	8,08	21,1	710	3,4	110,23	17:00	7,76	22	553	1,5	115,68	1:00	7,63	20,3	474	1,8	92,47
10:00	7,77	23,8	621	5	133,56	18:00	7,7	22	561	1	119,23	2:00	7,71	20,0	352	1,0	85,83
11:00	7,85	23,9	681	3	132,49	19:00	7,76	20,2	528	0,8	124,72	3:00	7,95	20,1	294	1,4	81,96
12:00	7,69	24,2	624	2,5	148,79	20:00	7,71	20,3	534	1,2	124,43	4:00	7,83	19,9	278	1,8	94,15
13:00	7,73	23,7	583	4,5	155,15	21:00	7,84	19,9	578	2,0	121,51	5:00	7,69	20,1	321	2,0	112,48
14:00	7,8	23,2	520	2	140,62	22:00	7,88	19,7	551	2,5	115,84	6:00	7,97	19,8	345	2,2	115,84
15:00	7,69	22,4	551	1,5	124,21	23:00	7,88	19,7	543	2,0	101,54	7:00	7,65	20,0	387	2,5	117,28
16:00	7,74	22,2	543	2	118,44	0:00	7,75	20	535	1,5	93,76	8:00	7,48	20,6	459	2,5	117,67
From.	7,82	22,83	619,22	3,12	130,41	From.	7,78	20,7	547	1,6	115,02	From.	7,74	20,1	383	1,9	101,27
Valor Min.	7,69	21,00	520,00	1,50	110,23	Valor Min.	7,70	19,7	528	0,8	93,76	Valor Min.	7,48	19,8	278	1,0	81,96
Valor Máx.	8,08	24,20	740,00	5,00	155,15	Valor Máx.	7,88	22,2	578	2,5	124,72	Valor Máx.	7,97	20,6	535	2,5	117,67
Res 0631/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---	Res 0631/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---	Res 0631/2 015	6,00 - 9,00	<40,0	---	5,00	---

*ChemiLab tiene estos parámetros acreditados.

(—) Parámetro no reglamentado por la norma de referencia.

(-) No es posible calcular el valor de incertidumbre, debido a que el parámetro evaluado registro el respectivo límite de cuantificación del método analítico empleado por el laboratorio.

Fuente: ChemiLab S.A.S, (2024).



INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL
VERTIMIENTOS
ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.
ESP



Acueducto y
Alcantarillado de
Popayán S.A.ESP

Tabla 15. Resultado de laboratorio. Agua residual doméstica CIUDAD 2000 – LA ISLA

Parámetro	Unidad	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	ciudad 2000 J1 MD432380		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	ciudad 2000 J2 MD432665		ciudad 2000 J3 MD432666	Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	LA ISLA J1 MD432385		Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	LA ISLA J2 MD432664		LA ISLA J3 MD432660		Artículo 8 - Resolución 0631/2015 (MADS)
			C.R	I.C		C.R	I.C			C.R	I.C		C.R	I.C	C.R	I.C	
Acidez Total*	mg CaCO ₃ /L	2024-03-13	39,1	+/- 3,00	2024-03-14	6,96	+/- 0,533	<5,00	—	2024-03-13	20,7	+/- 1,59	2024-03-14	<5,00	—	<5,00	Análisis y Reporte
Alcalinidad total*	mg CaCO ₃ /L	2024-03-13	184	+/- 1,30	2024-03-14	176	+/- 1,25	112	+/- 0,794	2024-03-13	181	+/- 1,27	2024-03-14	174	+/- 1,23	166	+/- 1,17
Aluminio Total	mg Al/L	2024-03-21	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	2024-03-21	<1,00	—	<1,00	Análisis y Reporte
Cadmio Total*	mg Cd/L	2024-03-18	<0,010	—	2024-03-24	<0,010	—	<0,010	—	2024-03-18	<0,010	—	2024-03-24	<0,010	—	<0,010	0,1
Caudal*(volumétrico)	L/s	2024-03-11	130,41	—	2024-03-13	115,02	—	101,27	—	2024-03-11	3,72	—	2024-03-13	2,65	—	1,67	—
Cianuro Total*	mg CN-/L	2024-03-22	<0,010	—	2024-03-22	<0,010	—	<0,010	—	2024-03-22	0,012	+/- 0,00115	2024-03-22	<0,010	—	<0,010	0,50
Cloruros*	mg Cl-/L	2024-03-22	69,8	+/- 1,69	2024-03-21	65,2	+/- 1,58	41,6	+/- 1,01	2024-03-22	103	+/- 2,49	2024-03-21	60,3	+/- 1,46	46,7	+/- 1,13
Cobre Total*	mg Cu/L	2024-03-20	<0,100	—	2024-03-20	<0,100	—	<0,100	—	2024-03-20	<0,100	—	2024-03-20	<0,100	—	<0,100	1
Color Real* - 436 nm	m-1	2024-03-13	16,6	+/- 0,544	2024-03-14	3,98	+/- 0,131	2,17	+/- 0,0712	2024-03-13	19,8	+/- 0,649	2024-03-14	7,46	+/- 0,245	2,28	+/- 0,0748
Color Real* - 525 nm	m-1	2024-03-13	11,3	+/- 0,371	2024-03-14	2,46	+/- 0,0807	1,28	+/- 0,0420	2024-03-13	14,2	+/- 0,466	2024-03-14	5,09	+/- 0,167	1,27	+/- 0,0417
Color Real* - 620 nm	m-1	2024-03-13	8,24	+/- 0,270	2024-03-14	1,85	+/- 0,0607	0,898	+/- 0,0295	2024-03-13	10,9	+/- 0,358	2024-03-14	3,75	+/- 0,123	0,864	+/- 0,0283

Anexo 6. Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV)



RESOLUCIÓN No. 00170
(12 DE FEBRERO DE 2021)

POR MEDIO DE LA CUAL SE APRUEBA PLAN DE SANEAMIENTO Y MANEJO DE VERTIMIENTOS – PSMV DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN Y SE TOMAN OTRAS DISPOSICIONES.

EL SUBDIRECTOR DE GESTIÓN AMBIENTAL DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA; en ejercicio de las funciones asignadas, por el Decreto Ley 2811 de 1974, Ley 99 de 1993, Decreto 1076 del 2015, Ley 1437 de 2011, Resolución 10705 de abril 18 de 2017 y

CONSIDERANDO:

1. ANTECEDENTES

Que LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A. E.S.P. con NIT número 891.500.117-1; mediante oficio con radicado SGA-06837-2017 del 22 de septiembre de 2017 y trámite interno 2017-10-001PSV (Carpeta 5/11 folio 972) presenta a la Subdirección de Gestión Ambiental de la CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA CRC. el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos - PSMV del Municipio de Popayán, Departamento del Cauca.

Mediante oficio con radicado SGA-04912-2018 del 23 de marzo de 2018, la Subdirección de Gestión Ambiental de la C.R.C. envía oficio de requerimiento para complementar el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos - PSMV del Municipio de Popayán (Carpeta 8/11, folio 1355)

El día 10 de abril y 30 de mayo de 2018, se realizaron mesas técnicas en las instalaciones de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado, en las cuales se abordaron diferentes temas técnicos, en el marco del trámite del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos - PSMV del Municipio de Popayán, de cada reunión se elaboró la respectiva acta, las cuales reposan en el expediente (Carpeta 8/11, folios 1356, 1357, 1358 y 1359).

Mediante consecutivos SGA-04004-2018 del 04 de mayo de 2018 y SGA-01417-2019 del 20 de febrero de 2019 la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. da respuesta al requerimiento enviado por la Corporación en marzo de 2018, en esta documentación presentan el Cronograma de obras (algunas estaban establecidas en el PSMV de vigencia anterior) y presentan la modelación del río Cauca, sin embargo, no presentan los soportes del modelo razón por la cual no se puede realizar el chequeo de los datos presentados.

El día 12 de marzo de 2019, se realiza mesa técnica en la Subdirección de Gestión Ambiental, para la revisión del PSMV del municipio de Popayán en articulación con el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico-PORH- río Molino; en esta mesa técnica se determinó que la eliminación de los vertimientos directos sobre río Molino y río Ejido debe ser a corto plazo, considerando la modelación de la calidad del río Molino y el análisis de calidad del agua obtenido en el marco del PORH, adicionalmente las determinaciones tomadas para el PSMV deben ser articuladas con aquellas obtenidas dentro del proceso de Ordenación de río Molino, considerando que estas son producto de información primaria y actualizada.

PBX:(52-2) 833 32 32
Fax: 092-8203251
Línea verde: 018000 952855

Corporación Autónoma Regional del Cauca - CRC
NIT: 891501885-4 / Web: crc.gov.co
Email: crc@crc.gov.co

Carrera 7 # 1N - 28
Edificio Edgar Negret Dueñas
Popayán - Cauca

1



Resolución 00170 de febrero 12 de 2021

11. Dar aviso y solicitud por escrito, de modificaciones o cambios realizados al Plan de Saneamiento o cronogramas de inversión.
12. Tramitar un nuevo Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos antes del vencimiento del presente PSMV.
13. El Municipio de Popayán, deberá cumplir con todas las actividades propuestas en el cronograma de inversión a corto, mediano y largo plazo, aprobado en el concepto técnico.
14. Presentar un informe anual sobre el estado de ejecución de las actividades aprobadas dentro del PSMV, con planos record, consolidado de inversiones y avance en el saneamiento de las fuentes hídricas del Municipio.
15. Antes de realizar la construcción de las obras se debe tramitar la Licencia Ambiental para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTARD del municipio de Popayán.
16. El colector CAUCA V deberá estar construido en un periodo máximo de 2 años, es decir, en el momento de que la construcción de la etapa 1 de la PTARD de encuentre en un 90%, el colector Cauca ya deberá estar construido en un 100%, de tal forma que se asegure el ingreso de los vertimientos de la zona norte a la PTARD.
17. De acuerdo a la articulación con los Procesos de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH río Molino, el cual se encuentra en proceso de adopción) de la Corporación, se deberá realizar las obras en el punto de descarga denominado Aeronáutica que generen un avance en el saneamiento del río Molino, en el primer quinquenio, trasladando el vertimiento de la Aeronáutica Civil y conectándolo a la descarga de la cancha de Pandiguando en el período 2020-2024. Implementar obras en el punto de descarga denominado Aeronáutica y Pandiguando, de tal forma que se sanee un tramo del río Molino en el primer quinquenio, las obras que se implementen deben realizarse de tal forma que se mitiguen los olores ofensivos a través de una entrega sumergida.
18. Para el planteamiento del próximo PSMV se deberá realizar una priorización de las obras de saneamiento conforme a las necesidades de cada fuente hídrica y de acuerdo a los elementos de planificación con los cuales cuenta la Corporación, como lo son los PORH, Acuerdos de Calidad, POMCA, entre otros.
19. Realizar jornadas de conservación, protección y mejoramiento de las fuentes hídricas: quebrada Pubus, quebrada Chamizal, quebrada Quita-Calzón, Río Molino y Río Ejido, cada año, durante la vigencia del PSMV, ya que estas fuentes son receptoras de vertimientos de agua residual sin tratamiento en la cabecera municipal de Popayán.
20. Teniendo en cuenta que el diagnóstico realizado para el trámite del PSMV se basó en la RAS 2000, se requiere que en el primer año de vigencia del Plan de Saneamiento se actualice el diagnóstico sobre el estado de las fuentes hídricas de la cabecera municipal conforme a la Resolución 330 de 2017.
21. Presentar anualmente evidencias de la gestión realizada para la obtención de los recursos financieros de las obras requeridas para la eliminación de los vertimientos sobre el río Molino.

PBX: (52-2) 833 32 32

Fax: 092-8203251

Línea verde: 018000 932855

Corporación Autónoma Regional del Cauca - CRC

NIT: 821.501.885-4 / Web: crc.gov.co

Email: crc@crc.gov.co



Carrera 7 # 1N - 28

Edificio Edgar Negret Dueñas

Popayán - Cauca