

**CALIBRACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE CALIDAD DEL AGUA
PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD ASIMILATIVA DEL RÍO MOLINO EN LA
ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**



**ANDRÉS ALVEAR BETANCOURT
ROSE MARY GRANDA RUÍZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN - CAUCA
2017**

**CALIBRACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE CALIDAD DEL AGUA
PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD ASIMILATIVA DEL RÍO MOLINO EN LA
ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN**

**ANDRÉS ALVEAR BETANCOURT
ROSE MARY GRANDA RUIZ**

**Informe final de trabajo de grado modalidad Investigación como requisito
para optar al título de Ingenieros Ambientales**

**Director
MAURICIO HERNÁN AGUIRRE GÓMEZ
Ingeniero Civil, MSc.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN - CAUCA
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

La tesis de grado titulada "CALIBRACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE CALIDAD DEL AGUA PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD ASIMILATIVA DEL RÍO MOLINO EN LA ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN", presentada por Andrés Alvear Betancourt y Rose Mary Granda Ruíz, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Ingenieros Ambientales

Ing. PhD. Nazly Efreidis Sánchez Peña
Jurado

Ing. Esp. Lady Susana Montenegro Arboleda
Jurado

Ing. MSc. Mauricio Hernán Aguirre Gómez
Director

Popayán, Cauca. Julio 25 de 2017

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios por permitirnos culminar con esta etapa; a nuestros padres y familiares por el apoyo incondicional a lo largo de nuestra vida; a nuestros profesores por su colaboración y compromiso a encaminarnos en el proceso de aprendizaje, en especial al Ingeniero Mauricio Hernán Aguirre Gómez por su paciencia, dedicación y asesoría, aportes significativos para finalizar este objetivo; a nuestros compañeros por acompañarnos en el camino hacia la formación como ingenieros ambientales y a quienes contribuyeron en las campañas de monitoreo; finalmente a las entidades municipales que aportaron información para el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN.....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	14
3. OBJETIVOS.....	16
3.1. GENERAL.....	16
3.2. ESPECÍFICOS.....	16
4. MARCO TEÓRICO	17
4.1. CALIDAD DEL AGUA.....	17
4.1.1. Caracterización de las aguas.....	18
4.1.2. Índices de calidad y contaminación	21
4.2. MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUAS SUPERFICIALES.....	22
4.2.1. El río como un sistema de tratamiento de aguas residuales	22
4.2.2. Modelación de Oxígeno disuelto y la DBO ₅	24
4.2.3. Ecuaciones de Streeter & Phelps	26
4.3. MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DEL AGUA	27
4.4. MÉTODOS DE AFORO	29
5. ASPECTOS GENERALES DE LA SUBCUENCA RÍO MOLINO	32
5.1. LOCALIZACIÓN SUBCUENCA RÍO MOLINO.....	32
5.2. DIVISIÓN EN CORREGIMIENTOS Y VEREDAS.....	34
5.3. RED DE DRENAJE	35
6. METODOLOGÍA	36
6.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA Y DEL RÍO MOLINO	36
6.2. ÁREA DE ESTUDIO.....	37
6.2.1. Reconocimiento del área de estudio.....	37
6.2.2. Determinación de los puntos de monitoreo.....	39
6.3. CAMPAÑAS DE MONITOREO	39
6.3.1. Recolección de muestras	43
6.3.2. Recopilación de información del río Molino.....	43
6.4. DETERMINACIÓN DE LOS TRAMOS A MODELAR EN EL RÍO MOLINO	44
6.5. SELECCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CALIDAD DEL AGUA.....	45
6.6. CALIBRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	45
6.6.1. Determinación de la constante de desoxigenación ($K_r=K_1$).....	45
6.6.2. Determinación de la constante de reaireación ($K_a=K_2$)	46
6.7. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN ICOS	48
6.8. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO Y ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LA FUENTE HÍDRICA.....	49
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	50
7.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DEL RÍO MOLINO	50

7.1.1.	Información hidráulica del río Molino	50
7.1.2.	Información Físicoquímica y biológica del río Molino	52
7.2.	TRAMOS DEL RÍO MOLINO A MODELAR EN LA ZONA URBANA	54
7.3.	SELECCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CALIDAD DEL AGUA.....	57
7.4.	CALIBRACIÓN DEL MODELO STREETER & PHELPS.....	58
7.5.	ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN ICOS	63
7.6.	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO Y ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LA FUENTE HÍDRICA.....	67
8.	CONCLUSIONES	72
9.	RECOMENDACIONES	73
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Principales influencias humanas en el medio acuático.	18
Figura 2. Zonas de un río poluido.	23
Figura 3. Curva SAG.	24
Figura 4. Sección transversal de aforo.	30
Figura 5. Flujo en tuberías parcialmente llenas.	31
Figura 6. Localización de la subcuenca río Molino en el Departamento del Cauca.	32
Figura 7. Mapa ubicación de la subcuenca río Molino Popayán/Cauca.	33
Figura 8. División político administrativa de la subcuenca río Molino.	34
Figura 9. Red hídrica del área urbana municipio de Popayán, visible red de drenaje río Molino. ..	35
Figura 10. Ubicación geográfica de los sitios observados.	37
Figura 11. Visita preliminar a través del cauce del río Molino desde a) vereda Pueblillo hasta b) barrio Junín.	38
Figura 12. Vereda Pueblillo. (E1)	40
Figura 13. Cerca de la CRC. (E2)	41
Figura 14. Río Molino, barrio Junín. (E3)	41
Figura 15. Cerca Aeronáutica civil. (V1)	42
Figura 16. Barrio Pandiguando. (V2)	42
Figura 17. Río Ejido, barrio Junín. (T2)	43
Figura 18. Tramos determinados para el área de estudio.	55
Figura 19. Representación tramos del río Molino a modelar.	56
Figura 20. Curva de O.D con datos de campo y modelados.	61
Figura 21. Curva de DBO con datos de campo y modelados.	62
Figura 22. Índice de contaminación por mineralización.	63
Figura 23. Índice de contaminación por materia orgánica.	64
Figura 24. Índice de contaminación por sólidos suspendidos.	65
Figura 25. Índice de contaminación por pH.	66
Figura 26. Curva de O.D de escenarios de simulación.	71

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Ecuaciones para hallar caudal en tuberías parcialmente llenas.	31
Tabla 2. Ubicación de la subcuenca río Molino.	33
Tabla 3. División político administrativa de la subcuenca río Molino.	34
Tabla 4. Sitios observados en el área de estudio.	37
Tabla 5. Puntos de monitoreo seleccionados en el área de estudio.	39
Tabla 6. Métodos para determinación de parámetros obtenidos del laboratorio CRC.....	44
Tabla 7. Métodos para la determinación de K_2	47
Tabla 8. Rangos de clasificación del grado de contaminación de las aguas mediante índices.	49
Tabla 9. Información hidráulica de jornada 1.....	50
Tabla 10. Información hidráulica de vertimientos de jornada 1.	51
Tabla 11. Información hidráulica de jornada 2.....	51
Tabla 12. Información hidráulica vertimientos de jornada 2.	51
Tabla 13. Información fisicoquímica y biológica río Molino jornada 1.	52
Tabla 14. Información fisicoquímica y biológica río Molino jornada 2.	53
Tabla 15. Parámetros calculados para vertimiento equivalente V_{Eq}	54
Tabla 16. Topología de la cuenca río Molino.....	54
Tabla 17. Descripción tramos del río Molino.....	55
Tabla 18. Constantes de desoxigenación K_1 y reaireación K_2 adoptadas y corregidas.	58
Tabla 19. Índice de contaminación por mineralización.....	63
Tabla 20. Índice de contaminación por materia orgánica.....	64
Tabla 21. Índice de contaminación por sólidos suspendidos.	65
Tabla 22. Índice de contaminación por pH.....	66
Tabla 23. Escenarios de simulación del modelo.	67
Tabla 24. Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas frecuentes.....	68

LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	80
Anexo 2. EVIDENCIA APLICACIÓN DE SOFTWARE	88
Anexo 3. RESULTADOS DEL MODELO DE STREETER & PHELPS.....	90

LISTA DE ANEXOS DIGITALES

- Anexo 1. SECCIONES TRANSVERSALES MEDIANTE AUTOCAD.
- Anexo 2. DETERMINACIÓN DE TRAMOS, PENDIENTES Y PERFIL MEDIANTE TOPO 3.
- Anexo 3. MODELO DE STREETER & PHELPS JORNADA 1 Y 2.
- Anexo 4. PRESUPUESTO EJECUTADO.

INTRODUCCIÓN

La disposición de diversos residuos, vertimientos y aportes de los mismos sistemas naturales afectan la calidad ambiental del agua. Aunque se ha mejorado, Colombia no alcanzó a cumplir la meta de lograr un adecuado manejo del 100% de sus residuos para el 2010 (CONPES, 2008; OCDE CEPAL, 2015) y cerca del 5% de estos se disponen inadecuadamente o son arrojados a los cuerpos de agua (IDEAM, 2015). Esta situación empeora cada día al existir un crecimiento poblacional indiscriminado, que contribuye al deterioro de la calidad del agua de forma continua y en aumento, generando un acelerado agotamiento del recurso hídrico, debido a la fuerte demanda ejercida sobre éste y aun también de los demás recursos naturales; a esto se suma una falencia de ordenamiento territorial que no tiene un control adecuado, permitiendo la legalización de asentamientos subnormales en distintos sectores, comprendiendo también las riberas de los ríos, esto último podría conllevar a situaciones de riesgo para los habitantes, por poseer una baja calidad de vida debido a carencia en la implementación de redes de alcantarillado y saneamiento básico, afectación relevante de las características paisajísticas y más aún para el estado natural de las fuentes hídricas.

El Departamento del Cauca dispone de una cobertura del 66% en sistemas de servicio de abastecimiento de agua; sólo Popayán cuenta con un sistema de abastecimiento de agua que se puede considerar aceptable cubriendo el 94.8% de su población (PDA CAUCA, 2010). La ciudad cuenta con cuatro fuentes principales que abastecen las diferentes plantas de tratamiento que la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. tiene para potabilizar el agua y entregarla apta para consumo de la ciudadanía. Estas fuentes de abastecimiento son Cuenca Molino, Cuenca Palacé, Cuenca Piedras y Cuenca Pisoje (ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN-S.A. E.S.P, s.f.). Dada la importancia de estas cuencas para la población y además por su demanda para satisfacer las actividades socioeconómicas como ganadería, agricultura, minería, etc., el presente estudio recae su interés sobre la cuenca del río Molino que abastece en 100% (POT, Popayán, 2009) la planta, popularmente conocida como “el acueducto de Tulcán”.

El río Molino es uno de los principales afluentes que atraviesan el municipio de Popayán, nace en la vereda de Santa Elena y al entrar al tramo urbano de la ciudad, recibe importantes descargas de vertimientos del alcantarillado municipal, sin el debido tratamiento, que sumadas a la descarga del río Ejido poco antes de la desembocadura al Río Cauca, generan la mayor afectación y alteración de las características fisicoquímicas y biológicas a lo largo de su cauce, adicionalmente algunos tramos de su ronda ha sido ocupada por construcciones que interfieren en la continuidad de la estructura ambiental y su espacio público (POT, Popayán, 2009)

La normatividad colombiana para el ordenamiento del recurso hídrico incluye la aplicación y calibración de modelos de simulación de la calidad del agua, que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables y/o utilización de índices de calidad del agua, de acuerdo con la información disponible de parámetros como: DBO₅: Demanda bioquímica

de oxígeno a cinco (5) días, DQO: Demanda química de oxígeno, SS: Sólidos suspendidos, OD: Oxígeno disuelto, Q: Caudal, Datos Hidrobiológicos, Coliformes Totales y Coliformes Fecales, entre otros (Decreto 3930, 2010).

Modelar contaminantes en un río es vital para entender los procesos de depuración por medio de mecanismos biológicos, físicos o químicos; además de esto la modelación brinda una perspectiva de la dispersión de las sustancias presentes en el agua. Para que estos modelos de simulación puedan representar con la mayor fidelidad la realidad estudiada, es necesario someterlos a un proceso de calibración y verificación. Una vez estos modelos han sido calibrados pueden utilizarse con fines de pronóstico, mediante corridas del modelo con escenarios de control de la contaminación, para fijar objetivos de calidad del agua y determinar usos potenciales del río (Holguín, 2014).

En este sentido con el creciente interés por vincular nuevas herramientas computacionales que faciliten la realización y la comprensión de los procesos naturales, se realizaron dos jornadas de monitoreo en diferente condición climática, registrándose algunos parámetros para la determinación de la capacidad asimilativa, que define la capacidad de un cuerpo de agua para "aceptar" y "degradar" sustancias orgánicas a través de procesos naturales físicos, químicos o biológicos, manteniendo el oxígeno disuelto a niveles adecuados para los usos designados de ese cuerpo de agua (CEPIS/OPS, s.f.). De acuerdo a esto para realizar la investigación en el río Molino, se evaluó la escogencia del modelo entre QUAL2K y Streeter & Phelps, finalmente se seleccionó este último y se efectuó la calibración aplicando el modelo simplificado, diseñando una hoja de cálculo en el software Microsoft Excel 2013 a partir de Aguirre, 2016.

La Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC. en convenio con la Universidad del Cauca, ha desarrollado estudio aplicando modelo de simulación de la calidad del agua en los ríos Palo y La Paila, y aunque se realizan monitoreos de calidad en el río Molino no se tiene evidencia de publicación acerca de estudios de modelación en esta corriente, por tanto esta investigación aporta importante información que puede usarse como referente, para contribuir a mejorar la gestión integral del recurso por los tomadores de decisiones, conllevando a un mejor manejo de la cuenca, además permite verificar el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015 donde se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, haciendo posible una disminución de costos de tratamiento para su potabilización.

Por otra parte, se van plantear escenarios de simulación y recomendar alternativas para lograr la recuperación y saneamiento de la fuente hídrica, que pueden ser controladas en los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, en esta importante fuente hídrica, evitando eventos futuros de enfermedades causadas por la proliferación de vectores y olores desagradables, vectores, además de posible uso para consumo, beneficiando a la población en general.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad de cualquier masa de agua, superficial o subterránea depende tanto de factores naturales como de la acción humana. Sin la acción humana, la calidad del agua vendría determinada por la erosión del substrato mineral, los procesos atmosféricos de evapotranspiración y sedimentación de lodos y sales, la lixiviación natural de la materia orgánica y los nutrientes del suelo por los factores hidrológicos, y los procesos biológicos en el medio acuático que pueden alterar la composición física y química del agua (ONU 2005-2015). Este escenario natural se interviene significativamente debido al crecimiento poblacional y a la demanda hídrica para las distintas actividades socioeconómicas y de consumo, que han generado una contaminación masiva de los cuerpos de agua, lo que conlleva a una alteración en las condiciones iniciales de su calidad. Estas condiciones son alteradas ya sea por procesos relacionados con dinámicas naturales (mencionado anteriormente) o por procesos de contaminación de vertimientos puntuales o difusos, los cuales ejercen un impacto dependiendo de las características de calidad y de la capacidad de los cuerpos de agua receptores para asimilar o degradar dichas cargas. Las cargas contaminantes generadas de forma puntual o difusa por los sectores usuarios del recurso, ejercen presión sobre los sistemas hídricos ya sea porque se vierten a través del alcantarillado o directamente a los cuerpos de agua después de tratamiento o sin tratamiento (IDEAM ENA, 2014). En tanto, el deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial con el crecimiento de la población humana, la expansión de la actividad industrial y agrícola y la amenaza del cambio climático como causa de importantes alteraciones en el ciclo hidrológico (ONU 2005 - 2015).

La problemática aumenta al tomar en consideración la contaminación por el deficiente control de disposición final de residuos sólidos. Los residuos domésticos aún son arrojados en ríos y efluentes. Según el Ministerio de Ambiente en Colombia, (2015) se sigue arrojando los residuos a los ríos y cuerpos de agua como una práctica continua. La generación anual de Residuos Sólidos es de aproximadamente 9.488.204 ton (MADS, 2015). Cerca de 492.049 Ton/año, (SSPD, 2015) no son dispuestas adecuadamente y una importante cantidad de tales residuos constituyen una carga significativa de contaminación a los cuerpos de agua (IDEAM, 2015). Estos residuos aumentan considerablemente la carga orgánica, disminuyen el oxígeno disuelto presente en el agua y aumentan los nutrientes (N y P), ocasionando un aumento descontrolado de algas y generando procesos de eutrofización. Como consecuencia, se produce la pérdida del recurso para el uso humano (consumo o recreación), la muerte de la fauna acuática y el deterioro del paisaje.

Asimismo, como en el país no existe discriminación para la disposición de residuos sólidos industriales, es factible que estos sean dispuestos conjuntamente con los domésticos en las corrientes de agua y que, por lo tanto, se pueda estar contaminando las aguas con sustancias peligrosas. Todo lo anterior no sólo provoca la pérdida del recurso agua, sino que implica altas inversiones para hacerla útil para su consumo. Además de efectos adversos para la salud humana por la proliferación de vectores transmisores de enfermedades (CEPIS/OPS, 1996). Con respecto a esto, en el caso de estudio la generación de residuos es referente a la galería Bolívar producto la actividad comercial en esta zona y distintos asentamientos subnormales a lo largo del cauce del río.

De esta forma, el crecimiento poblacional ha maximizado la ocupación del territorio, en las zonas urbanas, desde el Decreto 1504 de 1998 se reglamenta el manejo del espacio público en los planes de ordenamiento territorial, y establece a las rondas hídricas como áreas para la conservación y preservación del sistema hídrico. Pero hace falta mayor control de la normativa en las riberas de los ríos y en el caso del río Molino donde se ha permitido que sean el escenario creciente de invasión por asentamientos subnormales o precarios. Según Consejo Nacional de Política Pública y Social (2004) se suma el alto impacto ambiental relativo por la ocupación de zonas no aptas para la urbanización, incluyendo daño a las fuentes de agua, pérdida de vegetación e incremento de la escorrentía con la consecuente generación de situaciones de riesgo.” (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2005).

El municipio de Popayán no se escapa de esta realidad, el deterioro de la calidad del agua se evidencia en uno de los principales afluentes que lo atraviesan y que se estableció como el área de estudio para la presente investigación, el río Molino, este es contaminado constantemente por distintos vertimientos a lo largo de su cauce, los vertimientos relevantes son: vertimiento ubicado en el margen derecho aguas arriba cerca de la Aeronáutica Civil y el vertimiento ubicado en el margen izquierdo aguas arriba en el barrio Pandiguando con coordenadas 2°26'53.90"N, 76°36'52.91"O y 2°26'57.42"N, 76°37'1.45"O respectivamente, estos afectan significativamente las características fisicoquímicas y biológicas de esta fuente hídrica. De igual forma tomando relevancia el tributario río Ejido que aporta caudal y alta carga contaminante.

Esto debido a que en Popayán el alcantarillado tiene una cobertura del 88%, y es de tipo combinado en la zona histórica y de tipo separado en la zona norte y occidente, entregando finalmente al río Cauca a través de los ríos Ejido, Molino y algunas quebradas sin ningún tipo de tratamiento (POT, Popayán, 2009), y actualmente no se cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Municipal (Está diseñada pero aún no inicia su construcción), esta situación podría generar una preocupación de salud pública para las comunidades, y además, porque en su trayectoria el río Molino desemboca al río Cauca, el cual es fuente de abastecimiento para la ciudad de Cali, según la CONTRALORÍA GENERAL DE SANTIAGO DE CALI, 2012 la planta de potabilización Río Cauca es la encargada de suplir aproximadamente el 20% de la demanda de agua potable de la ciudad. Su producción actual promedio es de 1.8 m³/s.

2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En 2010 se aprobó la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010b), en la que se establecen los principios fundamentales para la gestión del recurso. Estos incluyen la gestión de las cuencas hidrográficas, el uso eficiente y la toma de decisiones, que debe tener una base empírica, ser transparente y permitir la participación (OCDE - CEPAL, 2014). En tanto, la gestión de la calidad del agua medio ambiental en Colombia, requiere del reforzamiento de los sistemas de monitoreo que permitan relacionar efectivamente el daño y su magnitud para garantizar y focalizar la inversión necesaria dirigida a mantener la operación y continua estabilización de los sistemas de abastecimiento de agua, aseguramiento de captación y recuperación de las fuentes hídricas. Debido a que, la carga neta de contaminantes por vertimientos puntuales que potencialmente llega a los sistemas hídricos del país provenientes del sector doméstico son DBO_5 de 522.439(t/año), DQO de 1.021.721(t/año), SST de 1.034.323 entre otros (IDEAM Tomo 3, 2014).

Lo expuesto conlleva a acrecentar el deterioro de la calidad de los cuerpos de agua generando la necesidad de realizar este tipo de estudio, ya que gran parte de estos terminan depositados en las fuentes de agua. Así conocer la incidencia de todos estos tensores sobre el río Molino, es un factor determinante, puesto que van a influir considerablemente en su capacidad de recuperación.

En Popayán el río Molino representa una fuente de abastecimiento para consumo por ello tiene gran importancia para la población, en tanto esta investigación busco implementar la calibración de un modelo matemático de calidad para obtener una estimación del comportamiento de la cuenca, frente a la magnitud de contaminación por los vertimientos y tributarios, contribuyendo a que se puedan desarrollar acciones de control, conservación, etc., por parte de los tomadores de decisiones que contemplen realmente las consideraciones obtenidas de los estudios y se vinculen de la mejor forma posible generando soluciones prontas y viables.

Considerando lo establecido en el Decreto 3930 de 2010, la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC siendo la autoridad ambiental competente que realiza entre otras funciones la del Ordenamiento del Recurso Hídrico en el departamento, ha utilizado modelos matemáticos para calidad del agua en convenio con la Universidad del Cauca en el estudio: Implementación del modelo de simulación de calidad del agua QUAL2K en el río La Paila y actualización del modelo existente en QUAL2E para el río Palo en al año 2010, y por su parte la Universidad del Cauca ha realizado la investigación denominada: Aplicación del modelo de Streeter & Phelps para estudio de autodepuración de aguas residuales de una piscifactoría de truchas en el tramo del río las piedras en el año 2014, los cuales representan un referente para futuros estudios en dichas cuencas, y sirven como guía para el presente estudio. En el río Molino se llevan a cabo monitoreos de calidad por parte de la Corporación desde la bocatoma hasta la desembocadura del río Ejido al río Molino en el barrio Junín, pero no se encuentra registro de publicación acerca de modelación de la calidad del agua, por tanto esta investigación será un punto de partida a próximos estudios, debido a que recoge datos hidráulicos, fisicoquímicos, biológicos y topográficos e información relevante, además a las entidades en la toma de decisiones para dar cumplimiento de la protección, conservación y control de esta

importante cuenca que atraviesa la ciudad de Popayán y que es fuente abastecedora en la planta de tratamiento de agua potable Tulcán satisfaciendo la necesidad de agua para consumo a distintas comunidades.

Por lo anterior para esta investigación se contemplaron dos modelos: QUAL2K y Streeter & Phelps para escoger el más conveniente y así determinar la capacidad asimilativa de esta fuente dando como resultado la implementación de la herramienta computacional Modelo Simplificado de Streeter & Phelps que incluye términos para desoxigenación carbonacea y reaireación atmosférica, este modelo debe calibrarse mediante comparación de los perfiles de OD calculados con los perfiles determinados realmente en el río. Una vez calibrado, el modelo sirve para proyectar y visualizar posibles condiciones futuras para diferentes cargas contaminantes y distintas magnitudes de caudales. Además puede emplearse para obtener y visualizar la capacidad de autopurificación de un río en forma muy aproximada pero razonable y, relativamente, de manera económica (Romero, 2004). La aplicación del modelo permite dar una verificación aproximada del estado del río Molino frente a la información previamente recogida. Los modelos de calidad del agua calibrados con datos de campo sirven como herramientas de planeación integral de los recursos hídricos, permitiendo establecer relaciones causa efecto para toma de decisiones oportunas y económicamente viables. Estos modelos deben ser una representación aproximada del sistema real y contener el mayor número de aspectos importantes del mismo, sin que su grado de complejidad haga difícil su comprensión y aplicación. Esta técnica permite el análisis y la toma de decisiones con respecto a las diferentes intervenciones y obras proyectadas, convirtiéndose en una herramienta muy valiosa para propósitos de gestión, planificación y evaluación de impactos (Holguín, 2014).

La presente investigación sirve como base para determinar el grado de contaminación de esta fuente hídrica y mostrar escenarios de simulación que permitan a los actores sociales controlar y cumplir con las metas de reducción en los tramos que ha sido sobrepasada la capacidad de autodepuración natural o donde el cuerpo de agua se ha vuelto inviable para cualquier uso. Además futuros estudios permitirán verificar el acuerdo 0015 de 2014 establecido por la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC., por el cual se aprueban y se definen las metas globales, grupales e individuales, de reducción de cargas contaminantes en DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y SST (Sólidos Suspendidos Totales) en las corrientes superficiales receptoras, para el quinquenio 2015-2019, de conformidad con el Decreto 2667 de 2012.

El documento presenta las categorías arrojadas por los cálculos de los Índices de Contaminación del Agua ICOS relevantes, determinados para las dos campañas de monitoreo en los tramos a lo largo del cauce de estudio. Finalmente, es importante brindar algunas alternativas para cumplir con el objetivo planteado para la recuperación ambiental de la fuente hídrica, dado que es relevante aportar hacia la mitigación del daño causado y beneficiar a la comunidad en general, por posibles eventos de afectación a la salud pública, además los escenarios de simulación del modelo permiten predicción del estado de la fuente para que se busque como controlar ante cualquier evento.

3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

- Calibrar un modelo matemático para la determinación de la capacidad asimilativa del río Molino en la zona urbana del municipio de Popayán.

3.2. ESPECÍFICOS

- Realizar el inventario de los principales vertimientos sobre el río Molino y determinar las cargas contaminantes actuales.
- Estimar mediante jornadas de monitoreo en campo y resultados de laboratorio los parámetros hidráulicos, fisicoquímicos y biológicos relevantes en la modelación de la calidad del agua del río.
- Seleccionar el modelo matemático pertinente para implementar en el caso de estudio, con base en la información obtenida mediante las campañas de monitoreo y resultados de laboratorio.
- Simular escenarios mediante predicción del modelo y sugerir alternativas viables para la recuperación ambiental de la fuente hídrica.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. CALIDAD DEL AGUA

El agua es un recurso difícil de estudiar y gestionar, por las formas que adopta (líquida, sólida y gaseosa) y por la fuerza de gravedad a lo largo de una cuenca o en el subsuelo. Muchas actividades económicas están ligadas de manera indirecta a los ecosistemas acuáticos, de modo que la contaminación de cuerpos de agua río arriba repercuten río abajo y en consecuencia las actividades dependientes de un alto grado de calidad del agua corren el riesgo de reducir su potencial productivo, entre ellas diversas manufacturas, turismo, pesca, acuicultura y algunas recreativas (Jiménez, Valiente, Guadalupe & Villanueva, 2010).

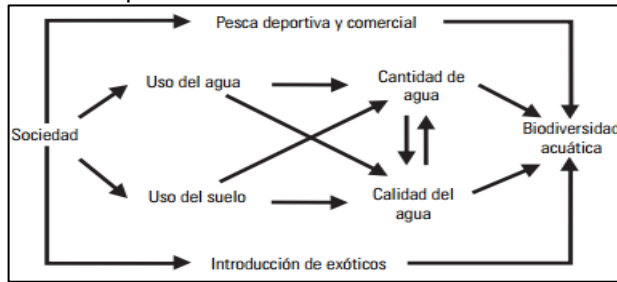
La sociedad obtiene grandes beneficios derivados del uso del recurso hídrico, pero esto puede desencadenar en la degradación de la calidad de los acuíferos, afectando así directamente las actividades que se planean a partir de la gestión del agua. Según Jiménez, 2010 la prosperidad de una sociedad depende en gran medida de su capacidad para utilizar, proteger y regenerar sus recursos hídricos (el agua en un sentido puramente físico) y acuáticos (la biodiversidad acuática).

El término “calidad del agua” está asociado en gran medida al escenario de uso que se le quiera dar al recurso hídrico, pues es este el determinante de las condiciones como parámetros y sustancias que debe poseer el líquido para que sea apto para dicha actividad a desarrollar. De acuerdo con Barrenechea, s. f., para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar.

Cabe resaltar que para entender el termino calidad del agua hay que realizar un seguimiento riguroso de las condiciones iniciales de la fuente hídrica a analizar, puesto que las aguas naturales dependiendo de su origen poseen niveles de sustancias como sales de magnesio que pueden ser dictaminados como intervenciones antrópicas, pero que en realidad son producto de la geomorfología y la mineralogía del lugar y/o del trayecto en donde se engendra el acuífero. Estas características iniciales le dan un estatus de “agua cruda”, y a partir de ahí y a lo largo de su recorrido por diversos factores físicos químicos y meteorológicos se pueden dar ciertas interacciones que modifiquen sus condiciones, como por ejemplo la lluvia que diluye y modifica la concentración de sales en el agua cruda, o por el contrario en el proceso de flujo libre se pueden arrastrar minerales que aumenten los niveles de dichas sustancias.

La calidad del agua está relacionada directamente con actividades realizadas por los seres humanos, las cuales pueden modificar negativamente las propiedades naturales del agua estos impactos se encuentran descrito en la figura 1.

Figura 1. Principales influencias humanas en el medio acuático.



Fuente: Jiménez et al., 2010.

Por otra parte se debe considerar el estado fisicoquímico y biológico que deben tener las aguas antes y después de su uso, que está debidamente estipulado en la normatividad colombiana existente como por ejemplo el decreto 1575 de 2007 por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano o la Resolución 0631 de 2015, que establece los parámetros y sus niveles máximos permisibles en aguas de vertimientos

4.1.1. Caracterización de las aguas

La composición química de las aguas naturales puede verse alterada por actividades económicas como; agrícolas, ganaderas e industriales, principalmente. La consecuencia es la incorporación de sustancias de diferente naturaleza a través de vertidos de aguas residuales o debido al paso de las aguas por terrenos tratados con productos agroquímicos o contaminados. Es aquí donde se hace necesario realizar un análisis exhaustivo del agua según se requiera para determinar la sustancia o parámetro que pueda afectar la calidad; para ello existen características físicas, químicas y biológicas que nos indican los niveles de contaminación.

A continuación se presentan los distintos parámetros que tienen en cuenta los modelos matemáticos de simulación de calidad del agua.

4.1.1.1. Parámetros físicos

Los parámetros físicos corresponden a aquellos que podemos percibir por medio de los sentidos. A su vez estos parámetros están asociados a los aspectos químicos de las aguas, por ejemplo la conductividad está asociada a la concentración de sales químicas que a su vez pueden variar el valor del pH. Algunas de estas variables son:

- **Color:** El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por sólidos suspendidos se llama color aparente mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero (Crites & Tchobanoglous, 2000).
- **Olor:** De acuerdo con Lentech, 2004 se define el Umbral de olor como la mínima concentración de una sustancia que puede ser detectada por la mitad de las personas presentes (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

- **Turbiedad:** Se define la turbiedad de una muestra de agua, como la medida de la pérdida de su transparencia, ocasionada por el material particulado o en suspensión que arrastra la corriente de agua (Cárdenas, 2005). Este material puede consistir en arcillas, limos, algas, etcétera. Sus niveles están directamente asociados a factores como los sólidos suspendidos.
- **Sólidos:** Todos los contaminantes del agua, con excepción de los gases disueltos, contribuyen para la carga de sólidos. Los sólidos pueden clasificarse de acuerdo con su tamaño y estado: sólidos en suspensión y sólidos disueltos; sus características químicas: sólidos volátiles y sólidos fijos; y su sedimentabilidad: sólidos en suspensión sedimentables y sólidos en suspensión no sedimentables. (Sperling, 2012).
- **Temperatura:** La temperatura es un factor abiótico que regula procesos vitales para los organismos vivos, así como también afecta las propiedades químicas y físicas de otros factores abióticos en un ecosistema (Universidad de Puerto Rico, s. f.). Este es uno de los parámetros de modelación más importante puesto que de la temperatura dependen muchos otros factores que afectan la calidad del agua.

4.1.1.2. Parámetros químicos

- **Conductividad:** Refleja la mineralización de las aguas (sólidos disueltos) y conjuga los cationes sodio, potasio, calcio, magnesio, así como los aniones carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros, principalmente. Se observan correlaciones significativas entre estas variables sólidos disueltos, dureza y alcalinidad (Ramírez, Restrepo, & Viña, 1995).
- **Dureza:** Concentración de cationes multimetálicos en solución. Los cationes más frecuentemente asociados a la dureza son los cationes bivalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} . En condiciones de supersaturación, tales cationes reaccionan con aniones en el agua, formando precipitados (Sperling, 2012).
- **Fosforo:** Aunque el fósforo no presenta toxicidad en los seres vivos, la presencia de fosfatos en aguas potables indica la posibilidad de contaminación del acuífero por aguas contaminadas o aguas residuales. Debido a que el fósforo se encuentra presente en cantidades relativamente altas en aguas residuales y aguas de riego agrícola, su presencia en valores mayores a los valores normales en aguas potables, puede deberse a una contaminación o infiltración de aguas residuales al yacimiento de agua potable (Universidad Autónoma de Chihuahua, s. f.).

Es esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Debido a los crecimientos indeseables de algas que ocurren en aguas superficiales, existe marcado interés en removerlos de las aguas residuales (Romero, 204).

- **DBO₅:** La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. Cuando se refiere a la DBO necesaria

para oxidar todo el material orgánico carbonáceo biodegradable, se denomina demanda bioquímica última de oxígeno carbonácea (DBOUC) (Romero, 2004).

- **DQO:** La demanda química de oxígeno es la medida del equivalente en oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte. Para muestras de una fuente específica, la DQO puede relacionarse empíricamente con la DBO, carbono orgánico o contenido de materia orgánica (INVEMAR, 2003).
- **pH:** El potencial hidrogeno o pH, es un parámetro de suma importancia tanto para aguas naturales como aguas residuales. El rango de pH en el cual pueden interactuar los ecosistemas y sobrevivir las especies que lo conforman, está sumamente restringido, por lo cual si este valor es alterado, los procesos biológicos que normalmente se llevan a cabo pueden ser perturbados y/o inhibidos y las consecuencias son adversas (Universidad Autónoma de Chihuahua, s. f.).
- **Nitritos:** Los nitritos representan una forma intermedia en el ciclo del nitrógeno; pueden estar presentes en las aguas como resultado de la degradación biológica de las proteínas o provenir de otras fuentes (INVEMAR, 2003). El control de nitritos en las aguas es vital debido a que estos compuestos químicos actúan en el organismo de las personas desencadenando enfermedades en el torrente sanguíneo.
- **Nitratos:** La especie química del nitrógeno más oxidada que se encuentra en aguas residuales. (Crites & Tchobanoglous, 2000), Los nitratos pueden ser utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteínas (Romero, 2004).
- **Alcalinidad:** provocada mayoritariamente por los iones carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-), aunque está también influida por el contenido en otros como boratos, fosfatos, silicatos y oxidrilos. La alcalinidad, no sólo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis (Universidad de Puerto Rico, s. f.).
- **Ortofosfatos:** Este compuesto químico (Ácido Fosfórico) es el utilizado por las plantas para desarrollar la fotosíntesis. En los casos en que constituye el nutriente limitador del crecimiento, la descarga de aguas residuales brutas o tratadas (domiciliarios o industriales), drenajes agrícolas arrastradas por el lavado de las lluvias a los cuerpos de agua tanto superficiales como profundos, pueden por un lado estimular el crecimiento de macro o microorganismos acuáticos fotosintéticos en cantidades exageradas (Maisterrena, s. f.). Los Ortofosfatos están directamente disponibles para el metabolismo biológico sin necesidad de conversiones a formas más simples. Las formas en las que los Ortofosfatos se presentan en el agua dependen del pH (Sperling, 2012).
- **Oxígeno Disuelto:** La determinación del OD es el fundamento del cálculo de la DBO y de la valoración de las condiciones de aerobividad de un agua. En general

todo proceso aerobio requiere de una concentración de OD mayor de 0,5 mg/L. En aguas naturales, para evitar efectos perjudiciales sobre la vida acuática se recomienda emplear concentraciones mayores de 4mg/L (Romero, 2004).

4.1.1.3. Parámetros biológicos

- **Coliformes Totales y Fecales**

Los coliformes están presentes en números bajos en las heces humanas y de animales homeotérmicos, pero están en número elevado en aguas residuales. Invariablemente estarán en aguas que contienen *E. coli* y por tanto serán indicadores de contaminación fecal (OPS, s. f.). Los coliformes totales, se encuentran con más frecuencia en el medio ambiente, pueden estar en el suelo y en las superficies del agua dulce, por lo que no son siempre intestinales, su identificación en estas fuentes sugieren fallas en la eficiencia del tratamiento y la integridad del sistema de distribución (IDEAM, 2007).

En la remoción de coliformes tienen efecto principal el tiempo de retención, la temperatura, la radiación ultravioleta, la concentración algar y el consumo por protozoos, rotíferos y dafnias (Romero, 2004).

4.1.2. Índices de calidad y contaminación

Existen varios tipos de indicadores de la calidad del agua entre los que se destacan los Índices de Calidad del agua ICAs y los índices de contaminación ICOs. Los ICOs e ICAs son términos matemáticos que se usan para determinación de la calidad del agua para diferentes usos. Estos índices se basan en las características físicas químicas y biológicas del cuerpo de agua a analizar. En el presente trabajo se calculara e interpretara únicamente los índices de contaminación.

El desarrollo de índices de contaminación (ICO) (Ramírez *et al.*, 1997) ha demostrado enormes ventajas sobre los ICA, pues estos últimos involucran, en un solo parámetro, numerosas variables, hecho que conlleva a diversos problemas conceptuales y de interpretación tales como:

- Una muestra de agua puede aparecer como de buena calidad, a pesar de que alguna(s) variable(s) exhiban un elevado grado de contaminación, puesto que la presencia conjunta de múltiples variables esconden o enmascaran tal condición. La ponderación de la incidencia de cada uno de estos factores, en la determinación final del ICA, es subjetiva y, por ende, susceptible de proporcionar resultados diversos bajo las mismas condiciones, porque depende del criterio del profesional a cargo de la investigación y evaluación de los resultados obtenidos.
- Dos cuerpos de agua con condiciones fisicoquímicas ampliamente opuestas pueden obtener un igual valor del índice de calidad ICA. Por tanto, éstos pueden conducir a falsas interpretaciones.
- Sobre un programa de monitoreo, en un cuerpo de agua particular, algunas variables podrían mejorar su calidad en el tiempo, mientras otras podrían exhibir mayor deterioro. Unos y otros eventos no se harán explícitos y, por tanto, quedan

ocultos y no podrá conocerse con precisión lo que sucede en el cuerpo de agua evaluado.

- Los ICA no permiten esclarecer condiciones particulares, por lo que el investigador debe retornar a los registros fisicoquímicos primarios.
- No permiten relacionar organismos indicadores con problemas ambientales específicos (Ramírez, Restrepo, & Cardeñosa, 1995).

4.2. MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUAS SUPERFICIALES

La modelación de aguas superficiales por medio de algoritmos matemáticos ha sido objeto de estudio en grandes institutos de índole mundial, por ello existen múltiples herramientas computacionales con las cuales se puede trabajar en el tema de modelación de fuentes hídricas.

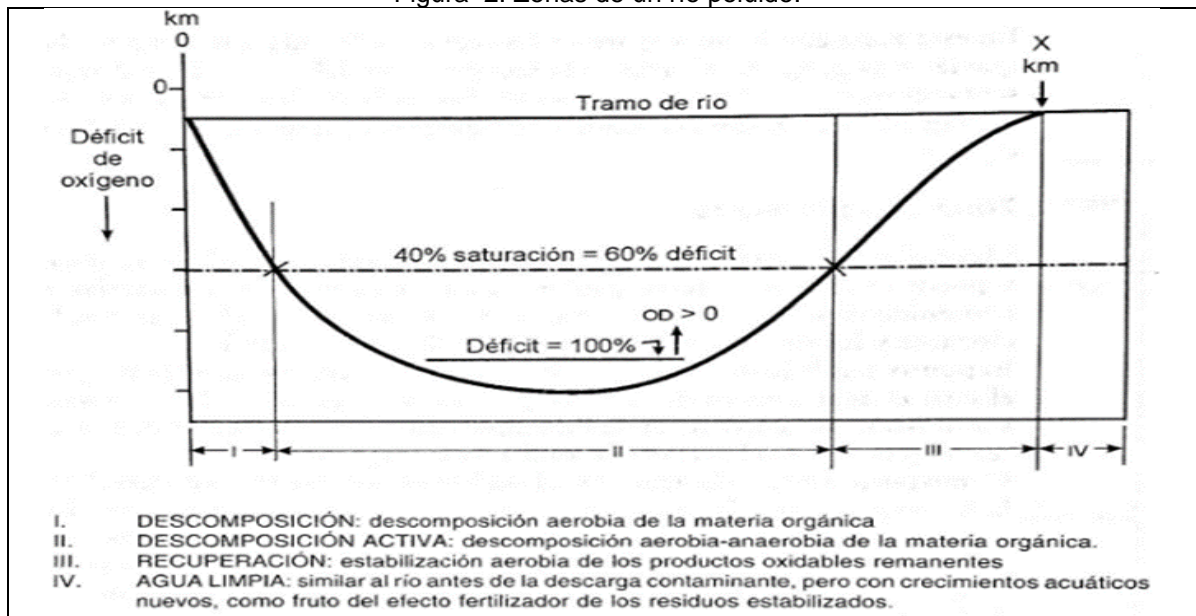
Considerar las diferencias entre un modelo hidrodinámico y uno de flujo estacionario se hace importante en la elección de un modelo en términos de resultados, complejidad, y parámetros a introducir (aunque también depende de las características del modelo por ejemplo si es: unidimensional, bidimensional, tridimensional). En general un modelo de estado estacionario trabaja bajo la concepción de que los términos de acumulación en los distintos balances son cero, es decir si las condiciones límites son independientes del tiempo, las variables dependientes del sistema pueden alcanzar gradualmente valores constantes con respecto al tiempo en un determinado punto (Adaptado de Bischoff & Himmelblau, 1976). Entonces un modelo hidrodinámico será aquel cuyas variables dependientes fluctúen con el tiempo. En realidad discriminar el tipo de modelo se realiza en función del objeto de estudio; si se trata de las condiciones ambientales en un tramo específico de una fuente superficial un modelo estacionario puede representar sin mayor dificultad y con alto grado de aproximación las condiciones reales de esa fuente, ahora si el estudio ambiental se realiza en una zona específica para aguas subterráneas se utilizaría el modelo hidrodinámico debido a que la interacción de residuos almacenados con el agua subterránea ocasionara una serie de procesos hidrodinámicos y químicos.

4.2.1. El río como un sistema de tratamiento de aguas residuales

Un río en las condiciones naturales, es un ecosistema que mantiene condiciones propicias para el crecimiento de plantas acuáticas y diferentes especies de peces. El río en diferentes sitios tiene diferentes concentraciones de oxígeno debido a las condiciones de reaireación desde la atmósfera.

Según Romero, 2004 en forma descriptiva se puede pensar que cuando un río, en condiciones normales se le aplica una descarga de aguas residuales domésticas, sin ningún tratamiento, se presenta una división arbitraria del río en cuatro zonas así:

Figura 2. Zonas de un río poluido.



Fuente: Romero, 2004.

- **Zona de descomposición**

En esta zona, la descomposición de las aguas residuales inicia la disminución de OD. La turbiedad inhibe la radiación solar y las plantas verdes desaparecen. El agua se vuelve gris, disminuyen progresivamente las especies de organismos y proliferan las bacterias. El límite de la zona es cuando el oxígeno es 40% del límite de saturación.

- **Zona de descomposición activa**

En esta zona el oxígeno continúa disminuyendo y puede agotarse por completo hasta llegar a cero. La vida acuática se reduce a las bacterias anaerobias y a unas pocas especies de protozoos anaerobios como los bonodidae. Arbitrariamente se considera que la zona termina cuando el nivel de OD es igual de nuevo al 40% de saturación.

- **Zona de recuperación**

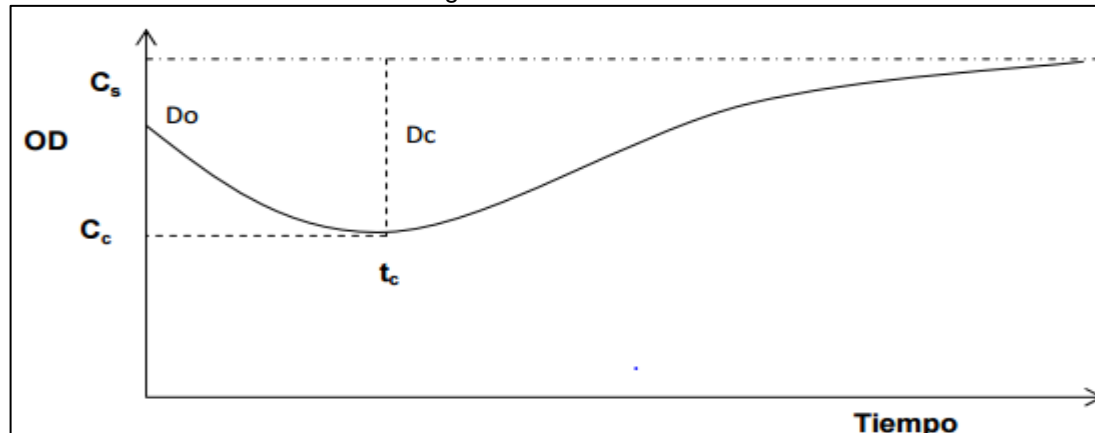
En esta zona empiezan a aparecer las plantas y la vida acuática a medida que la zona progresa. Continúa la recuperación del OD. La zona termina cuando se restablece el contenido normal de OD del río.

- **Zona de agua Limpia**

El contenido de OD ha vuelto a su valor original, la vida acuática se recupera y pueden subsistir bacterias patógenas y un número alto de bacterias. El contenido de sólidos disueltos es elevado; han aumentado los nitratos, los cloruros y los sulfatos, pero en general el río vuelve a ser útil.

En la curva de déficit de oxígeno en el punto más bajo se presenta un agotamiento del sustrato que permite que la reaireación sea más rápida que la satisfacción de la DBO, es decir empieza la recuperación del río. En la figura 3 se presenta la reaireación y la desoxigenación cuya diferencia produce un perfil de oxígeno disuelto en el río denominado curva SAG o curva de déficit de oxígeno

Figura 3. Curva SAG.



Fuente: Santamaría, 2013.

Donde:

- C_c = Concentración crítica de Oxígeno, mg/L
- C_s = Concentración de saturación de Oxígeno, mg/L
- D_o = Déficit inicial de oxígeno, mg/L
- D_c = Déficit crítico de oxígeno, mg/L
- t_c = Tiempo crítico, días

4.2.2. Modelación de Oxígeno disuelto y la DBO_5

Uno de los parámetros más importantes para la predicción de la calidad del agua es la modelación de la DBO. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) corresponde a la cantidad de oxígeno consumido en la descomposición de la materia orgánica (Bedoya, 2007).

A continuación, se menciona la DBO y su relación con el oxígeno disuelto, en la descomposición de la materia orgánica y las ecuaciones que los modelan, resaltando que el Oxígeno Disuelto es el Oxígeno que necesitan las bacterias para degradar la materia orgánica, los siguientes son factores que incrementan los niveles de Oxígeno en el agua:

- Reaireación desde la atmósfera.
- Oxígeno Disuelto en tributarios o debido a algas por respiración.

Las pérdidas de oxígeno se deben a:

- Oxidación de residuos carbonáceos
- Oxidación de residuos que contienen Nitrógeno

- Demanda de Oxígeno de los Sedimentos (DOS)

Su modelación está dada por las soluciones parciales de los procesos descritos anteriormente.

La Reaireación se expresa mediante un coeficiente de transferencia de oxígeno K_a que tiene unidades de tiempo, el cual se puede determinar por ecuaciones empíricas. Esta constante también debe ser corregida para temperaturas diferentes de 20 ° C así (Díaz, 2004):

$$K_a = K_{20} \theta^{T-20} \quad (\text{Ecuación 1})$$

K_{20} = Coeficiente de transferencia de oxígeno a 20° C

θ = es un coeficiente sin dimensión cuyo valor es igual a 1.024.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): es la medida de la cantidad de oxígeno consumido en la descomposición de la materia orgánica (la materia orgánica presente en las aguas residuales sirve de fuente de energía a los organismos heterotróficos en el proceso reverso de respiración y descomposición).

El decaimiento de la DBO se modela con la ecuación de decaimiento de primer orden:

$$\frac{dL}{dt} = -K_d L \quad (\text{Ecuación 2})$$

K_d = Tasa de descomposición de la Materia Orgánica.

L = Concentración de la DBO en mg/L.

La sedimentación y la actividad béntica también son importantes en la descomposición de la materia orgánica. Mediante la sedimentación se elimina gran parte de la fracción de sólidos orgánicos presentes en el agua residual. Este proceso está dado por una velocidad de sedimentación y se calcula en función de la profundidad. La sedimentación se modela mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dL}{dt} = -K_s L \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$K_s = \frac{V_s}{H} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

L = Concentración de DBO (mg/L)

K_s = Constante de remoción de DBO por sedimentación

V_s = Velocidad de sedimentación de las partículas (m/s)

H = Altura de la lámina de agua (m)

La tasa de decaimiento se aplica a una temperatura de 20°C; cuando se tienen diferentes temperaturas se requiere realizar una corrección utilizando un coeficiente θ igual a 1.047 la ecuación final es la siguiente:

$$K_d = K_{20} \theta^{T-20} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Relacionado con el Oxígeno Disuelto (OD) se hace necesario plantear un balance de masa que describa el decaimiento del oxígeno durante la descomposición de la materia orgánica de la siguiente forma (Camacho et al., 2004):

$$\frac{dO}{dt} = -K_1 L_0 e^{-K_d t} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

O = Oxígeno Disuelto (OD).

L_0 = La materia orgánica inicial.

K_1 = Constante de remoción de DBO.

t = Tiempo en que se mide el decaimiento de oxígeno respecto a la descomposición de la Materia Orgánica.

Si se tiene un nivel de oxígeno inicial O_0 , la ecuación 6 se resuelve así:

$$O = O_0 - L_0(1 - e^{-K_1 t}) \quad (\text{Ecuación 7})$$

La posibilidad de que estos parámetros como otros se puedan modelar abren un campo amplio en el desarrollo de un diagnóstico global de las características ambientales en una fuente hídrica, lo que permite mayor objetividad respecto a las acciones de tratamiento que se deban tomar. Se hace necesario que se articulen herramientas que permitan calibrar estos parámetros en conjunto.

4.2.3. Ecuaciones de Streeter & Phelps

Este modelo, publicado en 1944, aplicable a ríos con condiciones aerobias, flujo con superficie libre, flujo permanente, unidimensional, supone que la tasa de cambio del déficit de OD es igual a la diferencia entre la desoxigenación del agua, debida a la remoción de la DBO y materia orgánica carbonácea por oxidación biológica, y la reaireación o suministro de oxígeno proveniente de la atmósfera y causada por el déficit de OD y por la turbulencia (Romero, 2004).

$$L = L_0 \exp(-k_r t) \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$D = D_0 e^{-k_a t} + \frac{k_d L_0}{k_a - k_r} [e^{-k_r t} - e^{-k_a t}] \quad (\text{Ecuación 9})$$

Fuente: Castaño, 2015.

Donde:

L: DBO₅ en el tiempo t

L_0 : es la DBO₅ inicial

K_r : es la constante de remoción de oxígeno $K_r = K_d + K_s$:

K_d : constante de descomposición de la DBO₅

K_a : constante de reaireación del río

K_s : constante de sedimentación del río

D: Déficit de oxígeno en el río en el tiempo t

D_0 : Déficit inicial de oxígeno

La representación gráfica del oxígeno disuelto (OD = oxígeno de saturación – D) como función del tiempo t (o de la distancia aguas abajo de un punto de descarga $x = U/t$ donde: U es velocidad y t es tiempo), es una línea cóncava o en curva (conocida como la curva del oxígeno figura 3), con el mínimo localizado aguas abajo del punto de descarga. En el tramo descendente de la curva, los procesos que contribuyen a retirar oxígeno del medio dominan sobre aquellos que contribuyen a inyectar oxígeno. En el tramo ascendente, no obstante, el sistema se encuentra dominado por los procesos que inyectan oxígeno (Castaño, 2015).

En el punto considerado de mínimo oxígeno es debido a la desoxigenación que se lleva a cabo por procesos de degradación de la materia orgánica y fenómenos de remoción de oxígeno en el agua ya mencionados anteriormente; el déficit de oxígeno alcanza su punto crítico (máximo déficit) y el tiempo transcurrido para que estas condiciones ocurran se pueden estimar mediante las siguientes expresiones:

$$t_c = \frac{1}{k_a - k_r} \ln \left\{ \frac{k_a}{k_r} \left[1 - \frac{D_0(k_a - k_r)}{k_d L_0} \right] \right\} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$D_c = \frac{k_d L_0}{k_a} \left\{ \frac{k_a}{k_r} \left[1 - \frac{D_0(k_a - k_r)}{k_d L_0} \right] \right\}^{\frac{k_r}{k_a - k_r}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Fuente: Castaño, 2015.

4.3. MODELOS MATEMÁTICOS DE CALIDAD DEL AGUA

El modelo matemático deberá ser una aproximación razonablemente precisa del sistema real y contener el mayor número de aspectos importantes del mismo sin que su grado de complejidad haga difícil su comprensión y aplicación (CVC- UNIVALLE, 2001).

La calibración de un modelo matemático se debe realizar considerando las características del sistema a evaluar y la disponibilidad de información de calidad para que éste sea eficiente al mostrar los resultados. Dentro del proceso de calibración de un modelo se debe considerar el comportamiento de los diferentes parámetros que simulan los procesos incluidos en él, por lo tanto, se hace necesaria la implementación de un modelo matemático que garantice resultados confiables con la inclusión de diferentes parámetros factibles a determinar, permitiendo al usuario el estudio detallado de escenarios definidos para la caracterización ambiental de la corriente.

Los modelos matemáticos pueden ser uni, bi o tridimensionales dependiendo de las características físicas del medio a simular, tal como se describe a continuación:

- Modelos unidimensionales: se utilizan generalmente para representar flujos de aguas en ríos, siendo la dirección considerada el sentido del escurrimiento.
- Modelos bidimensionales: se utilizan para ríos de gran ancho, en los cuales las concentraciones de contaminantes varían de un lado de la ribera al otro. En estos casos se usa un sistema cartesiano de coordenadas, en el cual una de ellas corresponde al sentido del flujo y la otra a la dimensión lateral.

- Modelos tridimensionales: encuentran aplicación en estudios de agua subterráneas y en sistemas más complejos de aguas superficiales. Requieren de mayor información que los modelos uni y bidimensionales y también mayor tiempo computacional, por lo que su uso se restringe a problemas de gran magnitud cuando se dispone de recursos suficientes para su aplicación.

Existen modelos para calidad del agua básicamente de dos tipos de flujo dinámico o en estado estacionario. Los modelos de flujo no estacionario son de mayor costo debido a que suponen variaciones del agua no solo en el espacio sino también en el tiempo.

La Agencia de Protección Ambiental EPA (Environmental Protection Agency) ha desarrollado diversas herramientas computacionales basadas en modelos matemáticos para determinar el comportamiento de las aguas superficiales frente a las cargas contaminantes. Entre las herramientas desarrolladas por la agencia se tienen: WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), EPD-RIV1, QUAL2K, sin embargo otras entidades desarrollaron herramientas alternativas por ejemplo el Instituto de Hidráulica Danés (DHI por sus siglas en inglés: Danish Hydraulic Institute), quienes desarrollaron el modelo MIKE11 en 1999; y el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) quienes desarrollaron el modelo BLTM por sus siglas en inglés (Branched Lagrangian Transport Model).

- El WASP es un modelo que permite simular el comportamiento dinámico de un sistema acuático, incluyendo la columna de agua y los bentos. Este modelo permite analizar sistemas en 1, 2 y 3 dimensiones y para un variado número de contaminantes. En el modelo considera la variabilidad temporal de los diferentes fenómenos o procesos analizados (advección, dispersión, cargas puntuales o difusas), condiciones presentes en las fronteras del modelo. El WASP también considera los aspectos hidrodinámicos y el transporte de sedimentos que pueden ser aportados por afluentes al cuerpo de agua analizado, considera parámetros como las profundidades, velocidades, temperatura, salinidad y los flujos de los sedimentos.
- EPD-RIV1 es un conjunto de programas para la simulación unidimensional de las características hidrodinámicas y de calidad del agua, el modelo computacional está basado en el CE-QUAL-RIV1 (García et al., 2008) desarrollado por ingenieros de la EPA.
- El QUAL2K es un modelo para estimar la calidad del agua en ríos, este modelo ha sufrido una serie de transformaciones a partir del modelo QUAL2E el cual fue desarrollado en los años ochenta; no obstante existen otras herramientas informáticas desarrolladas a partir de los anteriores como el QUAL2Kw elaborado por la universidad de Washington

El modelo unidimensional QUAL2Kw simula el impacto de cargas contaminantes puntuales distribuidas en un flujo permanente, no uniforme, segmentando el sistema en tramos que pueden ser de longitud variable. El balance hidrológico se representa a través del flujo; el balance de calor a través de la temperatura, y el balance de material a través de la concentración de especies constituyentes (Arroyave et al., 2012-2013).

- QUAL2Kw al ser un modelo de calidad del agua de corriente de flujo constante unidimensional, su aplicación está limitada a condición de flujo en estado estacionario.

El modelo puede simular un número de componentes incluyendo la Temperatura, el pH, la Demanda Bioquímica Carbonacea, la Demanda de Oxígeno del Sedimento, Oxígeno Disuelto, Nitrógeno Orgánico, Nitrógeno Amoniacal, Nitritos y Nitratos Nitrógenos, Fósforo Orgánico, Fósforo Inorgánico, Nitrógeno Total, Fósforo Total, Fitoplancton y algas del fondo (Prakash et al., 2007).

Aquí se mencionan algunas ventajas técnicas del modelo qual2k:

- Se corrige la tasa de descomposición de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas. Se considera que bajo estas condiciones la tasa de descomposición, es igual a una tasa igual a la tasa de reaireación superficial y el déficit de oxígeno existente se iguala al oxígeno de saturación.
- Se corrige de igual forma la tasa de nitrificación bajo niveles de Oxígeno Disuelto muy bajos en el agua.
- Modela completamente el crecimiento de las plantas flotantes y de plantas radicales fijas. Para esta modelación tiene en cuenta los niveles de nutrientes en el agua, de la temperatura y la intensidad de la luz.
- Se modela el proceso de interacción agua-sedimento en forma explícita. A diferencia del modelo QUAL2E, al que se le suministra el valor de la demanda de oxígeno de los sedimentos, el modelo QUAL2K la incluye como una variable interna para el cálculo. Esta es una ventaja en la modelación de corrientes en estado aerobio.

El modelo Qual2K no presenta limitaciones en el número de tramos y subtramos a modelar de esta forma se eliminan las limitaciones presentadas por el modelo Qual2E, en este sentido (25 tramos, 20 subtramos, 7 elementos de entrada y de salida de caudal entre otros) para cada uno de los tramos se realiza un balance de caudal, de temperatura y de concentraciones de cada factor. Los balances son resueltos asumiendo una condición de estado estable y con un método de diferencias finitas.

4.4. MÉTODOS DE AFORO

Un aforo es un procedimiento que se realiza para encontrar el caudal que pasa por una sección en un tiempo t, existen diversos métodos de aforo a continuación se mencionan y definen algunos de ellos de acuerdo con lo encontrado en la literatura.

- **Relación área – velocidad**

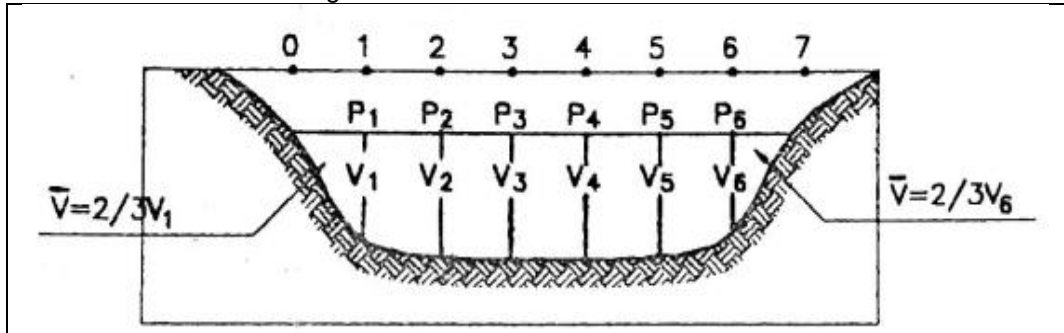
Consiste básicamente en medir la velocidad del agua en diferentes puntos de la sección transversal, el área de la misma y mediante la ecuación de continuidad ($Q = A \cdot V$; Q: caudal, V: velocidad media, A: área de la sección transversal) se determina el caudal (González, 2008).

El aforo con molinete es uno de los métodos más aplicados para área – velocidad y fue el implementado durante el desarrollo de este trabajo, por ende se hace énfasis en este procedimiento.

- **Aforo con molinete**

Seleccionada la sección transversal donde se va a hacer el aforo, se divide en una serie de subáreas a_1, a_2, \dots, a_n , (como se muestra en la figura 4), se mide en cada una de ellas las profundidades P_1, P_2, \dots, P_n y las velocidades puntuales en cada uno de los tirantes V_1, V_2, \dots, V_n .

Figura 4. Sección transversal de aforo.



Fuente: González, 2008.

El caudal entre los puntos 3 y 4 será igual:

$$Q_{3,4} = ((V_3 + V_4)/2) * a_{3,4} \quad (\text{Ecuación 12})$$

El caudal total será igual:

$$Q = \sum_{n=1}^n \left[\left(\frac{V_n + V_{n+1}}{2} \right) * a_{n,n+1} \right] \quad (\text{Ecuación 13})$$

Entre más secciones se hagan en una sección, mayor será la precisión en el cálculo del caudal, sin embargo se recomienda que el número de divisiones debe ser tal, que por cada una de las subáreas no pase más del 10% del caudal total (Romero, 2008)

Los datos se muestran en una tabla cuyas sus primeras 5 columnas obedecen a los datos que se midieron en campo: punto, distancia, profundidad, numero de revoluciones y tiempo a partir de estos se realizan los cálculos de velocidad media y área.

Para saber cuál es la velocidad se utiliza la ecuación del molinete utilizado, dichas ecuaciones están dadas en función de un "n" que es igual a el número de revoluciones por unidad de tiempo.

- **Aforo Volumétrico**

Consiste en recoger un volumen cualquiera de agua mediante un recipiente graduado en un tiempo determinado. El aforo volumétrico solamente se puede hacer para caudales pequeños que faciliten la recogida del agua (González, 2008)

- **Aforo con flotador**

Cuando no se dispone de un equipo, como un molinete, se puede reemplazar por colorantes o flotadores, los cuales se lanzan en el agua en un punto previamente

abscisado y se mide el tiempo transcurrido en recorrer la distancia conocida (González, 2008). Este procedimiento para medir la velocidad se efectúa en múltiples ocasiones con el fin de determinar un valor medio en el de estudio.

La relación entre la velocidad media y la velocidad superficial por experiencia varía entre 0.78 y 0.98. Un valor muy utilizado es de 0.85 para obtener la velocidad media aproximada (González, 2008).

Para determinar el caudal se debe obtener primero el valor del área de la sección en el tramo abscisado, por lo que se debe medir el área de varias secciones en el tramo para sacar un valor promedio.

- **Flujo en tuberías parcialmente llenas**

El cálculo del caudal en una tubería parcialmente llena el cual es el caso de los colectores de aguas residuales, se realiza a partir de la ecuación de continuidad; utilizando una velocidad media hallada en campo mediante el molinete, y para obtener el área mojada se hace utilizando las siguientes expresiones tomadas de Rocha, s. f.

Figura 5. Flujo en tuberías parcialmente llenas.

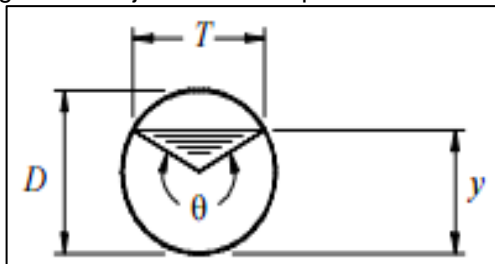


Tabla 1. Ecuaciones para hallar caudal en tuberías parcialmente llenas.

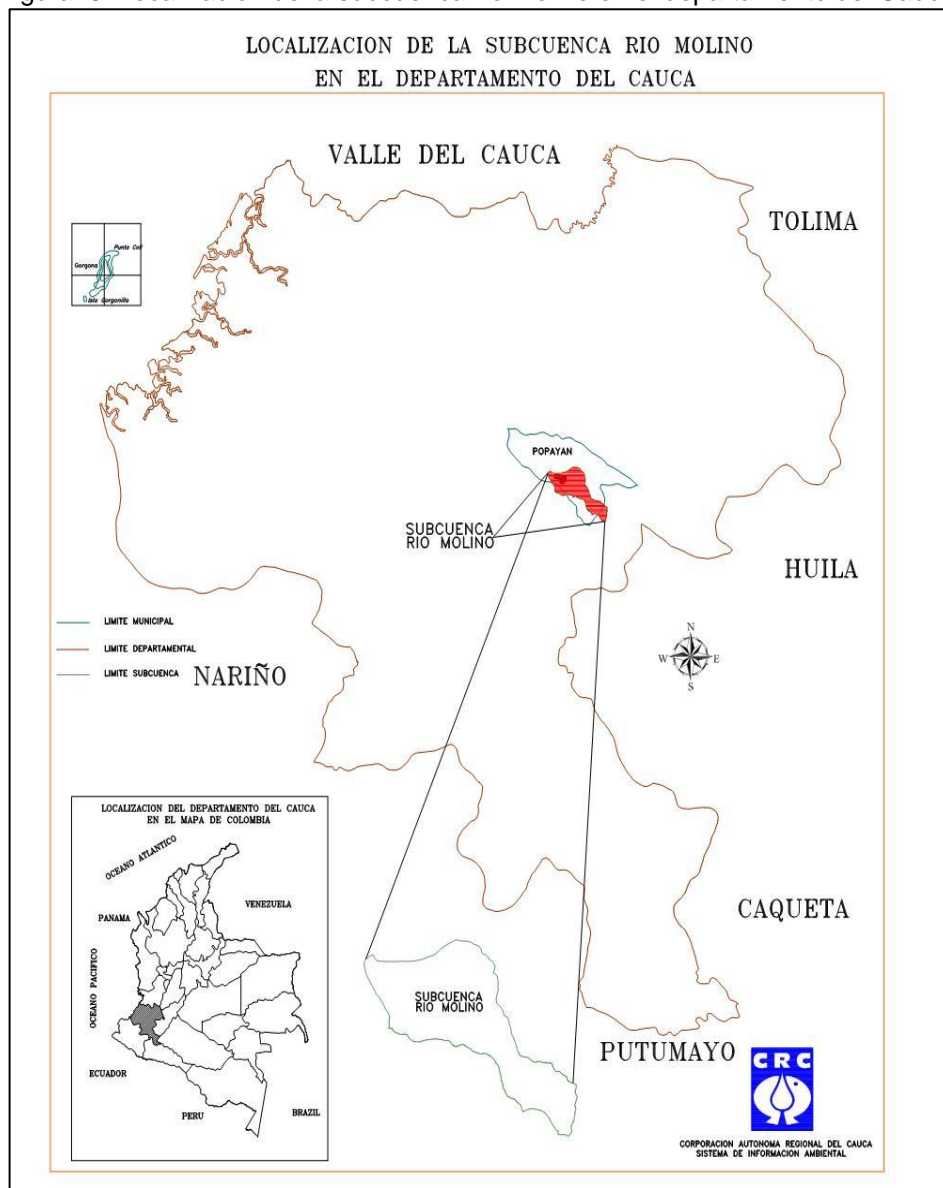
Área mojada A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico R (m)	Ancho superficial T (m)	Tirante hidráulico d (m)
$\frac{1}{8}(\theta - \text{sen}\theta)D^2$	$\frac{1}{2}\theta D$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)D$	$\left(\frac{\text{sen}\theta}{2}\right)D$, ó $2\sqrt{y(D-y)}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen}\frac{\theta}{2}}\right)D$

5. ASPECTOS GENERALES DE LA SUBCUENCA RÍO MOLINO

5.1. LOCALIZACIÓN SUBCUENCA RÍO MOLINO

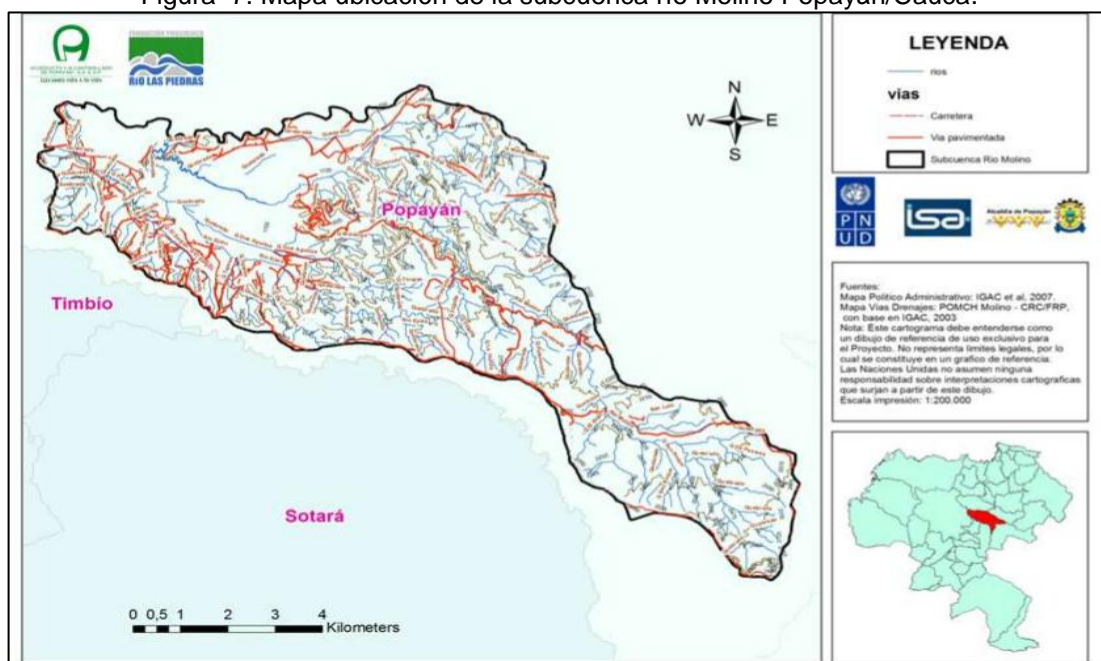
La subcuenca río Molino se encuentra localizada al suroccidente de Colombia, en el centro del departamento del Cauca, hacia el oriente del municipio de Popayán (Figura 6), en las coordenadas que se muestran en la tabla 2. En la Figura 7 se presenta ubicación más detallada.

Figura 6. Localización de la subcuenca río Molino en el departamento del Cauca.



Fuente: POMCH Molino-Pubús, 2006.

Figura 7. Mapa ubicación de la subcuenca río Molino Popayán/Cauca.



Fuente: Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático en la parte media y alta de la subcuenca río Molino municipio de Popayán, 2011.

Tabla 2. Ubicación de la subcuenca Río Molino.

PUNTO CARDINAL	REFERENCIA	COORDENADAS PLANAS	ÁREA (Km ²)
SUBCUENCA RÍO MOLINO			61,05
NORTE	Desembocadura del río Molino en el río Cauca	1050300 Este, 763700 Norte	
SUR	Nacimiento del río Molino en la vereda Santa Elena	1063100 Este, 764500 Norte	
ORIENTE	Nacimiento quebrada Pesares, vereda Santa Elena	1063600 Este, 755200 Norte	
OCCIDENTE	Límite con subcuenca quebrada Pubús	1051300 Este, 760600 Norte	

Fuente: base cartográfica POMCH Molino-Pubús, 2006.

La subcuenca río Molino es afluente directo del río Cauca, es de forma alargada y estrecha, de relieve montañoso suavizado por cenizas volcánicas, presenta una elevación media de 2624 m.s.n.m., en un rango altitudinal entre los 1700 y los 2800 m.s.n.m., lo cual permite que se diferencien los pisos bioclimáticos subandino, andino y alto andino (Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático en la parte media y alta de la subcuenca río Molino municipio de Popayán, 2011).

5.2. DIVISIÓN EN CORREGIMIENTOS Y VEREDAS

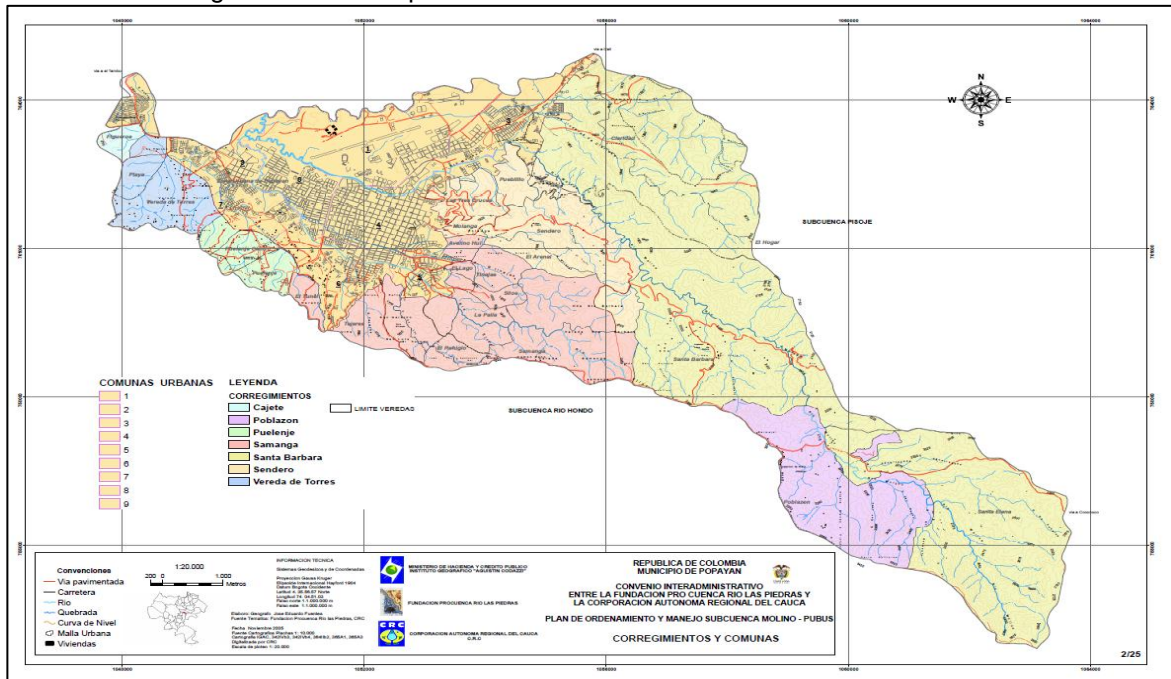
La subcuenca río Molino cuenta con 8 corregimientos, 27 veredas y 7 comunas urbanas (figura 8), su población se estima en 113058 habitantes distribuidos en la zona urbana y rural, que corresponde aproximadamente al 50% del total de población urbana, que es de 227840 según el censo realizado por el DANE en el transcurso del año 2006.

Tabla 3. División político administrativa de la subcuenca río Molino.

ZONA RURAL	
CORREGIMIENTO	VEREDAS
Poblazón	Santa Elena, Resguardo de Poblazón y Santa Bárbara
Santa Bárbara	Santa Elena, Pisojé Bajo, Santa Bárbara, El Hogar, La Claridad
El Sendero	El Sendero, El Arenal, Tres Cruces, Pueblillo Alto, Pueblillo Centro, Molanga, Pomona, Real Pomona
Samanga	Santa Bárbara, Samanga, Tinajas, Siloé, La Paila, Montebello
ZONA URBANA	
Barrios ubicados en el límite rural	El Refugio, El Carmen, Calicanto, Barrio Plateado, Los Andes, El Lago, Avelino UI, Pueblillo
Comunas	3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9

Fuente: talleres de diagnóstico participativo POMCH Molino- Pubús, 2005.

Figura 8. División político administrativa de la subcuenca río Molino.



Fuente: Fundación Pro Cuenca río Las Piedras, 2017.

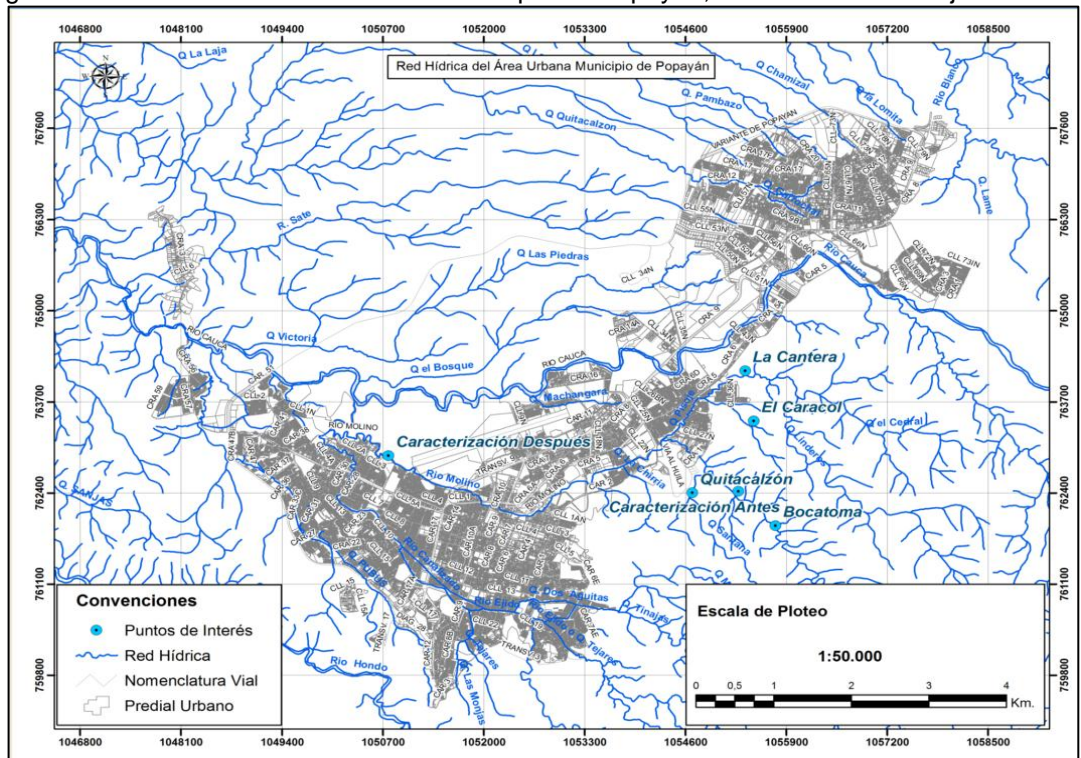
Como no se cuenta con una actualización del POMCH, se obtuvo información según Estudio preliminar Alcaldía-Unicauca, 2015 que Popayán tiene una superficie de 512 Km² que corresponden al 1,6% de la superficie del Departamento del Cauca. Su densidad poblacional es de 505 habitantes por Km².

5.3. RED DE DRENAJE

Desde el punto de vista de la red de drenaje, a la subcuenca río Molino llegan varios tributarios (Plan de Ordenación y Manejo Subcuenca Río Molino – Pubús, 2006):

- Río Ejido: es el principal afluente y está conformado por dos corrientes: quebrada Tinajas y quebrada Molanga, que generan más adelante la quebrada Dos Aguitas. Al río Ejido también caen otros afluentes como las quebradas Los Sauces, Santa Mónica, La Chorrera, La Monja y Los Tejares, éstos últimos dando origen a un humedal. Quebrada El Sanjón: conformado por los drenajes Linderos de Claridad y Matarredonda, a éste último llega la quebrada. La Cienaga.
- Quebradas como: La Cantera, Quitacalzón, Filipilla, La Honda, Patevenado, El Alejo, Piedra Grande o Villurco, Aguarregalada, San José, San Roque, Pesares y El Consuelo
- Humedal del río Ejido que origina las Quebradas Los Tejares y La Monja.

Figura 9. Red hídrica del área urbana municipio de Popayán, visible red de drenaje río Molino.



Fuente: Fundación Pro Cuenca río Las Piedras, 2017.

6. METODOLOGÍA

En el presente estudio, la metodología consistió en la realización de diferentes actividades, que permitieron generar una perspectiva hacia el alcance de la investigación para determinar la capacidad asimilativa del río Molino, las cuales arrojaron información relevante, con la que se pretende dar cumplimiento de los objetivos planteados buscando seleccionar, ejecutar y calibrar el modelo más conveniente para su implementación, mediante el análisis de la información tomada en campo, de resultados de laboratorio y suministrada por parte de entidades. Mas adelante se procede a presentar los resultados para la investigación tras la interpretación y depuración de la misma para darle estructura en el presente documento.

En los siguientes items se detallan algunas de las actividades y posteriormente en resultados se tendran en cuenta las de mayor influencia.

6.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA Y DEL RÍO MOLINO

Se llevo a cabo una evaluación de información de diversas fuentes como libros, tesis y articulos en físico y en medio magnético para identificar cuales aportaban para el caso de estudio.

Con respecto a la aplicabilidad de modelos: Los modelos de calidad del agua se han utilizado desde el desarrollo del modelo clásico de OD y DBO, de streeter & Phelps, en 1925, este modelo representó un marco en la historia de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Posteriormente fueron desarrollados otros modelos, dentro de la generación relativamente mas reciente, es el modelo QUAL2E, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Sperling, 2012). De donde tambien se han desarrollado los modelos QUAL2K y QUAL2Kw. A nivel regional se encuentran dos estudios de pregrado en la Universidad del Cauca realizados por Mera, 2014 denominado Implementación del modelo de simulación de calidad del agua QUAL2K en el río La Paila y actualización del modelo existente en QUAL2E para el río Palo y por Guerrero & Torres, 2010 denominado Aplicación del modelo de Streeter & Phelps para el estudio de la autodepuración de aguas residuales de una piscifactoría de truchas en un tramo del río Las Piedras. En los cuales se logro satisfactoriamente la calibración de dichos modelos, así como tambien en distintos lugares a nivel nacional y diferentes corrientes superficiales.

Con respecto a información referente a la fuente hídrica: Este estudio está conformado por información que comprende muchos aspectos relevantes de la subcuenca del río Molino por ello fue necesario acudir a entidades para su acceso, por una parte se obtuvo datos de topobatimetría por parte de la Alcaldía de Popayán, caracterización de principales vertimientos y otras generalidades por la Fundación ProCuenca río Las Piedras, resultados de parametros para la implementación del modelo por el laboratorio de la Corporación Autonoma Regional del Cauca, CRC., entre otras.

6.2. ÁREA DE ESTUDIO

Para seleccionar el área de estudio se tomo en cuenta la ausencia de la aplicación de un modelo de calidad del agua en el río Molino. El tramo del cauce a analizar esta determinado inicialmente en la vereda Pueblillo con coordenadas 2°27'14.15" N, 76°35'19.01" O y elevación de 1815.2 m.s.n.m., hasta la desembocadura del río Molino en el río Cauca con coordenadas 2°27'31.59"N, 76°37'28.22"O y elevación: 1710.139 m.s.n.m., La longitud total de la corriente superficial en la zona urbana del municipio de Popayán del río Molino es de 9.634 Kilómetros.

6.2.1. Reconocimiento del área de estudio

El reconocimiento del área de estudio fue mediante visita preliminar el día 27 de agosto de 2016 con apoyo del mapa base suministrado por la CRC, el recorrido inicio en la vereda Pueblillo y finalizó en el barrio Junín, con esta actividad fue posible tener un panorama de la red de drenaje, para posterior selección de los puntos relevantes para las jornadas de monitoreo. Por otra parte, no se encontraron captaciones de agua.

En la tabla 4 se presenta algunos de los sitios observados en el trayecto por el río Molino, georreferenciados con GPS cartográfico (Mobile Mapper Magellan) cuyo procesamiento se realizó en el software Mobile Mapper Office 4.0 y Google Earth. En el caso de los vertimientos se hace la descripción de su posición margen aguas arriba así como también de los tributarios.

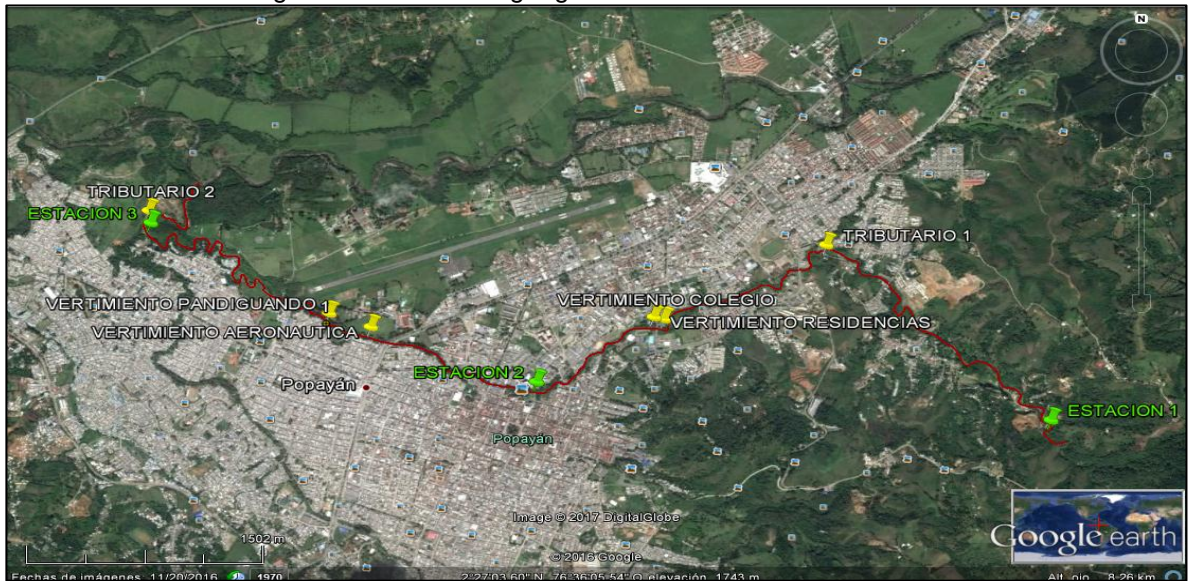
Tabla 4. Sitios observados en el área de estudio.

LUGAR	MARGEN VERTIMIENTO Aguas arriba	COORDENADAS	
		LATITUD	LONGITUD
Después de la bocatoma, cerca de la vereda Pueblillo		2°27'14.15"N	76°35'19.01"O
Barrio Yanaconas, quebrada La Cantera	Derecho	2°27'14.15"N	76°35'19.01"O
Cerca del puente Tulcán: Colegio Técnico Industrial	Derecho	2°26'55.84"N	76°35'52.39"O
Cerca del puente Tulcán: Residencias femeninas Unicauca.	Izquierdo	2°26'56.35"N	76°35'54.46"O
Bajo el puente del Humilladero, cerca de la CRC		2°26'40.31"N	76°36'18.66"O
Cerca de la Aeronáutica Civil	Derecho	2°26'53.90"N	76°36'52.91"O
Barrio Pandiguando	Izquierdo	2°26'57.42"N	76°37'1.45"O
Barrio Junín: río Molino antes del tributario (Río Ejido)		2°27'19.78"N	76°37'38.80"O
Barrio Junín: tributario río Ejido	Derecho	2°27'22.79"N	76°37'39.19"O

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

En la figura 10 se presentan los vertimientos puntuales y tributarios en color amarillo y las estaciones de calidad en color verde.

Figura 10. Ubicación geográfica de los sitios observados.



Fuente: Google Earth.

La subcuenta del río Molino es un afluente directo del río Cauca, en tanto el estudio abarca hasta su desembocadura representando una referencia final (R1), pero debido a la complejidad de acceso, no se llegó hasta ese punto, por ello las coordenadas se establecieron de Google Earth.

En la figura 11 se muestran dos de los sitios observados en el recorrido preliminar, los demás están registrados en Anexo 1.

Figura 11. Visita preliminar a través del cauce del río Molino desde a) vereda Pueblillo hasta b) barrio Junín.

a) vereda Pueblillo



b) barrio Junín



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Esta actividad sirvió para establecer que el sitio observado en la tabla 4 que representa la quebrada La Cantera, no se caracterizará para las posteriores jornadas de monitoreo, por representar una quebrada de agua limpia según observación de sus características organolépticas, es decir por no presentar olor ni color; de igual forma con los vertimientos cerca del puente Tulcán: Colegio Técnico Industrial y Residencias femeninas Universidad del Cauca se pudo concluir que sus caudales representan niveles muy inferiores al 10% del caudal total del río, por lo que no son significativos y no hacen parte del estudio. Por otro lado en el recorrido se observaron otros puntos de descarga puntual que probablemente correspondían a aguas pluviales que también se descartaron por su bajo caudal y por su aspecto de poca contaminación.

6.2.2. Determinación de los puntos de monitoreo

De acuerdo con el reconocimiento del área de estudio se procedió a establecer los puntos de calidad (estaciones y vertimientos más convenientes) para la ejecución de las jornadas de monitoreo, teniendo como referencia algunos de los puntos donde se han realizado monitoreos de calidad del agua por parte de la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC.

Tabla 5. Puntos de monitoreo seleccionados en el área de estudio.

PUNTO DE CALIDAD	LUGAR	ABSCISA (Km)
E1	Después de la bocatoma, cerca de la vereda Pueblillo	K0+000
E2	Bajo el puente del Humilladero, cerca de la CRC	K4+996
V1	Cerca de la Aeronáutica Civil	K6+136
V2	Barrio Pandiguando	K6+456
E3	Barrio Junín: río Molino antes del tributario (Río Ejido)	K8+776
T1	Barrio Junín: tributario río Ejido	K8+826

E = Estación V = Vertimiento T = Tributario

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

6.3. CAMPAÑAS DE MONITOREO

En el desarrollo del proyecto se planteaba ejecutar tres jornadas de monitoreo en el río Molino, debido a distintas limitaciones principalmente de costos de laboratorio e influencia climática, se debió asumir solo la realización de dos jornadas para determinar las características fisicoquímicas, biológicas e hidráulicas requeridas para el montaje y posterior calibración del modelo.

Las campañas de monitoreo se realizaron conforme a fechas programadas, resultando finalmente en condiciones climáticas diferentes: jornada 1 realizada el 14 de septiembre de 2016, bajo condiciones de alto caudal y jornada 2 realizada el 13 de octubre de 2016 bajo caudal de estiaje, para ello fue necesario el préstamo del equipo requerido, y solicitud de vehículo de transporte. Al finalizar las jornadas de monitoreo, las muestras

fueron transportadas a las instalaciones del laboratorio Ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Cauca, ubicado en el Vivero Forestal La Florida, Vereda González, Municipio de Popayán, para su debido procedimiento.

Finalmente cabe destacar que se requirió el apoyo y acompañamiento de compañeros para lograr tomar simultáneamente los parámetros in situ de cada punto de calidad en el trayecto del área de estudio.

En las figuras 12 a 17 se evidencia el registro fotográfico de la campaña de monitoreo número 2, en anexo 1 se presenta el registro de la jornada 1, además de muestreo, equipos, vehículo de transporte y acompañamiento policial.

PUNTOS DE MONITOREO: Secciones transversales, mediciones de parámetros.

- **ESTACIONES:**

Figura 12. Vereda Pueblillo. (E1)



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 13. Cerca de la CRC. (E2)



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 14. Río Molino, barrio Junín. (E3)



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

- **VERTIMIENTOS:**

Figura 15. Cerca Aeronáutica civil. (V1)



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 16. Barrio Pandiguando. (V2)



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

- **TRIBUTARIO:**

Figura 17. Río Ejido, barrio Junín. (T2)



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

6.3.1. Recolección de muestras

La realización del muestreo siguió el protocolo de la guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, (IDEAM, 2007 a, b) siguiendo lo establecido en el apartado: los factores y criterios para la ubicación de sitios de muestreo y para la toma de muestras. Para la preservación de las muestras se requirió neveras, geles de refrigeración y recipientes plásticos.

6.3.2. Recopilación de información del río Molino

Según la planificación y ejecución de las jornadas o campañas de monitoreo se recopiló la información necesaria mediante formatos de campo, con la cual se desarrolló los cálculos correspondientes.

Para la medición en campo de los parámetros de modelación se requirió el préstamo de algunos de los equipos o instrumentos; por parte del departamento de hidráulica (Molinete Tipo C2 '10.150' y departamento de ingeniería ambiental (sonda multiparámetro HQ40d) de la Universidad del Cauca y además de los suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC (Multiparámetro Thermo ORION pH/ISE/COND/OD portátil STAR y Flujómetro Global Water modelo FP-111). Debido al elevado costo de los anteriores, fue necesario un estricto cuidado en su manejo y acompañamiento policial. Además de los equipos mencionados también se utilizó termómetro, flexómetro, decámetro e instrumentos de seguridad, entre otros.

6.3.2.1. Información hidráulica río Molino

Los aforos se realizaron mediante el método área - velocidad; se determinaron las secciones transversales, según estructura planteada por González, 2008 y siguiendo los protocolos del IDEAM, arrojando datos de velocidad, profundidad, ancho superficial, etc., para posteriormente obtener caudales, profundidades, velocidades medias, rugosidad de Manning, radio hidráulico entre otros. En igual sentido para los vertimientos se asumió el procedimiento establecido por Romero, 2004, para cálculo de caudales en tuberías circulares parcialmente llenas (figura 5). Esta información también se aplica para los cálculos de las constantes de reaireación y desoxigenación para la calibración del modelo.

6.3.2.2. Información fisicoquímica y biológica del río Molino

Algunos de los parámetros para determinar la calidad de la fuente hídrica fueron medidos en campo con los equipos mencionados anteriormente, los demás se adquirieron mediante el laboratorio de la CRC, los cuales siguieron la metodología del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Dicha información se aplica para determinar la calidad del agua de la fuente hídrica.

Tabla 6. Métodos para determinación de parámetros obtenidos del laboratorio CRC.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	MÉTODO SM
Color		UPC	2120 C
Turbidez		UNT	2130 B
Nitratos	NO_3^-	mg NO_3^- N/L	4500- NO_3^- B
Nitritos	NO_2^-	mg NO_2^- N/L	4500- NO_2^- B, Modificado
Orto-Fosfatos	PO_4^-	mg PO_4^- P/L	4500- P E, Modificado
Dureza		mg CaCO_3 /L	2340 C
Alcalinidad		mg CaCO_3 /L	2320 B
Demanda bioquímica de oxígeno 5 días	DBO_5	mg/L	5210 B/4500-OG
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	5220 D, Modificado
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	2540 D
Coliformes Totales		UFC/100ml	9222 A
Coliformes Fecales		UFC/100ml	9222 A

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

6.4. DETERMINACIÓN DE LOS TRAMOS A MODELAR EN EL RÍO MOLINO

Para la determinación de los tramos de modelación se realizó un análisis de información como de pendientes, caudales y calidad, garantizando que dichas características permanecieran constantes o relativamente uniformes a lo largo de su recorrido por el tramo (Aguirre, 2016). Las pendientes de los tramos de estudio, se estimaron en el

programa TOPO 3 (Software creado por el Ingeniero Efraín Solano) con la información correspondiente a la cartera de datos topográficos sustraída del estudio preliminar Alcaldía-Unicauca, 2015. Se presenta en Anexo 2.

Una vez obtenida la información respectiva de las jornadas de monitoreo, se replanteo la unión de los vertimientos V1 y V2 (tabla 5) llevándolos a un vertimiento equivalente (V_{Eq}) (Aguirre, 2016), debido a que su distancia no supera 1 Km en tanto las concentraciones de parámetros en el río, no alcanzan a ser alteradas significativamente en un tramo tan corto de 320 metros entre ellos. Para obtener los parámetros fisicoquímicos y el caudal del vertimiento equivalente se realizó balances de masa.

Debido a que en las jornadas de monitoreo no se había considerado como tributario a la quebrada La Cantera, y según el análisis de la información, fue pertinente que esta hiciera parte del estudio debido a que en el transcurso de E1 a E2, se presentaba un aumento de caudal considerable (más del 10% del caudal del río), por lo cual se estableció que está quebrada era la que aportaba ese caudal. Por tanto la quebrada La Cantera quedó establecida como tributario 1 (T1) y el río Ejido pasó a ser el tributario 2 (T2). Para los datos fisicoquímicos de entrada al modelo se asumió que se asemejan a las del río Molino en el sector antes de pueblillo correspondiente a la estación 1.

6.5. SELECCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CALIDAD DEL AGUA

Considerando criterios para seleccionar modelos matemáticos de calidad del agua y debido a la existencia de distintos modelos se buscó escoger el más conveniente entre ecuaciones de Streeter & Phelps y QUAL2K, para el caso específico de estudio, considerando factores que lleguen a ser favorables o limitantes para su aplicabilidad.

6.6. CALIBRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

La calibración del modelo para obtener el perfil de OD y de DBO que represente condiciones actuales de la fuente hídrica se procura lograr mediante el ajuste de las constantes de desoxigenación K_1 y de reaireación K_2 , de acuerdo a la literatura, con ecuaciones establecidas por algunos autores, para ello se ensaya con valores promedios de distintos autores o con valor individual y finalmente estimar las constantes que permitan un mejor ajuste del modelo con respecto de la realidad.

A continuación, se detallan los métodos para determinar las constantes.

6.6.1. Determinación de la constante de desoxigenación ($K_d=K_1$)

La constante de desoxigenación se puede calcular mediante la ecuación 14 según Romero, 2004 y algunos de los métodos para su estimación descritos por el mismo autor se encuentran en las ecuaciones 15 y 16.

$$K_1 = (1/\Delta t) * \ln(L_A/L_B) \quad (\text{Ecuación 14})$$

Dónde:

K_1 = Constante de desoxigenación, base neperiana, d^{-1}

L_A = DBOU en el punto A, mg/L

L_B = DBOU en el punto B, mg/L

Δt = tiempo de flujo entre A y B

A = Punto localizado aguas arriba, para muestreo de agua relativamente limpia

B = Punto localizado aguas debajo de una fuente puntual de contaminación

Orgánica, para muestreo de agua bien mezclada del río y del residuo

Las constantes de desoxigenación se pueden asumir por:

- **Wright McDonnell**

$$K_1 = 1,8 Q^{-0.49} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

Q = caudal del río en $m^3/\text{segundo}$

- **Bosco**

$$K_1 = k + n^*(V/H) \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

k = constante de desoxigenación promedio en la botella de DBO, (d^{-1})

n = coeficiente de actividad del lecho del río, adimensional

V = velocidad del río, (m/d)

H, profundidad del río, (m)

- **Chapra**

$$K_1 = 0.3(H/8)^{-0.434} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Dónde:

H, profundidad del río, m

6.6.2. Determinación de la constante de reaireación ($K_a=K_2$)

La constante de reaireación se calcula utilizando los siguientes métodos teniendo en cuenta las respectivas restricciones. De acuerdo a la decisión de los autores.

Tabla 7. Métodos para la determinación de K_2 .

Método	Ecuación	Aplicabilidad				
		Caudal (m^3/s)	Profundidad media (m)	Velocidad (m/s)	Pendiente de energía (m/1000m)	K_a (20°C) (dia^{-1})
O'Connor and Dobbins (1958)	$K_a = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$		0.30-9.14	0.15-0.49	0.027-3.6	0.04-11.1
Churchill et al. (1962)	$K_a = 5.026 \frac{U}{H^{1.67}}$	27-489	0.61-335	0.55-1.52	0.126-2.35	0.52-12.8
Owens et al. (1964)	$K_a = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.67}}$	0.009	0.12-0.73	0.03-0.55	0.156-10.6	0.71-113
Tsvoglou and Neal (1976)	$K_a = 31.183 US$	0.00283-0.4247			0.095-56.8	0.08
	$K_a = 15.308 US$	0.4247-84.938				
Thackston and Dawson (2001)	$K_a = 2.16(1+9F^{0.25})\left(\frac{U^*}{H}\right)$ $U^* = \sqrt{gR_h S}$					
USGS (Pool-riffle) Melching and Flores (1999)	$K_a = 5.17(US)^{0.524} Q^{-0.242}$	0.0028-210	0.0457-3.05	0.003-1.83		
	$K_a = 596(US)^{0.528} Q^{-0.136}$			>0.556		
USGS (Channel-control) Melching and Flores (1999)	$K_a = 88(US)^{0.313} H^{-0.353}$			<0.556		
	$K_a = 142(US)^{0.333} H^{-0.66} B^{-0.243}$			>0.556		
<p>k_a: Coeficiente de reaeración (d^{-1}); H:profundidad de flujo (m) U: Velocidad media de flujo (m/s); F: número de Froude (adimensional) Q: Caudal de flujo (m^3/s); S: pendiente de fondo del canal U^*: Velocidad de corte (m/s); R_h: Radio hidráulico (m) B: Ancho superficial del canal (m)</p>						

Fuente: Jiménez, 2008.

6.7. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN ICOS

Los índices de contaminación a estudiar serán los siguientes: Fuente: Jiménez & Vélez, 2006.

- **ICOMI:** Índice de contaminación por mineralización este se calcula a partir de los promedios de los índices de las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$\text{ICOMI} = \frac{1}{3} * (I_{\text{conductividad}} + I_{\text{Dureza}} + I_{\text{Alcalinidad}}) \quad (\text{Ecuación 18})$$

A partir de la ecuación 18 se tiene

$$I_{\text{conductividad}} = \log_{10} \cdot I_{\text{conductividad}} = -3,26 + 1,34 \log_{10} \text{ Conductividad } (\mu\text{S/cm}) \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$I_{\text{conductividad}} = 10^{\log I_{\text{conductividad}}}$$

Conductividades mayores a 270 $\mu\text{S/cm}$, tienen un índice de conductividad = 1

$$I_{\text{Dureza}} = -9,09 + 4,40 \log_{10} \text{ Dureza mg/L} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$I_{\text{Dureza}} = 10^{\log I_{\text{Dureza}}}$$

Durezas mayores a 110 mg/L tienen un índice = 1 Durezas menores a 30 mg/L tienen un índice = 0

$$I_{\text{Alcalinidad}} = -0.25 + 0.005 \text{ Alcalinidad mg/L} \quad (\text{Ecuación 21})$$

- **ICOMO:** índice que expresa la contaminación por materia orgánica al igual que el ICOMI se calcula mediante una expresión que involucra tres variables: DBO, coliformes totales y %OD.

$$\text{ICOMO} = \frac{1}{3} * (I_{\text{DBO}} + I_{\text{Coliformes totales}} + I_{\text{Oxígeno \%}}) \quad (\text{Ecuación 22})$$

A partir de la ecuación 22 se tiene

$$I_{\text{DBO}} = -0.05 + 0.70 * \log_{10} \text{ DBO (mg/L)} \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$I_{\text{Coliformes totales}} = -1.44 + 0.56 * \log_{10} \text{ Col Tot (NMP)} \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$I_{\text{Oxígeno \%}} = 1 - 0.01 * \text{Oxígeno \%} \quad (\text{Ecuación 25})$$

- **ICOSUS:** Índice de contaminación por sólidos suspendidos.






$$\text{ICOSUS} = -0.02 + 0.003 * \text{Sólidos suspendidos mg/L} \quad (\text{Ecuación 26})$$

- **ICOpH:** se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{ICOpH} = \frac{e^{-31.08+3.45 \text{ pH}}}{1+e^{-31.08+3.45 \text{ pH}}} \quad (\text{Ecuación 27})$$

La interpretación de los índices de contaminación se hace de acuerdo a los valores que tome cada uno, está dado por:

Tabla 8. Rangos de clasificación del grado de contaminación de las aguas mediante índices.

VALOR DE LOS ÍNDICES	GRADO DE CONTAMINACIÓN	LEYENDA
0.8-1.0	Muy alta	
0.6-0.8	Alta	
0.4-0.6	Media	
0.2-0.4	Baja	
0.0-0.2	Muy baja	

Fuente: Jiménez & Vélez, 2006.

6.8. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO Y ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LA FUENTE HÍDRICA

El impacto que genera la contaminación a las fuentes superficiales es considerablemente peligroso para la salud pública en condiciones de extrema incidencia, para ello en este ítem se presenta algunos escenarios que permiten la predicción del modelo seleccionado para implementar en el caso de estudio y se sugieren alternativas viables que puedan contribuir a la mitigación del daño causado por deterioro de la calidad del agua de la corriente receptora. Según Vera, 2007 en las etapas iniciales es muy importante tener en cuenta la formulación matemática desarrollada para la solución del modelo, y además, la obtención de la información de partida para desarrollarlo y poderlo ejecutar; en las etapas intermedias es muy importante el análisis de la información obtenida como resultado, para ello la estadística juega un papel de análisis importante, y finalmente todo debe estar enfocado a la realización de escenarios factibles de modelación modificando o reemplazando variables o datos tenidos en cuenta para la concepción del modelo y poder construir alternativas de solución factibles de implementar.

Dichas alternativas se plantean con una revisión bibliográfica que permita encontrar información pertinente y además cumpliendo con la normatividad colombiana.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Según Mota, 1988 para la evaluación del impacto de la contaminación y de la eficacia de las medidas de control, es necesaria la cuantificación de las cargas contaminantes afluentes al cuerpo de agua. Para ello, son necesarios levantamientos de campo en el área en estudio, incluyendo muestreo de los contaminantes, análisis de laboratorio, medición de caudales entre otros. En caso de que no sea posible la ejecución de todos estos ítems, se puede complementar con datos de literatura (Sperling, 2012). Las actividades mencionadas se abarcaron en la metodología las cuales representan características importantes para las entradas del modelo y complementación del estudio. En los siguientes ítems se presentan los resultados obtenidos en las actividades sin detallar previamente y que son relevantes en el desarrollo de la investigación.

7.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DEL RÍO MOLINO

7.1.1. Información hidráulica del río Molino

No fue posible establecer una estación de monitoreo después de la confluencia de los ríos Molino y Ejido debido al difícil acceso, sin embargo era necesario determinar parámetros hidráulicos cerca a esta zona. Para ello se estableció una Estación Característica (EC) en una distancia presuntiva de 9.27 Km con coordenadas 2° 27' 23.38" N y 76° 37' 35.04" O, la cual se desarrolló con el software AutoCAD 2014 (Anexo 2).

Se presenta información hidráulica para las dos campañas, en las estaciones E1, E2, E3 y tributario T2, las cuales fueron medidas en campo a excepción de la Estación Característica (EC) correspondiente al tramo 4. Para esta se asumió la hidráulica por medio de iteraciones en el software AutoCAD 2014 hasta llegar al caudal de balance entre E3 y T2, utilizando la batimetría de la sección transversal del río Ejido, puesto que esta sección era más acorde a lo observado después de la confluencia de los dos ríos. EC se estimó de esta manera debido al difícil acceso al área de medición.

En las tablas 9 y 10 se presentan los resultados del comportamiento hidráulico de la corriente, del aforo realizado el 14 de septiembre de 2016 siendo la jornada 1.

Tabla 9. Información hidráulica de jornada 1.

PARÁMETRO HIDRÁULICO	PUNTO DE CALIDAD				
	E1	E2	E3	T2	EC
Caudal Q (m ³ /s)	0.451	0.658	0.753	0.540	1.293
Velocidad media Vm (m/s)	0.922	0.366	0.339	0.250	0.334
Profundidad media Pm (m)	0.174	0.387	0.344	0.280	0.475
Ancho T (m)	3.000	5.100	6.000	7.800	8.937
Área mojada A (m ²)	0.489	1.800	2.220	2.163	3.866
Perímetro mojado P (m)	6.092	10.478	12.812	15.790	18.247
Radio hidráulico R (m)	0.080	0.172	0.173	0.137	0.212
Pendiente m/1000m	13.7	8.3	10.8	*ND	7.9

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

*ND = Parámetro No determinado (Convención usada en el documento).

Tabla 10. Información hidráulica de vertimientos de jornada 1.

PARÁMETRO HIDRÁULICO	PUNTO DE CALIDAD	
	V1	V2
Caudal Q (m ³ /s)	0.079	0.147
Diámetro de tubería D (m)	1.473	0.737
Velocidad de flujo Vm (m/s)	1.200	2.600
Lámina de agua H (m)	0.120	0.140
Área mojada A (m ²)	0.066	0.056

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

En las tablas 11 y 12 se presentan los resultados tras procesamiento de la información del comportamiento hidráulico de la corriente subdividida en cuatro tramos, correspondiente al aforo realizado el 13 de octubre de 2016 siendo la jornada 2.

Tabla 11. Información hidráulica de jornada 2.

PARÁMETRO HIDRÁULICO	PUNTO DE CALIDAD				
	E1	E2	E3	T2	EC
Caudal Q (m ³ /s)	0.174	0.230	0.455	0.537	0.993
Velocidad media Vm (m/s)	0.629	0.164	0.220	0.281	0.343
Profundidad media Pm (m)	0.126	0.344	0.348	0.261	0.378
Ancho T (m)	2.400	5.150	6.120	7.85	8.784
Área mojada A (m ²)	0.276	1.399	2.066	1.912	2.891
Perímetro mojado P (m)	4.850	10.401	12.644	15.907	17.834
Radio hidráulico R (m)	0.057	0.134	0.163	0.120	0.162
Pendiente m/1000m	13.7	8.3	10.8	ND	7.9

Fuente: Alvear & Granda, 2017

Tabla 12. Información hidráulica vertimientos de jornada 2.

PARÁMETRO HIDRÁULICO	PUNTO DE CALIDAD	
	V1	V2
Caudal Q (m ³ /s)	0.055	0.098
Diámetro de tubería D (m)	1.473	0.737
Velocidad de flujo Vm (m/s)	0.946	2.165
Lámina de agua H (m)	0.110	0.120
Área mojada A (m ²)	0.058	0.045

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Tras información presuntiva de las descargas de vertimientos cerca del puente de Tulcán, con base en caudales aforados se tienen 0.001 m³/s y 0.005 m³/s para colegio Técnico Industrial y residencias femeninas Unicauca respectivamente, por ello anteriormente se especificó que estos se descartan para el estudio, por no ser significativo su caudal aun si se plantea unión de los mismos en vertimiento equivalente.

7.1.2. Información Físicoquímica y biológica del río Molino

En las siguientes tablas se presenta la información físicoquímica y biológica obtenida tras procesamiento de información de campo y resultados de laboratorio de la CRC para las campañas de monitoreo.

En la tabla 13 se presenta resumen de resultados de los datos de parámetros físicoquímicos y biológicos de la jornada 1 realizada el 14 de septiembre de 2016.

Tabla 13. Información físicoquímica y biológica río Molino jornada 1.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO	PUNTO DE CALIDAD					
	E1	E2	V1	V2	E3	T2
Color (UPC)	31	38	654	716	266	543
Turbiedad (UNT)	2.4	3.6	98.7	178	6.9	36.7
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	27.2	28.8	121	132	60.9	115
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	24.2	27.8	110	120	57.7	107
Conductividad (µs/cm)	72.9	191.7	836	940	482	870
Temperatura agua (°C)	15.9	17.3	21.7	21.9	19	19.6
pH (Unidades)	7.87	7.39	7.89	7.87	8	7.64
OD (mg/L)	7.75	6.62	ND	ND	5.26	3.26
OD (%Saturación)	98.288	85.432	ND	ND	70.167	43.877
DBO (mg/L)	<0.9	<0.9	96.8	170	9.1	138
DQO (mg/L)	32.7	13.2	130	260	42.8	213
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ N/L)	0.43	0.51	8.36	9.21	4.1	7.57
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ N/L)	<0.01	0.02	0.37	0.61	0.12	0.18
Ortofosfatos (mg PO ₄ ⁻ P/L)	<0.02	0.03	5.21	7.12	2.1	3.7
SST (mg/L)	43.9	47.3	48	54.3	27.5	21.2
Coliformes Totales (UFC/100ml)	5300	6100	13200000	14100000	3800000	10100000
Coliformes Fecales (UFC/100ml)	600	900	6600000	7300000	2000000	5700000

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

En la tabla 14 se presenta resumen de resultados de los datos de parámetros fisicoquímicos y biológicos de la jornada 2 realizada el 13 de octubre de 2016.

Tabla 14. Información fisicoquímica y biológica río Molino jornada 2.

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO	PUNTO DE CALIDAD					
	E1	E2	V1	V2	E3	T2
Color (UPC)	17	2	33	623	55	522
Turbiedad (UNT)	5.9	3.2	2.6	91.8	6.1	27.1
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	33.9	45.3	53.4	79.5	61.1	76
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	23.9	28	222	202	106	172
Conductividad (µs/cm)	66.1*	ND	ND	ND	233*	ND
pH (Unidades)	8.03	7.76	7.26	7.64	7.21	7.46
OD (mg/L)	7.69	6.22	ND	ND	0.98	0.17
OD (%Saturación)	98.636	82.223	ND	ND	13.781	2.390
DBO (mg/L)	1.9	13.4	41.1	172	67.9	109
DQO (mg/L)	< 15	18.8	101	448	129	289
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ N/L)	0.65	1.59	1.41	9.05	1.59	5.87
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ N/L)	0.01	0.02	0.29	0.09	0.02	0.05
Ortofosfatos (mg PO ₄ ⁻ P/L)	< 0.02	0.12	2.69	3	1.13	2.36
SST (mg/L)	27.7	12.5	12.7	250	16	70
Coliformes Totales (UFC/100ml)	3900	12200	63000	13400000	97000	7600000
Coliformes Fecales (UFC/100ml)	100	800	3000	4100000	14000	680000

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

* Datos asumidos evaluando condiciones similares de alcalinidad y dureza. Tomados de informes de calidad del agua del río Molino de 2013 y 2015 suministrado por la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC. Presentados en anexos digitales.

7.2. TRAMOS DEL RÍO MOLINO A MODELAR EN LA ZONA URBANA

Tras la unión de los vertimientos V1 y V2 quedando establecido como el punto de calidad denominado vertimiento equivalente (V_{Eq}) localizado a los 6.456 Km, se realizaron los cálculos necesarios utilizados como datos de entrada al modelo para las respectivas campañas de monitoreo como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Parámetros calculados para vertimiento equivalente V_{Eq} .

PARÁMETRO	JORNADA 1	JORNADA 2
Q (m ³ /s)	0.225	0.152
T (°C)	21.830	22
OD (mg/L)	0	0
DBO ₅ (mg/L)	144.430	125.103

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Para la calibración se requiere tener definido una delimitación del área de estudio, a continuación, se presenta la topología del río Molino en la zona urbana del municipio de Popayán de los tramos seleccionados para modelar.

Tabla 16. Topología de la cuenca río Molino.

PUNTO DE CALIDAD	LUGAR	ABSCISA (Km)	COTA (Km)
E1	vereda Pueblillo	K0+000	1815.200
T1	Q. La Cantera	K2+546	1768.680
E2	Bajo puente del Humilladero, cerca de la CRC	K4+996	1749.430
V_{Eq}	Vertimiento equivalente Aeronáutica + Pandiguando	K6+456	1717.522
E3	Río Molino antes de río Ejido, Barrio Junín	K8+776	1710.139
T2	Río Ejido, Barrio Junín	K8+826	1716.563
R1	Desembocadura en el río cauca	K9+636	1710.139

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Con la topología del río Molino, en la figura 18 se delimitan mediante diferentes colores los tramos establecidos para la aplicación del modelo de simulación matemática de calidad.

La descripción y abscisado final e inicial de los tramos se evidencian en la tabla 16, donde se presentan también los colores representantes a cada tramo y su respectiva longitud. Además, en figura 19 la representación del esquema de tramos determinados.

Figura 18. Tramos determinados para el área de estudio.



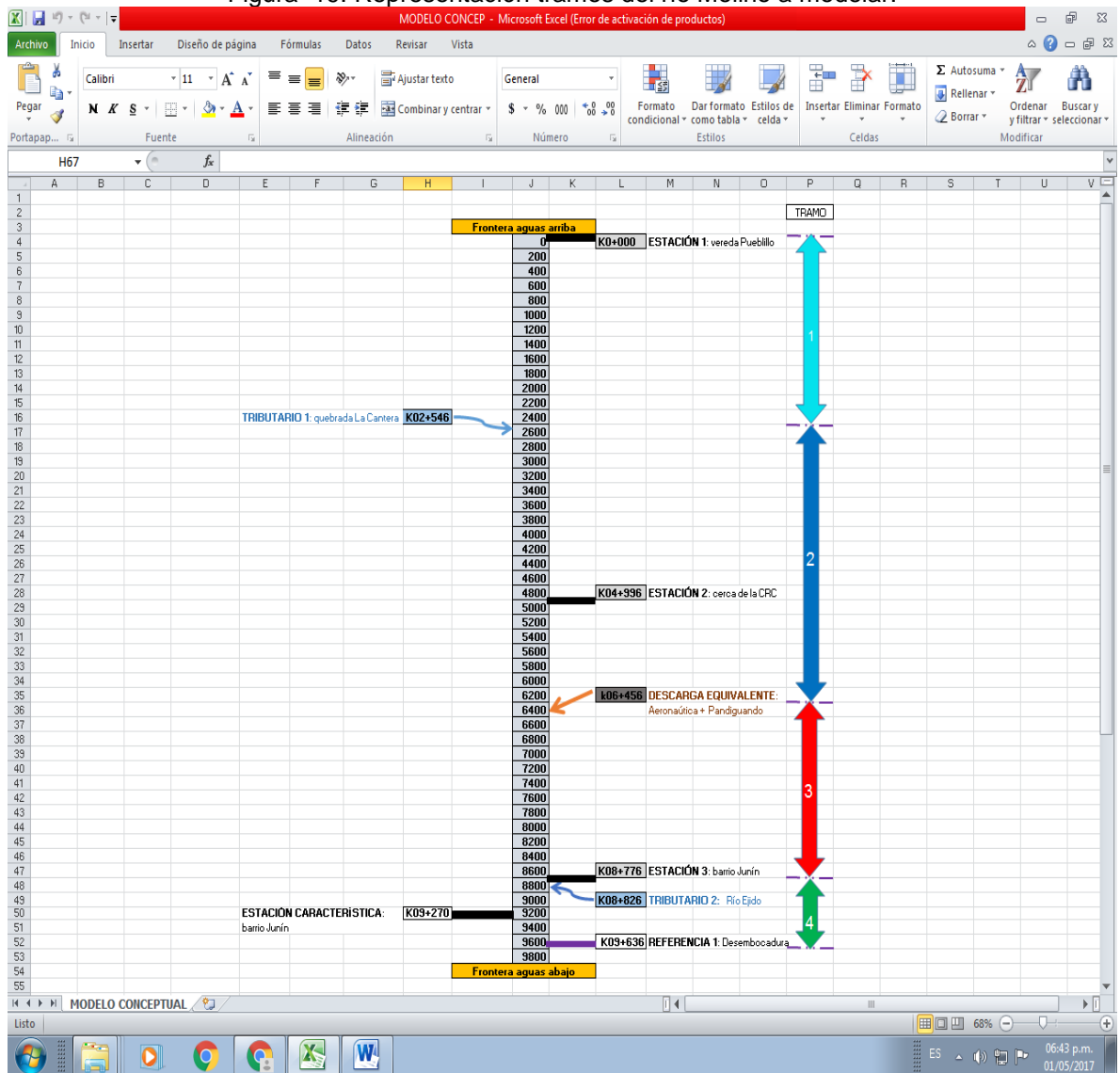
Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Tabla 17. Descripción tramos del río Molino.

TRAMO	COLOR	DESCRIPCIÓN	ABSCISA INICIAL- ABSCISA FINAL (Km)	LONGITUD (Km)
1	Cyan	De E1: vereda Pueblillo hasta T1: quebrada La Cantera	0 – 2.546	2.546
2	Blue	De T1: quebrada La Cantera hasta V_{Eq} . Aeronáutica + Pandiguando	2.546 – 6.456	3.91
3	Red	De V_{Eq} . Aeronáutica+ Pandiguando hasta E3: río Molino antes de río Ejido	6.456 – 8.776	2.32
4	Green	De E3: río Molino antes de río Ejido hasta E4: desembocadura en el río Cauca	8.776 – 9.636	0.86

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 19. Representación tramos del río Molino a modelar.



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

7.3. SELECCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CALIDAD DEL AGUA

Debido a que el modelo a seleccionar debe satisfacer algunas condiciones para que su escogencia sea confiable, a continuación se presentan algunas características generales de las cuales depende la viabilidad de un modelo, según Lozano G, et al 2001-2003:

- Simulación de los parámetros básicos de calidad del agua como Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno, ciclos del Nitrógeno y el Fósforo, principalmente, además de tener en cuenta la reducción de la concentración de contaminantes por el efecto de entradas de flujo adicionales.
- Flexibilidad, es decir, poder adaptarse a las condiciones de diferentes corrientes, puesto que sería algo no viable económica y técnicamente utilizar un modelo de simulación diferente para cada corriente.
- Aplicabilidad. Se prefieren los programas que hayan sido empleados en otras regiones similares a la de aplicación del modelo.
- Simplicidad en su ejecución y precisión en sus resultados. Un modelo con entradas de datos o procesos más complejos, necesariamente no es más preciso.
- Viabilidad económica. No se justifica hacer una gran inversión para un programa que tendría casi los mismos resultados de un programa más económico.
- Aprovechamiento de la información hidrométrica, meteorológica y de calidad del agua, disponible en forma histórica o actual, para los datos de entrada, lo cual se refleja en disminución de la cantidad de datos de entrada y, por tanto, de los costos, facilidad para realizar modelaciones con datos históricos y verificación más efectiva del modelo.

Con lo mencionado y a saber que existen diversos modelos se buscó que el seleccionado cumpliera con la mayoría de las características, según Bowie et al., 1985, para determinar la capacidad de asimilación de una corriente, se debe tener en cuenta su habilidad para mantener las concentraciones de Oxígeno Disuelto. Estas concentraciones son controladas por la Reaireación Atmosférica, la Fotosíntesis, la Respiración de animales y plantas, la Demanda de Oxígeno de los Sedimentos, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, el Proceso de Nitrificación, la Salinidad y la Temperatura. El modelo QUAL2K incluye la mayor cantidad de relaciones posibles entre los factores mencionados anteriormente y su efecto sobre el Oxígeno Disuelto de la corriente.

En tanto, aunque el modelo QUAL2K cumple con mejores características a su vez resulta complejo, por requerir de muchos parámetros que no fueron posibles de determinar debido principalmente al presupuesto; esto impactó negativamente en el desarrollo de más campañas de monitoreo, por lo cual la información obtenida no fue suficiente para entradas a dicho modelo.

Finalmente se seleccionó el modelo simplificado de Streeter & Phelps para la determinación de la capacidad asimilativa del río Molino en la zona urbana de Popayán, diseñando una hoja de cálculo en el software Microsoft Excel 2013 a partir de Aguirre,

2016. Por tanto, los parámetros fisicoquímicos y biológicos mencionados anteriormente que son usados en modelación de la calidad del agua, para este modelo disminuyen, pero los que no significan entradas del modelo se emplearon para la determinación de los índices de calidad del agua, lo que se desarrolla más adelante.

7.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO STREETER & PHELPS

Las determinaciones de oxígeno disuelto son la base del análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), por tanto, son el principio para las mediciones más importantes que se usan para evaluar la magnitud de la contaminación de los desechos domésticos e industriales. La DBO es el criterio más importante usado para el control de la contaminación de las corrientes donde la carga orgánica se debe restringir para mantener los niveles deseados de oxígeno disuelto (Sawyer et al, 2001)

La calibración del modelo se realizó con la elección de la jornada 2 como situación crítica por representar caudal de estiaje, donde las condiciones del cuerpo de agua van a presentar mayor alteración al ser receptor de cargas contaminantes, puesto que si se calibra con alto caudal se ve interferido por la dilución de los contaminantes a causa de descargas pluviales y la lluvia que cae directa sobre el cuerpo de agua, en anexos digitales se evidencia la calibración de la jornada 1 y en anexo 3 se muestran las curvas de OD y DBO₅ obtenidas las cuales no representan un buen ajuste.

En esta sección sólo se mostrará la calibración del modelo Streeter & Phelps con resultados obtenidos de la jornada 2 (anexo 3). Para ello se ensayó varias veces con diferentes constantes de reaeración y de desoxigenación, de acuerdo a los métodos para su determinación establecidos en los ítems 6.6.1 y 6.6.2., de esta forma se esperaba ajustar los datos obtenidos en campo con los modelados. Finalmente se estimó las constantes de desoxigenación y reaeración correspondiente a los valores adoptados por cada tramo, realizando promedio entre 2 o más métodos. En la tabla 17 se presentan dichas constantes así como su corrección en el modelo denominada K corregida, realizada por ecuación 1 y 5 según corresponda (en anexos digitales se presenta como se asumieron las constantes).

Tabla 18. Constantes de desoxigenación K1 y reaeración K2 adoptadas y corregidas.

TRAMO	K1 (d ⁻¹)		K2 (d ⁻¹)	
	ADOPTADA	CORREGIDA	ADOPTADA	CORREGIDA
1	1.852	1.654	11.276	10.427
2	2.000	1.859	1.643	1.562
3	1.181	1.16255	7.214	7.135
4	1.000	1.071	10.100	10.591

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

El caudal observado en un determinado periodo se utiliza cuando se desea calibrar el modelo, esto es, ajustar los coeficientes del modelo, para que los datos simulados sean lo más cercanos posible a los datos observados (medidos) en el curso de agua en el periodo en análisis (Sperling, 2012), en las figuras 20 y 21 se presentan las curvas para oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno DBO₅ con respecto a los resultados

obtenidos en campo para los vertimientos puntuales y los que arroja el ajuste del modelo dando como dato inicial el caudal observado de $0.174 \text{ m}^3/\text{s}$ de la estación 1.

En la figura 20 se muestra los resultados de la calibración del modelo con las ecuaciones de Streeter & Phelps para OD, para ello se partió con el valor del caudal en la primera estación (caudal del tramo 1) ubicada en la vereda Pueblillo, para posteriormente encontrar los demás valores en los tramos a partir de balances de masa.

El caudal del tramo 2 fue estimado por balance de masa sugerido por Aguirre, 2016, debido a la falta de datos en T1, tomando como base las mediciones de los parámetros hidráulicos de la quebrada La Cantera, en aforos realizados posteriores a las fechas establecidas para los monitoreos por razones explicadas en la metodología. En los tramos 3 y 4 se asumió el caudal de acuerdo a balances de masa, con la descarga equivalente del barrio Pandiguando y el T2 río Ejido respectivamente, debido a la proximidad de las descargas.

La modelación del OD y DBO se efectuó a partir de valores de E1 tomados durante medición en campo y reporte de laboratorio, a partir de esto se modelo de acuerdo a ecuaciones de Streeter & Phelps, por ello en el primer tramo no se presenta gran variación en la curva de OD.

El valor de comparación en el segmento 2 de la modelación es la E2 del monitoreo, ubicada cerca del edificio de la CRC en el km 4,996 del abscisado, para el cual el valor de OD es de 6.22 mg/L y el valor arrojado en la calibración del modelo de Streeter & Phelps para la misma distancia es de 6.631 mg/L , por lo que no se observa gran discrepancia en los niveles de OD. Esta diferencia mínima puede estar ligada a las pequeñas descargas que no se incluyeron en el modelo, como por ejemplo las del sector de Tulcán; sin embargo, a lo largo del cauce se presentan otras descargas de bajo caudal, que conjuntamente podrían ser significativas en la interpretación de los resultados del modelo. El segmento 2 de modelación no tiene un decaimiento notorio en comparación con los presentados en los tramos siguientes, a raíz de la magnitud de las descargas presentadas.

El tramo 3 empieza en el punto de descarga equivalente en la abscisa 6.456 Km en donde el río viene con OD de 6.346 mg/L y debido al vertimiento baja rápidamente a 3.802 mg/L , por la DBO presentada en la mezcla de 51.510 mg/L se sigue consumiendo oxígeno del cuerpo de agua hasta llegar al barrio Junín donde se observa un OD de 0.98 mg/L y el modelado en E3 en la misma abscisa es de $1,22 \text{ mg/L}$.

Luego de la mezcla con el río Ejido, en el tramo 4 decrecen considerablemente los valores de oxígeno hasta el punto de llegar a rangos muy próximos a cero: en el punto antes de la desembocadura del río Cauca con el río Cauca en el km 9.636 llega con un nivel de OD de 0.162 mg/L .

En la figura 21 se muestran resultados de la modelación de la DBO, la estimación que se tenía sobre T1, acerca de suponer condiciones de carga contaminante similares a las presentadas en el tramo 1 del río Molino, no resultó ser la apropiada, por lo que la no medición de los parámetros repercute notoriamente en los valores arrojados por el modelo en el tramo 2 de la modelación de la DBO. Análogamente se presenta una serie de pequeñas descargas no medidas, por lo cual el modelo requiere de más ajuste teniendo en cuenta estas condiciones. En este segmento de modelación se observa una diferencia cercana a 10 mg/L en la DBO observada vs la DBO del modelo.

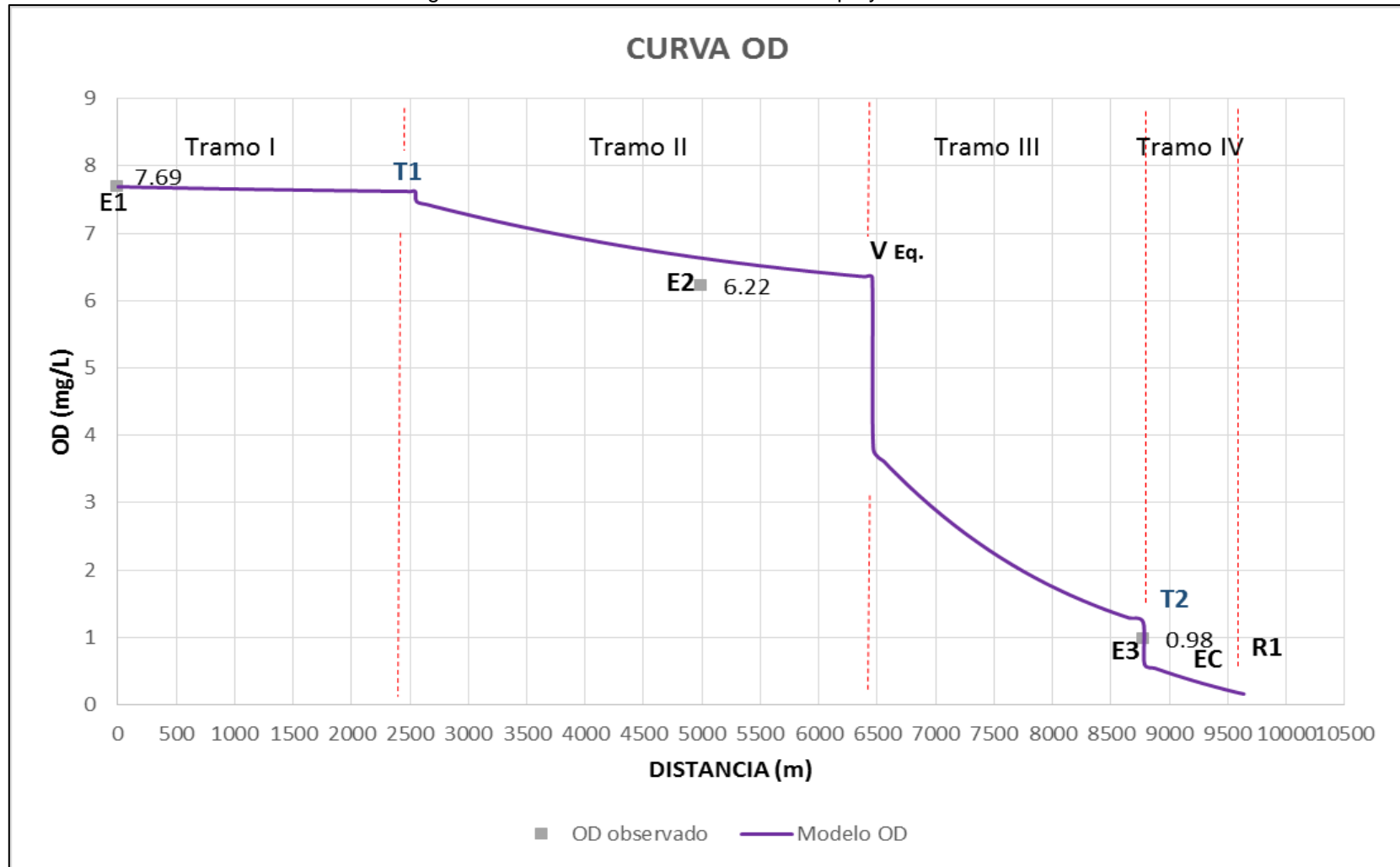
En el tramo siguiente se observa una mayor discordancia entre el dato medido y el arrojado por el modelo, la diferencia es mayor a 20 mg/L. Uno de los principales inconvenientes se debió a que los datos no fueron tomados de forma simultánea en todas los puntos de calidad, puesto que no se contó con más equipo y apoyo logístico, lo cual influyó en que los datos de las primeras estaciones se tomaron en horas de la mañana y las demás en horas pico, también se evidenció que son necesarias más estaciones de monitoreo, sobre todo en la cercanía a las descargas de La Aeronáutica y la del barrio Pandiguando, por lo cual la calibración del modelo mostrará una tendencia a mejorar a medida que se tenga mayor y mejor información.

El que no se haya dado un buen ajuste en la calibración de la curva de DBO justifica también que no se haya aplicado el modelo QUAL2K, considerando las falencias en la determinación de las constantes de reaireación y desoxigenación.

Lo anterior se puede sustentar desde las limitaciones en el desarrollo del estudio; en primer lugar, el presupuesto estimativo para las jornadas de monitoreo (en anexo 4 se presentan los costos ejecutados en la investigación), en segundo lugar las condiciones atmosféricas no fueron idóneas, lo que repercutió en no poder planificar un tercer monitoreo, para concluir el estudio, dado que se esperaba calibrar en condiciones climáticas similares preferiblemente en caudal de estiaje (en tanto en el lapso de tiempo de ejecución de la investigación se presentaron lluvias en repetidas ocasiones). Popayán es bimodal por tanto se presentan dos épocas de sequía y dos de lluvia.

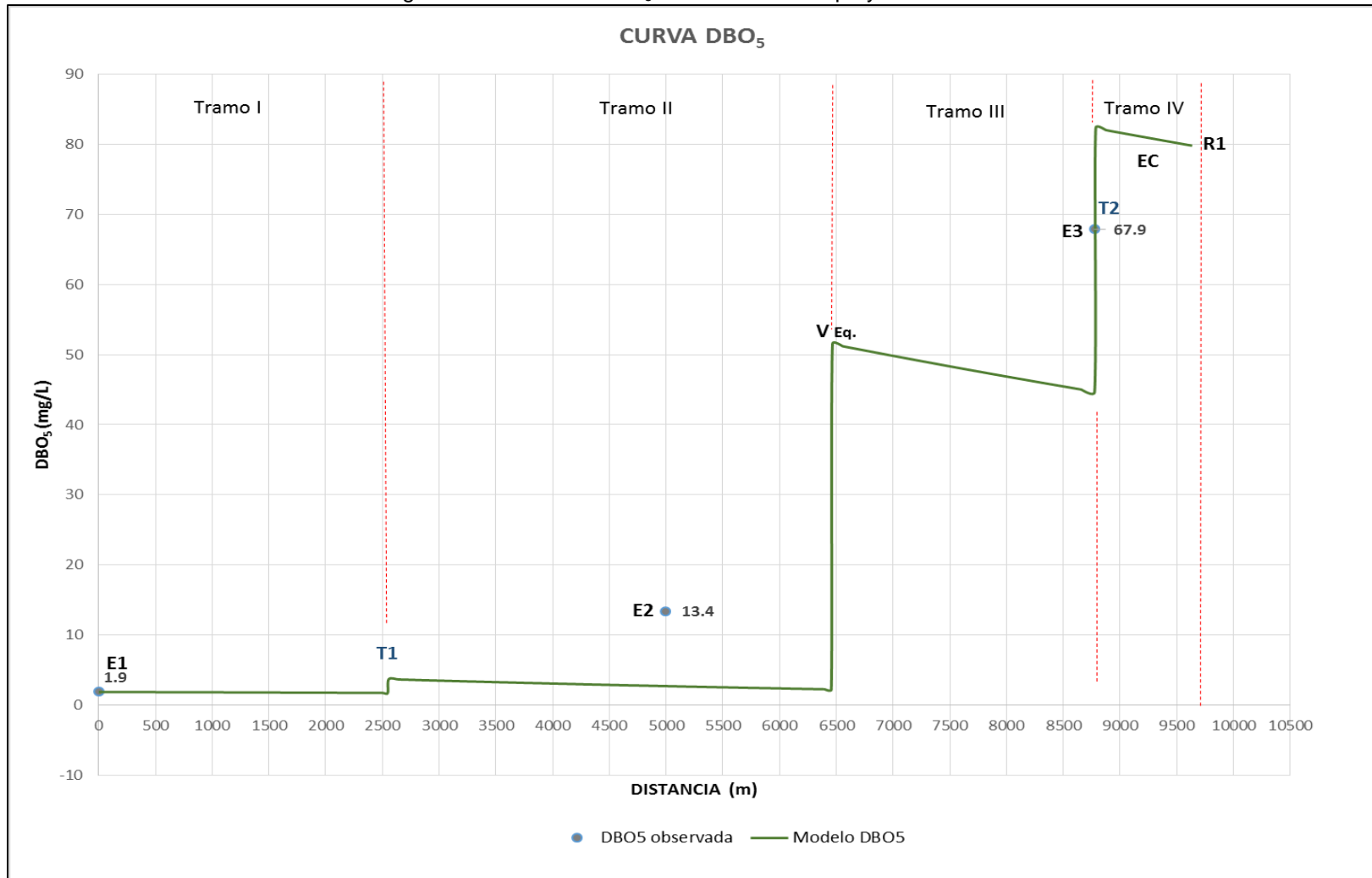
Cabe mencionar que la calibración realizada utilizando la jornada 2 es relativamente propicia por representar condiciones de caudal de estiaje, y aunque se esperaba dos jornadas en las mismas condiciones, la jornada 1 no fue lo esperado, resultando con altos caudales, lo que influye notoriamente en la dilución de contaminantes, motivo por el cual la calibración de la jornada 1 se optó por su no representación en este documento.

Figura 20. Curva de OD con datos de campo y modelados.



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 21. Curva de DBO₅ con datos de campo y modelados.



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

7.5. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN ICOS

Dado que en la investigación fue posible obtener varios parámetros que finalmente todos no fueron aplicados en el modelo de Streeter & Phelps, se decidió estimar la calidad del agua mediante los índices de contaminación (ICOS). Para calcular los ICOS se utilizaron algunos de los parámetros previamente obtenidos en las campañas de monitoreo y obtenidos por el laboratorio de la CRC, con los cuales se realiza una comparación de su comportamiento y se analiza su influencia en la calidad del agua del río Molino.

- **ICOMI**

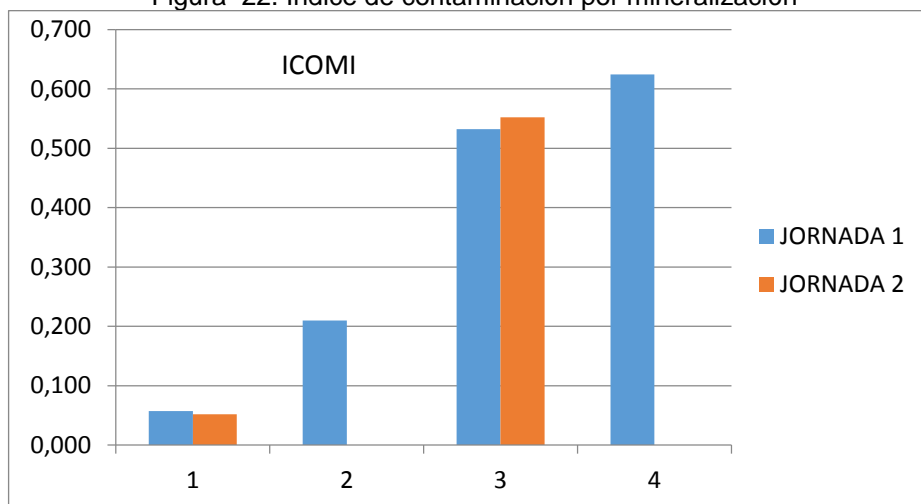
Para el cálculo de los índices de contaminación por mineralización no se contó con la medición de conductividad en la jornada 2, por lo tanto, solo se presentan valores de este índice para los intervalos 1 y 3, cuyos valores de este parámetro fueron tomados de los estudios realizados por la CRC.

Tabla 19. Índice de contaminación por mineralización.

TRAMO	ICOMI Jornada1	GRADO DE CONTAMINACIÓN	ICOMI Jornada2	GRADO DE CONTAMINACIÓN
1	0.057	Muy baja	0.052	Muy baja
2	0.210	Baja	ND	ND
3	0.532	Media	0.552	Media
4	0.624	Alta	ND	ND

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 22. Índice de contaminación por mineralización



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

De acuerdo con Ramírez et al.,1997 la conductividad refleja la mineralización de las aguas y conjuga los cationes de sodio, potasio, calcio, magnesio, así como los aniones carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros, principalmente. Se observan correlaciones significativas entre estas variables y sólidos disueltos, dureza y alcalinidad. De esta manera se asumieron los valores de conductividad de los tramos 1 y 3 en la jornada 2,

observando en los informes de calidad (CRC, 2014) un comportamiento similar de dureza y alcalinidad.

Como era de esperarse la contaminación por mineralización crece notoriamente en ambas jornadas a partir del tramo 3, debido a las descargas ubicadas en los sectores de la Aeronáutica Civil y el barrio Pandiguando, donde los valores de alcalinidad, dureza y conductividad son elevados por la cantidad de sólidos disueltos, iones y sales presentes en las descargas.

El fenómeno de mineralización en aguas está ampliamente ligado a la capacidad del cuerpo de agua que se estudia de disolver tanto cationes como aniones y esto se puede ver reflejado en la cantidad de sólidos disueltos que se pueden presentar y que incrementa o disminuye con la variación misma del resultado final del índice de contaminación (Cañas 2006).

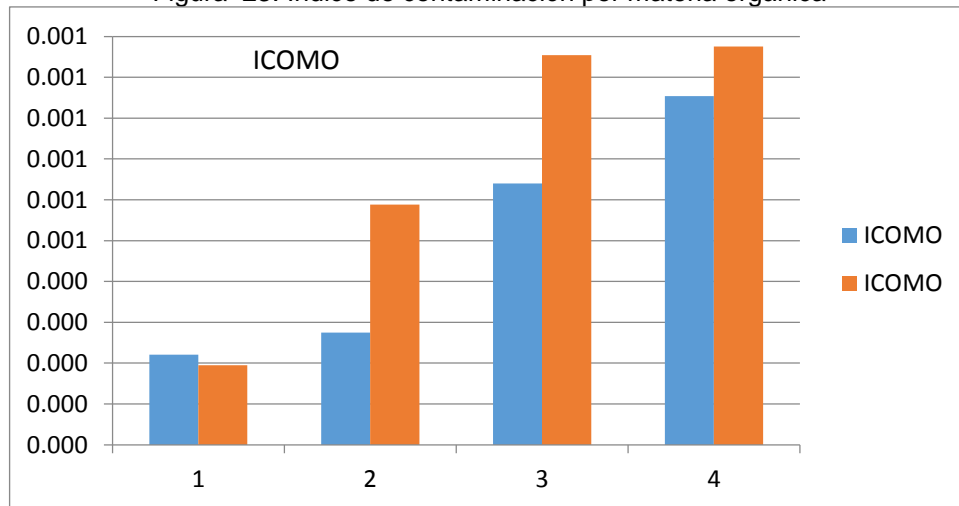
- **ICOMO**

Tabla 20. Índice de contaminación por materia orgánica.

TRAMO	ICOMO Jornada1	GRADO DE CONTAMINACIÓN	ICOMO Jornada2	GRADO DE CONTAMINACIÓN
1	0.221	Baja	0.195	Muy baja
2	0.275	Baja	0.588	Media
3	0.640	Alta	0.954	Muy alta
4	0.854	Muy alta	0.975	Muy alta

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 23. Índice de contaminación por materia orgánica



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

El ICOMO se expresa de acuerdo a diferentes variables fisicoquímicas: DBO, Coliformes Totales y porcentaje de saturación de oxígeno, las cuales, en conjunto recogen los efectos distintos de la contaminación orgánica (Ramírez et al., 1997).

En la primera jornada el ICOMO a excepción del tramo 1 es más bajo que en la jornada dos, relacionado con el efecto de la dilución de carga contaminante asociada a las lluvias. Al inicio de la zona de estudio cerca a la bocatoma del acueducto de Tulcán, el río Molino presenta buenas condiciones en cuanto a calidad; observando los resultados del índice para las dos jornadas en el primer tramo, se presentan valores de OD de 7.75 mg/L para jornada 1 y 7.69 mg/L para jornada 2.

La contaminación por materia orgánica en el tramo 2 posiblemente está determinada por pequeñas descargas como las del sector de Tulcán que aportan este tipo de polución. Análogamente los siguientes tramos evidencian ICOMI elevado debido a la descarga equivalente de Aeronáutica y Pandiguando al inicio del tramo 3, que aporta un caudal de 152 L/s y una DBO de 125.103 mg/L en la jornada 2, incrementando significativamente la contaminación en el cuerpo de agua.

El río Ejido confluye con el río Molino al inicio del tramo 4, produciendo efectos considerables en el aumento del índice debido valores de OD cercanos a 0, DBO₅ de 109 mg/L y un caudal de más de 530 L/s, para la jornada 2.

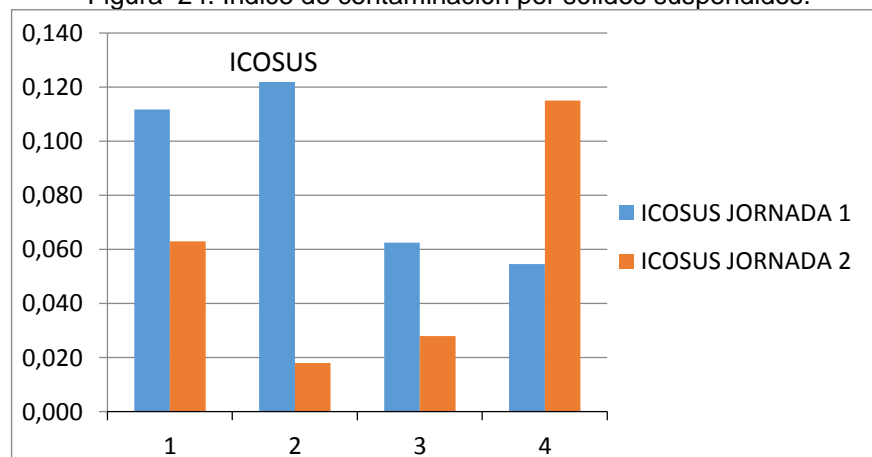
- **ICOSUS**

Tabla 21. Índice de contaminación por sólidos suspendidos.

TRAMO	ICOSUS Jornada1	GRADO DE CONTAMINACIÓN	ICOSUS Jornada2	GRADO DE CONTAMINACIÓN
1	0.112	Muy baja	0.063	Muy baja
2	0.122	Muy baja	0.018	Muy baja
3	0.063	Muy baja	0.028	Muy baja
4	0.055	Muy baja	0.115	Muy baja

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 24. Índice de contaminación por sólidos suspendidos.



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

A pesar de que en las dos jornadas difieren en los valores del ICOSUS por tramos, a lo largo de la zona de estudio este índice no presenta contaminación relevante como se muestra a continuación:

Los valores del ICOSUS son próximos a cero en ambas jornadas lo que según Cañas 2006, demuestra que los valores de las lecturas de cantidad de sólidos suspendidos totales son nulas o que de existir en el cuerpo de agua, sus cantidades presentan valores por debajo del mínimo detectable y no generaran problema alguno para la salud o el desarrollo de las actividades diarias de las personas que estén en contacto con el agua en la zona de estudio.

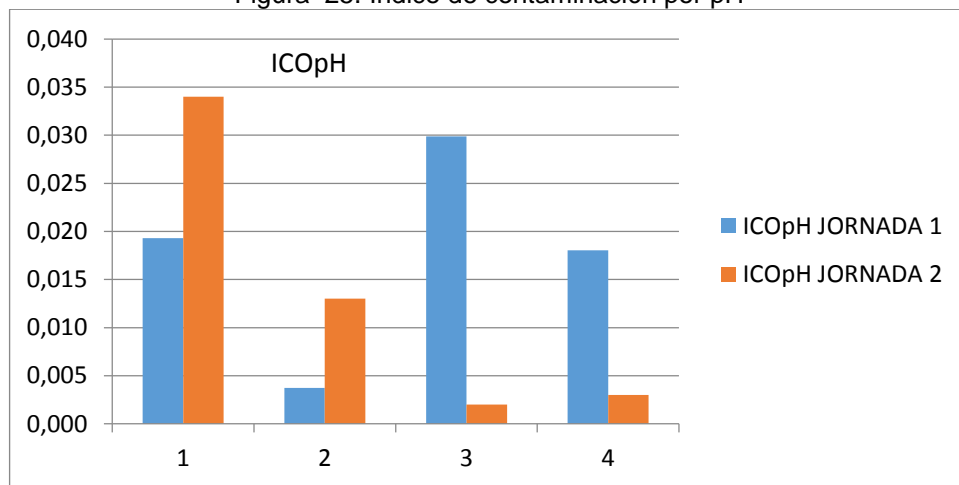
- **ICOpH**

Tabla 22. Índice de contaminación por pH

TRAMO	ICOpH Jornada1	GRADO DE CONTAMINACIÓN	ICOpH Jornada2	GRADO DE CONTAMINACIÓN
1	0.019	Muy baja	0.034	Muy baja
2	0.004	Muy baja	0.013	Muy baja
3	0.030	Muy baja	0.002	Muy baja
4	0.018	Muy baja	0.003	Muy baja

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 25. Índice de contaminación por pH



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Los valores del pH medidos en la zona de estudio fueron básicos, es decir próximos a 7, lo que explica el comportamiento de los índices de este parámetro fueran tan bajos, muy cercanos a cero como se ve en la figura 25, esto para ambas jornadas de estudio.

7.6. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LA FUENTE HÍDRICA

La necesidad por implementar estrategias para mitigar el impacto causado a los cuerpos de agua por las actividades antropogénicas, debe ser un tema de gran interés a nivel sociocultural y económico, debido al comportamiento destructivo al que es sometido el recurso hídrico donde se provoca un límite de deterioro, generando consecuencias que pueden afectar a la comunidad en general y por ende a corto, mediano o largo plazo se va a requerir de financiamiento para que se tomen acciones en pro de una adecuada ordenación y manejo del recurso. Según Vera, 2007 el uso de modelos de calidad del agua ha ido ganando importancia como herramienta para contribuir a la planificación integral de los recursos hídricos, puesto que al contar con un modelo confiable calibrado y confirmado, éste puede ser usado para representar esquemas de gestión e intervención directa. De esta forma, se convierte en una herramienta útil de planeación que puede soportar la toma de decisiones en problemas específicos que se quieran solucionar y estén afectando la calidad del agua de una corriente específica.

En este sentido se plantean escenarios de simulación del modelo Streeter & Phelps, para esto se definió la variación de caudales en el cuerpo receptor, (condiciones de sequía) y también se alteró sustancialmente la concentración de la DBO en la descarga equivalente y en T_2 , conforme con la legislación Colombiana; teniendo como base la resolución 0631 de 2015, la nueva norma de vertimientos que reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, actualiza el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años) respondiendo a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país (MADS, 2015). Además se sugieren alternativas de saneamiento en donde se recupere sustancialmente las condiciones de calidad del agua del río Molino.

El proceso para realizar los escenarios de simulación se estableció en los sitios críticos tramo 3 y 4, para analizar distintos aspectos de interés del comportamiento de la calidad del agua en la fuente hídrica. En la tabla 23 se presenta la descripción de los eventos de simulación.

Tabla 23. Escenarios de simulación del modelo.

ESCENARIO	ESCENARIO DE SIMULACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	Ajustar DBO_5 con cumplimiento de la norma mencionada en los vertidos.	Los valores de la DBO_5 en la descarga equivalente y en T_2 son 125.103 y 109 mg/L respectivamente. Con esta alternativa se pretenden ajustar estos valores a 90 mg/L mediante el tratamiento de estas aguas servidas.
2	Caudal crítico en el río y descargas no controladas.	Este escenario simula la calidad del río en condiciones de caudal de estiaje (disminución del caudal inicial del modelo de jornada 2 en un 20%)

		con descargas sin tratamiento en T2 y V_{Eq} .
3	Caudal crítico en el río, sin vertimientos.	Caudal del río en estiaje (disminución del caudal inicial del modelo de jornada 2 en un 20%), considerando el vertimiento equivalente nulo y de igual forma el T2, es decir cuando se construyan interceptores y emisor final de alcantarillado municipal a la PTAR, proyectada en el Valle del Ortigal.

Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Para calificar la incidencia de los escenarios de simulación en la fuente hídrica se tuvo en cuenta lo siguiente:

Tabla 24. Rangos de concentración de oxígeno disuelto y consecuencias ecosistémicas frecuentes.

[OD]. mg/L	CONDICIÓN	CONSECUENCIAS
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios.
0 - 5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles.
5 - 8	Aceptable	[OD] adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.
8 - 12	Buena	
> 12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética.

Fuente: Goyenola, 2007.

En la figura 26 se representan los escenarios planteados comparando la curva del modelo de OD para los valores en campo; en primer lugar se puede observar que con la implementación del escenario 1 representado con curva de color verde, se logra incrementar el oxígeno del tramo 3 en adelante, haciendo la comparación con el valor de oxígeno en E3 del modelo original dado en la curva morada, se gana una concentración 1.199 mg/L de oxígeno pasando de 1.225 mg/L a un valor de 2.454 mg/L, es decir se incrementa en más del 100%, pero según Goyenola, 2007 se encuentra en una condición de Hipoxia donde hay desaparición de organismos y especies sensibles; en el tramo 4 en la desembocadura del río Molino en el río Cauca pasa de una concentración de oxígeno de 0.162 a 0.963 mg/L, este escenario genera un incremento de la concentración de oxígeno disuelto que incrementa evitando que el río llegue a condiciones anóxicas y continúa en condición de hipoxia. No obstante no se puede garantizar concentraciones de O_2 adecuadas para la biodiversidad aunque se cumpla con la normatividad.

En segundo lugar con el escenario 2 representado con la curva azul oscuro, al obtener un caudal de 0.139 m^3/s correspondiente a la disminución en un 20% del valor de caudal inicial medido 0.174 m^3/s , y conservando las cargas actuales del V_{Eq} y del T2, sin llevarse control, se obtiene que a lo largo del cauce se va a presentar una disminución significativa de oxígeno disuelto sin llegada a la desembocadura del río Molino en el río Cauca es decir 0 mg/L, siendo este el escenario más crítico por generar condición de anoxia donde se presenta la muerte de organismos aerobios.

Finalmente, en el escenario 3 que se muestra con la curva azul claro, considerando de igual forma la disminución del caudal que en escenario 2, pero garantizándose vertimiento y tributario nulos al construirse interceptores y emisor final de alcantarillado municipal a la PTAR, proyectada en el Valle del Ortigal, se obtiene un escenario propicio para la flora y la fauna en cuanto a que se elimina la posibilidad de condiciones anaeróbicas, llegando un oxígeno disuelto de 6.616 mg/L al final del área de estudio cuya condición según Goyenola, 2007 indica que la concentración de oxígeno [OD] es adecuada para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos, observándose en la curva como el comportamiento del oxígeno disuelto varía positivamente en la corriente, en tanto este escenario sería el idóneo para la fuente hídrica.

Los escenarios permitieron obtener consideraciones dadas por Sawyer et al, 2001 expresando que en los desechos líquidos, el oxígeno disuelto es el factor que determina que los cambios biológicos sean producidos por organismos aeróbicos y anaeróbicos. Los aeróbicos usan oxígeno libre para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica y forman productos finales inocuos, mientras que los anaeróbicos llevan a cabo la oxidación mediante la reducción de algunas sales inorgánicas como sulfatos, y los productos finales generalmente son muy perjudiciales. Puesto que las dos clases de organismos están propagados en la naturaleza, es muy importante que se mantengan condiciones favorables para los organismos aeróbicos (condiciones aeróbicas); de otra manera, proliferan los organismos anaeróbicos y se generan condiciones nocivas. Consecuentemente, para mantener las condiciones aeróbicas es vital hacer mediciones de oxígeno disuelto en las aguas naturales que reciben material contaminante y en los procesos aeróbicos de tratamiento que se realizan para purificar las aguas residuales domésticas e industriales.

En relación a las alternativas viables que se pueden llevar a cabo para contribuir a la recuperación del río Molino, y teniendo en cuenta lo expuesto por Van der Steen, 2006 al considerar que, el modelo tradicional de gestión de las aguas urbanas no ha logrado distinguir entre las diferentes calidades de agua ni identificar usos para las mismas. Como resultado de este hecho, el agua de buena calidad ha sido destinada a satisfacer las necesidades indiscriminadas de las zonas urbanas, lo cual ha contribuido a agudizar la escasez del recurso (GLOBAL WATER PARTNERSHIP, s.f.), esta situación es evidente en el municipio de Popayán donde distintas comunidades demandan grandes cantidades de agua para diversas actividades fuera de consumo humano, que al terminar su uso ya se convierten en aguas residuales, en este sentido se propondría que se hagan campañas de concientización de uso sostenible del agua por parte de los actores sociales responsables, según Najjar and Collier, 2011 la gestión de aguas urbanas y la integración de los aspectos de las fuentes de agua y de su calidad requerirán educación pública y colaboración para llevar a cabo los cambios culturales y de comportamiento necesarios (GLOBAL WATER PARTNERSHIP, s.f.). Además se propone que se plantee la necesidad de buscar otras fuentes de agua para las actividades que no requieran de agua potable, por ejemplo implementar un sistema para recolectar y almacenar agua lluvia en los hogares podría suponer una alternativa viable y económica que contribuye a un gran ahorro para las familias.

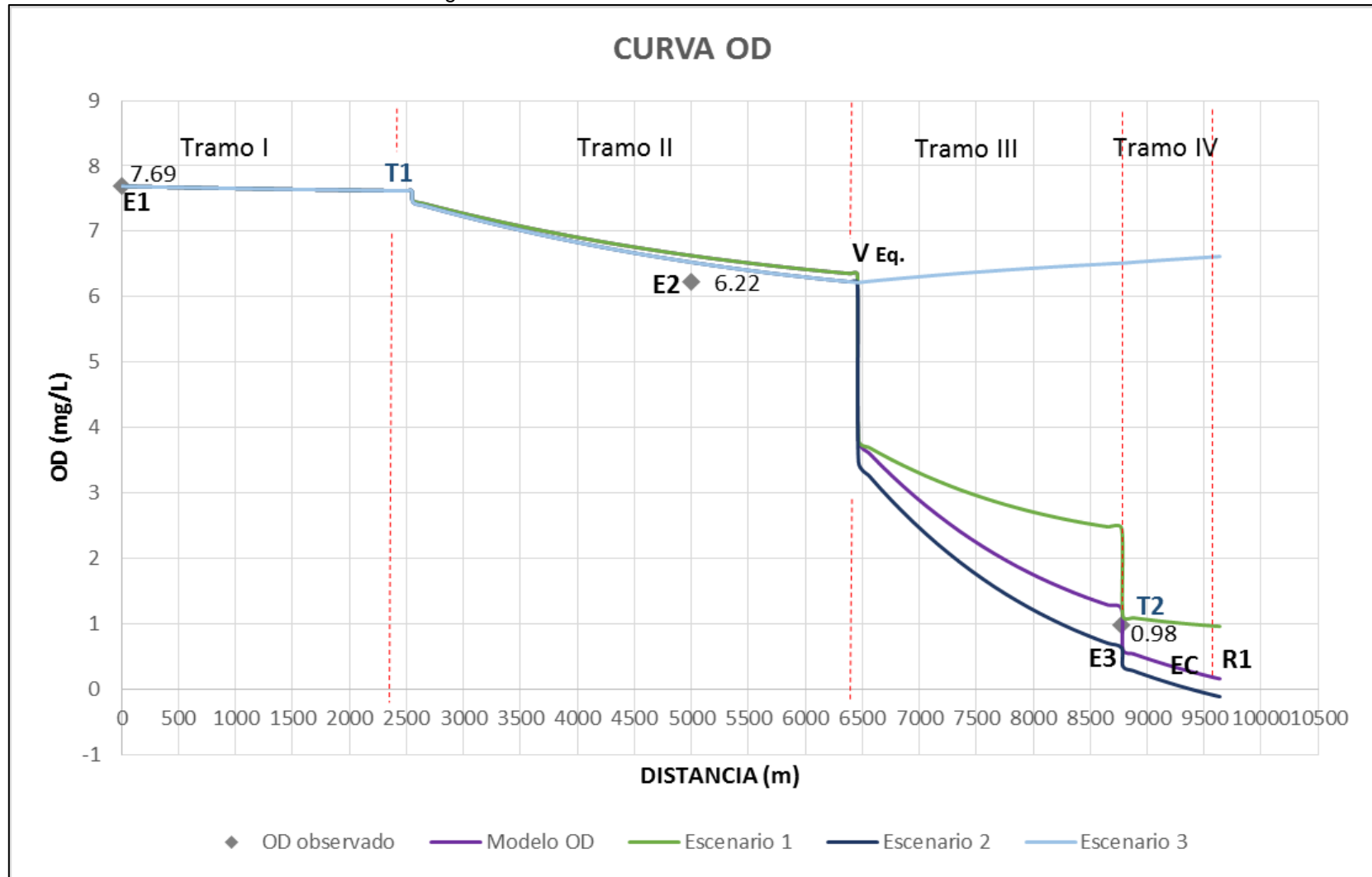
Desde el punto de vista paisajístico y de emanación de malos olores, se sugiere que se realice mejor manejo de los residuos sólidos urbanos cuya disposición final es a lo largo

del cauce del río Molino, como es el caso en la galería del barrio Bolívar y en los asentamientos subnormales construidos en la ronda hídrica como se muestra en anexos, en tanto, disponer de forma adecuada estos residuos que contribuyen a aumentar la carga contaminante, pueden disminuir tanto el deterioro de la calidad del agua como mejorar visiblemente la fuente hídrica, evitando que se generen fuertes olores desagradables que conlleven a posibles eventos de enfermedades por la proliferación de distintos vectores. Para esto se puede seguir implementando jornadas de limpieza tanto en las rondas del río Molino como de las demás fuentes hídricas del municipio. Como se llevó a cabo en el 2016, año en el que las jornadas llegaron a 11 sectores de la ciudad, con la participación activa de más de mil personas de las diferentes comunas. Asimismo, fueron removidas y transportadas cerca de 400 toneladas de basura, elementos de hogar y escombros, retirados de las riberas de los ríos y quebradas, con la articulación interinstitucional de entidades como Corporación Autónoma Regional del Cauca, Serviaseo, Fundación Río Piedras del Acueduco y Alcantarillado de Popayán, la Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria-Umata, y las unidades de Policía Metropolitana y Ejército Nacional (NOTIVISIÓN, 2017).

Finalmente, una alternativa que incluye a las entidades municipales sería realizar con mayor periodicidad campañas de monitoreo de calidad del agua del río Molino dando acceso a la información necesaria de los distintos parámetros, para que sea posible estimar la carga contaminante y de igual forma se puedan seguir implementando en más estudios otros modelos matemáticos de simulación de calidad del agua.

Aunque las anteriores alternativas no son nuevas requieren de una mejor estructuración, planificación y control para que se implementen adecuadamente y se logren los objetivos deseados, en este caso la recuperación de esta y a su vez de más fuentes hídricas.

Figura 26. Curva de O.D de escenarios de simulación.



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

8. CONCLUSIONES

En el presente estudio se pudo obtener diversa información relevante mediante trabajo de campo, adquirida de laboratorio y suministrada por entidades que contribuyeron en el desarrollo del estudio para determinar el comportamiento de la calidad del agua del río Molino frente a eventos críticos de contaminación.

Los resultados del modelo para OD presentaron un ajuste aceptable con respecto a los datos de campo, sin embargo se debe mejorar la calibración para que haya más confiabilidad, mediante el aumento de medición de parámetros contemplados en condiciones hidrológicas similares que garanticen una completa y veraz información.

Se determinó la capacidad asimilativa del río Molino, mediante la implementación del modelo simplificado de Streeter & Phelps, sin embargo la calibración no resultó según lo planeado, debido a distintos factores que interfirieron en gran magnitud en el estudio como por ejemplo la alta discrepancia entre los valores de la constante de desoxigenación, obtenidos por los métodos de Chapra y Wright & McDonnell.

En el río Molino se vierten aguas residuales en distintos puntos a lo largo de su cauce, pero aquellos que intervienen significativamente en las características fisicoquímicas y biológicas son los vertimientos de la Aeronáutica Civil y la del barrio Pandiguando los cuales fueron modelados en el presente estudio, con valores de campo de DBO de 41.1 y 172 mg/L respectivamente.

Los índices de contaminación permitieron concluir que la calidad del agua en cuanto a mineralización y materia orgánica se acrecienta en los tramos finales de la modelación, en contraparte los sólidos suspendidos y el pH se mantienen con mínimos niveles de contaminación a lo largo de la zona de estudio.

Se proyectaron inicialmente tres jornadas para muestreo y levantamiento de información en campo, no obstante por cuestiones de financiamiento sólo se ejecutaron dos, lo que implicó que los resultados obtenidos posean un alto grado de incertidumbre.

En las campañas de monitoreo de calidad aunque se realizan mediciones de distintos parámetros no siempre se obtienen valores correctos, por lo cual se presentan errores sistemáticos y aleatorios que pueden afectar el análisis de los resultados.

Los límites permisibles para vertidos vigentes en la resolución 0631 de 2015, deberían ser inflexibles frente a eventos de alta contaminación de las fuentes de agua superficial, implementando medidas sancionatorias relevantes a las entidades cuya jurisprudencia abarque las cuencas hidrográficas Colombianas.

Los escenarios planteados permiten identificar como se alteran las características de la corriente hídrica al ser expuesta a diversas cargas contaminantes y a la disminución del caudal para representar condiciones de caudal de estiaje, en tanto el escenario que resulta favorable para la recuperación de la fuente hídrica es el 3 puesto que el oxígeno disuelto no sufre gran afectación en la corriente de agua llegando finalmente a la desembocadura un OD de 6.616 mg/L, en cuanto a las alternativas presentadas aunque no son nuevas merecen una mejor estructuración para obtener resultados positivos.

9. RECOMENDACIONES

Para un mejor ajuste del modelo o la implementación de otro algoritmo matemático de calidad del agua, la constante de desoxigenación debería ser calculada por análisis de laboratorio (método de Winkler), para así tener un dato más certero.

En futuros estudios se recomienda la realización de más campañas de monitoreo para que los datos obtenidos sean suficientes, con lo cual se pueda realizar un análisis estadístico completo descartando valores inconsistentes, permitiendo evaluar intervalos de confianza y reportar error, logrando una calibración confiable de cualquier modelo de simulación de calidad del agua de esta u otra fuente hídrica.

Es necesario que se ejecuten más investigaciones en el ámbito de calidad del agua en el río Molino, haciendo uso de herramientas computacionales que permitan tomar medidas preventivas para que este no sea contaminado excesivamente generando a corto, mediano o largo plazo problemas de salubridad.

En la aplicación del modelo de Streeter & Phelps es relevante desarrollar una hoja de cálculo que satisfaga el propósito del estudio.

Es pertinente a futuro realizar investigaciones de modelaciones en cuerpos de agua donde se disponga de una línea base de información, para que la calibración del modelo a aplicar de alta confiabilidad.

Se sugiere que las alternativas mencionadas en dicho estudio sean tenidas en cuenta por entes encargados de la ordenación del recurso hídrico, para que el compromiso sea continuo, sustentado en el aporte de la comunidad, contribuyendo con la preservación de las fuentes hídricas, logrando un cambio real al estructurar de mejor forma el desarrollo de cualquiera de ellas.

Se propone que se actualice en la Corporación Autónoma Regional del Cauca y la Fundación Pro Cuenca río Las piedras, el análisis de calidad del agua en el río molino, no solo en la bocatoma y antes de la confluencia de los ríos Molino-Ejido, sino que se realice como en años anteriores que contemplaba más tramos, para que esta información pueda contribuir a futuros proyectos.

Se sugiere que la información que suministra este estudio pueda utilizarse en próximos proyectos contemplando parámetros faltantes como: DBO_{fast} , DBO_{slow} , curvas de calibración de caudal, constante de sedimentación, sólidos disueltos orgánicos e inorgánicos entre otros para llevar a cabo actualización y/o migración a QUAL2K o QUAL2Kw.

Se recomienda una mayor segmentación en la determinación de tramos de modelación del río, para que se lleve a cabo una mejor interpretación de la dinámica del cuerpo de agua.

Es pertinente realizar más divisiones al levantar las secciones transversales en el río, para que de esta forma se obtenga mayor precisión en el cálculo del caudal.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A E.S.P. (s.f.) Fuentes de abastecimiento. Gestión Ambiental. Disponible en: [<http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/>].
Plantas de tratamiento. Institucional. Disponible en: [<http://www.acueductopopayan.com.co/institucional/infraestructura/plantas-de-tratamiento/>].
- AGUIRRE, M. H. (2016). Asesoría reuniones director trabajo de grado. Docente Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.
- ALCALDÍA DE POPAYÁN. POT. (2009). Marco conceptual y acoplamiento del plan de desarrollo con el plan de desarrollo municipal.
- ALCALDÍA-UNICAUCA. (2015). Estudio preliminar (afectación y daños) asociados a fenómenos de inundación lenta y súbita (avenida torrencial) en la zona urbana y rural del municipio de Popayán. Convenio 20131800008927. Informe final. Julio de 2015. Suministrado por la Alcaldía de Popayán, mediante la Oficina Asesora de planeación.
- ALEAN, L. E. (2009). Modelación de la capacidad máxima de asimilación de vertimientos de carga orgánica en la ciénaga de Mesolandia en el Departamento del Atlántico.
- ARROYAVE, D. M., MORENO, A. A., TORO, F. M., GALLEGO, D., CARVAJAL, L. F. (2012- 2013). Estudio del modelamiento de la calidad del agua del Río Sinú, Colombia.
- BARRENECHEA, A. (s. f.). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Disponible en: [<http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf>].
- BEDOYA, J. (2007). Modelo de simulación de transporte de metales pesados en la cuenca baja del río Tunjuelo. Universidad de la Salle. Disponible en: [<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14332/T41.07B391m.pdf?sequence=1>].
- BISCHOFF, K. B. & HIMMELBLAU, D. H., (1976). Análisis y simulación de procesos. Barcelona: Reverté, S.A. Disponible en: [<https://es.scribd.com/document/99034341/CAPITULO-SIMULACION-DE-PROCESOS>].
- BOWIE, MILLS, PORCELLA, CAMBELL, PAGENKOPF, RUPP, JONSON, CHAN AND GHERINI. (1985). Rates and constants and kinetics formulation in surface water quality modeling.
- CAMACHO, L. A. (2003). Modelación preliminar de la calidad del agua en los interceptores Fucha – Tunjuelo y Tunjuelo – Canoas y de la calidad del Río Bogotá.
- CAMACHO, L. A., DÍAZ, M. (2004). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y de calidad del agua en ríos – caso Río Bogotá.

Capítulo III. Componente urbano. Estrategias de crecimiento y Reordenamiento de la ciudad. Disponible en: [<http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/popayan/3%20COMPONENTE%20URBANO.pdf>].

CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL PLAN DEPARTAMENTAL DE AGUAS Y SANEAMIENTO BÁSICO. (2010) Departamento del Cauca. Disponible en: [http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/AMB_PDA_CAUCA.pdf].

CASTAÑO OSSA, J. M. (2015). Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá. Disponible en: [<http://www.bdigital.unal.edu.co/52643/1/1088000081.2015.pdf>].

CEPIS/OPS. (1996) Análisis Sectorial de Residuos Sólidos en Colombia. Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud. Series Análisis Sectoriales N° 8. BIRF/Programa de Gestión Urbana/Ministerio de Salud de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente de Colombia. Organización Panamericana de la Salud. Abril, 1996. Disponible en: [<http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/analisis/colombia/Colombia6.html>].

CEPIS/OPS. (S. f.). Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales. Sección 7: Desarrollo de Programas Nacionales/Regionales/Locales. Estrategias alternativas de control para descargas de desechos. Disponible en: [<http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/publica/desprona/descap75.html>].

CÉSPEDES, D. Y., CAMACHO, L. (2004). Metodología de calibración de modelos hidrológicos e hidráulicos de flujo no permanente-aplicación en la cuenca media del río Bogotá (Colombia).

CONTRALORÍA GENERAL DE SANTIAGO DE CALI. (2012). Dirección técnica ante EMCALI EICE ESP. Informe resultado de aplicación de los estudios técnicos realizados por EMCALI EICE ESP en busca de alternativas para garantizar el suministro continuo de agua potable. Disponible en: [https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiDiZaN1PjUAhWGYyYKHQJODCEQFghkMA0&url=http%3A%2F%2Farchivos.contraloriacali.gov.co%2Fcolecciones%2Fdownload%2F%255B%2526quot%253Binforme_final_agua_dic_19_2012.pdf%2526quot%253B%252C%2526quot%253Binforme_final_agua_dic_19_2012%2526quot%253B%252C%2526quot%253Bpdf%2526quot%253B%252C%2526quot%253B771%2526quot%253B%252C%2526quot%253B5245a00dbb72%2526quot%253B%255D&usg=AFQjCNFKDjU09pgQwluDWnsU0KRskTQbbA].

CRC. (2006) Plan de Ordenación y Manejo de la subcuenca Río Molino y Quebrada Pubús.

CONVENIO FUNDACIÓN PRO CUENCA RÍO LAS PIEDRAS – PNUD (2011). Programa de integración de ecosistemas y adaptación al cambio climático en el macizo colombiano. Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático en la parte media y alta de la subcuenca río Molino municipio de Popayán. Agosto de 2011. Disponible en:

[<http://acueductopopayan.com.co/wp-content/uploads/2012/08/analisis-vulnerabilidad-cuenca-molino.pdf>].

CRITES, R., TCHOBANOGLIOUS, G. (2004) Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill Interamericana, S.A.

CRC. ACUERDO N° 0015. (2014). Disponible en: [<http://www.crc.gov.co/index.php/181-acuerdo-no-0015-del-25-de-noviembre-de-2014>].

Plan de Ordenación y Manejo Subcuenca Río Molino – Pubús. (2006). Convenio 1130-12-04 Corporación Autónoma Regional del Cauca - Fundación Pro Cuenca Río Las Piedras. Disponible en: [<http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POMCH/Rio%20MolinoPubus/Plan%20de%20Ordenacion%20y%20Manejo.pdf>].

DECRETO 1504 (1998). Disponible en: [<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1259>].

DECRETO 3930 (2010). Capítulo III. Del Ordenamiento del Recurso Hídrico. Disponible en: [<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>].

DELGADILLO, O., CAMACHO, A., PERE, L., & ANDRADE, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales - Google Libros. (Nelson Antequera Duran CENTRO ANDINO PARA LA GESTIÓN Y USO DEL AGUA (AGUA), Ed.). Cochabamba-Bolivia. Disponible en: [[https://books.google.com.co/books?id=1kO2J5aDlJQC&pg=PA54&lpg=PA54&dq=olor+del+agua+tchobanoglous&source=bl&ots=Khn0s0wW3g&sig=eaB6a8VBvazlccaOsb1gt3S1p5U&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjhksmHkenSAhVJOiYKHbNoDiMQ6AEIGDAA#v=onepage&q=olor del agua Tchobanoglous](https://books.google.com.co/books?id=1kO2J5aDlJQC&pg=PA54&lpg=PA54&dq=olor+del+agua+tchobanoglous&source=bl&ots=Khn0s0wW3g&sig=eaB6a8VBvazlccaOsb1gt3S1p5U&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjhksmHkenSAhVJOiYKHbNoDiMQ6AEIGDAA#v=onepage&q=olor%20del%20agua%20Tchobanoglous)].

GARCÍA, H. A., (2008). OBREGÓN, N. Modelación de calidad del agua en corrientes naturales mediante sistemas no lineales acoplados.

GOYENOLA G. (2007). Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos (Red MAPSA). Cartilla vii. Oxígeno Disuelto. Disponible en: [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/cartillas_redMAPSA.htm].

Global Water Partnership.(s.f.).Hacia una gestión integrada de aguas urbanas. Documento de perspectiva. Disponible en:[http://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/Aguas_Urbanas-municipalidades-GWP-Centroamerica_ELFFIL20121026_0001.pdf].

HOLGUÍN., J. (2014). Calibración del modelo de simulación de la calidad del agua qual2kw del río palo con fines de ordenamiento del recurso hídrico. CONVENIO CRC – FUNARU, 2014. Disponible en: [http://crc.gov.co/files/GestionAmbiental/RHidrico/INFORME_MODELACION_RIO_PALO_ULTIMA.pdf].

IDEAM, INVEMAR, SINCHI, IIAP, IAvH (2016). Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales 2015. Documento Síntesis. Bogotá, D.C., 2017. 75 pág. +

Anexo digital. Disponible en: [<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023641/IEARN2015.pdf>].

IDEAM Tomo 3 (2014): Contaminación y presencia de sustancias químicas como riesgos a la salud de la población. Caracterizaciones y avances en el monitoreo y conocimiento. Bogotá, D. C., 2015. 132 pág. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, diciembre de 2015, Bogotá, D. C., Colombia. Disponible en: [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023438/Informe_Tomo3.pdf].

IDEAM. (2007). Determinación de Coliformes totales y E. Coli de aguas mediante la técnica de sustrato definido, colilert por el método de Numero Más Probable. Disponible en: [<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+agua+NMP+Método+Colilert.pdf/463a6c8d-122c-4f75-8572-81bd64baa2d2>].

IDEAM, 2007a. Toma de muestras de aguas residuales. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428].

IDEAM, 2007b. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Disponible en: [<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021172/Protocoloparaelmonitoreoyseguimientodelagua.pdf>].

IDEAM. (2014) Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D. C., 2015. Disponible en: [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf].

INVEMAR. (2003). Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos. Disponible en: [<http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/7010manualTecnicas analiticas.pdf>].

FUNDACIÓN PRO CUENCA RÍO LAS PIEDRAS. (2017). Red hídrica del área urbana municipio de Popayán, visible red de drenaje río Molino.

JIMÉNEZ, B., VALIENTE, E., GUADALUPE, P., & VILLANUEVA, S. (2010). Calidad del agua: un enfoque multidisciplinario. Disponible en: [<http://biblioteca.clacso.edu.ar/Mexico/iiec-unam/20110804014021/Calidagua.pdf>].

JIMÉNEZ, M. (s. f.). MUTC – un modelo de transporte en ríos: aplicación al río Sinú. Disponible en: [<http://www.bdigital.unal.edu.co/5013/1/71260638-2008>].

JIMÉNEZ, M., & VÉLEZ, M. (2006). Análisis comparativo de indicadores de la calidad del agua superficial. Avances en recursos hidráulicos, 14. Disponible en: [<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/viewFile/9331/9974>].

LOZANO, G., ZAPATA, M. A., PEÑA L. E. (2001-2003). Selección del modelo de simulación de calidad del agua en el proyecto “Modelación de corrientes hídricas superficiales en el Departamento del Quindío”. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.

MAISTERRENA, V. (s. f.). Determinación de ortofosfatos en agua. Disponible en: [<http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/pubpdf/anuavet/n1999a33maisterrena.pdf>].

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (2005). Serie desarrollo urbano. Guía metodológica 2. Procedimiento de Legalización de Asentamientos Humanos. Disponible en: [http://portalterritorial.gov.co/apc-aa-files/7515a587f637c2c66d45f01f9c4f315c/Legalizacion_Asentamientos_1.pdf].

MULLIGAN, A., BROWN, L., (1998) Genetic algorithm for calibrating water quality models.

NG A.W.M., PERERA B. J. C. (2003) Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration.

NOTIVISIÓN. (2017). Reinician jornadas de limpieza sobre las quebradas y ríos de Popayán, en el marco de la campaña 'Popayán me pertenece limpia'. Disponible en: [<http://www.notivision.com.co/noticias/popayan/reinician-jornadas-de-limpieza-sobre-las-quebradas-y-rios-de-popayan-en-el-marco-de-la-campana-popayan-me-pertenece-limpia>].

ONU (2005-2015). Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones de las Naciones Unidas (ONU-DAES). Decenio del Agua. Calidad del agua. Disponible en: [<http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>].

OCDE – CEPAL. (2014). Evaluaciones del desempeño ambiental: COLOMBIA 2014. Naciones Unidas. Disponible en: [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36663/lcl3768_es.pdf;jsessionid=1990A86A3F89C4052775B584294BADA9?sequence=1]

OPS, O. P. de la S. (s. f.). Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. Disponible en: [<http://www.bvsde.paho.org/bvsair/e/repindex/rep184/vleh/fulltext/acrobat/agua.pdf>].

PELLETIER, G.J., CHAPRA, S. (2006). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1). A modeling framework for simulating river and stream water quality.

POT Popayán. (2009). Documento técnico, capítulo 1 dimensión ambiental. [<http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/popayan/1%20FINAL%20AMBIENTAL.pdf>].

PRAKASH, R. J; LEE, S; LEE, Y. S.; KANEL S. R; PELLETIER G. J. (2007). Aplicación de qual2kw automatizado para el modelado de la calidad del agua y la gestión en el Río Bagmati, Nepal.

QUAL2K. Disponible en: [<http://es.calameo.com/read/003916830d38e3f8d3438>].

RAMÍREZ, A., RESTREPO, R., & CARDEÑOSA, M. (1995). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(5), 89–99. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-3831999000100008]

RAMÍREZ, A., RESTREPO, R., & VIÑA, G. (1995). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(3), 135–153. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009

RESOLUCIÓN 0631 (2015). Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-es_631_marz_2015.pdf].

ROMERO ROJAS, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales : teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería.

SALLA, M.R., PAREDES, J., SOLERA, A., ÁLVAREZ, J.A., PEREIRA, C.E., ALAMY, J.E., OLIVEIRA, A. L. (2014). Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River basin, Brazil.

SANTAMARÍA, F. (2013). Análisis simplificado de oxígeno disuelto en el río Ubaté por el modelo qual2k. Escuela colombiana de ingeniería. Disponible en: [http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/120/1/ANALISIS_SIMPLIFICADO_DE_OXIGENO_DISUELTO_EN_EL_RIO_UBATÉ_POR_EL_MODELO_QUAL2K.pdf].

SAWYER, C. N., McCARTY, P. L., PARKIN, G. F. (2001). Química para Ingeniería Ambiental. McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.

SPERLING, M. (2012). Principio del tratamiento biológico de aguas residuales: Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. Volumen 1. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA. (s. f.). Parámetros y características de las aguas naturales. Disponible en: [<http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/parametros1.pdf>].

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO. (s. f.). Manual de ecología microbiana. Disponible en: [<http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-conductividad.pdf>].

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

ANEXOS

Anexo 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO

La presente sección abarca el respectivo registro fotográfico que se llevó a cabo en las diferentes actividades planteadas en la investigación. Fuente: Alvear & Granda, 2017.

- **VISITA PRELIMINAR**

Figura 1. Quebrada La Cantera.

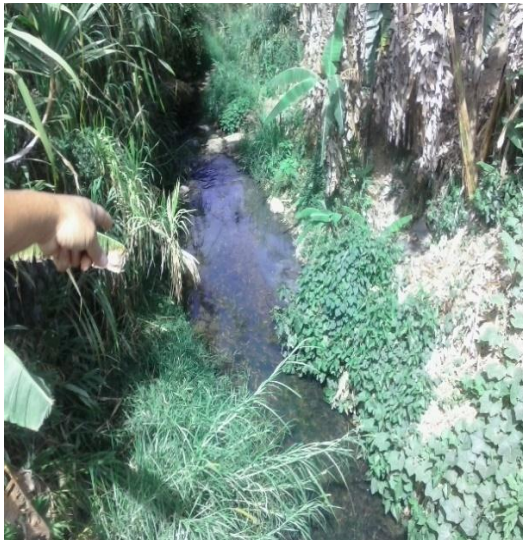


Figura 2. Descarga pluvial aeronáutica.



Figura 3. Río Molino, puente Yanacunas.



Figura 4. Vertimientos cerca puente Túlcan.
a) Colegio Técnico Industrial. b) Residencias femeninas, Unicauca.



Figura 5. Vertimiento barrio Pandiguando.
a) Caja de inspección. b) Vertimiento.



Figura 6. Vertimiento cerca Aeronáutica civil.



Figura 7. Río Molino,barrio Junín.



Figura 8. Río Ejido,barrio Junín.



- **CAMPAÑA DE MONITOREO NÚMERO 1**

PUNTOS DE MONITOREO: Secciones transversales, mediciones de parámetros.

ESTACIONES:

Figura 9. Vereda Pueblillo. (E1)



Figura 10. Cerca de la CRC. (E2)



Figura 11. Río Molino, barrio Junín. (E3)



VERTIMIENTOS:

Figura 12. Cerca Aeronáutica civil. (V1)



Figura 13. Barrio Pandiguando. (V2)



TRIBUTARIO:

Figura 14. río Ejido, barrio Junín. (T2)



- **TOMA DE MUESTRAS**

En las dos campañas de monitoreo se siguió el siguiente procedimiento para el muestreo.

Figura 15. Recipiente para almacenamiento de muestra de laboratorio y muestra para mediciones en campo.



Figura 16. Almacenamiento muestra para llevar al laboratorio.



Figura 17. Geles de refrigeración para preservar muestras de laboratorio.



Figura 18. Toma de muestra para medir los parámetros requeridos.



- VARIOS

OTROS INSTRUMENTOS

Figura 19. GPS, cinta metrica, flexometro.



Figura 20. Termómetro.



EVIDENCIAS: TRANSPORTE UNICAUCA Y ACOMPAÑAMIENTO POLICIAL.

Figura 21. vehiculo de transporte Unicauca



Figura 22. acompañamiento policial



- **CONTAMINACIÓN POR RESIDUOS SÓLIDOS.**

Figura 23. Disposición inadecuada de residuos sólidos en asentamientos subnormales.



Anexo 2. EVIDENCIA APLICACIÓN DE SOFTWARE

- **AUTOCAD: SECCIONES TRANSVERSALES CARACTERÍSTICAS DE TRAMO 4**

Una vez realizada la batimetría de las estaciones del caso de estudio, con la información arrojada de las secciones transversales en las campañas de monitoreo, fue necesario establecer una sección para el tramo 4 de la modelación como se especificó en el desarrollo del documento. A continuación se presentan la sección transversal de la denominada Estación Característica (EC) para el tramo 4 en cada jornada. Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 24. Sección transversal característica jornada 1, tramo 4.

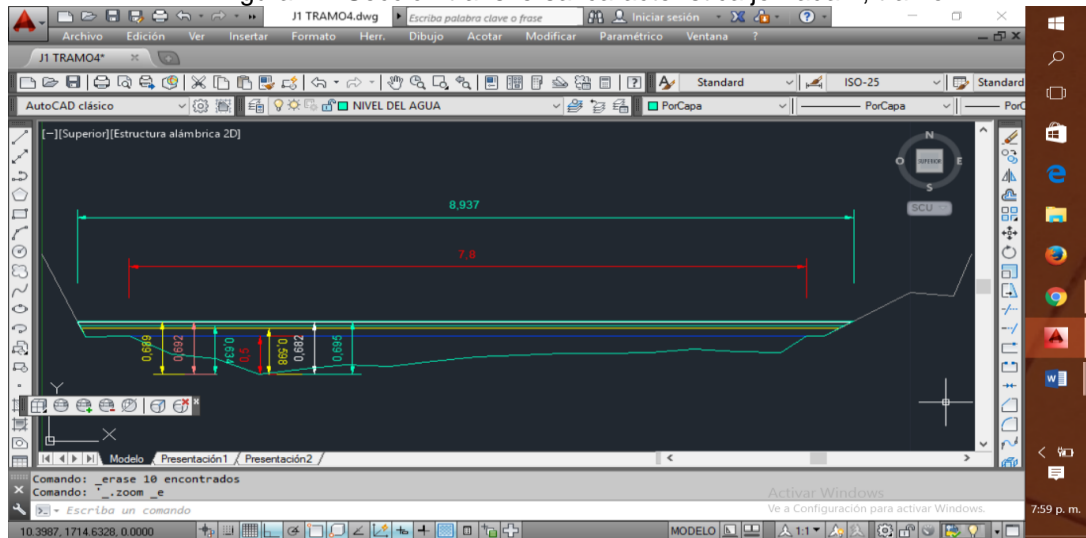
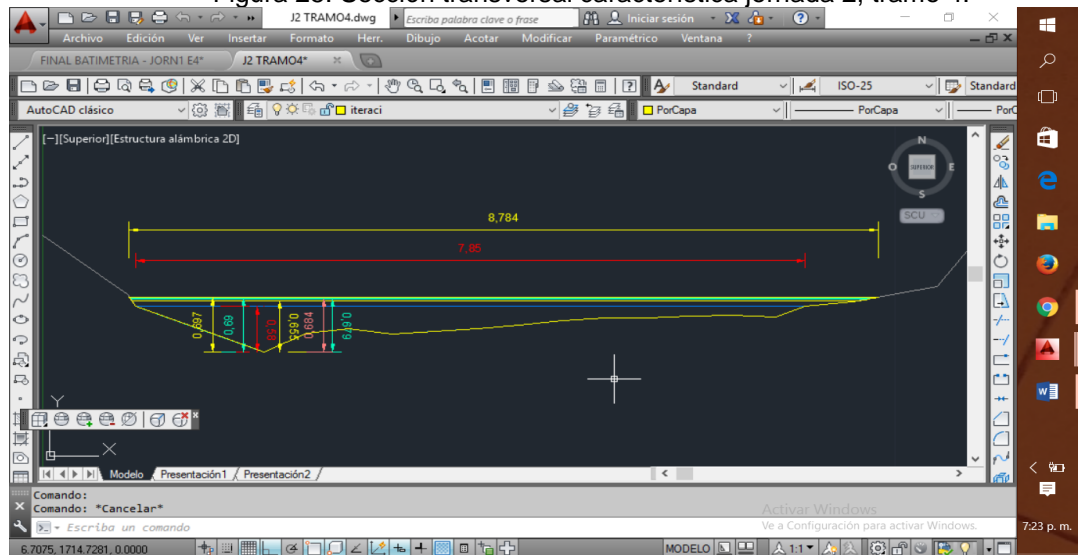


Figura 25. Sección transversal característica jornada 2, tramo 4.



- **TOPO 3: DETERMINACIÓN DE PENDIENTES Y TRAMOS DEL RIO MOLINO**

En la presente sección se muestran las figuras de los pasos para determinar las pendientes y tramos del río Molino en la zona urbana de Popayán, para ello se utilizó la cartera de datos topográficos del río (información suministrada por la Alcaldía municipal según CONVENIO 20131800008927 ALCALDÍA – UNICAUCA del “Estudio preliminar (afectación y daños) asociados a fenómenos de inundación lenta y súbita (avenida torrencial) en la zona urbana y rural el municipio de Popayán”).

En primer lugar se pasó los datos de Excel a Topo3 donde se seleccionaron las capas de interés y posteriormente se realizó el polígono, se trabajó sobre este y finalmente se obtiene la información requerida. Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 26. Cartera de datos topográficos.

Nombre	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Código
1	1055967.176	781518.565	1833.492	T
2	1055968.119	781518.82	1831.298	T
3	1055969.246	781521.493	1829.177	T
4	1055970.225	781523.815	1827.201	T
5	1055970.093	781523.503	1827.553	BT
6	1055970.671	781525.149	1825.363	OP
7	1055970.675	781525.487	1825.35	OP
8	1055970.622	781525.941	1825.647	TUBO
9	1055971.096	781526.73	1824.217	OP
10	1055971.183	781526.033	1824.226	OP
11	1055971.175	781526.069	1824.142	REGLA
12	1055971.267	781526.963	1823.092	REGLA
13	1055971.223	781526.226	1823.145	OP
14	1055971.269	781526.526	1823.106	OP
15	1055971.38	781526.553	1822.062	OR

Figura 27. Capas seleccionadas.

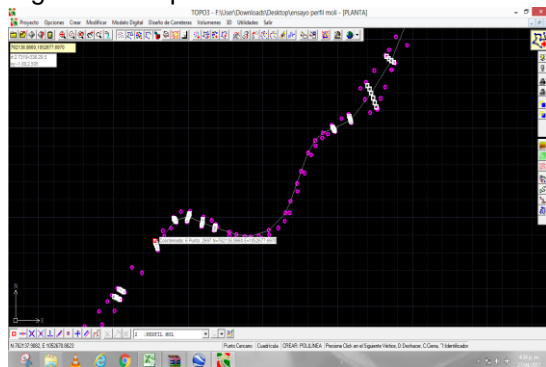


Figura 28. Trazado de polígono.

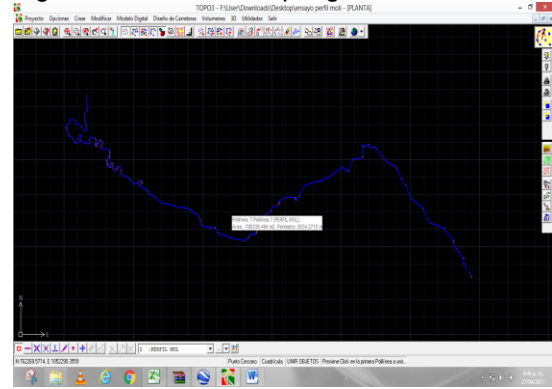


Figura 29. Para tramos.

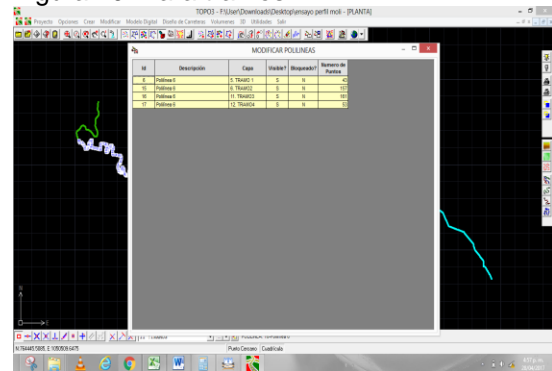
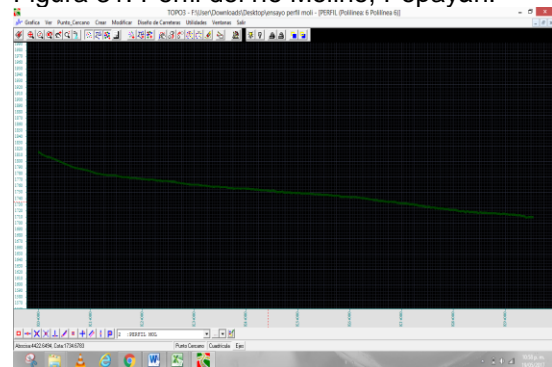


Figura 30. Para pendientes.

Punto	Alturas	Distancia	Ángulo (grados)	Deflexión (grados)	Cota (m)	Desnivel (m)	Pendiente (%)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	2.765	522.73	116	18.4124742	201.52	0.201	0.10
2	3.765	54.37	152.452	167.19	181.76	-4.15	-2.28
3	1055970	100.667	154.452	167.19	181.76	-4.15	-2.28
4	1055970	20.667	154.452	167.19	181.76	-4.15	-2.28
5	201.515	61.7654	4.15	181.76	181.76	0	0
6	201.515	61.7654	4.15	181.76	181.76	0	0
7	275.276	6.8275	152.32	166.8	175.17	-0.848	-0.48
8	425.707	147.276	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
9	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
10	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
11	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
12	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
13	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
14	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
15	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
16	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
17	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
18	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
19	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48
20	425.707	0.848	157.17	166.8	175.17	-0.848	-0.48

Figura 31. Perfil del río Molino, Popayán.



Anexo 3. **RESULTADOS DEL MODELO DE STREETER & PHELPS**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la calibración del modelo simplificado de Streeter & Phelps para la campaña de monitoreo número 2.

Debido a lo expuesto en el documento, para la jornada 1 no se presentan resultados de calibración en el documento, se pueden encontrar en anexos digitales, sin embargo se presentan las curvas de OD y DBO₅ obtenidas en su proceso en las figuras 32 y 33 respectivamente.

Finalmente en relación a los resultados del modelo con respecto a los escenarios de simulación planteados en el ítem 7.6., no se presentan en este documento debido a su extensa información, también están dispuestos en anexos digitales.

Tabla1. Cuadro de resultados modelo Streeter & Phelps jornada 2.

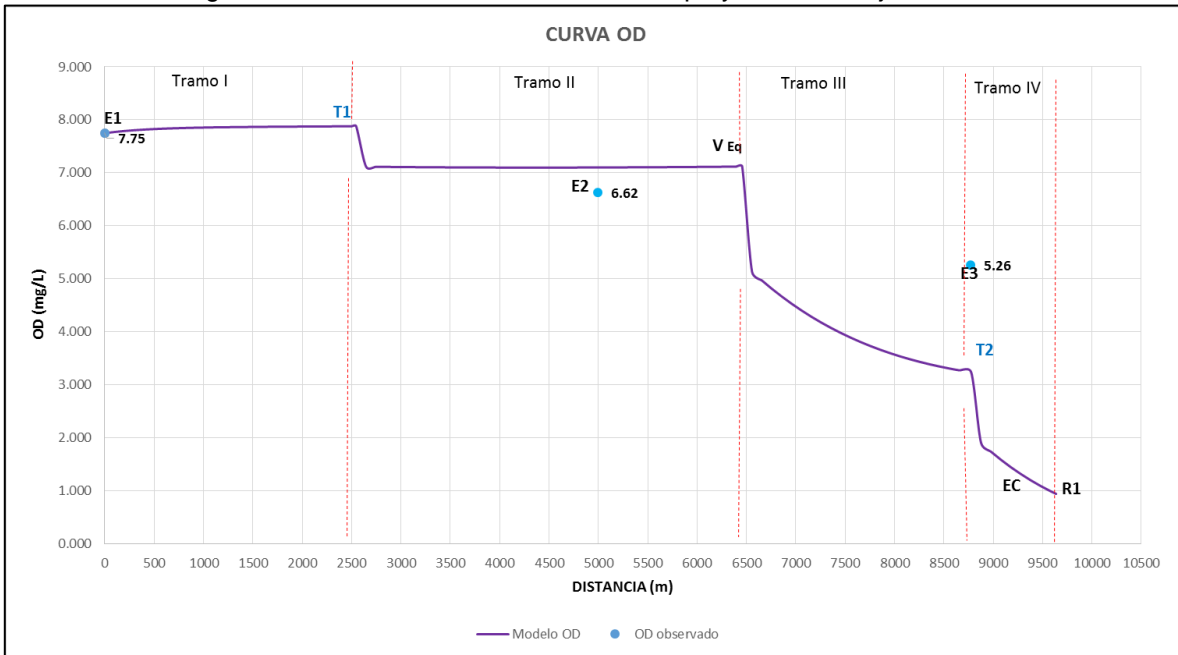
MODELO STREETER & PHELPS					
TRAMO	X (m)	OD (mg/L)	D (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	
E1	0	7.690	0.106	1.900	
	100	7.686	0.110	1.894	
	200	7.683	0.114	1.888	
	300	7.679	0.117	1.883	
	400	7.676	0.121	1.877	
	500	7.672	0.124	1.871	
	600	7.669	0.127	1.866	
	700	7.666	0.130	1.860	
	800	7.663	0.134	1.854	
	900	7.660	0.137	1.849	
	1000	7.657	0.140	1.843	
	1100	7.654	0.142	1.837	
	1200	7.651	0.145	1.832	
	1300	7.648	0.148	1.826	
	1400	7.646	0.151	1.821	
	1500	7.643	0.153	1.815	
	1600	7.640	0.156	1.810	
	1700	7.638	0.158	1.804	
	1800	7.636	0.161	1.799	
	1900	7.633	0.163	1.793	
	2000	7.631	0.165	1.788	
	2100	7.629	0.168	1.782	
	2200	7.626	0.170	1.777	
	2300	7.624	0.172	1.772	
	2400	7.622	0.174	1.766	
1	2500	7.620	0.176	1.761	
	2546	7.619	0.177	1.758	
	2556	7.472	0.093	3.720	

E2	2	2646	7.426	0.138	3.673
		2746	7.382	0.183	3.627
		2846	7.339	0.226	3.581
		2946	7.296	0.268	3.536
		3046	7.255	0.310	3.492
		3146	7.215	0.350	3.448
		3246	7.176	0.389	3.405
		3346	7.137	0.427	3.362
		3446	7.100	0.465	3.320
		3546	7.064	0.501	3.278
		3646	7.028	0.537	3.237
		3746	6.994	0.571	3.196
		3846	6.960	0.605	3.156
		3886	6.947	0.618	3.140
		3887	6.947	0.618	3.140
		3986	6.914	0.651	3.101
		4086	6.883	0.682	3.062
		4186	6.852	0.713	3.023
		4286	6.822	0.743	2.985
		4386	6.793	0.772	2.948
		4486	6.764	0.801	2.911
		4586	6.737	0.828	2.874
		4686	6.710	0.855	2.838
		4786	6.684	0.881	2.802
		4886	6.658	0.907	2.767
		4986	6.634	0.931	2.732
		4996	6.631	0.934	2.729
		5096	6.607	0.958	2.695
		5196	6.584	0.981	2.661
		5296	6.562	1.003	2.627
		5396	6.540	1.025	2.594
		5496	6.518	1.046	2.562
		5596	6.498	1.067	2.530
		5696	6.478	1.087	2.498
		5796	6.459	1.106	2.466
		5896	6.440	1.125	2.435
		5996	6.422	1.143	2.405
		6096	6.404	1.161	2.375
		6196	6.387	1.178	2.345
		6296	6.371	1.194	2.315
		6396	6.355	1.210	2.286
		6456	6.346	1.219	2.269
			6466	3.802	3.309

		6556	3.616	3.495	51.196
		6656	3.439	3.672	50.885
		6756	3.270	3.841	50.575
		6856	3.109	4.002	50.267
		6956	2.956	4.155	49.961
		7056	2.810	4.301	49.657
		7156	2.671	4.440	49.355
		7256	2.540	4.571	49.054
		7356	2.415	4.696	48.756
		7456	2.296	4.815	48.459
	3	7556	2.184	4.927	48.164
		7656	2.077	5.034	47.871
		7756	1.976	5.135	47.579
		7856	1.881	5.230	47.290
		7956	1.791	5.320	47.002
		8056	1.706	5.405	46.716
		8156	1.625	5.486	46.431
		8256	1.550	5.561	46.149
		8356	1.479	5.632	45.868
		8456	1.412	5.699	45.589
		8556	1.349	5.762	45.311
		8656	1.290	5.821	45.035
E3		8776	1.225	5.886	44.706
		8786	0.608	6.504	82.310
		8876	0.544	6.567	82.013
		8976	0.484	6.627	81.717
		9076	0.427	6.684	81.422
		9176	0.373	6.738	81.129
EC		9276	0.322	6.789	80.836
		9376	0.274	6.837	80.544
		9476	0.229	6.883	80.254
		9576	0.186	6.925	79.964
R1	4	9636	0.162	6.950	79.791

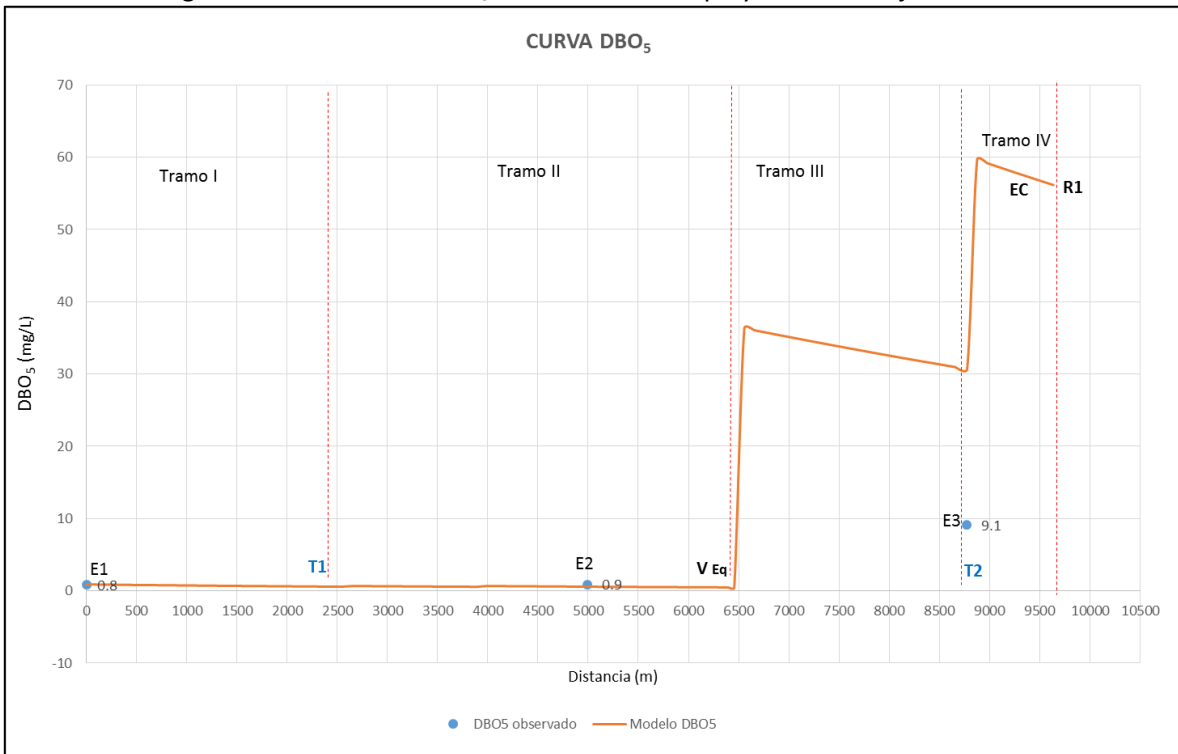
Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 32. Curva de OD con datos de campo y modelados jornada 1.



Fuente: Alvear & Granda, 2017.

Figura 3327. Curva de DBO₅ con datos de campo y modelados jornada 1.



Fuente: Alvear & Granda, 2017.