

**Efecto de la materia orgánica proveniente de vertimientos de aguas residuales
domésticas, sobre la calidad de la quebrada Mensulí, en el tramo autopista Floridablanca -
Piedecuesta, Santander**

Diana Alexandra Sánchez Virviescas

Código: 2178802

**Trabajo de grado para obtener el título de Magister en Recursos Hídricos y
Saneamiento Ambiental**

Director

**Javier Ernesto Holguín González, Dr. Sc.
Ph.D. en Ciencias Biológicas Aplicadas.**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de ingenierías fisicomécnicas
Escuela de ingeniería civil
Maestría en recursos hídricos y saneamiento ambiental
Bucaramanga
2020**

Nota de Proyecto de Grado

Autorización de Uso a Favor de la UIS

Agradecimientos

Agradecimiento a IBG ingeniería E.U por sus aportes para el desarrollo del presente estudio, A SEGIMA S.A.S por el aporte en todo el tema de laboratorio y muestras de aguas, A mi director por sus grandes aportes, y a la Universidad Industrial de Santander UIS por el crecimiento académico que aporta a los estudiantes.

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	5
1.1 Objetivo General	5
1.2 Objetivos Específicos	5
2. MARCO REFERENCIAL	6
2.1. Marco Teórico	6
2.1.1. Aguas residuales y capacidad de autodepuración de corrientes	6
2.1.2. Monitoreo de calidad y cantidad del agua con fines de calibración de un modelo matemático de simulación	7
2.1.3. Modelación de la calidad del agua en ríos	8
2.2. Antecedentes	12
2.3 Zona de estudio	13
2.3. Marco legal	17
2.4. Marco institucional	18
3. METODOLOGÍA	20
3.1. Fase I. Identificación de vertimientos:	20
3.1.1. Captura de información Hidromorfológica	21
3.1.2. Proyección de sitios de monitoreo	22
3.1.3. Georreferenciación de vertimientos y levantamiento topo batimétrico	25
3.1.4. Toma de caudal	26

3.2. Fase 2. Caracterización y evaluación la calidad fisicoquímica e hidromorfológica.	27
3.2.1. Planeación del programa de monitoreo y caracterización fisicoquímica e hidráulica	28
3.2.2. Caracterización hidromorfológica	30
3.2.3. Análisis hidroclimatológico.....	31
3.2.4. Modelación hidráulica	32
3.3. Fase 3. Implementación de un modelo simplificado de simulación matemática de la calidad del agua de la quebrada Mensulí	34
3.3.1. Protocolo de modelación de la calidad del agua.....	35
3.3.2. Selección y justificación del modelo a utilizar	36
3.3.3. Definición del modelo a utilizar	37
3.3.4. Esquematización de la corriente	38
3.3.5. Información de entrada al modelo	39
3.3.6. Establecimiento de criterios de desempeño	39
3.3.7. Información de salida del modelo	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1. Vertimientos identificados sobre la quebrada Mensulí:	40
4.2. Resultados de la calidad fisicoquímica e hidromorfológica de la quebrada Mensulí.	41
4.2.1. Estaciones Hidrológicas	47
4.2.2. Estaciones climatológicas	47
4.2.3. Uso del suelo y coberturas	51

4.2.4.	Caracterización hidráulica	53
4.2.5.	Caracterización Hidromorfológica	58
4.3.	Modelo matemático de la calidad del agua de la quebrada Mensulí	70
4.3.1.	Esquematización de la corriente	70
4.3.2.	Datos de Entrada al Modelo de Simulación	71
4.3.3.	Datos hidráulicos	72
4.3.4.	Datos climáticos	74
4.3.5.	Datos de vertimientos y tributarios	75
4.3.6.	Datos de las estaciones de control	76
4.3.7.	Calibración y validación del modelo QUAL2Kw Quebrada Mensulí	76
6.	RECOMENDACIONES.....	83

Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados ICA campañas 2018 CDMB.	14
Tabla 2. Resultados ICA campañas 2015, 2016, 2017, 2018 CDMB.	14
Tabla 3. Resultados ICOMI ICOMO campañas 2018 CDMB.	15
Tabla 4. Resultados ICOSUS ICOTRO campañas 2018 CDMB.	15
Tabla 5. Normatividad Colombia recurso Hídrico.	17
Tabla 6. Características Estación Topográfica.	26
Tabla 7. Resultados Matriz multicriterio selección de modelo.	37
Tabla 8. Resultados monitoreos en época de lluvia y bajas precipitaciones.	42
Tabla 9. Resultados monitoreos vertimientos.	45
Tabla 10. Resultados caudales sobre la quebrada Mensulí (CDMB, 2018).	47
Tabla 11. Descripción Grupo de suelo. (SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000)	51
Tabla 12. Clasificación de suelos a efecto umbral de esorrentía (SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000)	52
Tabla 13. Medición de caudal y velocidades épocas de lluvia de abril 2019.	56
Tabla 14. Medición de caudal y velocidades épocas de sequía de diciembre 2019.	56
Tabla 15. Caracterización condiciones Morfológicas.	60
Tabla 16. Caracterización condiciones del índice de Hábitat fluvial.	61
Tabla 17. Cálculo de Hábitat fluvial tramo 10.	61
Tabla 18. Valores tiempos de Concentración en minutos.	63
Tabla 19. Estación Granja Piedecuesta.	63
Tabla 20. Valores de intensidad en mm/hora para la estación Granja Piedecuesta.	64
Tabla 21. Caudal máximo Tr 50, 100 y 500 años.	65

Tabla 22. Porcentaje de naturalidad.....	66
Tabla 23. Calculo índice QBR.	69
Tabla 24. Valoración nivel de calidad hidromorfológica Quebrada Mensulí. ((ACA, 2006)	69
Tabla 25. Esquematzación de la quebrada Mensulí en el tramo de estudio.	70
Tabla 26. Resultados calculo criterio de Plecet y Courant.	71
Tabla 27. Cálculo de variables estacionales.....	72
Tabla 28. Constantes hidrométricas para calibrar el componente hidráulico del modelo QUAL2Kw.....	73
Tabla 29. Calculo zona de mezcla de la quebrada Mensulí en el tramo de estudio.	74
Tabla 30. Calculo tiempos de viaje quebrada Mensulí en el tramo de estudio.	74
Tabla 31. Datos para tiempo de viaje PC3.....	74
Tabla 32. Datos climáticos ingresados al modelo.	75
Tabla 33. Constantes de calibración modelo de calidad quebrada Mensulí.	77
Tabla 34. Valores coeficientes Nash.....	78
Tabla 35. Calculo de caudal ambiental quebrada Mensulí.	81
Tabla 36. Valores factor de asimilación.	81

Lista de Figuras

Figura 1. Elementos que componen la terminología adoptada de modelacion Adaptado de Resfsgaard y Henriksen (2004) (MINAMBIENTE, 2018).....	10
Figura 2. Caracteriticas punto MS-05 (CDMB, 2020).....	14
Figura 3. Predio objeto de estudio en la cartográfica general (IGAC, 2016).....	16

Figura 4. Protocolo levantamiento de datos hidromorfológicos en campo (ACA, 2006)	
Partes a y b del Protocolo.....	22
Figura 5. Proceso metodológico para la caracterización FQ - MB de aguas. (SEGIMA SAS, 2019).....	27
Figura 6. Protocolo de modelacion quebrada Mensulí (Minambiente, 2018)	35
Figura 7. QUAL2Kw esquema de segmentación de un río sin afluentes (Pelletier & Chapra, 2008).....	38
Figura 8. Puntos de monitoreo sobre la quebrada mensuli. (MINAMBIENTE, 2018). ...	41
Figura 9. Resultados monitoreo época seca y lluviosa para tributarios.	44
Figura 10. Resultados monitoreo época seca y lluviosa para puntosa de control.	44
Figura 11. Puntos de monitoreo sobre la quebrada Mensuli.	45
Figura 12. Tramos de estudio, estudio Hidromorfológico (IGAC, 2016)	46
Figura 13. Estaciones climaticas cercanas (CDMB, 2020).....	48
Figura 14. Estaciones Hidroclimatológicas analizadas.....	49
Figura 15. Polígonos de Thiessen estaciones cercanas.....	50
Figura 16. Precipitación La Judía (CDMB, 2020).....	51
Figura 17. Suelos presentes en la zona de estudio (CDMB, 2020)	52
Figura 18. Coberturas presentes en la zona de estudio (CDMB, 2020).....	53
Figura 19. Regitro fotografico levantamiento topografico.....	54
Figura 20. Curvas de nivel levantamiento topografico.....	54
Figura 21. Modelo de elevacion digital del terreno.....	55
Figura 22. Regitro fotográfico toma de caudales.....	56
Figura 23. Punto de toma de caudales.	57

Figura 24. Caudales sobre puntos de monitoreo.....	58
Figura 25. Tipología del canal.....	59
Figura 26. Curvas IFD para la Estación Granja Piedecuesta. (IDEAM, 2018)	64
Figura 27. Usos del suelo en la Anchura TR 50 años.....	66
Figura 28. Registro fotográfico de cada tramo de 1 al 10.	68
Figura 29. Diagrama de la Quebrada Mensulí.....	71
Figura 30. Datos de la cabecera en calibración.....	72
Figura 31. Datos hidráulicos ingresados al QUAL2Kw.	73
Figura 32. Datos de temperatura ambiente ingresados al QUAL2Kw.....	75
Figura 33. Datos de vertimientos y tributarios ingresados al QUAL2Kw.....	75
Figura 34. Datos de puntos de control ingresados al QUAL2Kw.....	76
Figura 35. Resultados QUAL2Kw Caudal modelado calibrado.	79
Figura 36. Resultados QUAL2Kw Profundidad modelado calibrado.....	79
Figura 37. Resultados QUAL2Kw Temperatura modelado calibrado.....	79
Figura 38. Resultados QUAL2Kw OD modelado calibrado.....	79
Figura 39. Resultados QUAL2Kw DBO Lenta modelado calibrado.	79
Figura 40. Resultados QUAL2Kw DBO Rápida modelado calibrado.....	79
Figura 41. Resultados QUAL2Kw Caudal modelado validado.....	80
Figura 42. Resultados QUAL2Kw profundidad modelado validado.....	80
Figura 43. Resultados QUAL2Kw Temperatura modelado validado.	80
Figura 44. Resultados QUAL2Kw OD modelado validado.	80
Figura 45. Resultados QUAL2Kw DBO Lenta modelado validado.....	80
Figura 46. Resultados QUAL2Kw DBO Rápida modelado validado.	80

Lista de Apéndices

Apéndice A Formato Protocolo Hidromorfológico

Apéndice B Modelo HEC HMS

Apéndice C Modelo HEC RAS

Apéndice D Modelo de calidad del agua QUAL2Kw

Apéndice E Reporte de laboratorios

Apéndice F Cálculos

Apéndice G Manual QUAL2KW

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS

Resumen

TÍTULO: EFECTO DE LA MATERIA ORGÁNICA PROVENIENTE DE VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, SOBRE LA CALIDAD DE LA QUEBRADA MENSULÍ, EN EL TRAMO AUTOPISTA FLORIDABLANCA - PIEDECUESTA, SANTANDER *

AUTOR: Diana Alexandra Sánchez Virviescas**

PALABRAS CLAVE: Calidad del agua, Batimetría, constantes, QUAL2Kw

Descripción:

El estudio de la calidad del agua se ha convertido en una estrategia para implementar medidas que permitan establecer políticas de conservación y preservación del recurso hídrico, estos estudios se realizan por medio de modelaciones matemáticas que permiten predecir el comportamiento de los contaminantes en el medio. Esta modelación debe estar sujeta a la recolección de información de campo adecuada que permita plasmar la realidad de la fuente hídrica en el modelo utilizado. Por otra parte, las modelaciones deben ir acompañadas de calibraciones y validaciones que reduzcan el grado de incertidumbre y se conviertan en herramientas para la gestión del recurso hídrico. Por tal razón, con el propósito de conocer el comportamiento de la calidad de la quebrada Mensulí, se utilizó el software QUAL2Kw Versión 6, el cual se calibró y validó con las campañas de campo realizadas en abril de 2019 para representar la época lluviosa y diciembre de 2019 para representar la época seca. Se observa como resultado de la modelación que las variables de oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno presenta un ajuste mejor según los datos observados y las variables de fósforo y nitrógeno un menor ajuste. La quebrada Mensulí en el tramo de estudio en los primeros 800 metros no presenta un impacto significativo, ya que se alcanza a registrar una recuperación del oxígeno disuelto producida por la materia orgánica de los vertimientos, caso contrario en el restante de los 700 metros aguas abajo, donde los vertimientos aumentan las concentraciones de los contaminantes en la quebrada. El modelo de la quebrada Mensulí presente una bondad del ajuste o bondad del modelo Nash-Sutcliffe (NS) de 0,8, el cual indica un ajuste muy bueno.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: Javier Ernesto Holguín González

Abstract

Title: EFFECT OF ORGANIC MATTER COMING FROM DOMESTIC WASTE WATER DISCHARGES ON THE QUALITY OF THE MENSULÍ GREEK, IN THE FLORIDABLANCA - PIEDECUESTA HIGHWAY SECTION, SANTANDER (Santander, Colombia) *

Autor: Diana Alexandra Sánchez Virviescas **

Keywords: Water quality, Bathymetry, constants, QUAL2Kw

Description:

The study of water quality has become a strategy to implement measures that allow establishing policies for the conservation and preservation of water resources, these studies are carried out through mathematical modeling that allows predicting the behavior of pollutants in the environment. This modeling must be subject to the collection of adequate field information that allows to capture the reality of the water source in the model used. On the other hand, the modeling must be accompanied by calibrations and validations that reduce the degree of uncertainty and become tools for the management of water resources. For this reason, in order to know the quality behavior of the Mensulí creek, the QUAL2Kw version 6 software was used, which was calibrated and validated with the field campaigns carried out in the months of April to represent the rainy season and the month December to represent the dry season. It is observed as a result of the modeling that the dissolved oxygen variables and the biochemical oxygen demand present a better adjustment according to the observed data and the phosphorus and nitrogen variables a lower adjustment. The Mensulí stream in the study section in the first 800 meters does not present a significant impact, since it is possible to register a recovery of the dissolved oxygen produced by the organic matter of the discharges, otherwise in the remaining 700 meters downstream, where the discharges increase the concentrations of the pollutants in the ravine. The model of the Mensulí creek presents a goodness of fit or goodness of the Nash-Sutcliffe (NS) model of 0,8, which indicates a very good fit

* Degree work

** Faculty of mechanical engineering. School of civil engineering. Master's degree in water resources and environmental sanitation. Director: Javier Ernesto Holguín González

Introducción

El agua presenta una importancia estratégica en el desarrollo mundial desde el ámbito social, político y económico generando desarrollo y subsistencia de las naciones. Con el uso del agua en las actividades de los seres humanos se presentan problemas de calidad y cantidad del recurso hídrico, uno de los grandes problemas que se vive actualmente es la insostenibilidad ambiental del crecimiento poblacional, lo cual genera el deterioro de la calidad de las aguas por el aumento de las cargas contaminantes provenientes de aguas residuales domésticas generadas en las zonas urbanas y rurales de los territorios (Navarro Carrascal, 2004).

Se estima en el mundo que más del 80% de las aguas residuales son vertidas a las fuentes hídricas sin tratamiento alguno impactando la salud humana, la economía, los recursos naturales y ecológicos (UNESCO, 2017). El 88% de las enfermedades diarreicas se producen por la falta de saneamiento y la contaminación de aguas, causando la muerte de 1,8 millones de personas al año (OMS, 2004)

Estudios realizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en las principales ciudades de Colombia comprueban, que el sector doméstico es el responsable del aporte del 69% de la carga orgánica biodegradable (DBO_5), el 61% de la demanda química de oxígeno (DQO), el 91% de los sólidos suspendidos totales (SST) vertidos a los cuerpos hídricos después de los respectivos tratamientos. Debido al alto porcentaje de aporte del sector doméstico, es importante estudiar e identificar los impactos causados a las fuentes hídricas que reciben vertimientos sin ningún tratamiento, debido al aporte de contaminantes que alteran significativamente las características de calidad (MINAMBIENTE, 2015)

La autoridad ambiental CDMB *Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga*, en su gestión del recurso hídrico cuenta con sistemas de monitoreo en las fuentes hídricas de importancia en la ciudad, incluida la quebrada Mensulí, con tres estaciones de monitoreo, la estación MS-05 (parte media de la cuenca), la estación AZ-07 (Aguas abajo del punto MS -05, donde inicia el desarrollo urbanístico) y la estación AZ-1 (donde entrega sus aguas al río Frío), los resultados obtenidos para la quebrada Mensulí reportan una calidad dudosa en el 2014, buena en 2015 y dudosa nuevamente en 2016 en las tres estaciones, términos manejados por la autoridad ambiental de acuerdo con el resultado de los índices de calidad ICA. De igual manera solo se cuenta con análisis de índices de calidad, desconociéndose datos de las características hidráulicas y la asimilación de estos contaminantes a través de su recorrido (IGAC, 2017)

El presente proyecto se encamina en identificar la afectación de la calidad de la quebrada Mensulí en un tramo específico, llegando a conocer los efectos e impactos que se producen por los vertimientos domésticos y las concentraciones de materia orgánica. La quebrada Mensulí se encuentra ubicada entre los municipios de Floridablanca y Piedecuesta, con un área de cuenca aproximada de 3250 hectáreas; la parte media de la cuenca presenta un recorrido paralelo a la autopista que comunica a los dos municipios y sus áreas de expansión, lo que conlleva a desarrollos urbanísticos y el aumento de la densidad poblacional en el área de influencia directa de la fuente hídrica, generando aguas residuales domésticas que son vertidas directamente con o sin tratamiento previo, disminuyendo la capacidad de regulación y autodepuración de la quebrada.

La quebrada Mensulí es afectada por vertimientos generados por asentamientos humanos ubicados en sus inmediaciones, acarreado problemas en los usos del agua y alteraciones de la calidad; por lo que es importante gestionar estudios de la identificación de los impactos, y alternativas para mejorar las condiciones de calidad de sus aguas. El diagnóstico se basa en

conocer las características hidrológicas e hidráulicas de la fuente, que como cuerpo hídrico independiente debe ser tratado de una forma específica, basado en una adecuada gestión del recurso pues la contaminación disminuye la regulación dentro del ciclo hidrológico (Suárez Alonso & Vidal Abarca Gutiérrez, 2012).

El presente estudio se enfoca en evaluar los efectos que tiene la materia orgánica procedente de aguas residuales domésticas, mediante el comportamiento del oxígeno disuelto a través de un tramo de análisis, identificando las variables hidrológicas e hidráulicas que intervienen en la capacidad de asimilar los contaminantes a través de su recorrido (MINAMBIENTE, 2015). Se identifican los impactos sobre la quebrada, y se genera una herramienta importante para la planeación del recurso hídrico en la zona. La identificación de los efectos se establece como requisito para el cumplimiento de los objetivos de calidad planteados y la planificación de los usos que se desarrollan en el área, mejorando a su vez la calidad de las aguas, mediante la implementación de sistemas de tratamiento adecuados a los vertimientos realizados.

El deterioro de los recursos naturales y el incremento de los problemas ambientales enfoca a los países a incorporar y adoptar normatividad en las decisiones de la administración de los recursos, como el concepto desarrollo sostenible “*satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*”; este concepto de la Organización de las Naciones Unidas busca lograr un equilibrio entre la economía de las sociedades y el medio ambiente; situación que se ve afectada por el consumo indiscriminado de los recursos, especialmente en las zonas urbanas que se ubican cerca a fuentes hídricas para supervivencia, siendo necesario buscar estrategias para que exista un desarrollo sostenible en las Urbes (UNESCO, 1997).

En la búsqueda de un equilibrio sostenible, se implementa la modelación de corrientes, la cual se ha convertido en una herramienta poderosa en la simulación del comportamiento de vertimientos en los ríos, obteniendo resultados confiables para la toma de decisiones, siendo necesario conocer la capacidad de autodepuración de la fuente, la cual requiere datos a nivel de detalle del punto donde se realiza el vertimiento.

Con el fin de aportar herramientas para la toma de decisiones a nivel local, se establece el proyecto evaluación del impacto de la materia orgánica de vertimientos residuales domésticos sobre la calidad de la quebrada Mensulí, por medio de información detallada que permite modelar la capacidad de asimilación de contaminantes, integrando el modelo predictorio, con un análisis a nivel de cuenca que permite correlacionar variables resultantes en los escenarios analizados. Esto permite plantear proyectos encaminados a mejorar la calidad de la quebrada, y generar lineamientos en los sistemas de tratamiento que permitan disminuir las cargas contaminantes de los vertimientos generados (Quiroz Fernández et al., 2016)

Utilizando protocolos para la valoración la calidad del agua hidromorfológica y fisicoquímica, se recolectó la información en campo requerida para identificar la situación actual en la que se encuentra la quebrada. Se realizó levantamiento de información complementaria, que permitió caracterizar la cuenca; conocer las características hidroclimatológicas que se presentan, batimetría del tramo de estudio generando las características hidráulicas representativas.

Con los resultados de las campañas de monitoreo realizadas en época seca y lluviosa, se modeló y simuló el comportamiento de la materia orgánica en el tramo de estudio, identificando las condiciones actuales que la quebrada, y la modelación de escenarios futuros, base para las estrategias del desarrollo sostenible del área de influencia.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el impacto generado por la materia orgánica de los vertimientos de aguas residuales domésticas sobre la calidad de la quebrada Mensulí, en el tramo de la autopista Floridablanca – Piedecuesta comprendido entre el Restaurante Menzuly y la universidad Pontificia Bolivariana.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los vertimientos de aguas residuales domésticas que afectan la quebrada Mensulí, en el tramo de la autopista Floridablanca -Piedecuesta, comprendido entre el Restaurante Mensulí y la Universidad Pontificia Bolivariana.

Caracterizar y evaluar la calidad fisicoquímica e hidromorfológica de la quebrada Mensulí y determinar la carga contaminante de los vertimientos de aguas residuales identificados en el tramo de estudio.

Implementar un modelo simplificado de simulación matemática de la calidad del agua de la quebrada Mensulí en el tramo de la autopista Floridablanca -Piedecuesta, comprendido entre el restaurante y la Universidad Pontificia Bolivariana.

2. Marco Referencial

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Aguas residuales y capacidad de autodepuración de corrientes

Las aguas residuales se clasifican de acuerdo con el sector económico donde se producen, los vertimientos generados en el sector doméstico, por ejemplo, se consideran como fundamentales y cuantificables, por el grado de crecimiento del sector urbano y la transformación de las aguas residuales domésticas en el tiempo debido a la cantidad de productos que se utilizan en los hogares. Esta importancia se compone principalmente por el aporte de materia orgánica en su forma soluble y en suspensión, indicador del grado de contaminación de una fuente hídrica, y del consumo de oxígeno en la misma, esta medida se puede identificar en la curva de DBO en la fuente de análisis generada por los materiales orgánicos carbónicos (Ramalho, 1990).

Los vertimientos de aguas residuales domésticas son descargados a ríos y quebradas, generando contaminación y disminución de la capacidad autodepuradora del cuerpo hídrico, viéndose reflejado en el deterioro de la calidad del agua y la disminución del oxígeno disuelto, siendo uno de los problemas de saneamiento y salud en la sociedad. Es por esto por lo que las entidades gubernamentales buscan implementar estrategias para mejorar la calidad de la fuente hídrica, implementado modelaciones y simulaciones que permitan conocer las características autodepuradoras de la fuente contaminada y el grado de asimilación de los contaminantes en el medio (Romero Rojas, 1999).

En el proceso de Autodepuración de una fuente hídrica, el cuerpo busca estabilizar el material orgánico, por medio de mecanismos bioquímicos que permitan balancear los microorganismos presentes, estos procesos se llevan a cabo con el oxígeno disuelto presente el agua, encargado de

oxidar los contaminantes. Para estimar la capacidad de autodepuración de un cuerpo hídrico, es importante estimar la capacidad de reaeración, la cual depende de las características de las aguas residuales vertidas, de las características hidráulicas de la fuente y el estado inicial en que se encuentra al momento de recibir el vertimiento (Romero Rojas, 1999).

Una fuente hídrica presenta una buena capacidad de autodepuración, al contar con tasas de reaeración adecuadas que permitan generar el debido intercambio de oxígeno entre la atmósfera y el cuerpo hídrico, permitiendo recuperar el oxígeno disuelto una vez este es consumido durante el proceso de degradación de la materia orgánica, mejorando de esta forma la calidad del agua; por esta razón los estudios e investigaciones encaminadas a la modelación de la calidad del agua, deben estimar de manera adecuada la cantidad de oxígeno que se transfiere de la atmósfera. Por consiguiente, el diagnóstico de los ríos o quebradas deriva de campañas y trabajos de campo base para la toma de información que permita estimar de forma adecuada coeficientes de reaeración utilizando ecuaciones empíricas o semiempíricas, ajustadas a la realidad (Adams et al., 2002).

2.1.2. Monitoreo de calidad y cantidad del agua con fines de calibración de un modelo matemático de simulación

La información recolectada en campo hace parte fundamental de la modelación de calidad de agua, por lo que es importante el establecimiento de sitios de monitoreo adecuados, que indiquen de manera real y precisa las características de la fuente hídrica. Las campañas realizadas para la obtención de los datos de calidad fisicoquímica y cantidad del agua deben cumplir con las metodologías estandarizadas para los laboratorios colombianos, tanto en recolección de muestras, transporte y análisis de estas (Camacho & Díaz Granados, 2003). El análisis hidromorfológico de corrientes es un concepto nuevo en la determinación de la calidad de ríos y quebradas, según la

Directiva Marco del Agua de la Unión Europea se tiene en cuenta en esta caracterización el análisis de la morfometría fluvial, estructura del bosque de ribera y régimen de caudales(ACA, 2006).

Para obtener resultados más confiables en la modelación de la calidad del agua se debe contar con un programa monitoreo sobre la fuente hídrica, que permita la adecuada calibración y validación del modelo. Estos monitoreos deben permitir realizar una caracterización física e hidrodinámica del cuerpo hídrico e identificar las variables críticas que representan la afectación de la corriente a causa de los vertimientos de aguas residuales realizados. La guía de modelación de aguas superficiales emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible establece las variables físicas, químicas, microbiológicas e hidrobiológicas mínimas a monitorear en el cuerpo de agua y en vertimientos para la realización de modelaciones de calidad del agua. El monitoreo de la corriente hídrica puede tener ajustes a las indicaciones iniciales, ya que se debe tener en cuenta el objetivo de la modelación, y las características particulares identificadas para cada cuerpo de agua (MINAMBIENTE, 2018).

2.1.3. Modelación de la calidad del agua en ríos

Los contaminantes presentes en los vertimientos al entrar en contacto con el cuerpo hídrico se transportan a través de la masa de agua, presentando diferentes características, las cuales se consideran importantes en la representación del transporte de los solutos, descripción realizada por medio de ecuaciones empíricas de advección y dispersión desarrollada por Taylor en 1954. Esta formulación se basa en describir el comportamiento de las sustancias disueltas en la trayectoria de la fuente hídrica, teniendo en cuenta los parámetros de la ley de Fick (Camacho & Díaz Granados, 2003). El transporte de contaminantes en ríos ha sido modelado mediante la Ecuación de Advección Dispersión, la cual se encuentra involucrada de forma implícita en los

modelos comerciales, haciendo necesario que el usuario introduzca los respectivos parámetros del modelo al realizar la simulación(MINAMBIENTE, 2018).

Teniendo en cuenta la información requerida para la modelación de la calidad del agua, se debe entender que cada cuerpo hídrico representa un sistema independiente, donde ocurren diversidad de procesos complejos, difíciles de identificar por el hombre a simple vista; como es el caso de la depuración y recuperación de la calidad del agua. Es por esto, por lo que se utilizan modelaciones que consisten en representaciones matemáticas de los procesos de transporte y degradación de una o varias sustancias contaminantes, indicando la capacidad de asimilación, ante diferentes escenarios como variabilidad de caudales y características de vertimientos(Zhang et al., 2012).

La manera de realizar un modelo que se acerque a la realidad depende de la calidad de la información recolectada en campo. Debido a la complejidad y dinámica de los sistemas naturales los monitoreos conllevan a errores en la captura de los datos de entrada a los modelos, teniendo en cuenta esta afirmación el modelador debe ser consiente y dar a conocer las limitaciones e incertidumbre que se puedan presentar en los resultados y de esta forma ningún modelo puede representar de forma exacta el comportamiento de dichos sistemas (Camacho & Díaz Granados, 2003).

Al considerar la incertidumbre como uno de los problemas más importantes en la modelación de la calidad del agua, se deber enfocar los trabajos en busca de la reducción de la incertidumbre asociada a la aplicación de los modelos matemáticos de simulación de la calidad del agua, esto se realiza contando con información que sea suficiente en cantidad y calidad, y el seguimiento de un protocolo de modelación que permita identificar y cuantificar las fuentes de incertidumbre. Considerando lo anterior, en el presente proyecto se realiza el seguimiento de la Guía de modelación de aguas superficiales que rige en el país desde el 2018 (MINAMBIENTE, 2018).

El proceso de modelación consiste en la representación de la realidad mediante un modelo conceptual, el cual implica una serie de simplificaciones e hipótesis que permiten describir de forma aceptable el sistema natural a representar. De acuerdo con Refsgaard y Henriksen (2004), el proceso de modelación puede entenderse como la interacción de cuatro elementos básicos: realidad, modelo conceptual, código y modelo (como se indica en la Figura 1) Dichos elementos están vinculados entre sí a través de los procesos de análisis, programación, preparación del modelo y simulación, que a su vez comprenden procedimientos que evalúan la fiabilidad de dichos procesos.

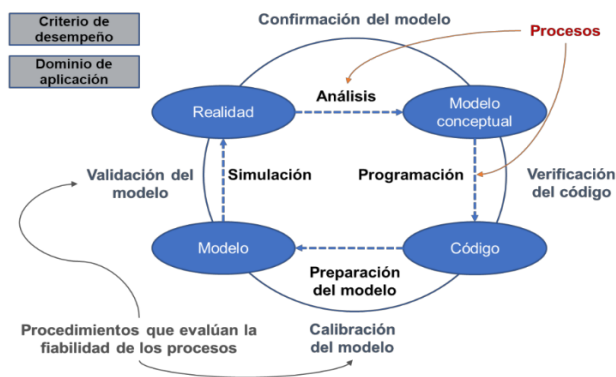


Figura 1. Elementos que componen la terminología adoptada de modelación Adaptado de Resfsgaard y Henriksen (2004) (MINAMBIENTE, 2018).

Dentro de las simulaciones comúnmente utilizadas, se encuentra el modelo de Streeter-Phelps, donde se determina la cantidad de oxígeno disuelto presente en la fuente hídrica y la transformación de la materia orgánica, en la zona que se estudia (Chapra, 2008), el modelo QUAL2Kw, que incorporan las ecuaciones de Streeter & Phelps, han sido aplicados en diversas aplicaciones de modelación a nivel nacional y regional (MINAMBIENTE, 2018).

QUAL2Kw está codificado en lenguaje Fortran hasta actualmente estar desarrollado en formato VBA y el software DELFT 3D desarrollado por el instituto Deltares, es continuamente actualizado y brinda gran cantidad de recursos de ayuda para su uso y desarrollo, es de uso libre para la

simulación de la calidad de las aguas superficiales continentales, fue desarrollado por Chapra, como una versión mejorada del modelo QUAL2E (Brown and Barnwell 1987), presenta gran documentación para la aplicación a nivel regional, considerándose un opción adecuada para la modelación de la calidad del agua (MINAMBIENTE, 2018).

Para un adecuado desarrollo de la modelación y de la debida representación de la realidad, se debe contar con un código adecuado que se ajuste a los objetivos planteados y a los resultados que se buscan obtener. Posteriormente, el código computacional construido es configurado para que represente las condiciones particulares del área de estudio (por ejemplo, caudales, vertimientos, entre otros.), con lo cual se obtiene el modelo de un caso de estudio particular. Finalmente, el modelo implementado debe ser calibrado y validado, con el fin de garantizar su capacidad de representar las condiciones observadas en la realidad, de forma que pueda ser usado para la simulación de distintos escenarios (MINAMBIENTE, 2018).

La calibración es el proceso mediante el cual se ajustan los parámetros del modelo con el fin de hacer coincidir, tanto como sea posible, los resultados de la simulación con los datos medidos en campo (Gupta et al., 2005). En otras palabras, la calibración consiste en ajustar el modelo para que reproduzca adecuadamente el sistema que se está modelando en términos hidrodinámicos y de calidad de agua, los parámetros de un modelo de calidad del agua son los coeficientes o tasas de reacción y transporte, los cuales se deben ajustar mediante métodos estadísticos o regresiones matemáticas.

Las modelaciones permiten la identificación de impactos que se generan en quebradas y ríos, no solo se puede quedar en la predicción del comportamiento del oxígeno disuelto a través del tramo, por lo que es importante valorar el grado de afectación antrópica en el cuerpo hídrico a nivel ecológico. Es por esto por lo que se tienen que integrar los análisis fisicoquímicos e

hidromorfológicos, incorporando un análisis de la modelación a nivel ecológico y su incidencia en la cuenca(Holguin-Gonzalez et al., 2013).

2.2. Antecedentes

Dentro de los estudios realizados en el sector con fines de ordenamiento y control de la contaminación de las corrientes hídricas y que emplean herramientas de simulación matemática, se destaca el realizado en el 2015 en la microcuenca río Frío en la quebrada Mensulí Aranzoque, en donde se desarrolló un proyecto que buscaba establecer un instrumento que describiera el comportamiento de la calidad del agua del tramo en estudio.

Mediante un modelo de simulación, basado en monitoreos históricos de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga-CDMB y la realización de campañas de monitoreos fisicoquímicos se realizó la simulación de la calidad en la quebrada Mensulí utilizando el modelo QUAL2Kw, presentando limitaciones en la información requerida para realizar la calibración y verificación del modelo(Chaparro Díaz, 2013).

Otro estudio realizado sobre una de las fuentes hídricas importantes de la región, la quebrada La Iglesia afectada por los vertimientos industriales ubicados en su recorrido y los lixiviados generados por el relleno sanitario de la ciudad de Bucaramanga El Carrasco, de igual manera se utilizó el modelo QUAL2Kw, por medio de este estudio se permitió evaluar la capacidad de asimilación de aguas residuales que tiene la corriente hídrica mediante la simulación de varios constituyentes de calidad del agua, utilizando una solución de diferencias finitas de las ecuaciones de advección-dispersión y de reacción.(Carrillo Quintero, 2016).

Para la determinación de la capacidad de auto purificación del río Frío en el departamento de Santander, se utilizó el modelo QUAL2Kw. Como base para los datos de entrada al modelo se

estimaron las características del río de montaña y las afectaciones de las aguas residuales domésticas. Gracias a este estudio se identificó la importancia de las características hidráulicas del río tales como la alta rugosidad Manning y la velocidad media, para el aumento de la capacidad de autopurificación, permitiendo tasas de reaireación del orden de $3,26 \text{ d}^{-1}$ (Rivera Gutiérrez, 2016).

En el 2015 en el río Guacaica del Departamento de Caldas, se realizó una simulación de la calidad del agua, por medio de un modelo matemático teniendo en cuenta los diferentes procesos de transporte y degradación de los compuestos que son vertidos a la corriente, utilizándose el QUAL2Kw. La implementación del modelo calibrado permitió predecir la respuesta del río ante la hipótesis de escenarios de saneamiento futuro, llegando a la conclusión que las constantes cinéticas son variables importantes en los resultados obtenidos (Castro Huertas, 2015).

En el río Palo localizado en el departamento del Cauca, en el 2014, se realizó la simulación matemática para la calibración y verificación de los subcomponentes hidráulicos y fisicoquímicos del modelo de simulación de la calidad del agua QUAL2Kw, con el fin de generar una herramienta de soporte de toma de decisiones con fines de ordenamiento del recurso hídrico (Holguín, 2014).

2.3 Zona de estudio

En la zona de estudio se encuentra la autoridad ambiental CDMB la cual cuenta con un sistema de seguimiento de la calidad del agua de las fuentes de su área de influencia. La Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga cuenta con seis puntos de monitoreo sobre el Río de Oro (RO-CY, RO-05, RO-04, RO-4A, RO-02 y RO-01) en los afluentes principales de este río fueron establecidos cuatro puntos de control (RF-1A, LI-01, LT-01 y SO-01) y para finalizar en el Río Lebrija, fueron establecidos dos puntos más, para un total de 12 puntos (RL-02 y RL-03). Sucesivamente y a través del tiempo la CDMB instaló más puntos de

monitoreo a la Red con el propósito de generar un mayor cubrimiento del área de jurisdicción, así como también establecer el estado del recurso en los principales cascos urbanos, dentro de esta inclusión adicional se encuentra el punto de monitoreo MS-05 sobre la fuente de la quebrada Mensulí. En la Figura 2 se observa las características del punto de monitoreo.

SUBDIRECCION DE ORDENAMIENTO Y PLANIFICACION INTEGRAL DEL TERRITORIO		
MUNICIPIO: Piedecuesta	COORDENADAS	
CUENCA: Lebrija		
SUBCUENCA: Río de Oro		
MICROCUENCA: Río Frío		
FUENTE: Q. Mensully – Aratoque	NORTE	ESTE
ESTACIÓN: Platacero	1269168	1111743
CÓDIGO DE LA FUENTE: 2319- 2 -4	7° 1' 44,861"	73° 3' 58,334"
CÓDIGO ESTACIÓN: MS – 05	COTA (m): 1.026	TIPO DE AFORO: Vadeo
REFERENCIA: Antes de las descargas de los establecimientos sobre la vía Piedecuesta-Florida.	AÑO DE CREACIÓN: 2003	

Figura 2. Características punto MS-05 (CDMB, 2020)

Tabla 1. Resultados ICA campañas 2018 CDMB.

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	1ra RONDA	2da RONDA	3ra RONDA	4ta RONDA	ICA 2018	CALIDAD
Q. Mensulí	MS-05	64,19	58,32	47,61	69,72	59,96	BUENA

Los valores de la Tabla 1 corresponden a los datos evaluados de las campañas realizadas sobre el punto de monitoreo MS-05 de las quebrada Mensulí en el 2018, indicado una calidad buena de acuerdo con las metodologías evaluadas del índice de calidad ICA. En la Tabla 2 se observa el resultado del 2018 indicado en la Tabla 1 (59,96 promedio de los 4 resultados del año), con la comparación de los índices en los diferentes años mostrando un descenso en la calidad del agua en 2016, 2017 y 2018 con respecto del 2015, pasando de óptima a buena.

Tabla 2. Resultados ICA campañas 2015, 2016, 2017, 2018 CDMB.

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	2015		2016		2017		2018	
		ICA	Calidad	ICA	Calidad	ICA	Calidad	ICA	Calidad
Q. Mensulí	MS-05	82,78	OPTIMA	58,47	BUENA	63,09	BUENA	59,96	BUENA

Tabla 3. Resultados ICOMI ICOMO campañas 2018 CDMB.

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	ICOMI	Grado de Contaminación	ICOMO	Grado de Contaminación
Q. Mensulí	MS-05	0,14	Ninguna	0,42	Media

Tabla 4. Resultados ICOSUS ICOTRO campañas 2018 CDMB.

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	ICOSUS	Grado de Contaminación	ICOTRO	Grado de Contaminación
Q. Mensulí	MS-05	0,05	Ninguna	0,1425	Eutrófico

Revisando los resultados de los ICO se encontró que los índices ICOMI E ICOSUS no presentan ningún grado de contaminación, pero el índice ICOMO que evalúa la materia orgánica se encuentra en un nivel medio, interpretándose como altos contenidos de materia orgánica, para lo cual no puede ser validado al no encontrarse los datos del laboratorio tomado en cada una de las campañas (Ver Tabla 3 y Tabla 4).

La subcuenca Río de Oro tiene un área de drenaje aproximada de 56.942,18 hectáreas, y se circunscribe parcialmente a los municipios de Piedecuesta, Girón y Bucaramanga y a la totalidad del municipio de Floridablanca. Esta subcuenca corresponde al área Suroriental de la Cuenca Superior del Río Lebrija y se ha dividido en las microcuencas Oro Alto, Oro Medio, Oro Bajo, Río Hato y Río Frío.

La microcuenca de Río Frío alcanza una extensión aproximada de 11.890 hectáreas, abarcando sectores del Macizo de Santander y de la zona intermontana de Bucaramanga. En ella se ubica la mayor parte del territorio municipal de Floridablanca. Según el POMCA del río Lebrija la microcuenca río Frío alcanza altitudes que varían de 800 a 3.000 metros, con precipitaciones que varían de 1.000 a 2.000 mm y temperaturas que oscilan de 10 a 25°C; parámetros que le imparten a la microcuenca diversos climas ambientales: cálido semiseco, medio semihúmedo a muy

húmedo y frío muy húmedo. Esta microcuenca es atravesada por numerosas vías tanto en el sector urbano como rural. La Transversal Oriental atraviesa la zona urbana de Floridablanca, desde la divisoria de aguas con la Microcuenca Oro Bajo hasta conectarse con la vía Bucaramanga Piedecuesta (CDMB, 2004).

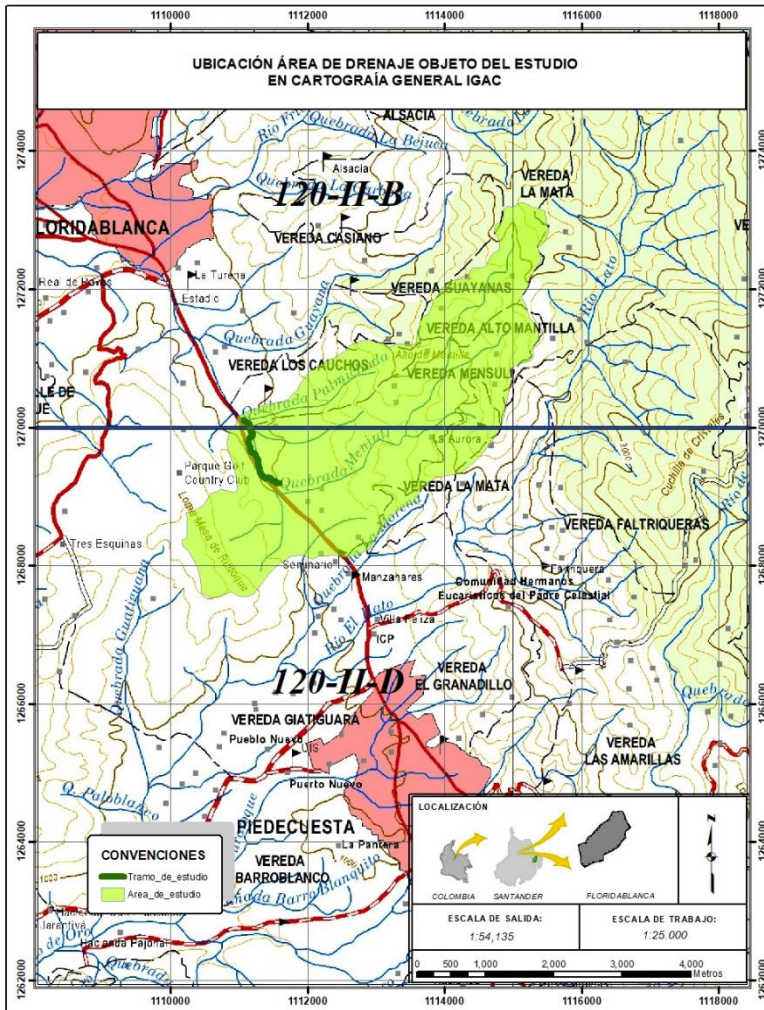


Figura 3. Predio objeto de estudio en la cartográfica general (IGAC, 2016).

El área objeto de estudio de la quebrada Mensulí cuenta con un área aproximada de 3250 hectáreas ubicadas en el municipio de Floridablanca Santander, en las coordenadas aproximadas:

X: 1.105.496,521 Y: 1.271.972,910 como se observa en la Figura 3, las cuales corresponden a la plancha 120-II-B y 120-II-D del IGAC y se ubican en la microcuenca Río Frío (CDMB, 2013).

La quebrada Mensulí en la parte media de la cuenca presenta el recorrido paralelo a la autopista que comunica a los municipios de Floridablanca y Piedecuesta; lo que conlleva a desarrollos urbanísticos y el aumento de la densidad poblacional en el área de influencia directa de la quebrada, generando aguas residuales domésticas que son vertidas a la fuente hídrica con o sin tratamiento previo, disminuyendo la capacidad de regulación y autodepuración.

2.3. Marco legal

En la Tabla 5 se enmarca en el ordenamiento del recurso, a continuación, se enumeran la normativa que enmarca la legislación colombiana en el tema del recurso hídrico.

Tabla 5. Normatividad Colombia recurso Hídrico.

NORMATIVIDAD	
Decreto Ley 2811- 1774	Se dicta el código Nacional de Recursos Naturales y protección del medio ambiente.
Decreto 1449-1977	Por el cual se reglamenta parcialmente el inciso del numeral 5 del artículo 56 de la ley 135 de 1961 y el decreto ley 28181 de 1974, en relación con la conservación, protección y aprovechamiento de las aguas, los propietarios de predios están obligados a Ver ley 79 de 1986, ley 373 de 1997, y en relación con la protección y conservación de los bosques los propietarios de predios están obligados a ver Decreto Nacional 1791 de 1996, aprovechamiento forestal.
Ley 99- 1993	Se crea el ministerio del medio ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y os recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental SINA y se dictan otras disposiciones
Decreto 1600-1994	Se reglamenta parcialmente el sistema nacional ambiental SINA e relación con el sistema nacional de investigación ambiental y de información ambiental.
Ley 373- 1997	Se establece el programa de uso eficiente y ahorro de agua.
Decreto 155- 20004	Reglamenta el artículo 43 de la ley 99 de 1993 sobre las tasas de utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 1443-2004	Reglamenta parcialmente el decreto ley 2811 de 1974, l ley 253 de 1996 y la ley 430 de 1998 en relación con la prevención y control de la contaminación ambiental por el

	manejo de plaguicidas y desechos o residuos peligrosos provenientes de los mismos y se toman otras determinaciones.
Resolución 865-2004	Adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones
Resolución 872-2006	Establece la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas subterráneas a que se refiere el decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 1323-2007	Crea el sistema de información del recurso hídrico (SIRH)
Decreto 2820-2010	Por el cual se reglamenta el título VIII de la ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales
Decreto 2667-2012	Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras disposiciones.
Decreto No. 1076 de 2015	Mayo 26 de 2015 "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible".
Resolución No. 0631 de 2015	Marzo 17 de 2015 "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones"
Decreto No. 2245-2017	"Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas"
Decreto No. 1090 de 2018	Junio 28 de 2018 "Por el cual se adiciona el Decreto 1046 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones.,"
Resolución No. 0958 de 2018	Mayo 31 de 2018 "Por la cual se incorpora la Guía técnica para la formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico superficial - PORH a la resolución 751 de 2018, se ordena su publicación en el diario oficial y se dictan otras disposiciones."
Resolución No. 0959 de 2018	Mayo 31 de 2018 "Por medio de la cual se reglamenta parcialmente el artículo 2.2.3.2.1.7 del Decreto 1076 de 2015 y se dictan otras disposiciones.
Decreto 50 de 2018	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones

2.4. Marco institucional

El contexto de un marco institucional para la gestión del recurso hídrico sobre la fuente hídrica Quebrada Mensulí, implica un sinnúmero de actores de diferentes sectores, tales como:

- Las alcaldías de los municipios de Floridablanca y Piedecuesta.
- Los organismos reguladores y responsables tienen un papel clave en el establecimiento y aseguramiento de la aplicación efectiva de las herramientas en saneamiento sostenible y gestión del agua, como lo es la autoridad ambiental local la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- La CDMB en busca del cumplimiento del objetivo de calidad de la quebrada Aranzoque o Mensulí – mediante acuerdo Consejo Directivo CDMB N.º 1075 de 2006, estableció los objetivos de calidad para la corriente, en el cual se precisa el uso del agua Agrícola (CDMB, 2018).
- Actualmente el monitoreo de corrientes es un programa institucionalizado de la CDMB que evalúa la calidad del agua de las corrientes superficiales del área de jurisdicción de la entidad, el desarrollo de este comprende un monitoreo que incluye toma de muestras, análisis de laboratorio y la evaluación de los resultados (CDMB, 2018).
- En este sentido, la CDMB cuenta con un programa institucional llamado Red de Monitoreo de Corrientes que tiene como objetivo/propósito fundamental, medir y analizar la calidad de agua en las corrientes y tramos de corrientes, por medio del cual se realiza el seguimiento a las cuarenta (40) principales fuentes hídricas en su área de jurisdicción donde se realizan cuatro campañas en el año, con el fin de obtener información de la calidad y cantidad de estas fuentes hídricas.

3. Metodología

Para evaluar los impactos generados por los vertimientos sobre la Quebrada Mensulí, se realizó la identificación y caracterización de los vertimientos presentes en el tramo de estudio, los cuales, junto con las características hidrológicas, hidráulicas de la fuente hídrica se incorporaron en un modelo matemático de la calidad del agua. El estudio se dividió en tres fases metodológicas con sus respectivas actividades. Las fases y actividades ejecutadas se detallan a continuación, con su respectivo registro fotográfico:

3.1.Fase I. Identificación de vertimientos:

Para evaluar los impactos que se generan sobre el recurso hídrico, se realizó la caracterización del tramo de quebrada Mensulí desde el punto conocido como el restaurante Mensuly, hasta la Universidad Pontificia Bolivariana. Para la identificación de los vertimientos presentes en la zona de estudio se realizó una visita de reconocimiento el 19 de septiembre de 2018, donde se efectuó una caminata por el tramo de la corriente, determinado como zona de estudio. En este recorrido se identificaron las características hidráulicas e hidromorfológicas de la quebrada y siete vertimientos sobre el tramo, con esta información se diseñó de manera adecuada y de acuerdo con las características particulares de la fuente hídrica evidenciadas en campo el formato de recolección para la toma de características hidromorfológicas, siguiendo el protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos de la *Agencia Catalana del Agua* (ACA, 2006). Durante esta visita inicial se observaron los puntos de monitoreo sobre la quebrada y los vertimientos identificados, se verificaron los accesos (Facilidad de ingreso al punto) para la toma de información especialmente el levantamiento topo batimétrico y el monitoreo de variables fisicoquímicas y microbiológicas.

En el recorrido se realizó una georreferenciación de los vertimientos y tributarios con un equipo Garmin GPSmap 62sc, los cuales se ingresaron a un sistema de información geográfica (Q-GIS) para observar su ubicación y posteriormente consolidar y manejar los datos levantados en campo. La georreferenciación de los puntos se consideró base para la planeación del levantamiento topográfico y la toma de información hidromorfológica. De acuerdo con la georreferenciación realizada y la cartografía base del IGAC y de la CDMB se identificaron las generalidades del área de drenaje.

3.1.1. Captura de información Hidromorfológica

Se utilizó la metodología de los protocolos para la valoración la calidad del agua hidromorfológica, hidrobiológica y fisicoquímica, y se recolectó la información en campo requerida para identificar la situación actual en la que se encuentra la quebrada. Se realizó un levantamiento de información complementaria, que permitió caracterizar la cuenca; conocer las características hidrológicas gracias a las estaciones del IDEAM y la batimetría del tramo de estudio realizada en el desarrollo del presente proyecto de donde se obtuvieron las características hidráulicas representativas.

Con el fin de incluir la calidad hidromorfológica dentro del tramo de estudio de la quebrada Mensulí, que permita determinar el nivel de impacto generado por los vertimientos y los desarrollos del sector, se incluyó la evaluación de la estructura física (morfometría fluvial y estructura del bosque de ribera), así como el régimen de caudales asociados a los ecosistemas fluviales. En la Figura 4 se encuentra el formato de captura de información hidromorfológica que se utilizó sobre quebrada Mensulí, en el apéndice A. Formato Protocolo Hidromorfológico se encuentra el formulario diligenciado completamente para cada tramo analizado.

General							
nombre del cuerpo de agua				fecha		tiempo (hora de muestreo)	
Condiciones climáticas excepcionales Si/No			lluvia extrema Si/No		Sequía Extrema Si/No		otros Si/No
Sección cruzada		anchura en la parte superior		Anchura de la superficie del agua (cauce)		av. Profundidad	
anchura/profundidad		<2/1		2/1 ≤ x <5/1		>5/1	
variación en la anchura							
variación en el flujo		ausente en construcciones humanas		Si/No moderado alto		Si/No bajo Si/No	
capa inferior							
invisible-turbia Asnt/baja/Mod/alta/Dom*							
natural Asnt/baja/Mod/alta/Dom*							
no natural Asnt/baja/Mod/alta/Dom*							
sustrato		invisible		grava		arena	
		detritus		escombros		gujarro+(F, 0.4-6.4 cm)	
		concreto		otro:		limo	
						arcilla	
						roca arcilla y caliza	
						va. Gujarro (F, 6.4-25.6 cm)	
						carbón ligero	
						piedras grandes	
sombreado							
Ausente		Noreste		Norte		parcialmente sombreada, limite en el tramo <33%	
Noroeste		Sureste		Sur		parcialmente sombreada, tramo más grande 33-90%	
Sureste		Suroeste		Este		parcialmente sombreada, en todo el tramo >90%	
Suroeste				Oeste		completamente sombreado, limite en el tramo >33%	
						completamente sombreado, tramo más grande 33-90%	
						completamente sombreado, en todo el tramo >90%	
						Si/No	
						Si/No	
						Si/No	
						Si/No	
						Si/No	
						Si/No	
barras sedimentos							
#curvas en el interior		...		#barras puntuales		...	
#uniones de curvas		...		#mid-barras del canal		...	
						#barras laterales	
						...	
capas de lodo							
invisible		ausente		<5cm		entre 5 y 20 cm	
Si/No		Si/No		Si/No		Si/No	
						> 20 cm	
						Si/No	
pozos actuales							
Invisible		Si/No		grandes diferencias locales		Si/No	
Ausente/Variación del flujo = 0		Si/No		Abundantes		Si/No	
presente moderadamente		Si/No					

Figura 4. Protocolo levantamiento de datos hidromorfológicos en campo (ACA, 2006) Partes a y b del Protocolo.

3.1.2. Proyección de sitios de monitoreo

La evaluación del impacto del vertimiento sobre la calidad del cuerpo de agua se realiza teniendo en cuenta condiciones de caudal crítico, para lo cual se simuló un escenario en el que se consideró las condiciones de caudales bajos en el cuerpo de agua y la máxima carga contaminante. En una etapa posterior al análisis de la información existente del cuerpo de agua, se efectuó una etapa de trabajo de campo, con el fin de levantar la información requerida para la calibración y validación del modelo, por tal razón se proyectó dos campañas de monitoreo una en abril de 2019 para representar la época de altas precipitaciones y la siguiente el 12 de diciembre de 2019 para representar la época de bajas precipitaciones, y así, tener la información para la calibración y validación del modelo.

Inicialmente, para la selección de los puntos a muestrear durante las dos campañas se siguió los criterios sugeridos por la guía de modelación de la calidad del agua superficial. Estos consisten

en tomar como punto de muestreo aquellos sitios de las corrientes donde se presenta las descargas, así mismo, se tuvieron presentes otros aspectos considerados relevantes para la seleccionar o descartar algunos puntos:

- Los sitios de monitoreo representan de forma apropiada el cambio de la calidad del agua a lo largo de la quebrada y permita identificar el efecto de aportes de carga contaminante de tributarios y vertimientos puntuales, debido a cambios en el uso del agua y del suelo.
- Se consideró la localización de sitios de monitoreo que acotan cambios significativos en la geomorfología y dinámica de los cuerpos de agua, teniendo en cuenta los vertimientos y tributarios principales al cuerpo de agua.
- Los tributarios considerados en el monitoreo son aquellos que generan un aporte significativo de caudal y/o carga contaminante sobre el cuerpo de agua objeto de ordenamiento.
- Se considero las estaciones utilizadas previamente por la Autoridad Ambiental competente en otros estudios para la evaluación y control de la calidad del agua.
- La facilidad de acceso a los sitios propuestos de monitoreo. Para este fin es importante la visita preliminar de campo, el acceso a cartografía con las vías principales que cruzan o pasan cerca del cuerpo de agua y sus tributarios principales, y las condiciones topográficas de los puntos.
- Los puntos deben estar localizados a una distancia mayor o igual a la longitud de mezcla, aguas abajo de confluencias con afluentes naturales o vertimientos.

Para la definición de los sitios a monitorear se tomó la información recopilada de la visita de campo inicial y la caracterización hidromorfológica, donde se identificó que los puntos a monitorear identificados corresponden a siete vertimientos y cuatro tributarios, de igual manera se complementaron con siete puntos de control sobre la fuente hídrica. La definición y ubicación de estos puntos de monitoreo se basa en construir un esquema que indique las entradas, salidas,

los procesos fisicoquímicos y biológicos dominantes en el sistema a modelar, los segmentos que se tracen deben contener características hidrológicas, hidráulicas, ecológicas, geomorfológicas, topográficas, usos de suelo o calidad del agua similares (MINAMBIENTE, 2018)

A continuación, se genera una descripción de la información que se utilizó para el análisis y comprensión de los principales procesos hidrológicos, hidráulicos e hidromorfológicos, y se presenta el desarrollo de las actividades:

- Ubicación de estaciones hidroclimatológicas y de calidad de agua, realizada por medio de cartografía de la información oficial del IDEAM y CDMB.
- Captura de información de suelos y coberturas.

Con el fin de conocer las características climáticas, hidrológicas y de calidad del agua de quebrada Mensulí, se usó la información de las estaciones climatológicas de las autoridades competentes para tal fin, como lo es el IDEAM y CDMB, se precedió a ubicar las estaciones presentes en el área de estudio las cuales se identificaron con información homogénea.

Para la determinación de las características climáticas, se ubicaron las estaciones cercanas al área de influencia con el fin de determinar la estación más representativa operada por el IDEAM y la CDMB, y en estado activo que representan importancia para la cuenca de interés. Esta información es de vital importancia para identificar las estaciones que tienen mayor representación en el área de drenaje; por esta razón se realizó el análisis de polígonos de Thiessen con las estaciones cercanas, y el resultado que define la incidencia de las estaciones en la cuenca.

Se realizó un filtro de las estaciones con información importante para el desarrollo del estudio en el cual se tuvo en cuenta aquellas con información en su serie de datos mínimo de 10 años para los datos climáticos. Analizada esta información se procedió a identificar todas las que contenían los datos con el mismo periodo con el fin de generar una coherencia en los años analizados.

3.1.3. Georreferenciación de vertimientos y levantamiento topo batimétrico

En la realización del levantamiento topográfico se tuvieron en cuenta las siguientes actividades:

En la *actividad 1* se realizó una visita al campo para la verificación de la toma de los puntos de control.

En la *actividad 2* se armó la estación total encima del punto de referencia proporcionado por IBG Ingeniería, con la ayuda de un segundo punto, se hizo el amarre respectivo para el levantamiento, esto con el fin de darles coordenadas X, Y, Z a los detalles que se encontraron dentro del centro donde se desarrolló el levantamiento altimétrico y planimétrico

En *la actividad 3* se realizó el levantamiento de la nube de puntos (poligonales de control) que representan la superficie del suelo y vías existentes con el fin de ejecutar el cálculo de las curvas de nivel de la zona de estudio, se recomendó usar el método de poligonal cerrada punto a punto cuyos datos registrados por la Estación total (Ver características de la estación Tabla 6.)

En la *actividad 4* se procedió a extraer los datos de coordenadas de cada uno de los puntos levantados con la estación total, se calcularon las curvas de nivel cada 0,5 metros.

En la *actividad 5* se identificó el reporte de posicionamiento, con ayuda del receptor de GPS para determinar la posición de los elementos en la superficie terrestre y en navegación, para esto se empleó el método Estático post proceso, tomando variaciones de tiempo en función de las distancias entre los puntos.

Recurso técnico empleado: Los materiales de campo usados fueron: Una cinta métrica, un flexómetro, un martillo, clavos de acero, estacas, bastón, pintura de aceite y prisma; y se implementaron los siguientes equipos para el desarrollo del proyecto junto con sus respectivas características y especificaciones detallada de ellos.

Tabla 6. Características Estación Topográfica.

CARACTERISTICAS	ESPECIFICACION	MEDICION DE ANGULOS	TELESCOPIO
South, Ref. NTS-350L\350R, con precisión de 3mm: equipo de topografía profesional, Alcance con un prisma 5 m, memoria 17.000 p, 2 pantallas, alfanuméricas, precisión 5"/1" aumentos 30x con plomada laser, con estuche de alto impacto, batería recargable, pantallas de cristal líquido iluminable en ambos lados, compensador líquido, lectura electrónica de ángulos con resolución en pantalla 1" (UN segundo).	MEDICIÓN DE DISTANCIA Max.Range _ 1 Prism: 5,0 kilómetros _ 3 Prism: 6,0 kilómetros _ Mini Prism: 800m Lectura máxima: 99.999.999,9999 m Lectura mínima: 0,1 mm	Método de medida: código Absoluto Diámetro Raster: 79mm Min Unidad de visualización: 1 "/ 5" seleccionable Precisión: 5 " Método de detección: Horizontal: Dual Vertical: Dual	Imagen: Erguido Longitud: 154mm Apertura de vigencia: Telescopio: 45mm; Objeto de la lente (50mm) Ampliación: 30x



3.1.4. Toma de caudal

Como el objeto del estudio es la modelación de la calidad de un sistema natural como lo es la quebrada Mensuli, se identificaron los procesos naturales que ocurren, interactúan y tienen incidencia en ella para lo cual se realizaron la mayor cantidad de mediciones y caracterizaciones posibles que permitieron reducir las incertidumbres del modelo que se quería lograr. Dentro de las mediciones macroscópicas realizadas, se encuentra la caracterización fisicoquímica de la fuente hídrica, cálculo de velocidades de la fuente por medio de aforos con molinetes, niveles del agua en el momento de la caracterización, y batimetría para identificar la hidráulica de la corriente. Se realizó una medición de velocidad en 11 puntos de la quebrada Mensulí mediante molinete correntómetro universal tipo F1. Dicha labor la realizó un técnico especializado en este tipo de tomas por parte del Laboratorio SEGIMA acreditado por el IDEAM, se realizaron mediciones en los puntos indicados en la visita inicial. Con esto fue posible estimar un caudal aproximado, teniendo en cuenta la sección en los puntos de medición y el perfil típico de velocidades en una sección hidráulica trapezoidal.

3.2.Fase 2. Caracterización y evaluación la calidad fisicoquímica e hidromorfológica.

Las actividades de campo se realizaron a la par con los trabajos de topografía realizados en marzo y abril de 2019. Gracias a la caracterización hidromorfológica de la quebrada Mensulí se identificó el inventario de obras hidráulicas presente en el tramo de estudio y la identificación de los puntos de monitoreo sobre la quebrada. La caracterización y evaluación de la calidad del agua se basó en la planeación del programa de monitoreo y la toma de información adecuada la cual es la principal fuente de alimentación del modelo matemático de calidad de agua, a continuación, se indica cada una de las actividades realizadas.



Figura 5. Proceso metodológico para la caracterización FQ - MB de aguas. (SEGIMA SAS, 2019)

En la Figura 5, se presenta el proceso metodológico para la caracterización fisicoquímica y microbiológica, el cual comprende las actividades de trabajo de campo, análisis de muestras, reporte de laboratorio e informe técnico, todo lo anterior con base en los lineamientos establecidos en el Manual de Toma y Preservación de Muestras del IDEAM según el documento interno de SEGIMA SAS, PD-CR-01 Procedimiento de caracterización de aguas.

3.2.1. Planeación del programa de monitoreo y caracterización fisicoquímica e hidráulica

De acuerdo con el objetivo del estudio donde se busca identificar el impacto generado de los vertimientos de aguas residuales domésticas sobre la quebrada Mensulí y la guía metodológica de modelación de la calidad del agua, se establecen las siguientes variables claves comúnmente usadas para representar la hidrodinámica, el transporte y las condiciones de calidad del agua: la temperatura del agua, velocidad, profundidad, caudal, los organismos patógenos (modelación de coliformes totales y/o fecales como indicadores), pH, alcalinidad, oxígeno disuelto, materia orgánica, los nutrientes (ciclos del nitrógeno y fósforo, principalmente). El Indicador de la concentración de materia orgánica en el agua se determina directamente con la medida del carbono orgánico total (COT), pero en el presente proyecto se determina este indicador de manera indirecta, midiendo la capacidad reductora del carbono existente con la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). (Fuentes Rivas, 2015).

Si bien uno de los aspectos más importante que afectan la calidad del agua en el recurso hídrico es la presencia u ocurrencia de la demanda béntica de oxígeno, en la presente modelación de la calidad del agua no se contempla la variable SOD, a pensar que la quebrada Mensulí presenta profundidades bajas que favorecen la acumulación de sedimento, pero presenta velocidades

medias superiores a los 0,6 m/s, adicional los métodos de campo son costosos incrementando el presupuesto del presente proyecto.

Teniendo en cuenta que en el alcance del presente proyecto se quiere identificar el impacto de la materia orgánica sobre la corriente se caracterizan variables fisicoquímicas y microbiológicas y no se incluye monitoreo de especies hidrobiológicas, si bien estas son bioindicadores de la calidad del agua están relacionadas con la detección de los cambios en el estado ambiental, requieren de conocimientos previos de la biota (Jhonson et al, 1993) y por limitaciones presupuestales, no se incluyeron estas variables en el monitoreo realizado.

Como primer componente para la caracterización de la quebrada Mensulí se identificó las variables hidráulicas del cuerpo de agua como la geometría, la velocidad de flujo, los caudales y el tiempo de viaje, para lo cual se realizó un estudio hidráulico de la corriente. La caracterización Hidromorfológica e hidráulica se realizó en marzo y abril de 2019, la cual contempló recolección de información de los tramos morfológicos de la fuente hídrica, toma de caudales, velocidades profundidades de la quebrada, además un levantamiento topo batimétrico para conocer las características hidráulicas de la fuente. Con los datos tomados en campo se pudieron determinar los caudales, parámetros hidráulicos, tiempos de viaje, parámetros climáticos, coeficientes, y cambios morfológicos en la quebrada. Cada uno de estos cálculos se realizaron para las diferentes épocas de toma de información de campo una realizada el 19 de abril de 2019 y la siguiente el 12 de diciembre de 2019, representado los meses más secos y lluviosos respectivamente de acuerdo con el régimen bimodal de precipitación de la zona.

Después de la caracterización hidráulica, se realizó la recolección de la información referente a la calidad del agua del cuerpo de agua receptor y de las fuentes de carga contaminante (en

términos físicos, químicos y microbiológicos). El procedimiento realizado para la toma de datos se describe a continuación (MINAMBIENTE, 2018):

- La toma de muestras se realizó siguiendo la masa de agua desde aguas arriba hacia aguas abajo, incluyendo los afluentes y vertimientos en el orden que confluyen en la corriente principal, basado en los tiempos de viaje obtenidos del modelo hidráulico se realizó el diseño del programa de monitoreo y de esta manera las muestras fueron tomadas el 6 de mayo de 2019 para época de lluvias y el 27 de diciembre de 2019 para época de bajas precipitaciones.
- Se realizó la conservación y el transporte de las muestras por un laboratorio acreditado por el IDEAM en la NTC ISO 17025:2005. La caracterización fisicoquímica y microbiológica se realizó a través de la metodología establecida por el IDEAM.
- Las muestras tomadas para los parámetros fisicoquímicos sobre la quebrada se realizaron de manera integrada en la sección transversal y en la profundidad, de acuerdo con los protocolos del laboratorio SEGIMA S.A.S, acreditado por el IDEAM contratado para la realización de la actividad.
- Cada sitio de monitoreo contó con sección topo-batimétrica que cubría todo el cauce principal, los niveles y caudales medidos en campo para las dos épocas se modelaron hidráulicamente.

3.2.2. Caracterización hidromorfológica

Con los datos tomados en campo y la cartografía del sector de la zona se realizó la caracterización hidromorfológica del tramo de estudio.

A continuación, se presentan las principales herramientas o metodologías trabajadas en la determinación de los parámetros para la evaluación de la calidad hidromorfológica.

- Determinación de la unidad de muestreo: como unidad de muestreo se tomaron tramos de 120 metros lineales sobre la quebrada objeto de estudio, la cual contempla una longitud total de estudio de 1200 m. Los tramos hidromorfológicos se analizaron de manera independiente para obtener la caracterización morfológica.
- Recolección de datos: para la toma de información se utilizaron estudios de la autoridad ambiental competente CDMB, cartografía del sector, topografía levantada sobre la fuente hídrica para el presente estudio, y datos tomados en campo que se recolectaron en un recorrido por todo el tramo de estudio de acuerdo con el formato ilustrado en la figura 3.

Realización de protocolos para la determinación de la calidad hidromorfológica de acuerdo con la información recolectada. Los protocolos realizados basados en estudios realizados por el Marco del Agua se presentan a continuación: Protocolo 1: Parámetros de Caracterización Morfológica; Protocolo 2: Índice de Hábitat Fluvial (IHF); Protocolo 6: Naturalidad de los Usos del suelo en las Riberas; Protocolo 7: Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR); Protocolo 9: Determinación del nivel de calidad hidromorfológica final. Es importante aclarar que el Protocolo 3: Cumplimiento de Caudales de Mantenimiento (QM), no se tuvo en cuenta en el presente estudio, debido a la poca información de caudales sobre la fuente hídrica objeto de estudio, por tal motivo no se incluye dentro del análisis.

3.2.3. Análisis hidroclimatológico

Debido a la importancia que tienen los factores climáticos sobre los recursos hídricos, se realizó un análisis climatológico a nivel de cuenca, con el presente estudio se llevó a cabo la descripción del clima natural de la zona de estudio de la quebrada Mensulí, para ello se generó una descripción espacial y temporal de las principales variables climatológicas, identificando aquellas zonas donde

se destaca la existencia de áreas con alta pluviosidad, y diversificación de las variables a través del tiempo.

Las variables climáticas trabajadas para la zona de estudio corresponden a temperatura, precipitación, brillo solar, evaporación, y humedad relativa, con base en la información obtenida de las estaciones presentes en el área de estudio operadas por la CDMB y el IDEAM. Para efectuar la caracterización climática de la zona de estudio, objeto de estudio, se realizó el inventario y recopilación de la información disponible, la cual se explica a continuación.

Para el análisis hidroclimatológico se realizó un análisis de las estaciones hidrológicas y climatológicas cercanas al área de estudio, tomando las activas tanto de la CDMB como del IDEAM y se realizó el análisis de acuerdo con la cercanía con el área de estudio. Se identificaron como estaciones en estado activo como: La Florida, Club Campestre, La Judía y El Rasgón operadas por la CDMB, y las estaciones Granja Piedecuesta y el Conquistador operadas por el IDEAM, obtenido los datos necesarios para el cálculo de caudales.

De las anteriores estaciones nombradas se retira la estación el Conquistador por ser una estación hidrológica (otorga datos de caudales de otra fuente hídrica) ubicada en una fuente hídrica diferente a la quebrada Mensulí. Con las cinco estaciones restantes se realiza el análisis de cercanía y representatividad de estaciones por medio de polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada una de ellas sobre la cuenca de drenaje de la quebrada Mensulí así definir los datos representativos sobre el área de estudio.

3.2.4. Modelación hidráulica

Para el modelo de tránsito de caudales a través de las secciones levantadas en la quebrada Mensulí se aplicaron los conceptos técnicos de la hidráulica de canales abiertos. Para el desarrollo matemático fue utilizado el software HEC-RAS y la extensión GEO RAS para desarrollarlo en un

sistema de información geográfica. Para la determinación de niveles de lámina de agua para el caudal observado se ha partido del concepto que las velocidades de flujo a lo largo de una fuente es diferente en toda las partes de la sección transversal, significa que en el plano vertical, en un canal con rugosidad mínima y flujo subcrítico la velocidad es cero en las paredes y crece lentamente dentro de la capa límite donde el flujo es laminar, pasada la capa límite el flujo es turbulento y la distribución de las velocidades es diferente a la que tenía en la capa límite.(Fan et al., 2009)

Las secciones transversales obtenidas del levantamiento batimétrico de la quebrada Mensulí en el tramo de estudio se modelaron por medio del software HEC RAS, creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU, obteniendo un modelo hidráulico que contemple los caudales tomados los días del monitoreo, este modelo permitió obtener las variables hidráulicas características de la fuente de estudio.

3.2.4.1. Curvas de relaciones hidráulicas

Se identificaron las características hidráulicas de la quebrada Mensulí, en los diferentes tramos estudiados teniendo en cuenta el levantamiento topo batimétrico. Con base en los datos obtenidos en las secciones transversales como velocidades, profundidades y caudales se determinó por medio de regresiones potenciales las relaciones hidráulicas entre el caudal, la velocidad y la altura de la lámina de agua.

3.2.4.2. Cálculo de zona de mezcla

La estimación de la longitud de la zona de mezcla se realizó mediante la aplicación de ecuaciones empíricas, o mediante modelos numéricos, la aplicación de la fórmula se realizó con los datos obtenidos en el monitoreo realizado en la época de precipitaciones bajas,

correspondientes a caudales bajos y concentraciones máximas esperadas sobre la quebrada, y máxima carga contaminante en el vertimiento.

3.2.4.3. Tiempos de viajes

El cálculo del tiempo de viaje permitió diseñar el programa de monitoreo y así determinar el delta de tiempo para la toma de los monitoreos en la fuente hídrica, permitiendo la caracterización siguiendo la masa de agua. Con los datos obtenidos de la topografía y la campaña de toma de caudales se sigue la siguiente metodología contemplada en la guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2018):

1. Obtener la velocidad media y máxima de la sección transversal respectiva.
2. Estimar los tiempos medios de viaje y de primer arribo desde el primer sitio de medición hasta los subsiguientes (incluyendo, en el orden en el cual confluyen, los vertimientos puntuales y tributarios a monitorear). Para ello se deberá contar previamente con las distancias respectivas entre el primer punto y los demás. Para el caso de vertimientos y tributarios, se deberá proyectar la longitud hasta el sitio de confluencia respectivo.
3. El tiempo de toma de muestras para cada sitio deberá estar entre los siguientes tiempos para garantizar el seguimiento a la misma masa de agua (t_0 es el tiempo de la toma de muestras en el primer sitio de medición).

3.3. Fase 3. Implementación de un modelo simplificado de simulación matemática de la calidad del agua de la quebrada Mensulí

Con el fin de conocer las condiciones de la quebrada Mensulí se realizó una modelación de la calidad del agua, que permitió identificar la capacidad de autodepuración de la fuente hídrica. A continuación, se comenta la metodología utilizada para esta modelación.

3.3.1. Protocolo de modelación de la calidad del agua

a modelación de la calidad del agua superficial es un proceso continuo, el cual debe ser revisado y actualizado de forma periódica, con el fin de verificar las hipótesis asumidas inicialmente. Por la tanto la incorporación de un protocolo de modelación permite documentar de forma detallada cada uno de los pasos seguidos en la implementación del modelo, conociendo de esta manera las entradas, salidas, métodos e incertidumbres de la modelación, permitiendo la actualización en el futuro (MINAMBIENTE, 2018). Para el caso de la modelación de la quebrada Mensulí se utiliza el protocolo establecido por el guía de modelación de la calidad del agua superficial del 2018 ajustado a las características del proyecto (ver Figura 6).

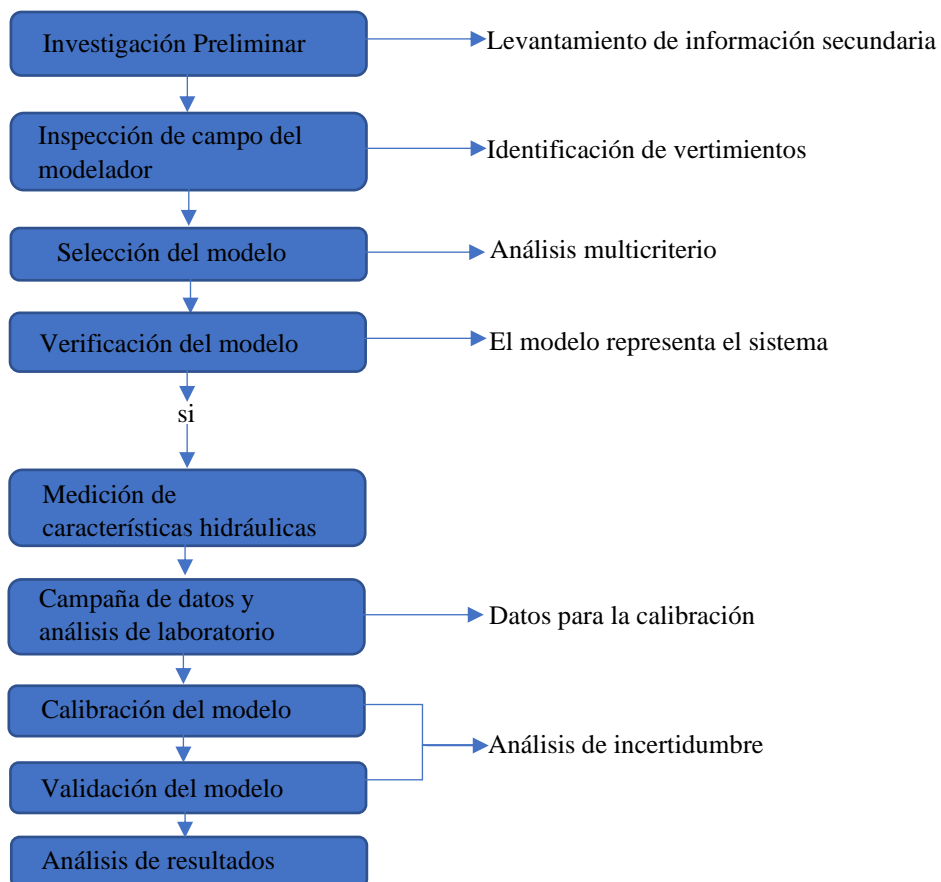


Figura 6. Protocolo de modelación quebrada Mensulí (Minambiente, 2018)

3.3.2. Selección y justificación del modelo a utilizar

Para la selección del modelo se realizó una matriz multicriterio (ver Tabla 7) que consiste en calificar en una escala cuantitativa de 1 a 5 donde 1 indica que no se ajusta a los requerimientos del presente estudio y 5 se ajusta adecuadamente a los requerimientos del estudio, adicionalmente dentro de dicha matriz se analiza los criterios expuestos a continuación:

1. Características del modelo: En este grupo se deben considerar aspectos definidos anteriormente tales como: a. Procesos y parámetros de calidad del agua: se evalúa el hecho de que el modelo simule los procesos y parámetros seleccionados para ser modelados; b. Escala espacial: se evalúa la capacidad o robustez que tiene el modelo para representar las dimensiones x, y, z. c. Escala temporal: se evalúa el modelo en su capacidad de representar el cambio de caudal en el tiempo. modelos en estado dinámico o estable.

2. Requerimientos en datos de entrada: Está relacionado directamente con la complejidad del modelo. A mayor complejidad del modelo, se requerirá mayor volumen de datos y mayor capacidad técnica del personal.

3. Aplicaciones previas en el ámbito local: Es un parámetro de evaluación toda vez que entre más experiencias en el entorno local se dispondrá de una mejor fuente de información.

4. Flexibilidad: la cual se entiende como la capacidad de modelar los procesos y la facilidad de modificar el código fuente para ajustarlo a aplicaciones específicas.

5. Documentación: la disponibilidad de información como manuales y/o tutoriales y el hecho de que se encuentren en idioma español se considera una ventaja.

6. Actualización: los que tienen soporte y son continuamente actualizados toda vez que esto implica una revisión constante del estado del arte y su inclusión en el modelo.

Tabla 7. Resultados Matriz multicriterio selección de modelo.

	PROGRAMA					
	Streeter and Phelps	QUAL2k	QUAL2kw v6	WASP	HEC-RAS	Mike 11
PARÁMETROS MODELADOS	0	5	5	5	3	5
ESCALA ESPACIAL	5	5	5	5	5	5
ESCALA TEMPORAL	5	5	5	5	5	5
PERSONAL	5	5	5	5	5	5
SERIES DE INFORMACIÓN	5	5	5	3	5	5
APLICACIONES PREVIAS EN EL ÁMBITO LOCAL	5	4	5	5	4	2
FLEXIBILIDAD	0	0	1	0	0	0
COSTOS	5	5	5	5	5	0
DOCUMENTACIÓN	5	5	5	5	5	4
ACTUALIZACIÓN	0	3	5	5	4	5
PUNTUACIÓN	35	42	46	43	41	36

3.3.3. Definición del modelo a utilizar

Analizadas todas las características anteriores y valoradas dentro de la matriz y obteniendo un resultado superior de 46 puntos, se seleccionó el modelo QUAL2Kw Versión 6 para simular los cuerpos loticos quebrada Mensulí, este modelo es comúnmente conocidos y utilizados a nivel regional, permitiendo la comparación con estudios semejantes.

Teniendo en cuenta la metodología establecida en la guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales y las variables a modelar se utilizó el software QUAL2Kw Versión 6, el cual es un software de modelación de calidad de agua para ríos de uso libre, desarrollado bajo una aplicación de Visual Basic que trabaja bajo Excel. El modelo incorpora parámetros de calidad de agua, parámetros hidráulicos, datos de elevación, ubicación geográfica, meteorología y procesos de reaireación, el modelo presenta una aplicación que permite realizar una calibración objetiva, mediante la auto calibración del modelo usando la técnica de algoritmos genéticos (Pelletier & Chapra, 2008).

3.3.4. Esquematización de la corriente

El modelo QUAL2Kw representa la fuente hídrica como una serie de alcances. Estos representan tramos de río que tienen características hidráulicas constantes (por ejemplo, pendiente, anchura de fondo). Como se representa en la Figura 7, los alcances están numerados en orden ascendente a partir de la cabecera del tallo principal de la corriente, la esquematización dirigida al proyecto de identifica en la Figura 29.

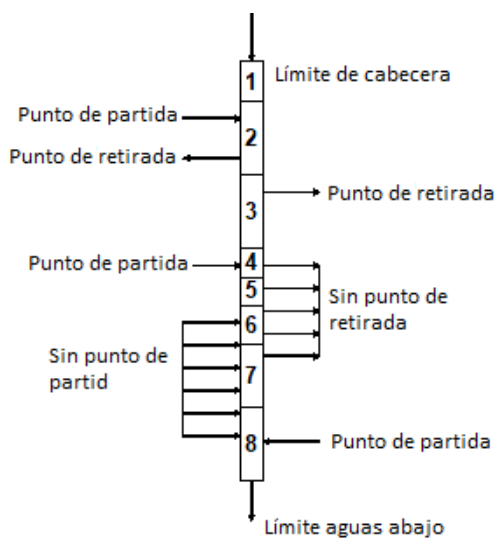


Figura 7. QUAL2Kw esquema de segmentación de un río sin afluentes (Pelletier & Chapra, 2008)

Para definir la esquematización del sistema a modelar y establecer la segmentación en tramos de la corriente hídrica en estudio, se tomó la información recolectada en campo de los vertimientos y tributarios identificados. Esta información se llevó a un sistema cartográfico para identificar su ubicación y con la base de la topografía del terreno, las entradas, las salidas y la geomorfología se definieron los segmentos o tramos a modelar. La información de partida corresponde a siete vertimientos, cuatro tributarios y ocho puntos de control sobre la quebrada Mensulí.

Es importante tomar un valor adecuado del Δx para la segmentación ya que si este es muy grande pueden ocurrir fenómenos que no se logran percibir o visualizar generando errores

numéricos en el resultado y si es muy corto el modelo es insensible a los cambios de la calidad del agua; por el contrario, si los incrementos son muy pequeños, los tiempos de cómputo son muy altos, es entonces fundamental discretizar adecuadamente las variables independientes que en el caso del modelo propuesto son espacio en la dirección de la corriente (x) y tiempo (t). Para esto existen dos criterios que se usan comúnmente, el criterio de Courant para la discretización del tiempo y el número de Peclet para la discretización de la longitud (Cardona, 2009). Es decir, se debe garantizar que, en un paso de tiempo de cálculo, la distancia recorrida por el frente de concentración no supere la dimensión de la discretización espacial adoptada para la representación del dominio de cálculo (Celorio, 2011).

3.3.5. Información de entrada al modelo

El modelo QUAL2Kw emplea el software Excel como interfase gráfica y de acceso de datos, se encuentra dividido por hojas que permiten el ingreso de los datos al modelo, lo que se ingresa consiste en información general, información de la frontera aguas arriba (cabecera), descripción de los tramos del río, condiciones climatológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), los valores de las tasas de reacción o constantes cinéticas de calibración del modelo, la información correspondiente a los tributarios y captaciones puntuales y distribuidas y la información de las estaciones aguas abajo de la cabecera.

3.3.6. Establecimiento de criterios de desempeño

Dentro de los criterios para la calibración, se encuentra la definición de la función objetivo o la bondad y ajuste del modelo, calculando el error del método de calibración, llegando a identificar la respuesta entre el modelo y los datos medidos; la incertidumbre del modelo se define en el parámetro que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos al dato real tomado en campo en los monitoreos de calidad del agua sobre la fuente hídrica.

Dentro de los métodos ampliamente utilizados para el establecimiento de los criterios de desempeño se encuentra el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, lo cual incluye la descripción de la función objetivo, el Nash-Sutcliffe es ampliamente utilizado para evaluar el desempeño de modelos hidrológicos; los valores de dicho coeficiente varían entre $-\infty$ y 1, siendo los valores más cercanos a 1 los que indican un mejor ajuste (MINAMBIENTE, 2018).

3.3.7. Información de salida del modelo

Después de que el modelo QUAL2Kw ha efectuado los cálculos necesarios para poder realizar las corridas de simulación, se generan diferentes hojas electrónicas y gráficas con los resultados en el mismo libro de Excel. En las gráficas resultantes se pueden comparar las curvas correspondientes al perfil de concentraciones de los diferentes parámetros estimados por el modelo a lo largo del río, con los datos medidos en campo en las estaciones de monitoreo (Holguín, 2014). Los resultados obtenidos se comparan con los objetivos de calidad que se presente para la fuente hídrica quebrada Mensulí, identificando si actualmente la fuente cumple con los valores en términos de calidad agua establecidos por la CDMB.

4. Resultados y Discusión

4.1. Vertimientos identificados sobre la quebrada Mensulí:

En la visita de campo realizada a la quebrada Mensulí se identificaron y caracterizaron siete vertimientos (dos Restaurantes, dos viviendas, un taller de ornamentación, un lavadero de carros y una institución educativa) y cuatro tributarios (tres innominadas y la quebrada Mediagua), para el complemento de la caracterización de la quebrada se adicionaron siete puntos de control sobre la fuente hídrica que permitieran identificar las alteraciones obre la quebrada después de la entrega

de los tributarios y vertimientos; estos puntos se llevaron a un sistema de información geográfica- y se graficaron en una salida cartográfica como se observa en la Figura 8.

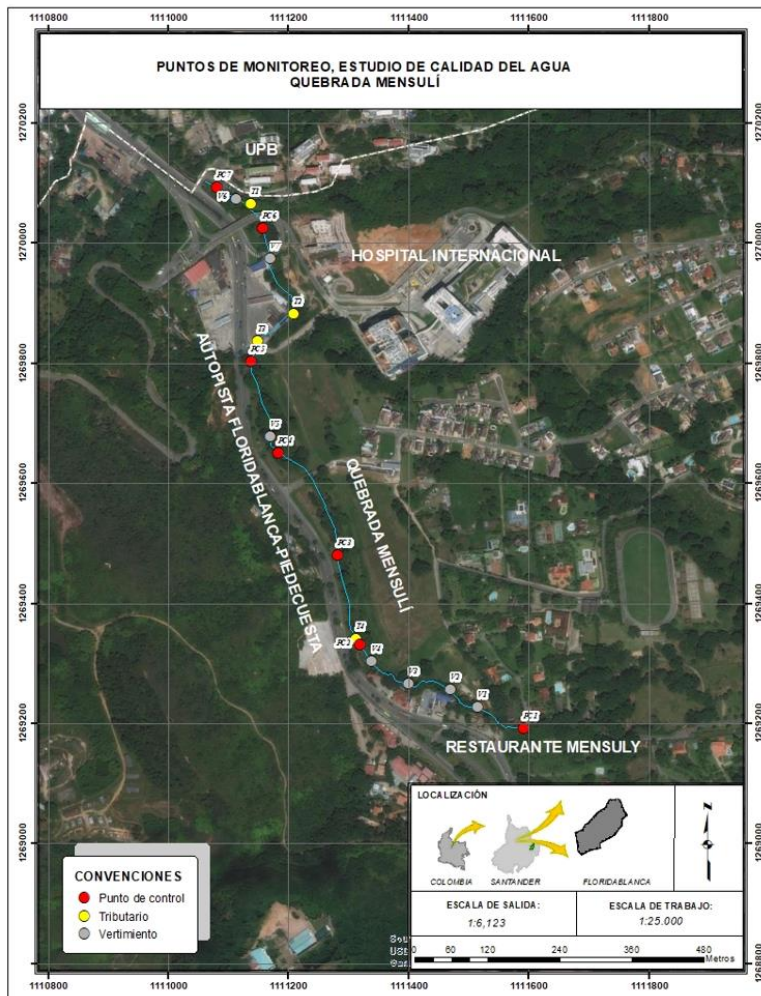


Figura 8. Puntos de monitoreo sobre la quebrada mensulí. (MINAMBIENTE, 2018).

4.2. Resultados de la calidad fisicoquímica e hidromorfológica de la quebrada Mensulí.

Se caracterizó en dos épocas del año para los monitoreos (lluvia mayo 2019-sequía diciembre 2019) El resumen de los datos repostados por el laboratorio para las épocas de medición se encuentra en la Tabla 8, donde se identifican con la nomenclatura PC (puntos de control), V(vertimientos) y T tributarios.

Tabla 8. Resultados monitoreos en época de lluvia y bajas precipitaciones.

		ÉPOCA DE SEQUÍA						
ENSAYO	UNIDAD	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
		Km 0	Km 0,44	Km 0,52	Km 0,85	Km 1,00	Km 1,36	Km 1,5
Alcalinidad Total	mg CaCO3/L	69,5	75,1	61,4	52,3	51,0	144,8	154,8
Oxígeno disuelto	mg/L	7,030	5,100	6,100	6,500	6,800	5,270	4,240
pH	Unidades de pH	7,510	7,200	6,900	7,100	7,600	7,670	7,650
SST	mg/L	15,2	21,4	19,4	18,5	18,0	138,5	153,7
Temperatura	°C	26,0	25,2	27,2	26,8	26,1	28,2	29,3
Ortofosfatos	mg/L	1,48	2,00	1,80	1,10	0,80	1,21	2,62
Fosforo Total	mg/L	2,73	3,03	2,80	2,00	0,92	2,01	2,92
Nitratos	mg NO3- N/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Nitritos	mg NO2- N/L	0,011	0,012	0,005	1,000	0,900	0,011	0,012
N. Amoniacal	mg NH3-N/L	26,7	32,0	21,0	18,0	12,0	16,7	26,7
DBO1	mg/L	1,1	3,8	4,4	3,8	3,3	16,4	16,9
DBO2	mg/L	2,1	4,7	5,3	4,7	5,2	23,7	25,0
DBO3	mg/L	5,3	6,7	8,3	6,8	7,1	48,9	56,0
DBO4	mg/L	8,1	9,2	13,0	9,2	8,3	65,4	72,8
DBO5	mg/L	9,2	18,5	31,7	21,6	12,5	95,2	113
*DBO5 Filtrada	mg/L	4,3	4,2	22,1	12,4	9,3	39,9	39,2
Coliformes totales	NMP/100 mL	1400	2900	45000	45000	44000	2400000	2400000
*Escherichia coli	NMP/100 mL	200	287	3450	3000	2800	20000	45000
ENSAYO	UNIDAD	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
		Km 0,1	Km 0,16	Km 0,24	Km 0,33	Km 0,88	Km 1,31	Km 1,45
Alcalinidad Total	mg CaCO3/L	102,0	232,0	89,0	118,0	98,0	276,0	134,0
Oxígeno disuelto	mg/L	3,200	4,200	2,200	5,400	5,200	2,100	3,110
pH	Unidades de pH	7,900	7,800	7,600	6,700	7,100	7,900	7,700
SST	mg/L	110,0	112,0	154,0	231,0	120,0	298,0	231,0
Temperatura	°C	25,30	26,50	29,50	28,00	27,00	28,00	26,00
Ortofosfatos	mg/L	2,120	1,000	1,000	1,000	1,100	1,800	0,800
Fosforo Total	mg/L	2,160	1,100	1,200	1,500	2,000	2,600	0,900
Nitratos	mg NO3- N/L	0,0	0,0	0,0	1,0	1,2	1,2	0,0
Nitritos	mg NO2- N/L	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,9	1,0
N. Amoniacal	mg NH3-N/L	8,540	7,800	5,000	5,000	6,000	12,000	9,000
DBO5	mg/L	134	143	167	167	98	286	198
*DBO5 Filtrada	mg/L	98	56	101	76	34	121	56
Coliformes totales	NMP/100 mL	9200	600	10000	6743	2000	6800	6000
*Escherichia coli	NMP/100 mL	6800	54	1203	432	156	3000	1800
ENSAYO	UNIDAD	T1	T2	T3	T4			
		Km 1,41	Km 1,2	Km 1,13	Km 0,5			
Alcalinidad Total	mg CaCO3/L	54,3	78,0	101,0	54,0			
Oxígeno disuelto	mg/L	6,800	6,700	5,800	7,800			
Ph	Unidades de pH	6,900	6,6	7,100	6,900			
SST	mg/L	23,0	21,0	32,0	12,0			
Temperatura	°C	28,0	29,0	28,3	26,0			
Ortofosfatos	mg/L	1,00	0,90	0,70	1,00			
Fosforo Total	mg/L	2,00	1,00	1,00	1,10			
Nitratos	mg NO3- N/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Nitritos	mg NO2- N/L	0,010	0,013	0,010	0,011			
N. Amoniacal	mg NH3-N/L	12,0	10,0	18,0	8,0			
DBO5	mg/L	12,0	87,0	98,0	12,0			
*DBO5 Filtrada	mg/L	6,5	45,0	56,0	8,0			
Coliformes totales	NMP/100 mL	9800	2000	3000	800			
*Escherichia coli	NMP/100 mL	100	1200	1900	321			

ÉPOCA DE LLUVIA								
ENSAYO	UNIDAD	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
		Km 0	Km 0,44	Km 0,52	Km 0,85	Km 1,00	Km 1,36	Km 1,5
Alcalinidad Total	mg CaCO3/L	68,5	74,1	60,0	45,0	49,0	123,0	134,0
Oxígeno disuelto	mg/L	7,130	5,000	6,000	6,300	6,700	5,100	4,600
Ph	Unidades de pH	7,800	7,100	7,000	7,000	7,200	7,300	7,500
SST	mg/L	13,2	19,0	19,0	18,0	12,0	132,0	134,0
Temperatura	°C	26,0	25,0	27,0	23,0	23,0	22,0	21,0
Ortofosfatos	mg/L	1,20	1,70	1,00	1,01	0,10	1,00	1,00
Fosforo Total	mg/L	1,90	3,00	2,00	1,80	0,40	1,60	1,10
Nitratos	mg NO3- N/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Nitritos	mg NO2- N/L	0,011	0,012	0,005	0,500	0,600	0,011	0,012
N. Amoniacal	mg NH3-N/L	21,0	26,0	20,0	14,0	11,0	12,0	22,0
DBO1	mg/L	0,9	2,3	4,0	3,1	3,0	15,0	15,0
DBO2	mg/L	1,8	4,0	5,1	3,9	4,7	22,1	22,0
DBO3	mg/L	4,9	5,7	7,8	5,3	6,8	34,5	54,0
DBO4	mg/L	6,9	8,8	11,0	8,9	7,8	56,1	68,0
DBO5	mg/L	8,4	16,0	29,0	20,1	11,7	87,0	100
*DBO5 Filtrada	mg/L	4,8	3,9	16,0	10,0	8,8	43,0	31,0
Coliformes totales	NMP/100 mL	1200	2878	32000	38000	37000	2400000	24000000
*Escherichia coli	NMP/100 mL	198	198	2000	2000	2000	20000	45000
ENSAYO	UNIDAD	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
		Km 0,1	Km 0,16	Km 0,24	Km 0,33	Km 0,88	Km 1,31	Km 1,45
Alcalinidad Total	mg CaCO3/L	112,0	212,0	78,0	100,0	87,0	287,0	131,0
Oxígeno disuelto	mg/L	3,000	4,300	2,100	5,000	5,000	2,000	3,000
Ph	Unidades de pH	7,600	7,500	7,300	6,200	7,500	7,500	7,400
SST	mg/L	112,0	110,0	132,0	221,0	112,0	256,0	236,0
Temperatura	°C	24,00	28,00	22,00	22,00	22,00	22,00	23,00
Ortofosfatos	mg/L	2,000	1,100	1,500	0,800	1,600	1,600	0,800
Fosforo Total	mg/L	2,100	1,300	1,100	1,300	2,000	2,000	1,000
Nitratos	mg NO3- N/L	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0
Nitritos	mg NO2- N/L	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,9	1,1
N. Amoniacal	mg NH3-N/L	8,000	7,700	4,000	5,200	5,000	11,000	12,000
DBO5	mg/L	132	141	160	156	67	240	167
*DBO5 Filtrada	mg/L	99	50	97	65	32	100	67
Coliformes totales	NMP/100 mL	9200	800	10000	7000	2100	6800	6000
*Escherichia coli	NMP/100 mL	6800	54	1203	400	300	3000	1800
ENSAYO	UNIDAD	T1	T2	T3	T4			
		Km 1,41	Km 1,2	Km 1,13	Km 0,5			
Alcalinidad Total	mg CaCO3/L	49,0	67,0	98,0	45,0			
Oxígeno disuelto	mg/L	6,900	8,000	6,000	7,900			
Ph	Unidades de pH	7,000	6,500	7,600	6,900			
SST	mg/L	22,0	20,0	31,0	15,0			
Temperatura	°C	27,0	25,0	22,0	22,0			
Ortofosfatos	mg/L	1,00	1,00	1,00	1,00			
Fosforo Total	mg/L	2,10	1,20	1,20	1,00			
Nitratos	mg NO3- N/L	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Nitritos	mg NO2- N/L	0,010	0,013	0,010	0,011			
N. Amoniacal	mg NH3-N/L	13,0	11,0	15,0	5,0			
DBO5	mg/L	16,0	67,0	87,0	10,0			
*DBO5 Filtrada	mg/L	6,7	34,0	53,0	8,6			
Coliformes totales	NMP/100 mL	9800	2000	3100	800			
*Escherichia coli	NMP/100 mL	100	1200	1900	321			

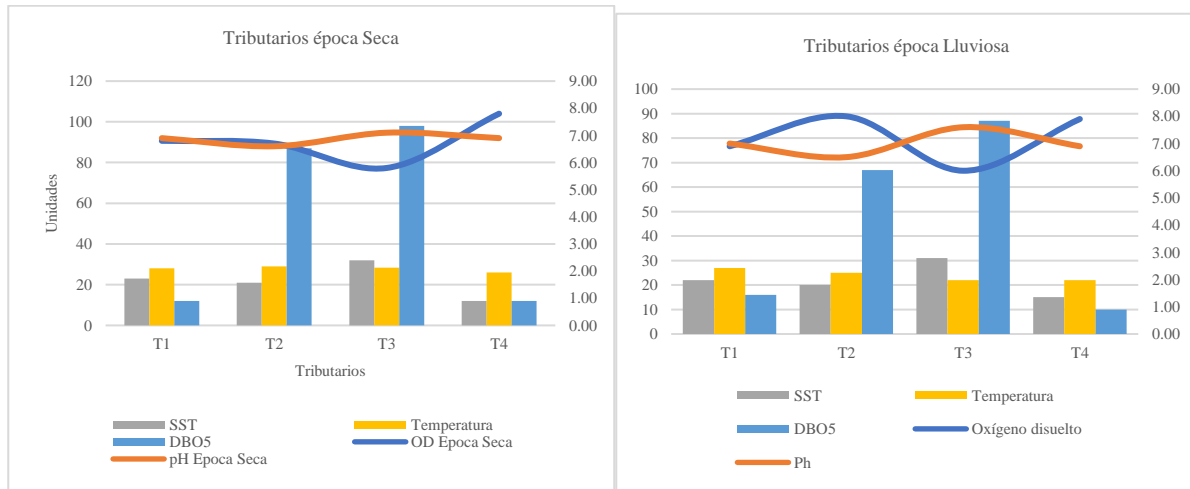


Figura 9. Resultados monitoreo época seca y lluviosa para tributarios.

El pH refleja un resultado ligeramente alcalino, estando dentro de los límites permisibles establecidos para la calidad de agua (6,5 – 9) en todos los puntos de monitoreo (Figura 9, Figura 10, Figura 11). La concentración de oxígeno disuelto para los cuatro tributarios en las dos temporadas presenta valores superiores a los 4,0 mg/L, lo cual brinda altas posibilidades para el desarrollo de vida de organismos acuáticos. Según los resultados obtenidos se evidenció que las concentraciones de las variables no presentan gran variación entre la época de bajos y altos caudales.

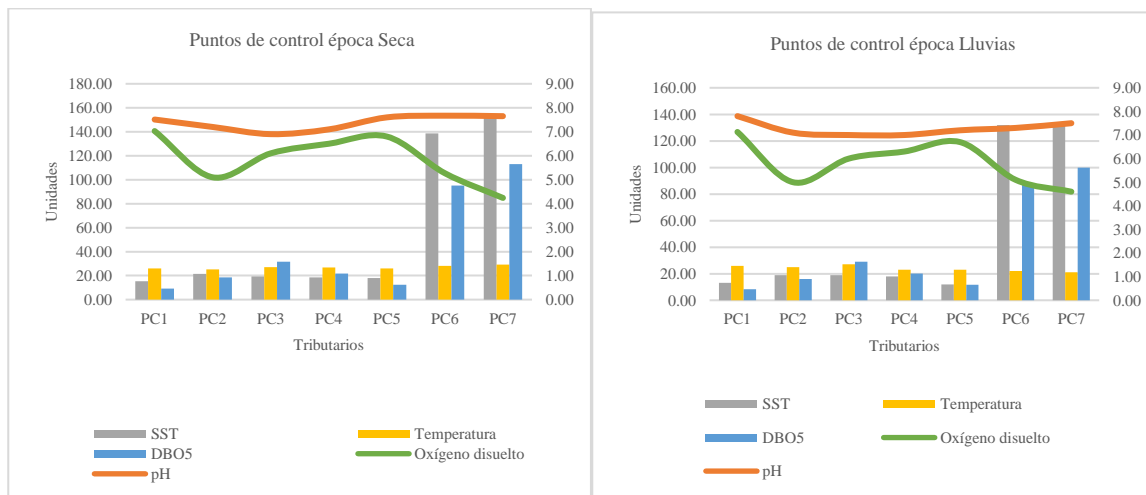


Figura 10. Resultados monitoreo época seca y lluviosa para puntosa de control.

Los resultados de laboratorio arrojan que los puntos de monitoreo para los vertimientos V4, V6 y V7 presentan concentraciones altas de DBO₅ y bajas concentraciones de OD, debido a la carga de materia orgánica generada de las actividades que se realizan, generando la afectación de la fuente hídrica en los últimos tramos de análisis.

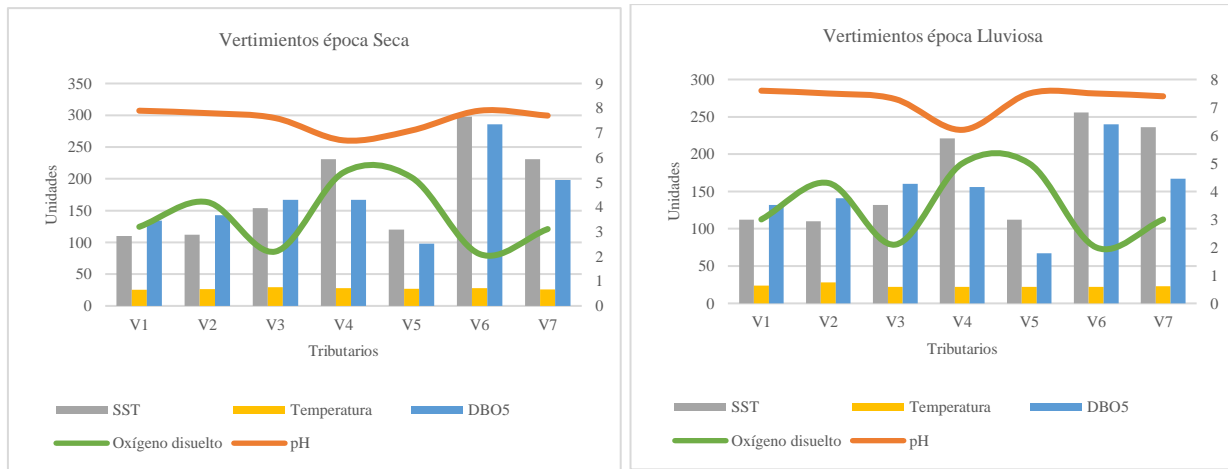


Figura 11. Puntos de monitoreo sobre la quebrada Mensulí.

Con los resultados obtenidos en los dos monitoreos realizados, se modeló matemáticamente de la calidad de la quebrada Mensulí, sin realizar análisis estadístico ni comparación con información tomada en monitoreos adicionales, los datos obtenidos de la época de bajos caudales se utilizaron para la calibración del modelo y los datos de época lluviosa para la validación del modelo; en la Tabla 9 se observan las cargas contaminantes de los vertimientos sobre el tramo de estudio, donde se evidencia que la mayor carga de materia orgánica es aportada por el lavadero de carros:

Tabla 9. Resultados monitoreos vertimientos.

VERTIMIENTO	DESCRIPCION	COORDENA.		CAUDAL (l/s)	DBO ₅ (mg/l)	Carga (Kg/d)	Carga (Kg/año)
		X metros	Y metros				
1	Restaurante	1111520	1269230	0,5	134	5,79	2083,97
2	Ornamentación	1111470	1269260	1,2	143	14,83	5337,45
3	Vivienda	1111400	1269270	0,9	167	12,99	4674,93
4	Restaurante	1111340	1269300	0,3	167	4,33	1558,31

5	Vivienda	1111170	1269680	0,2	98	1,69	609,64
6	Lavadero	1111110	1270070	8,6	286	212,51	76503,40
7	Institución	1111170	1269970	0,2	198	3,42	1231,72

El recorrido de la quebrada de estudio se realizó en una longitud de 1.200 metros, el cual se dividió en 10 tramos considerados como extensiones longitudinales de la quebrada Mensulí morfológicamente homogéneos, las cuales son el punto de partida para la valoración hidromorfológica de la fase dos (Ver Figura 12).

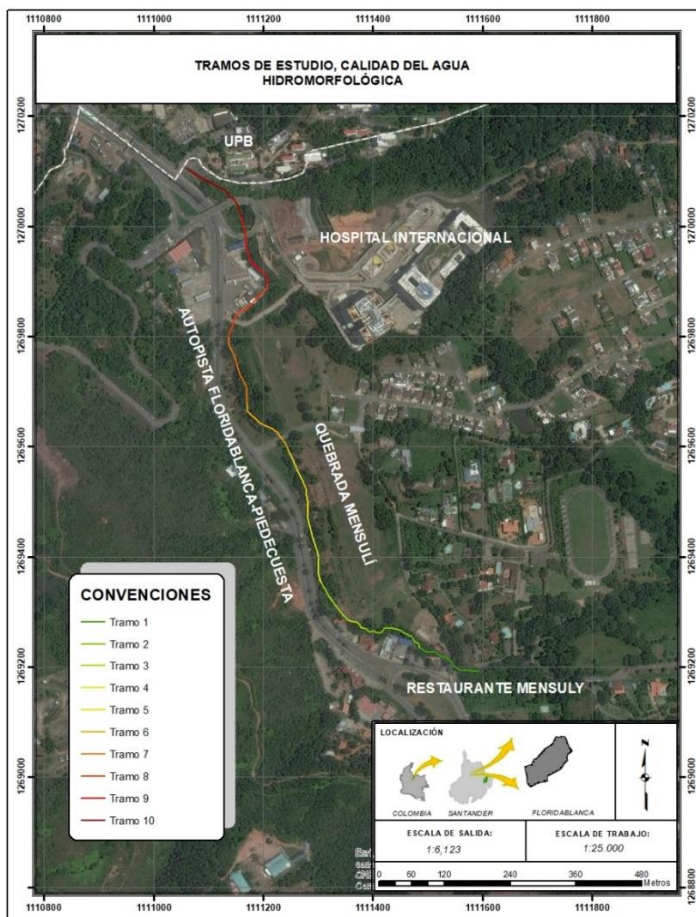


Figura 12. Tramos de estudio, estudio Hidromorfológico (IGAC, 2016)

Con la visita inicial realizada y la georreferenciación de los vertimientos se realizó la esquematización del sistema a modelar, para lo cual se diseñó el formato de recolección de información de campo (Apéndice A), importante para la realización y ejecución de la fase dos.

4.2.1. Estaciones Hidrológicas

Las mediciones hidrológicas se hacen con el fin de obtener información de los procesos hidrológicos. Esta información se utilizó para entender mejor estos procesos y como información de entrada en modelos de simulación hidrológica (Chow et al., 1994). Por este motivo dentro de la recolección de información secundaria, se realizó la búsqueda de estaciones hidrológicas para conocer los caudales históricos sobre la quebrada Mensulí. Por parte del IDEAM no se cuenta con información, la otra entidad de la zona la CDMB no cuenta con estaciones hidrológicas sobre la quebrada, de igual manera dentro de los registros encontrado en la documentación del estado del recurso, se observa la medición de caudales cuatro veces durante el 2018 (CDMB, 2018). En los monitoreos de calidad y cantidad de agua efectuados anualmente por la CDMB se realizaron aforos de los caudales (m^3/s) que transporta la corriente, como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados caudales sobre la quebrada Mensulí (CDMB, 2018).

Punto MS - 05	
Fecha	Caudal (m^3/s)
20/06/2018	0,097
16/08/2018	0,007
22/10/2018	0,135
25/11/2018	0,034

4.2.2. Estaciones climatológicas

Una vez Identificada el área de influencia del proyecto, se ubicaron las estaciones climatológicas operadas por las autoridades competentes y se recopiló la información disponible, y con la información obtenida de las estaciones presentes en el área de drenaje operadas por la CDMB y el IDEAM se realizó la caracterización climática de la zona de estudio (IDEAM Y CDMB).

La información contenida en las estaciones de las dos entidades muestra el estado activo (ACT), suspendido (SUS) o fuera de servicio (FSR) como se muestra en la Figura 13, con esta información se realiza el primer filtro, eliminando aquellas suspendidas; como segundo filtro aquellas estaciones que presenten una serie de datos con información inferior a 15 años.

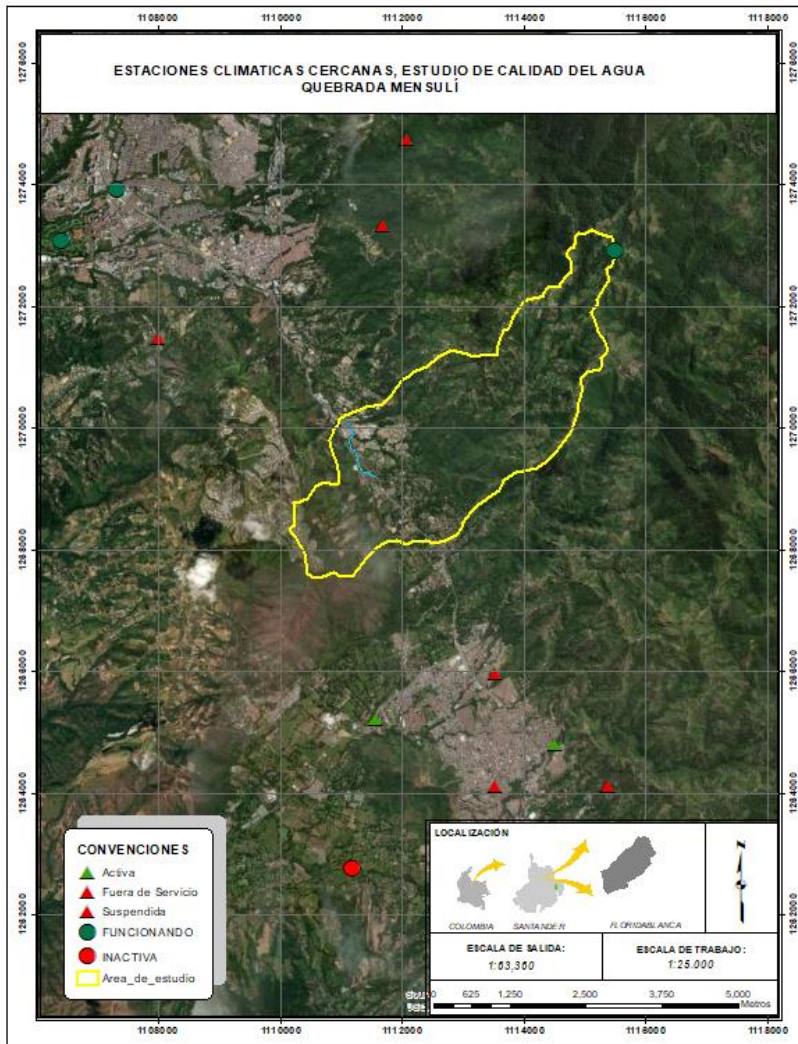


Figura 13. Estaciones climaticas cercanas (CDMB, 2020)

En la Figura 13 se observan dos tipos de figuras triángulos (referente estaciones operadas por el IDEAM) y círculos (referente a estaciones operadas por la CDMB) cada una de ellas se diferencia por dos colores verde activas y rojo suspendidas o inactivas. Con las estaciones activas

de cada una de las entidades se realizó el análisis climatológico el cual se observa en la fase 2. En la Figura 14 se observan las estaciones en estado activa como: LA FLORIDA, CLUB CAMPESTRE, LA JUDIA Y EL RASGÓN operadas por la CDMB, y las estaciones GRANJA PIEDECUESTA Y EL CONQUISTADOR operadas por el IDEAM, tomando la estación granja Piedecuesta con un periodo de información de 15 años.

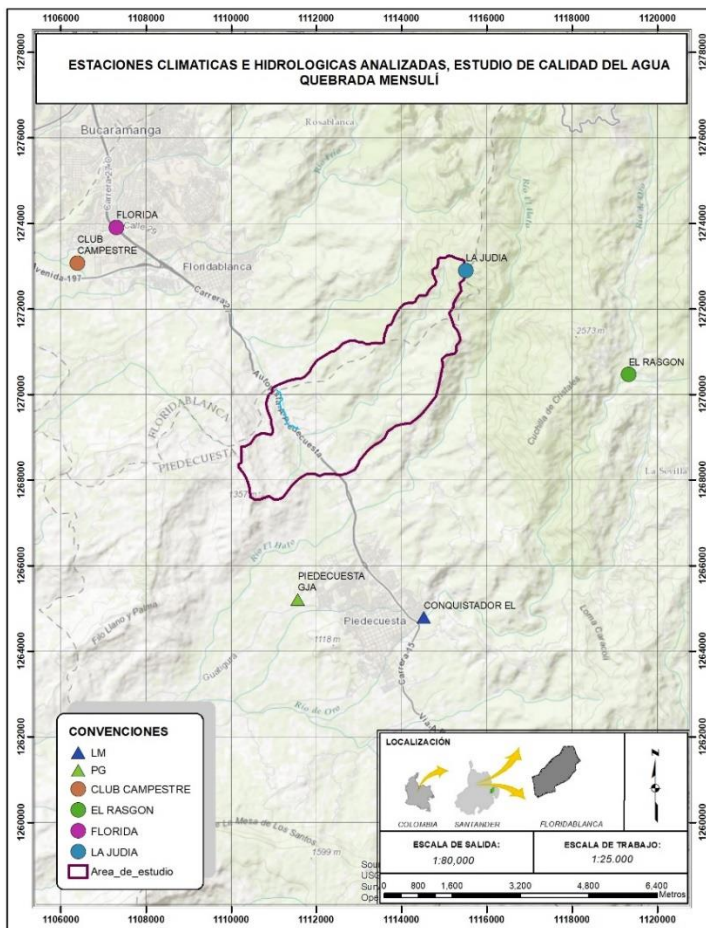


Figura 14. Estaciones Hidroclimatológicas analizadas.

En la Figura 15 se observa el análisis de los polígonos de Thiessen donde se muestra la influencia de cada una de las estaciones cercanas, determinado que las estaciones con influencia sobre el área de estudio son GRANJA PIEDECUESTA Y LA JUDIA operadas por IDEAM y la CDMB respectivamente.

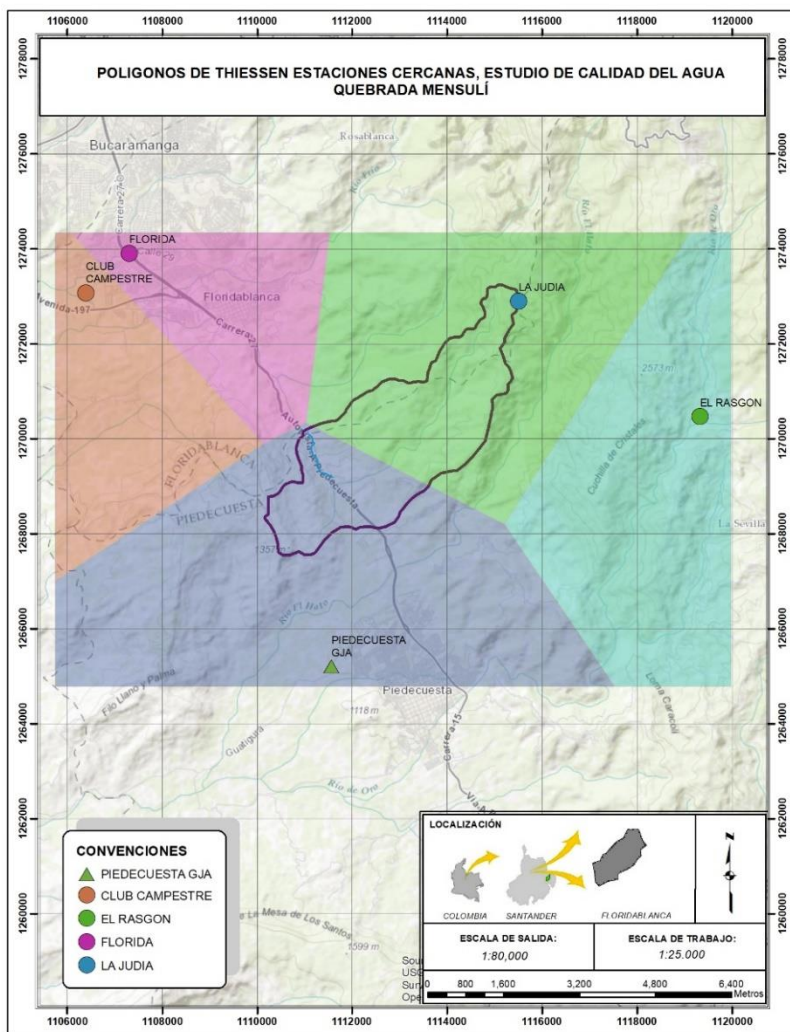


Figura 15. Polígonos de Thiessen estaciones cercanas.

En la Figura 16 se realiza una caracterización climática del área de estudio por medio de la estación La Judía que se encuentra ubicada en la vereda Casiano Alto del municipio de Floridablanca, su altura sobre el nivel del mar es de 2165m, se observa un comportamiento de tipo bimodal con las mayores precipitaciones en mayo y agosto con 166 y 160,6 mm respectivamente; los meses con menor precipitaciones corresponden a diciembre y enero (CDMB, 2020).

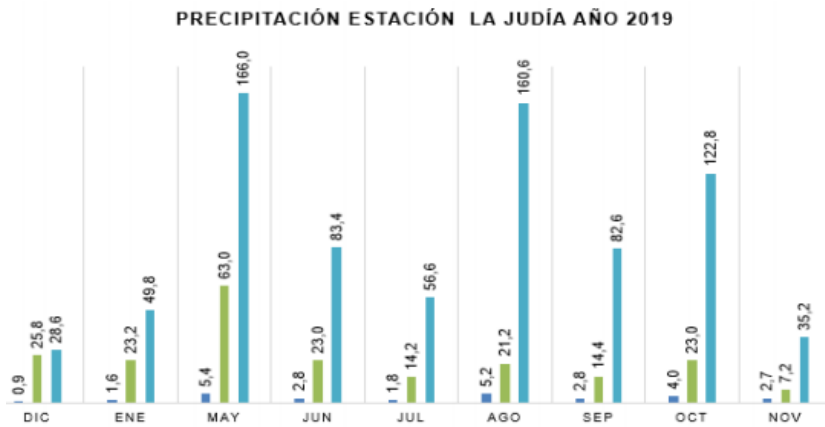


Figura 16. Precipitación La Judía (CDBM, 2020)

4.2.3. Uso del suelo y coberturas

Se realiza el cálculo de los suelos del área de influencia de la quebrada Mensulí, con la información de los suelos del POMCA del río Lebrija. Según el POMCA Lebrija los suelos identificados presentan texturas (FArA) Franco Arcilloarenosos, (ArA) ArcilloArenosos y (ArAg) Arcillo Arenosos Gravillosos (Figura 17), presentando infiltración moderada a lenta y una potencia media según la descripción de la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11. Descripción Grupo de suelo. (SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000)

GRUPO	DESCRIPCION
A Infiltración entre 7.62-11.43 mm/hr	Son suelos que tienen altas tasas de infiltración (bajo potencial de escurrimiento), aun cuando están enteramente mojados y están constituidos mayormente por arenas o gravas profundas, bien y hasta excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua
B Infiltración entre 3.81-7.62 mm/hr	Son suelos que tienen tasas de infiltración moderadas, cuando están cuidadosamente mojados y están constituidos mayormente de suelos profundos de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión del agua.
C Infiltración entre 1.27-3.81 mm/hr	Son suelos que tienen bajas de tasas de infiltración cuando están completamente mojados y están constituido mayormente, por suelos con un estrato que impiden el movimiento del agua hacia abajo, o suelos con una textura que va de moderadamente fina a fina, estos suelos tienen una baja tasa de transmisión del agua.
D Infiltración entre 0-1.27 mm/hr	Son suelos de alto potencial de escurrimiento, de tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y están formados mayormente por suelos arcillosos con un alto potencial de esponjamiento, suelos con índice de agua permanentemente alto, suelos con arcilla o capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos superficiales sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión de agua

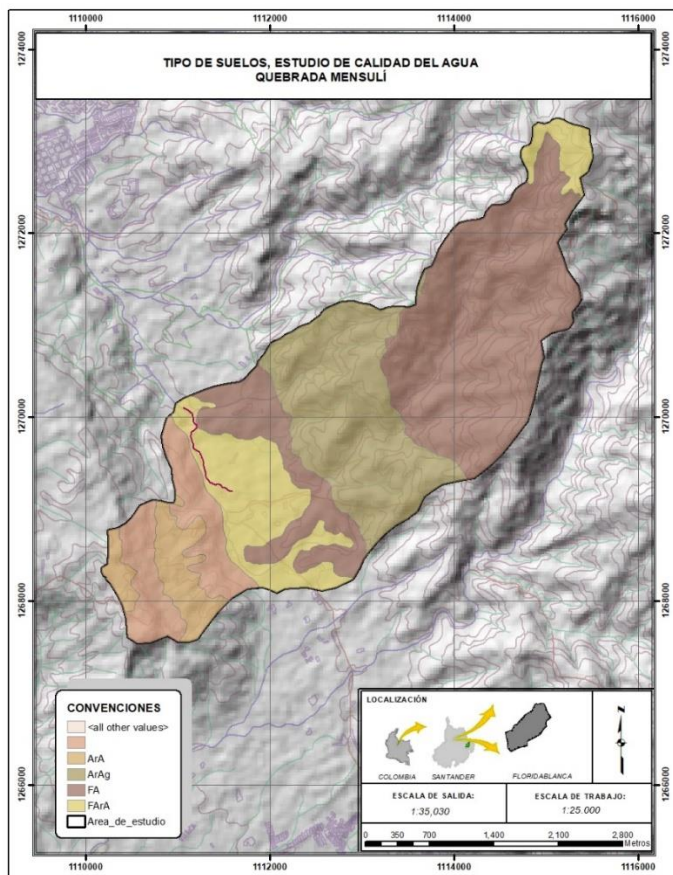


Figura 17. Suelos presentes en la zona de estudio (CDMB, 2020)

Tabla 12. Clasificación de suelos a efecto umbral de escorrentía (SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000)

GRUPO	INFILTRACION	POTENCIA	TEXTURA	DRENAJE
A	Rápida	Grande	Arenosa	Perfecto
			Areno-Limosa	
B	Moderada	Media a Grande	Franco-arenosa	Bueno a moderado
			Franca	
			Franco-arcillosa-arenosa	
			Franco-Limosa	
C	Lenta	Media a Pequeña	Franco-arcilloso	Imperfecto
			Franco-arcillosa-limosa	
			Arcillo-Arenosa	
D	Muy Lenta	Pequeño	Arcillosa	Pobre o muy Pobre

Dentro de las coberturas encontradas, se observó en gran proporción la presencia de pastos y cultivos, los cuales permiten mayor aporte de cargas difusas a la fuente hídrica, en la Figura 18 se observa las coberturas presentes en la cuenca de estudio.

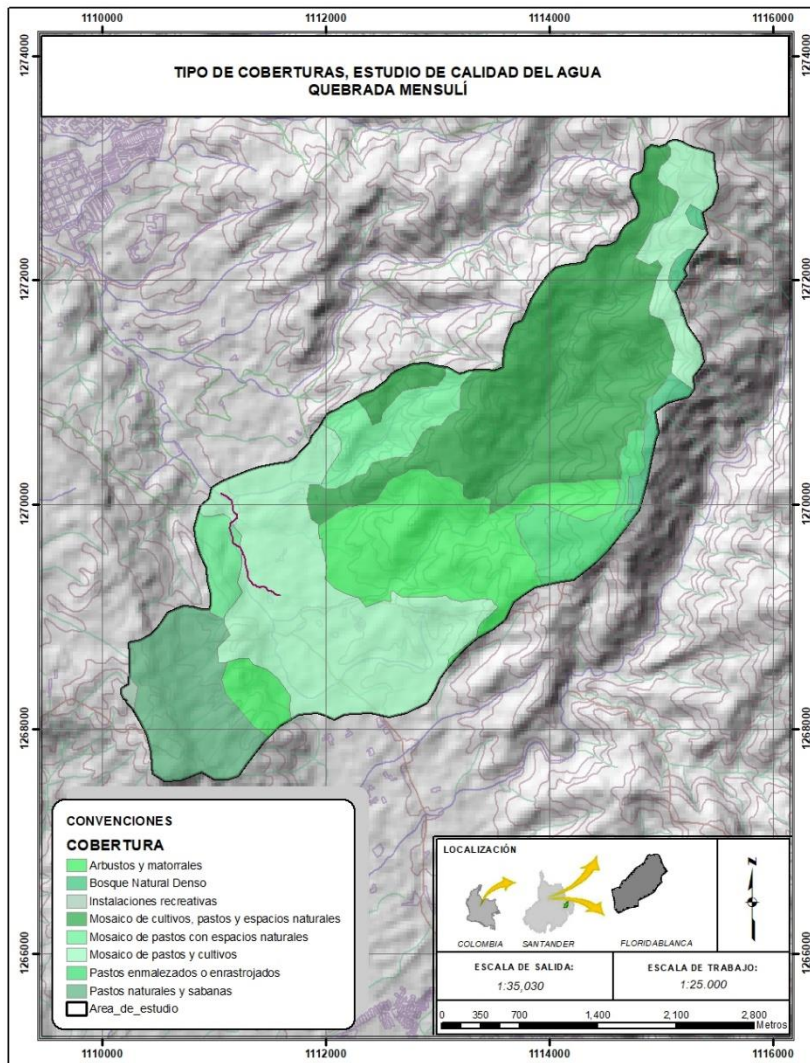


Figura 18. Coberturas presentes en la zona de estudio (CDBM, 2020)

4.2.4. Caracterización hidráulica

Para la caracterización hidráulica de la quebrada Mensulí se realizó el levantamiento topográfico (ver Figura 19), el cual se ejecutó con una estación total coordinada por un topógrafo y dos cadeneros, levantando una nube de puntos con su descripción y así, permitió conocer la geometría del cauce. En la fase de oficina la nube de puntos que contienen las coordenadas X, Y y Z de donde se localizan, se interpolaron para generar el modelo digital del terreno (MDT), y la malla TIN.

Figura 19. Registro fotografico levantamiento topografico.

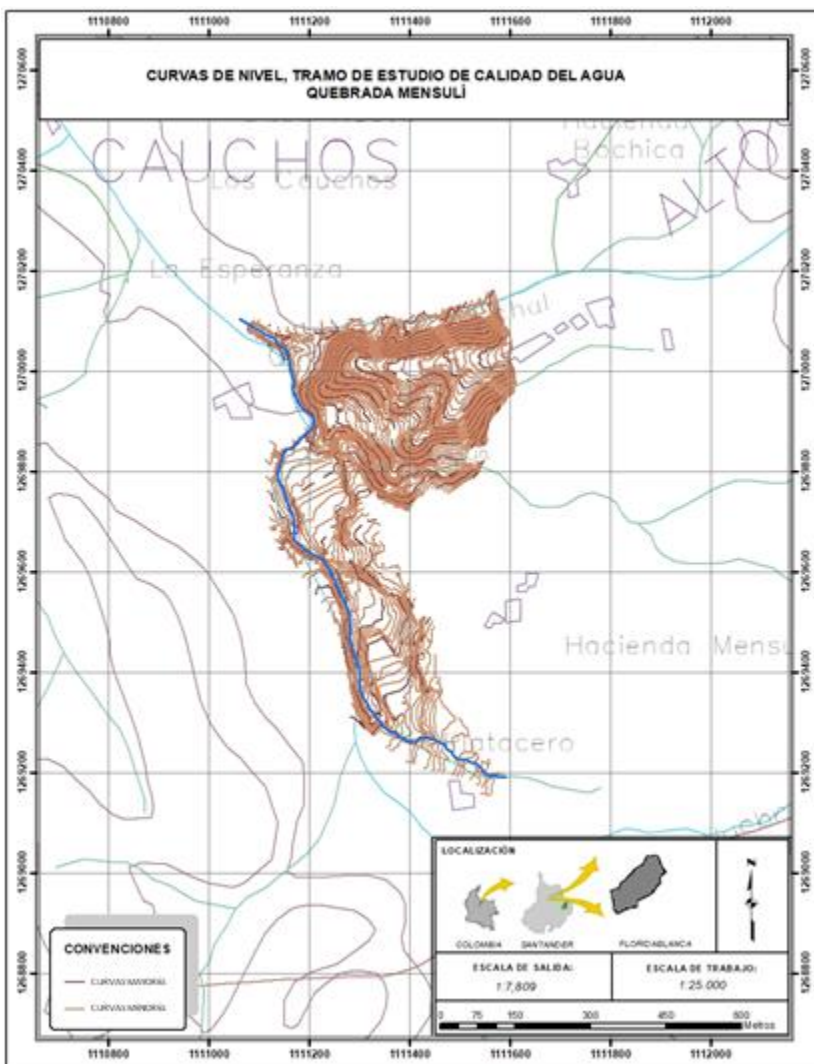


Figura 20. Curvas de nivel levantamiento topografico.

Una vez obtenido el MDT se realizó una interpolación matemática del DTM y se generaron las curvas de nivel equidistantes a cada 0,5 metros, además obteniendo la representación de la topografía en planta del terreno, como se observa en las fotografías de la Figura 20.

Los resultados obtenidos del levantamiento topográfico de las curvas de se observan en la Figura 20 y en la Figura 21 se observa el modelo de elevación digital del tramo de estudio, con la información obtenida se realizó la esquematización del tramo, la modelación hidráulica y la programación del monitoreo.

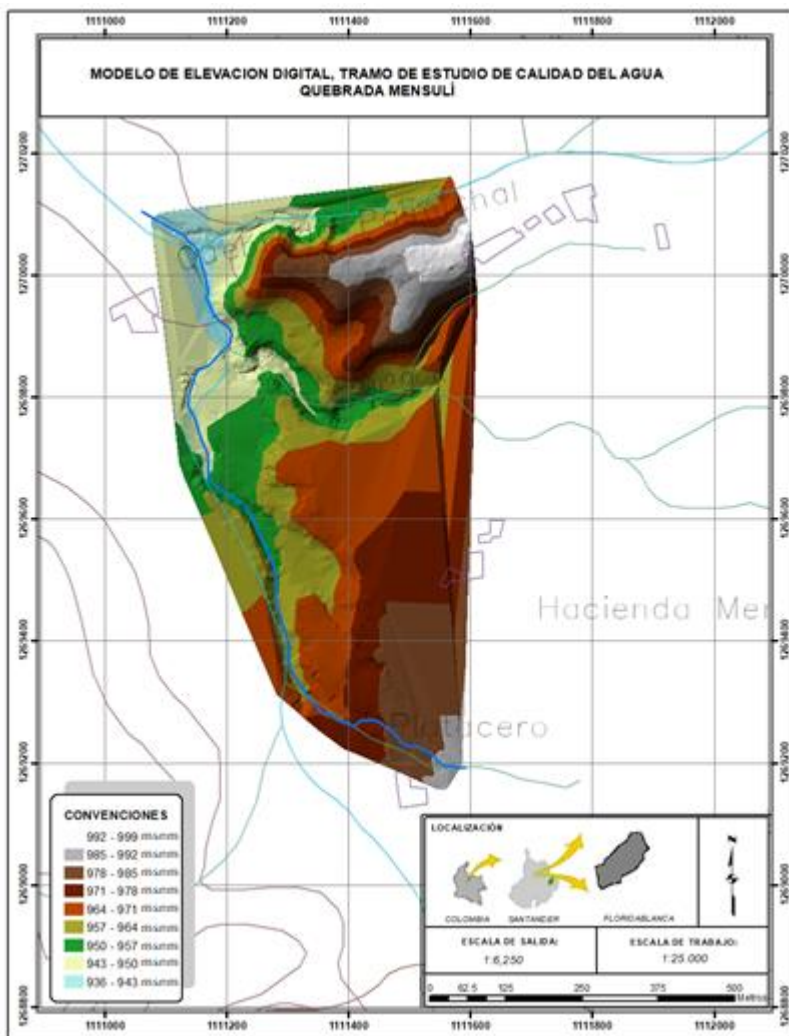


Figura 21. Modelo de elevacion digital del terreno.



Figura 22. Registro fotográfico toma de caudales.

Tabla 13. *Medición de caudal y velocidades épocas de lluvia de abril 2019.*

Punto	Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)	Vel Máx. (m/s)	Vel Media (m/s)
Aguas Arriba	0,04583	45,83	0,118	0,098
Punto de control 2	0,044893	44,893	0,103	0,085
Punto de control 3	0,068143	68,143	0,129	0,1
Punto de control 4	0,067586	67,586	0,108	0,087
Punto de control 5	0,068046	68,046	0,11	0,09
Punto de control 6	0,082463	82,463	0,092	0,076
Tributario 1	0,015243	15,243	0,118	0,1
Tributario 2	0,01132	11,32	0,135	0,103
Tributario 3	0,002845	2,845	0,099	0,082
Tributario 4	0,02314	23,14	0,106	0,087
Aguas Abajo	0,094185	94,185	0,127	0,104

Tabla 14. *Medición de caudal y velocidades épocas de sequía de diciembre 2019.*

Punto	Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)	Vel Máx. (m/s)	Vel Media (m/s)
Aguas Arriba	0,01124	11,24	0,105	0,088
Punto de control 2	0,011494	11,494	0,096	0,078
Punto de control 3	0,021412	21,412	0,108	0,089
Punto de control 4	0,02093	20,93	0,101	0,082
Punto de control 5	0,02187	21,87	0,1	0,082
Punto de control 6	0,0259	25,9	0,09	0,075
Tributario 1	0,001596	1,596	0,09	0,075
Tributario 2	0,004513	4,513	0,11	0,092
Tributario 3	0,000754	0,754	0,091	0,075
Tributario 4	0,00932	9,32	0,101	0,083
Aguas Abajo	0,02945	29,45	0,092	0,07

En la Tabla 13 y la Tabla 14 se observa el resultado de las mediciones de caudales y en la Figura 22 las fotografías de las actividades realizadas, obteniéndose con este trabajo el caudal de la

quebrada Mensulí en los diferentes puntos identificados en la Figura 23. Las mediciones se realizaron el 19 de abril del 2019 junto con la batimetría, con el fin de obtener valores de caudales en la época lluviosa del año y el 12 diciembre de 2019 junto con los monitoreos de agua, con el fin de identificar los caudales en época de sequía.

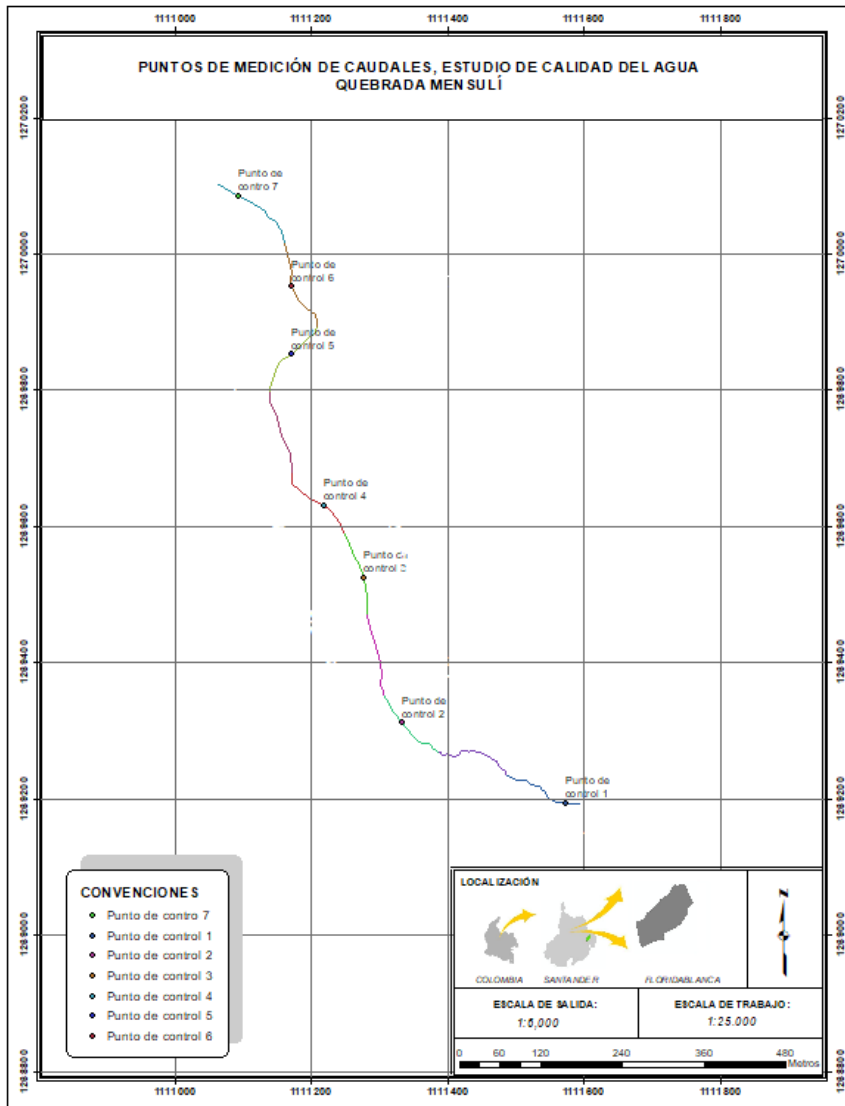


Figura 23. Punto de toma de caudales.

Como se observa en la Figura 24 los caudales presentados en la época de lluvias supera en un 60% los caudales presentados en la época de bajas precipitaciones, el tributario cuatro presenta el mayor aumento de caudal, respecto a los tres tributarios monitoreados.

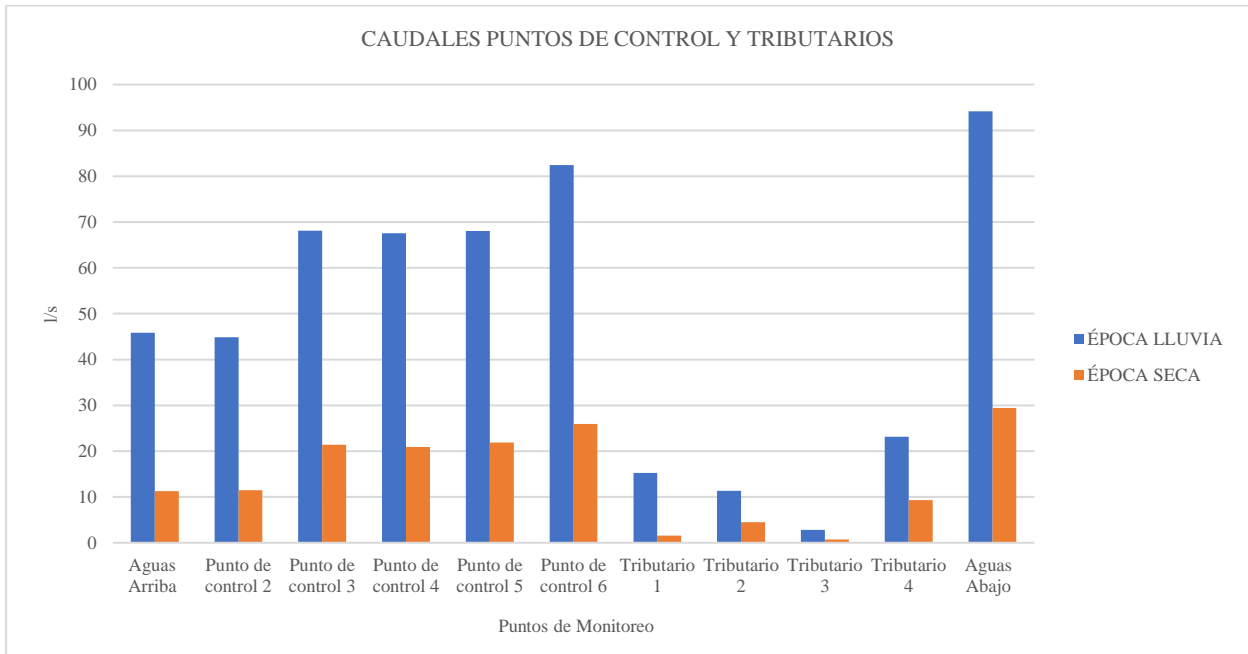


Figura 24. Caudales sobre puntos de monitoreo.

4.2.5. Caracterización Hidromorfológica

4.2.5.1. Protocolo 1: Parámetros de Caracterización Morfológica

En la fase de campo se realizó el levantamiento de información en cada uno de los tramos de la quebrada Mensulí, dentro del formato del APENDICE A se recolectó información de la geometría del canal, grado de sinuosidad, pendiente del río, variación de la anchura y profundidad, y tipo de valle, los cuales se consignan en la Tabla 15, sin obtener una valoración de la calidad del agua, solo se realiza como caracterización morfológica inicial:

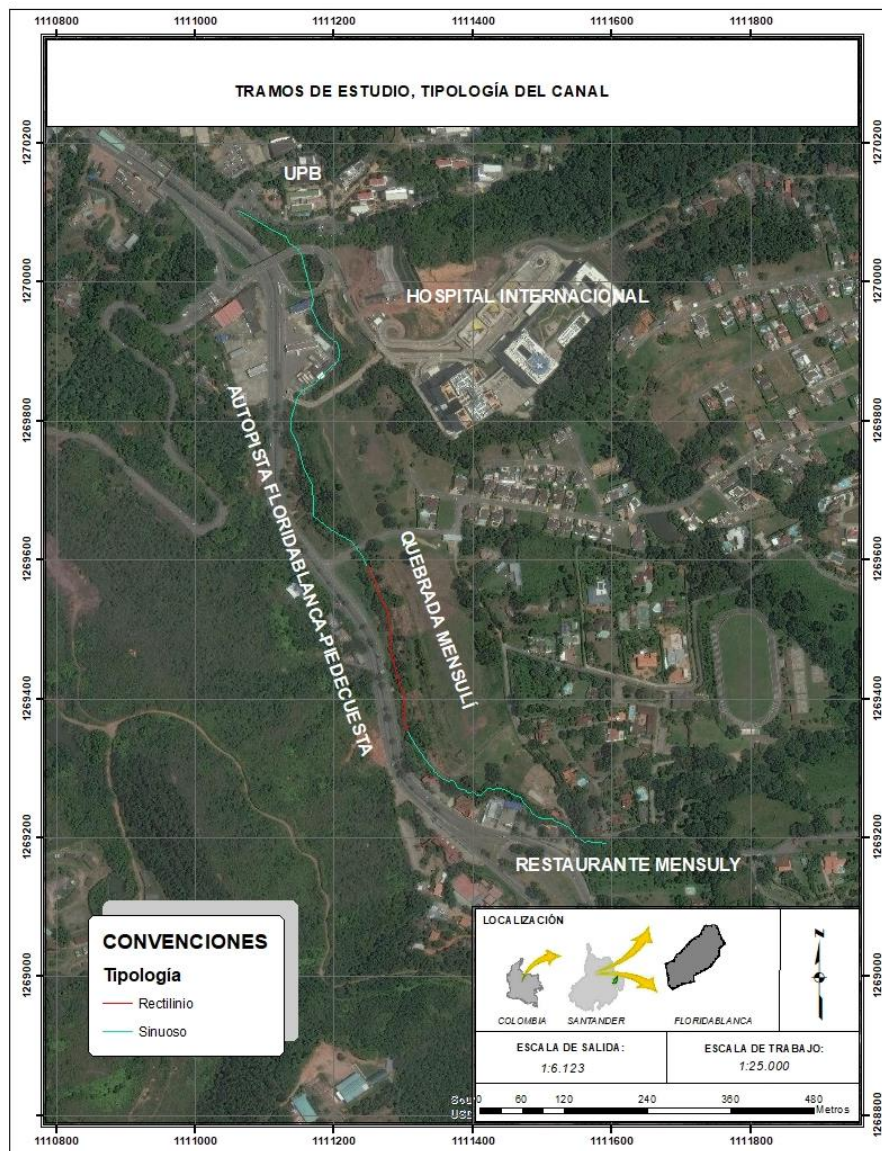


Figura 25. Tipología del canal.

En la Figura 25, se observa la tipología del canal la cual en su mayor parte se encuentra de manera sinuosa y en solo dos tramos se caracterizan rectilíneos. En la Tabla 15 se observa la caracterización morfológica realizada a la quebrada Mensulí en cada uno de los tramos analizados, efectuados con el trabajo de campo y la cartografía base del sector.

Tabla 15. Caracterización condiciones Morfológicas.

Tramo	Tipología	Sinuosidad	Pendiente Media	Variación anchura	Variación Profundidad	Tipo Valle
1	Sinuoso	Recto	56	Muy elevada	Elevada	Forma de V
2	Sinuoso	Sinuoso	77	Muy elevada	Elevada	Garganta
3	Sinuoso	Recto	76	Muy elevada	Elevada	Garganta
4	Rectilíneo	Recto	38	Muy elevada	Elevada	Garganta
5	Rectilíneo	Recto	36	Muy elevada	Elevada	Forma de V
6	Sinuoso	Recto	26	Moderada	Elevada	Forma de V
7	Sinuoso	Recto	30	Moderada	Elevada	Forma de V
8	Sinuoso	Recto	24	Muy Baja	Elevada	Forma de V
9	Sinuoso	Recto	22	Muy elevada	Elevada	Garganta
10	Sinuoso	Recto	29	Muy elevada	Elevada	Garganta

4.2.5.2. Protocolo 2: Índice de Hábitat Fluvial (IHF)

Para la realización del protocolo 2 IHF se recolectó en campo la información se complementó de manera independiente para cada uno de los tramos analizados, los parámetros levantados en campo y que hacen referencia a la calidad del Hábitat fluvial son:

- Inclusión de rápidos- sedimentación de pozas: Se realizó un recorrido por cada uno de los tramos de la quebrada y se contabilizó el grado en que las partículas del substrato que están fijadas (hundidas) y se observó a la deposición de material fino en zonas más lenticas.
- Frecuencia de rápidos: Se estimó el promedio de la aparición de rápidos en relación con la presencia de zonas más remansadas.
- Composición del substrato y medida de las partículas: para la determinación se este bloque se realizó inspección visual clasificando la composición del sustrato del tramo de la siguiente manera: Bloques y piedras: mayor 64 mm, Cantos y gravas: 2 – 64 mm, Arena: 0,6 – 2 mm y Limo y arcilla: menor 0,6 mm.
- Regímenes de velocidad/profundidad, porcentaje de sombra en el cauce, elementos de heterogeneidad y cobertura y diversidad de la vegetación acuática.

Los resultados de este índice no expresan necesariamente un nivel de calidad y por lo tanto no son utilizados en la evaluación de la calidad hidromorfológica final, aunque sí se utilizan para caracterizar los parámetros físicos del cauce. El IHF permitió en su obtención el análisis de parámetros del estado ecológico del cuerpo hídrico, como la presencia de las comunidades biológicas (ACA, 2006). Los resultados obtenidos para la caracterización del IHF se observa en la Tabla 16, para cada uno de los tramos seleccionados para el proyecto y en la Tabla 17 del tramo 10 a manera de mostrar el cálculo realizado.

Tabla 16. Caracterización condiciones del índice de Hábitat fluvial.

Tramo	Índice de Hábitat fluvial
1	58
2	61
3	70
4	72
5	78
6	53
7	51
8	46
9	46
10	45

Tabla 17. Cálculo de Hábitat fluvial tramo 10.

Datos Generales Índice IHF (Índice de Hábitat Fluvial)					
Inclusión en rápidos- Sedimentación en pozas (Puntaje máximo 10)			frecuencia de rápidos (Puntaje máximo 10)		
Descripción	Punt.	Calif	Descripción	Punt.	Calif
Rápidos Piedras, gravas no fijadas por sedimentos fijos 0-30%	10		Alta frecuencia de rápidos. Relación distancia rápidos/Anchura del río <7	10	
Rápidos Piedras, gravas poco fijadas sedimentos fijos 30-60%	5		Escasa frecuencia de rápidos. Relación distancia rápidos/Anchura del río 7-15	8	
Rápidos Piedras, gravas medianamente fijadas por sedimentos fijos >60%	0		Presencia ocasional de rápidos. Relación distancia entre rápidos/Anchura del río 15-25	6	4
Sedimentación, 0-30%	10	5	Constancia de flujo laminar Relación distancia rápidos/Anchura del río >25	4	
Sedimentación, 30-60%	5				
Sedimentación, >60%	0		Sola pozas	2	
Composición del sustrato (Puntaje máximo 20)			Cobertura de vegetación acuática (Puntaje máximo 30)		
Descripción	Punt.	Calif	Descripción	Punt.	Calif
1-10%	2	2	10 - 50%	10	5

% Bloques y piedras > 64 mm.	>10%	5		% Plocon + fijados al sustrato por un extremo	1-10% 0 > 50%	5	
% Cantos y gravas 2 – 64 mm.	1-10%	2	2	% Pecten. talos aplanados, laminares o esféricos	10 - 50%	10	5
% Arena 0,6 – 2 mm.	>10%	5	2	% Faner+ogamas + Charales	1-10% 0 > 50%	5	
% Limo y arcilla < 0,6 mm.	>10%	5	2		10 - 50%	10	5
					1-10% 0 > 50%	5	
Total			8	Total			15
Regímenes de velocidad / Profundidad Somero <0.5m, lento < 0.3 m/s (Puntaje máximo 10)				Porcentaje de sombra en el cauce (Puntaje máximo 10)			
Descripción		Punt.	Calif	Descripción		Punt.	Calif.
4 categorías Lento-profundo, lento-somero, rápido-profundo y rápido-somero		10		Sombreado con ventanas		10	
solo 3 de las 4 categorías		8	4	Totalmente en sombra		7	7
solo 2 de las 4 categorías		6		Grandes claros		5	
solo 1 de las 4 categorías		4		Expuesto		3	
Elementos de heterogeneidad (Puntaje máximo 10)							
Descripción		Punt.	Calif	Descripción		Punt.	Cal.
Hojarasca >10% 0 < 75%		4	2	Presencia de troncos y ramas		2	2
1-10% 0 > 75%		2		Raíces expuestas		2	
				Diques naturales		2	
Total				Total			
Puntación final Índice IHF				45			

4.2.5.3. Protocolo 6: Naturalidad de los Usos del suelo en las Riberas

El grado de naturalidad de la zona de ribera de la quebrada Mensulí en el tramo de estudio se determinó a través del análisis de los usos del suelo, delimitando la zona de inundación para un periodo de retorno de 50 años y siguiendo la metodología del Protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos de la Agencia Catalana del Agua, 2006.

De acuerdo con el modelo hidráulico, los caudales proyectados para un periodo de retorno de 50 años, la topografía levantada en campo y la cartografía del sector se obtuvo la delimitación de la anchura para la quebrada Mensulí que es analizada para la naturalidad de los usos de los suelos en las riberas (Ver Figura 27). Para la obtención de caudales máximos se utilizó la metodología de transformación de lluvia en escorrentía, de acuerdo con el software Hec Hms, en la Tabla 18

se observan los valores morfométricos ingresados al programa para obtención de los caudales de diseño.

Tabla 18. Valores tiempos de Concentración en minutos.

Cuenca	Área (Km ²)	Cota Mayor	Cota Menor	L (Km)	S (m/m)	S (%)	Kripich (Minutos)	Temez (Minutos)	Giandotti (Minutos)
Cuenca Mensulí	12.48	2100	936	8,08	0,14	14,4	41,90	53,06	57,71

Para el análisis de la precipitación y lluvia de diseños se analizaron las estaciones Limoncito, Buenavista Canal 1, Canal 2, la Esperanza y San Antonio Santander Automática las cuales se encuentran suspendidas, la estación Neomundo Automática a pesar de estar cercana a la zona de análisis no cuenta con una serie de datos representativos de precipitación. Por lo anterior, para los datos de análisis de precipitación se trabajó con la estación Granja Piedecuesta de categoría Pluviográfica, las especificaciones de la estación se observan en la Tabla 19.

Tabla 19. Estación Granja Piedecuesta.

Nombre	Granja Piedecuesta
Código	23190700
Tipo	Pluviográfica
Estado	Activa
Operada	IDEAM
Departamento	Santander
Municipio	Piedecuesta
Fecha de instalación	15/07/1970

Para el cálculo de intensidad de la lluvia se elaboraron curvas sintéticas IDF para diferentes periodos de retorno con la estación se empleó la metodología y los resultados encontrados en la investigación de Rodrigo Vargas (1998) de la Universidad de los Andes, denominado “Curvas Sintéticas de Intensidad Duración Frecuencia para Colombia” y presentado como método simplificado en el manual de drenaje del Instituto Nacional de Vías INVIAS, en la Figura 26 y la Tabla 20 se observan los resultados de las curvas IDF para la estación representativa.

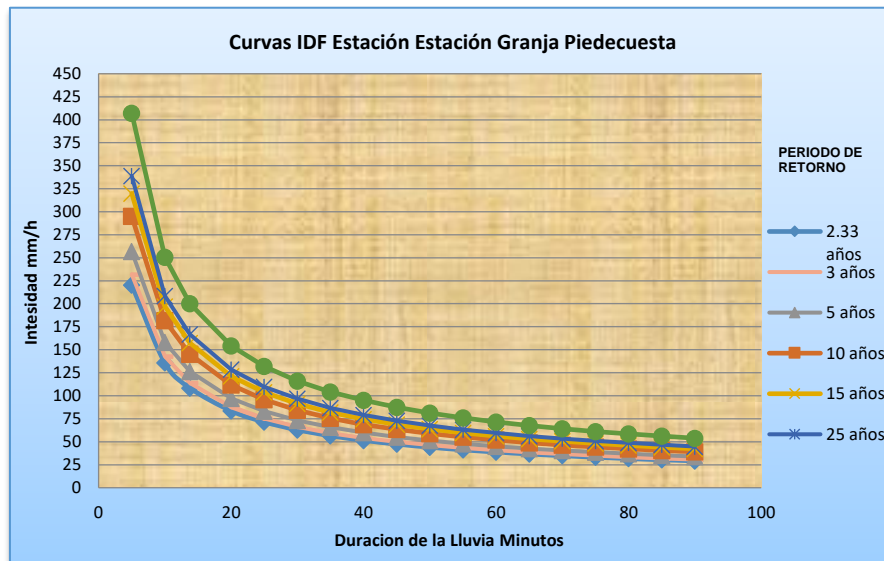


Figura 26. Curvas IFD para la Estación Granja Piedecuesta. (IDEAM, 2018)

Tabla 20. Valores de intensidad en mm/hora para la estación Granja Piedecuesta.

TR (Años)	DURACIÓN DE LA LLUVIA (Minutos)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
2,33	220,486	135,725	102,187	83,548	71,466	62,903	56,469	51,430
3	231,917	142,762	107,485	87,880	75,172	66,165	59,397	54,097
5	256,864	158,118	119,047	97,333	83,258	73,282	65,786	59,916
10	295,059	181,630	136,749	111,807	95,638	84,179	75,568	68,825
15	319,983	196,973	148,301	121,251	103,717	91,290	81,952	74,639
20	338,934	208,638	157,083	128,432	109,859	96,696	86,805	79,059
50	407,102	250,601	188,677	154,263	131,955	116,144	104,264	94,960
100	467,637	287,865	216,733	177,201	151,576	133,415	119,768	109,080
500	645,213	397,175	299,032	244,490	209,134	184,076	165,247	150,501

Para la estimación del caudal máximo, se calculó la CN de la Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América, SCS, la cual es un método denominado número de curva de escorrentía CN, para calcular las abstracciones de una tormenta.

Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planteamiento de cuencas para la estimación de la escorrentía superficial a partir de la precipitación. Las propiedades de los suelos “desnudos”, luego de un humedecimiento prolongado, que son consideradas para estimar la tasa mínima de infiltración, son: profundidad del nivel freático en

época de invierno, infiltración y permeabilidad del suelo luego de un humedecimiento prolongado, y la profundidad hasta el estrato de permeabilidad muy baja. La influencia de la cobertura vegetal es tratada independientemente. Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos A, B, C, y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

Para realizar el cálculo de la CN, se requirió información de los suelos y las coberturas que se presentan en el área de análisis, lo cual se realizó el cruce de la información de suelos y coberturas los cuales se indicaron en la Figura 17 y la Figura 18.

Con las características asignadas a los suelos se asume un grupo, siendo necesario para cada grupo determinar el tipo de coberturas establecidas y así estimar la curva número el cual se calculó en 63.

Para la modelación hidrológica se realizó el cálculo de los hietogramas de aguaceros espaciales de diseño de precipitación efectiva a ser aplicados a los hidrogramas de escorrentía superficial sobre arrea de drenaje de interés.

Paso seguido se introdujo los valores de la lluvia de diseño calculados; para la cual se ha utilizó las curvas IDF tomando la intensidad para los dos periodos de retorno de análisis (50, 100 y 500 años), con estas intensidades se calculó la precipitación para un intervalo de cinco minutos. Se asignó a la estación creada el intervalo de entrada de información, para este caso será 5 minutos ya que así se diseñó la tormenta. El caudal máximo generado es de 167,8 m³/s para un periodo de retorno de 100 años. Los valores de caudal máximo generados para 50 años, 100 años y 500 años se presentan en la Tabla 21:

Tabla 21. Caudal máximo Tr 50, 100 y 500 años.

Área de Influencia	Q Tr 50 años (m ³ /s)	Q Tr 100 años (m ³ /s)	Q Tr 500 años (m ³ /s)
Cuenca Mensuli	85,2	95,5	122,6

Una vez se realizó la delimitación de la zona de ribera, se interceptó la información con los usos de suelos de la zona (Figura 27), la información de los usos de suelo se clasificó en usos naturales, agrícolas y urbanos, basado en la información cartográfica, topografía y fotografías de la zona.

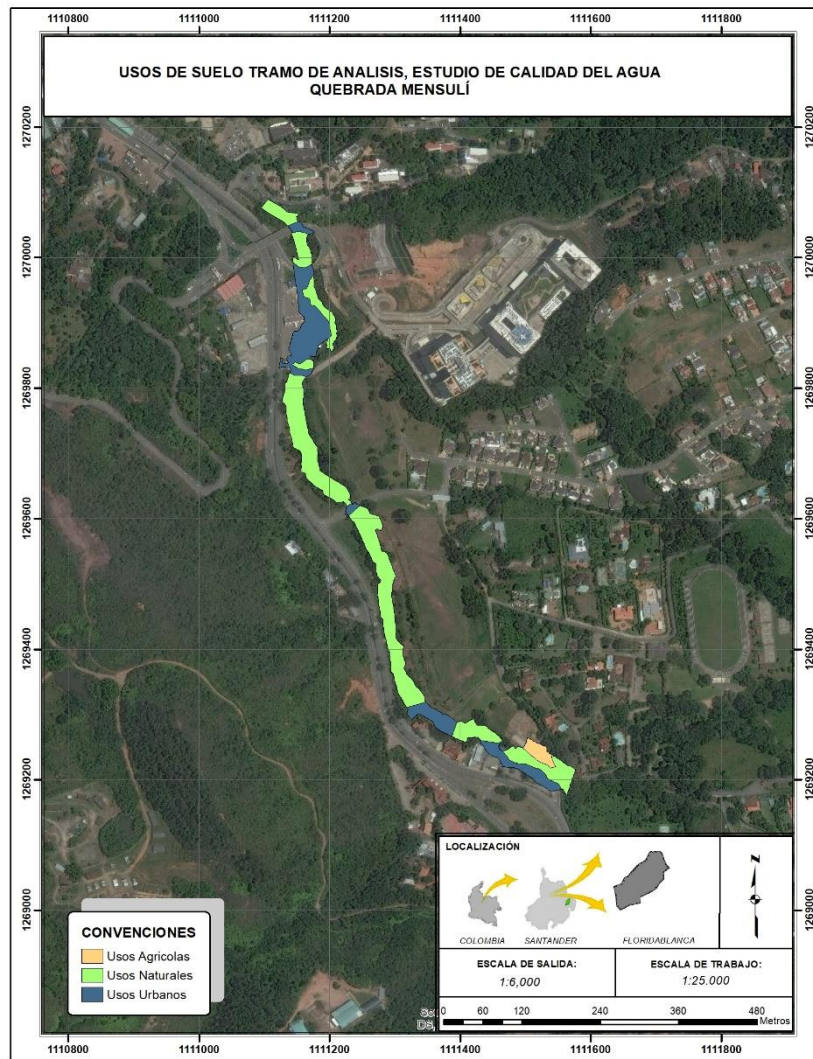


Figura 27. Usos del suelo en la Anchura TR 50 años.

Tabla 22. Porcentaje de naturalidad

Usos del suelo	Nivel de Naturalidad	Calidad
Usos Naturales	69%	Bueno
Usos Urbanos	27%	Inferior a bueno
Usos Agrícolas	4%	Muy bueno

En la Figura 27 y la Tabla 22 se observa la obtención del grado de Naturalidad de los Usos del suelo en las Riberas para el tramo de estudio, las cuales se encuentran distribuidos entre muy bueno e inferior, reduciendo el grado de naturalidad del tramo de estudio debido al gran porcentaje de suelos urbanos dentro de la franja del periodo de retorno de 50 años.

4.2.5.4. Protocolo 7: Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR)

El QBR es un índice de aplicación rápida y sencilla, que integra aspectos biológicos y morfológicos del lecho del río y su zona inundable y los utiliza para evaluar la calidad ambiental de las riberas se estructura en cuatro bloques independientes, cada uno de los cuales valora diferentes componentes y atributos del sistema. Cada bloque recibe una puntuación entre 0 y 25, y la suma de los cuatro bloques da la puntuación final del índice, que expresa el nivel de calidad de la zona de estudio (ACA, 2006):

- 1) el grado de cubierta vegetal de las riberas: Determina qué porcentaje de las riberas tiene cobertura vegetal
- 2) la estructura vertical de la vegetación: Valora la complejidad estructural de las áreas de la ribera donde existe cobertura de vegetación.
- 3) la calidad y la diversidad de la cubierta vegetal; Se tiene en cuenta la diversidad de especies del bosque de ribera ponderada por el tipo geomorfológico del sistema
- 4) el grado de naturalidad del canal fluvial.

Para la valoración del índice QBR se realizó un recorrido por toda la longitud de estudio de la quebrada Mensulí y se recolectó la información que se encuentra en el APENDICE A por cada uno de los tramos inicialmente dividido en la Figura 28 se muestra un registro fotográfico de cada uno de los tramos estudiados, iniciando en el 1 y finalizando en el 10.



Figura 28. Registro fotográfico de cada tramo de 1 al 10.

En la Tabla 23 se observa el resultado de la valoración de cada tramo, según los bloques que se indican en la metodología del cálculo del índice QBR y que se unifica para determinar el índice de calidad hidromorfológico final de la quebrada Mensulí.

Tabla 23. Cálculo índice QBR.

Tramo	Bloque 1 Grado cobertura de zona de ribera	Bloque 2 Estructura de cobertura	Bloque 3 Calidad cobertura	Bloque 4 Grado naturalidad	índice QBR	TOTAL Nivel de Calidad
1	10	5	5	10	30	Deficiente
2	0	5	0	5	10	Malo
3	5	0	0	5	10	Malo
4	10	5	0	25	40	Deficiente
5	25	10	5	25	65	Moderado
6	10	5	5	10	30	Deficiente
7	10	10	5	5	30	Deficiente
8	5	0	0	5	10	Malo
9	5	0	0	0	5	Malo
10	5	0	0	0	5	Malo

4.2.5.5. Protocolo 9: Determinación del nivel de calidad hidromorfológica final

Para determinar el nivel de calidad del tramo de estudio de la quebrada Mensulí, se realizó la combinación de los niveles de calidad obtenidos según el QBR y la Naturalidad de los usos en la ribera para obtener el nivel de calidad de la ribera, como se observa en la Tabla 24, de manera general la calidad de la quebrada Mensulí se encuentra entre moderado y malo:

Tabla 24. Valoración nivel de calidad hidromorfológica Quebrada Mensulí. ((ACA, 2006)

Tramo	Nivel de Calidad QBR	Índice de Naturalidad	Calidad Hidromorfológica
1	Deficiente	Inferior a Bueno	Deficiente
2	Malo	Bueno	Malo
3	Malo	Inferior a Bueno	Malo
4	Deficiente	Muy bueno	Moderado
5	Moderado	Muy bueno	Bueno
6	Deficiente	Muy bueno	Moderado
7	Deficiente	Muy bueno	Moderado
8	Malo	Inferior a Bueno	Malo
9	Malo	Malo	Malo
10	Malo	Bueno	Malo

4.3. Modelo matemático de la calidad del agua de la quebrada Mensulí

Para la modelación de la calidad del agua de la quebrada Mensulí se consolidó la información recolectada a lo largo del desarrollo del proyecto, generando la base de datos de ingreso al modelo seleccionado QUAL2Kw por medio de la matriz multicriterio. En este estudio se tuvieron en cuenta los datos de los monitoreos realizados a la quebrada Mensulí, a sus vertimientos y tributarios, características del cauce en su recorrido y la topografía de la quebrada, la longitud total del cauce se encuentra cercana a 1,5 km, por tal razón se definieron tres tramos de modelación, que, por sus características presentan condiciones hidráulicas similares.

4.3.1. Esquematización de la corriente

El aspecto fundamental para la aplicación del modelo es la discretización de la corriente principal. Por una parte, permite definir cuáles serán las áreas susceptibles de modelación hidrológica y por otra parte permite garantizar los criterios de estabilidad numérica. El proceso de discretización de la corriente se hizo en forma no automatizada. La esquematización de la quebrada Mensulí corresponde a una corriente construida entre la abscisa 0 km Restaurante Mensulí al inicio del tramo simulado y la abscisa 1,5 km en la Universidad Pontificia Bolivariana en la salida del tramo. En la Tabla 25 y la Figura 29 se observa la esquematización de la quebrada Mensulí.

Tabla 25. Esquematización de la quebrada Mensulí en el tramo de estudio.

ESTACIONES	FRONTERA INTERNA (DESCRIPCION)	ABSCISA KM	Número
Aguas arriba restaurante Mensulí	Punto de control 1	0,00	1
	Vertimiento 1	0,10	2
	Vertimiento 2	0,16	3
	Vertimiento 3	0,24	4
	Vertimiento 4	0,33	5
	Punto de control 2	0,44	6
	Tributario 4	0,50	7
Punto medio del tramo	Punto de control 3	0,52	8
	Punto de control 4	0,85	9
	Vertimiento 5	0,88	10

Punto del lavadero	Punto de control 5	1,00	11
	Tributario 3	1,13	12
	Tributario 2	1,20	13
	Vertimiento 6	1,31	14
	Punto de control 6	1,36	15
	Tributario 1	1,41	16
	Vertimiento 7	1,45	17
	Punto de control 7	1,50	18
Total, Tramo km		1.50	

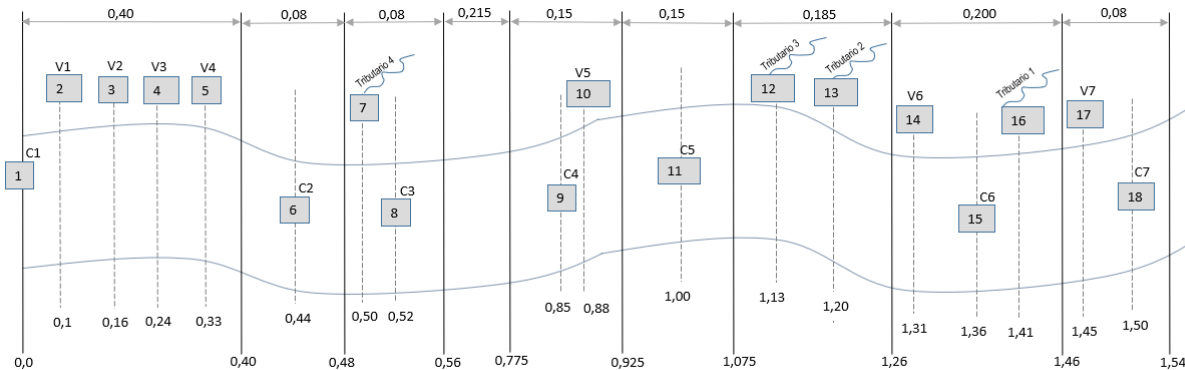


Figura 29. Diagrama de la Quebrada Mensulí.

Como se observa en el diagrama se cuenta con nueve tramos de que varían de 0,040 a 0,215 km, con el fin de verificar la estabilidad de la modelación de la calidad del agua se chequea el cumplimiento de los dos criterios Peclet y el número de Courant, con los datos de las características hidráulicas se calculan los criterios como se observa en la Tabla 26, obteniendo como resultado valores muy grandes para los tramos de 0,04 y 0,08 km generando a su vez en estos tramos insensibilidad en el modelo.

Tabla 26. Resultados calculo criterio de Peclet y Courant.

Δx	0.400	0.080	0.215	0.150	0.185	0.200	0.040
Courant	1.000	5.000	1.860	2.667	2.162	2.000	10.000
Peclet	0.500	0.100	0.269	0.188	0.231	0.250	0.050

4.3.2. Datos de Entrada al Modelo de Simulación

Durante la implementación de un modelo de simulación en una corriente superficial es

necesario recolectar información sobre dos aspectos básicos: Información sobre calidad, cantidad y ubicación de los tributarios o vertimientos y de la corriente que se está modelando.

En la Tabla 27 y Figura 30, se muestra el ingreso de los datos de la cabecera, pertenecientes al punto denominado PC1 aguas arriba de la quebrada Mensulí, según los datos del monitoreo realizado en la época de sequía, de igual manera se realizó el cálculo por medio de fórmulas de la DBO rápida, DBO lenta, fósforo orgánico, nitrógeno orgánico y detritos las cuales son variables que no son reportadas por el laboratorio y son importantes para el ingreso adecuado de los datos al modelo.

QUAL2KW Stream Water Quality Model Quebrada Mensuli					
Datos de frontera aguas arriba y aguas abajo					
Caudal y calidad del aguas arriba	Unidades	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM
Caudal	m ³ /seg	0.011240	0.011240	0.011240	0.011240
Temperatura	C	26.00	26.00	26.00	26.00
Conductividad	u S/cm 25C	0.00	0.00	0.00	0.00
Solidos Inorganicos	mgD/L	15.20	15.20	15.20	15.20
Oxigeno disuelto	mg/L	7.03	7.03	7.03	7.03
CBOD _{amto}	mgO2/L	3.85	3.85	3.85	3.85
CBOD _{rapido}	mgO2/L	8.15	8.15	8.15	8.15
Nitrógeno orgánico	ugN/L	26590.00	26590.00	26590.00	26590.00
NH4-Nitrogen Anonico	ugN/L	100.00	100.00	100.00	100.00
NO3-Nitrogen Nitrate	ugN/L	10.00	10.00	10.00	10.00
Fósforo orgánico	ugP/L	1250.00	1250.00	1250.00	1250.00
Fósforo Inorgánico (SRP)	ugP/L	1480.00	1480.00	1480.00	1480.00
Fitoplancton	ugA/L	40.00	40.00	40.00	40.00
Detritus (POM)	mgD/L	0.00	0.00	0.00	0.00
Patógeno	cfu/100 mL	200.00	200.00	200.00	200.00
Constituyente genérico	user defined				
Alcalinidad	mgCaCO3/L	69.50	69.50	69.50	69.50
pH	s.u.	7.51	7.51	7.51	7.51

Figura 30. Datos de la cabecera en calibración.

Tabla 27. Cálculo de variables estacionales.

$DBO_{rápida} = \frac{DBOCFN_5}{1 - e^{-k_1 \cdot 5}}$	DBOCFN ₅ (mg O2/L)	k1 d-1	DBO Rápida (mg O2/L)	
	4,3	0,15	8,15	
$DBOC_L = DQO_F - DBOCFN_5$	DBO Rápida (mg O2/L)	DQO _F	DBO Lenta (mg O2/L)	
	8,15	12	3,85	
$P_{org} = P_{Total} - \text{Ortofosfatos}$	P Total (mg P/L)	Ortofosfatos (mg P/L)	P Org (mg P/L)	
	2,73	1,48	1,25	
$SSI = SST - SSV$	SST (mg D/L)	SSV (mg D/L)	SSI (mg D/L)	
	15,2	0	15,2	
$NORG = NT - NH4 - NO3$	NT (mg N/L)	NH4 (mg N/L)	NO3 (mg N/L)	Norg (mg N/L)
	26,7	0,1	0,01	26,59

4.3.3. Datos hidráulicos

El primer paso de la modelación consiste en dividir el sector en estudio en varios tramos de características hidráulicas homogéneas, tomando como base la morfología de la cuenca. Una vez

definidos los tramos de modelación con características hidráulicas similares, es necesario obtener las constantes hidrométricas del río en cada uno de los tramos. El objetivo es obtener los valores de los coeficientes y exponentes que mejor aproximen las series de datos de caudal - velocidad y caudal - profundidad.

Se asignaron las constantes hidrométricas, que mejor describieran las características hidráulicas de los tramos de modelación definidos gracias a la batimetría realizada. La información correspondiente a las secciones hidráulicas de los tramos de modelación es suministrada en el modelo QUAL2Kw en las hojas “reach”, los coeficientes obtenidos se describen en la Tabla 28 y la Figura 31.

Tabla 28. Constantes hidrométricas para calibrar el componente hidráulico del modelo QUAL2Kw.

ESTACIONES	Coefficiente de Velocidad (α)	Exponente de Velocidad (β)	Coefficiente de Profundidad (α)	Exponente de Profundidad (β)
0	0.1288	0.0849	0.1339	0.0650
0.4	0.1139	0.0848	0.1488	0.0676
0.48	0.1139	0.0848	0.1488	0.0676
0.56	0.1215	0.0810	0.2863	0.1681
0.775	0.1215	0.0810	0.2863	0.1681
0.925	0.1122	0.0812	0.2256	0.1632
1.075	0.1117	0.0808	0.1936	0.1728
1.26	0.1117	0.0808	0.1936	0.1728
1.46	0.1002	0.0793	0.2619	0.2136
1.54	0.1000	0.0780	0.7232	0.2496

Numero	Tramo		Aguas Abajo		Elevación		Aguas Abajo				Presa		Curvas de Calificación					
	Longitud (km)	Latitud	Logitud	Abscisa (km)	Aguas Arriba (m)	Aguas Abajo (m)	Latitud (norte Positivo)		Longitud (Este Positivo)		Altura (m)	Ancho (m)	Coefficiente	Exponente	Coefficiente	Exponente		
0		7.03	73.07	0.000	986.575	954.000	7.00	1	45	73.00	4	4	0.0000	0.0000	0.1288	0.0849	0.1339	0.0650
1	0.40	7.03	73.07	0.400	986.575	954.000	7.00	1	49	73.00	4	12	0.0000	0.0000	0.1139	0.0848	0.1488	0.0676
2	0.08	7.04	73.07	0.480	954.000	945.578	7.00	2	9	73.00	4	16	0.0000	0.0000	0.1139	0.0848	0.1488	0.0676
3	0.08	7.04	73.07	0.560	945.578	942.112	7.00	2	18	73.00	4	20	0.0000	0.0000	0.1215	0.0810	0.2863	0.1681
4	0.22	7.04	73.07	0.775	942.112	938.251	7.00	2	22	73.00	4	22	0.0000	0.0000	0.1215	0.0810	0.2863	0.1681
5	0.15	7.04	73.07	0.925	938.251	930.185	7.00	2	35	73.00	4	26	0.0000	0.0000	0.1122	0.0812	0.2256	0.1632
6	0.15	7.05	73.08	1.075	930.185	925.223	7.00	2	44	73.00	4	32	0.0000	0.0000	0.1117	0.0808	0.1936	0.1728
7	0.19	7.05	73.08	1.260	925.223	922.002	7.00	2	56	73.00	4	35	0.0000	0.0000	0.1117	0.0808	0.1936	0.1728
8	0.20	7.05	73.08	1.460	922.002	912.354	7.00	3	15	73.00	4	44	0.0000	0.0000	0.1002	0.0793	0.2619	0.2136
9	0.08	7.06	73.08	1.540	910.147	906.262	7.00	3	31	73.00	4	56	0.0000	0.0000	0.1000	0.0780	0.7232	0.2496

Figura 31. Datos hidráulicos ingresados al QUAL2Kw.

4.3.3.1. Zona de mezcla

La zona de mezcla calculada para cada uno de los puntos sobre la quebrada Mensulí, se describen en la Tabla 29 los datos de la distancia tomada para los monitoreos se basaron en los

resultados obtenidos de la zona de mezcla, para el caso lo vertimientos identificación todos se realizan en la orilla de acuerdo con la formula Yotsukura, 1968.

Tabla 29. Calculo zona de mezcla de la quebrada Mensulí en el tramo de estudio.

ZONA DE MEZCLA ORILLA:	Aguas Arriba	Punto de control 2	Punto de control 3	Punto de control 4	Punto de control 5	Punto de control 6
	6,2750 (m)	5,5620 (m)	6,3464 (m)	5,8472 (m)	5,8472 (m)	5,3481 (m)

4.3.1.2. Tiempo de viaje

Los tiempos de viajes calculados según los datos de batimetrías, y campañas de caudales, se registran con el fin de conocer los tiempos que demora en viajar la partícula de una sección a otra, de tal manera estos tiempos son el delta de tiempo en la toma de muestras en las fechas de los monitoreos con el fin de caracterizar la quebrada siguiendo la masa de agua (Tabla 30 Tabla 31).

Tabla 30. Calculo tiempos de viaje quebrada Mensulí en el tramo de estudio.

PUNTOS DE MONITOREO	TIEMPO MINIMO DE TOMA DE MUESTRA (Minutos)	TIEMPO MÁXIMO DE TOMA DE MUESTRA (Minutos)
Aguas Arriba	12,698	15,152
Punto de control 2	10,417	12,821
Punto de control 3	16,975	20,599
Punto de control 4	19,802	24,390
Punto de control 5	23,333	28,455
Punto de control 6	25,926	31,111

Tabla 31. Datos para tiempo de viaje PC3.

Calculo Punto de control 3	Unidades	
VELOCIDAD MEDIA:	0.089	(m/s)
VELOCIDAD MAXIMA:	0.108	(m/s)
AREA SECCION:	0.200	(m ²)
ANCHO:	1.500	(m)
CAUDAL:	0.021	(m ³ /s)
LONGITUD DEL TRAMO:	110.000	(m)

4.3.4. Datos climáticos

En el modelo QUAL2Kw los datos climatológicos (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra) de los tramos en estudio, se introducen en las

hojas “Air Temperature”, “Dew Point Temperature”, “Wind Speed”, “Cloud Cover” y “Shade”.

Con los datos tomados el día de los monitoreos y basados en la información analizada en el capítulo de análisis climatológico, se estimó las condiciones ingresadas el modelo, indicadas en la Tabla 32 (día del monitoreo y estación la Judía) y la Figura 32.

Tabla 32. Datos climáticos ingresados al modelo.

Datos Climáticos		
Temperatura ambiente =	29,5	°C
Temperatura punto de rocío =	21,20	°C
Velocidad del viento =	3	m/s
Nubosidad =	0	%
Sombrío =	2	
Radiación solar =	197,8	W/m ²

usando valores de la columna G o repitiendo las entradas de variaciones de diel en las columnas G a Z

						Día 1					
Río arriba	Tramo	Aguas Abajo	Tramo	Río arriba	Aguas Abajo	12:00 AM	1:00 AM	2:00 AM	3:00 AM	4:00 AM	5:00 AM
Identificación	Identificación	Identificación	Numero	Distancia km	Distancia km	Temperatura del aire por hora para cada alcance (grados C)					
	1.00		1	0.00	0.50	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5
	2.00		2	0.50	1.00	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5
	3.00		3	1.00	2.00	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5

Figura 32. Datos de temperatura ambiente ingresados al QUAL2Kw.

4.3.5. Datos de vertimientos y tributarios

Los datos obtenidos del monitoreo realizado en diciembre de 2019, se ingresan el software QUAL2Kw teniendo en cuenta que es la época se considera como seca y presenta las condiciones críticas. Se ingresan siete vertimientos identificados sobre la corriente hídrica y los cuatro tributarios que vierten sus aguas la quebrada Mensulí (ver Figura 33).

Nombre	Localización (km)	Punto de abstracción			Punto de entrada de Caudal			Temperatura	
		Promedio m3/s	rango/2 m3/s	Tiempo Maximo	Promedio m3/s	rango/2 m3/s	Tiempo Maximo	Promedio °C	rango/2 °C
Vertimiento 1	0.10				0.00050			25.30	
Vertimiento 2	0.16				0.0012			26.50	
Vertimiento 3	0.24				0.0009			29.50	
Vertimiento 4	0.33				0.0003			28.00	
Tributario 4	0.50				0.0093			26.00	
Vertimiento 5	0.86				0.0002			27.00	
Tributario 3	1.11				0.0008			28.30	
Tributario 2	1.18				0.0045			29.00	
Vertimiento 6	1.29				0.0086			28.00	
Tributario 1	1.39				0.0016			28.00	
Vertimiento 7	1.43				0.0002			26.00	

Figura 33. Datos de vertimientos y tributarios ingresados al QUAL2Kw.

4.3.6. Datos de las estaciones de control

Con el fin de comparar los datos modelados con los datos observados, se ingresan los resultados de los monitoreos realizados sobre la fuente hídrica denominados puntos de control, de los cuales se tienen y puntos de control (Figura 34).

Distancia (Km) (requerido)	Fecha (opcional)	Temperature (degC) (optional)	Conductivity (uS/cm 25C) obs avg	Inorganic suspended solids (mgD/L) Prom Observado	Dissolved oxygen (mgO2/L) Prom Observado	CBODLenta (mgO2/L) Prom Observado	CBODRapida (mgO2/L) Prom Observado
0.000		26.00		15.20	7.03	4.30	9.18
0.44		25.20		21.40	5.10	4.20	18.50
0.52		27.20		19.40	6.10	22.10	31.67
0.85		26.80		18.50	6.50	12.40	21.60
1.00		26.10		18.00	6.80	9.34	12.45
1.36		28.20		138.50	5.27	39.90	95.20
1.50		29.30		153.70	4.24	39.20	113.00

Distancia (km)	Caudal (m^3/sec) Observado	Profundidad (m) Observado	Velocidad (m/s) Observado
0.440	0.011	0.110	0.078
0.520	0.021	0.150	0.089
0.850	0.021	0.120	0.082
1.000	0.022	0.100	0.082

Figura 34. Datos de puntos de control ingresados al QUAL2Kw.

4.3.7. Calibración y validación del modelo QUAL2Kw Quebrada Mensulí

La calibración del modelo QUAL2Kw en la quebrada Mensulí se realizó con la información del monitoreo realizado en diciembre de 2019 (condiciones de estiaje, caudales bajos) y una verificación con la información del monitoreo de abril de 2019 (condiciones de lluvias, caudales altos).

Se implementó la metodología contenida mediante el uso de dos hojas de cálculo en el modelo QUAL2Kw, denominadas Fitness y Auto-calibración, con una cantidad de 5.000 corridas), monitoreo de diciembre de 2019, si bien el modelo es calibrado con los datos de un solo día, es importante indicar que el resultado final obedece a un modelo con la existencia de limitaciones relacionadas con las predicciones que se realicen, ya que QUAL2KW requiere mínimo dos días de información para realizar el corrimiento, para este caso específico y debido a problemas presupuestales los datos del día uno se repiten el día dos. En la Tabla 33, se observan las constantes con las se realizó la aplicación de calibración del modelo con su debida validación.

Tabla 33. Constantes de calibración modelo de calidad quebrada Mensulí.

TASA O CONSTANTE	DESCRIPCIÓN DEL PARÁMETRO DE CALIBRACIÓN	VALOR DE CALIBRACIÓN	UNID.
VS-SSI	<i>Velocidad de sedimentación de SSI</i>	1,59695	<i>m/d</i>
Tasa hidrólisis DBO lenta	<i>Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición</i>	0,198746	<i>1/d</i>
Tasa de Oxidación DBO- DBO lenta	<i>Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición</i>	0,03425	<i>1/d</i>
Tasa de Oxidación DBO rápida (Kc)	<i>Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación</i>	0,59965	<i>1/d</i>
Hidrólisis NO	<i>Hidrólisis de nitrógeno orgánico</i>	4,7128	<i>1/d</i>
VSNO	<i>Vel de sedimentación de nitrógeno orgánico</i>	1,558481	<i>m/d</i>
Tasa de Nitrificación (Kn)	<i>Tasa de nitrificación de amonio</i>	0,2558	<i>1/d</i>
Tasa de Desnitrificación	<i>Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)</i>	4,6581	<i>m/d</i>
CT- D222esnitrificación Sed.	<i>Coficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos</i>	0,2149	<i>1/d</i>
Hidrólisis PO	<i>Hidrólisis del Fósforo Orgánico</i>	1,61725	<i>1/d</i>
VS-PO	<i>Vel de sedimentación del Fósforo Orgánico</i>	3,0854	<i>m/d</i>
VS-PI	<i>Vel de sedimentación del Fósforo Inorgánico</i>	2,2517	<i>m/d</i>
Hidrólisis POM	<i>Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))</i>	0,1571225	<i>1/d</i>
Velocidad de sedimentación POM	<i>Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))</i>	1,4538635	<i>m/d</i>

Una vez se logró calibrar el modelo se realizó la bondad de ajuste del modelo para así determinar el error, se utilizó el Criterio de eficiencia o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), con el fin de tener parámetros de evaluación de la calibración. En la Tabla 34 se observan los coeficientes obtenidos para los parámetros calibrados y el Nash global de la modelación de 0,77.

Respecto a la calibración del modelo se tiene un buen ajuste y con un grado de confiabilidad muy bueno (Molnar, 2011), sin embargo es importante identificar por que los valores de temperatura presentan resultados de 0,33, inferiores respecto a las demás variables analizadas, esto puede verse influenciado por errores en la captura de los datos de campo ya que las constates cinética utilizada se encontraba dentro de los valores teóricos recomendados por lo tanto sería necesario realizar nuevos monitoreos haciendo énfasis en esta variable y estaría bien a su vez hallar esta constante cinética en campo.

Tabla 34. Valores coeficientes Nash.

	Distancia (Km)	Oxígeno disuelto (mgO ₂ /L)	CBOD Rápida (mgO ₂ /L)	CBOD lenta (mgO ₂ /L)	Temperatura (degC)
Datos Observados	0,00	7,03	9,18	4,30	26,00
	0,44	5,10	18,50	4,20	25,20
	0,52	6,10	31,67	22,10	27,20
	0,85	6,50	21,60	12,40	26,80
	1,00	6,80	12,45	9,34	26,10
	1,36	5,27	95,20	39,90	28,20
	1,50	4,24	113,00	39,20	29,30
Datos medidos	0,00	7,03	8,15	3,85	25,75
	0,44	5,17	36,69	18,93	26,80
	0,52	5,98	26,79	14,54	26,60
	0,85	6,44	26,91	14,48	26,98
	1,00	6,59	26,70	14,38	27,12
	1,36	5,46	90,95	41,46	27,68
	1,50	4,87	90,19	41,14	27,68
NS			0,92	0,89	0,78
Factor de Importancia		100	100	100	80
NS Ponderado		91,97	89,66	78,24	33,11
				NS Total	0,77

Se destaca la representatividad que tiene el modelo con buena precisión la tendencia y los valores máximos y mínimos de los parámetros, especialmente del oxígeno disuelto.

La validación del modelo se realizó con los caudales altos correspondientes al monitoreo realizado el abril de 2019, en épocas de lluvias máximas; los tributarios reciben gran parte de la escorrentía que contienen cargas difusas, de igual manera en la parte de baja de la cuenca se presentan construcciones que pueden presentar fuentes difusas, por la complejidad de la captura de información y bajo presupuesto del proyecto, no se incluyeron cargas difusas en estas áreas.

En las Figuras de la 35 a la 46 se observan los resultados de la calibración del modelo de simulación de la calidad del agua QUAL2Kw y se puede observar los resultados de la verificación de este modelo.

En la Figura 38 Se observa que el impacto generado por los vertimientos realizados a la quebrada Mensulí en los primeros 800 metros no es tan impactante, ya que se alcanza a registrar una recuperación del oxígeno disuelto producida por la materia orgánica de los vertimientos.

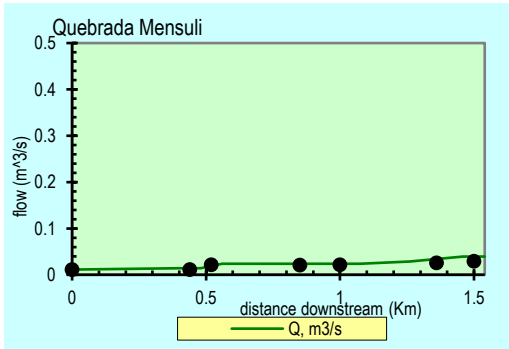


Figura 35. Resultados QUAL2Kw Caudal modelado calibrado.

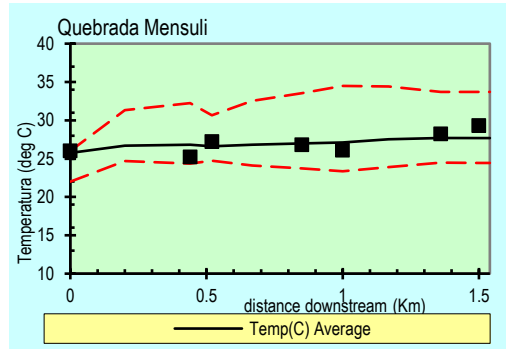


Figura 37. Resultados QUAL2Kw Temperatura modelado calibrado.

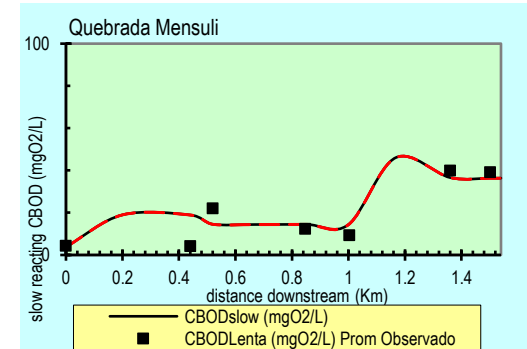


Figura 39. Resultados QUAL2Kw DBO Lenta modelado calibrado.

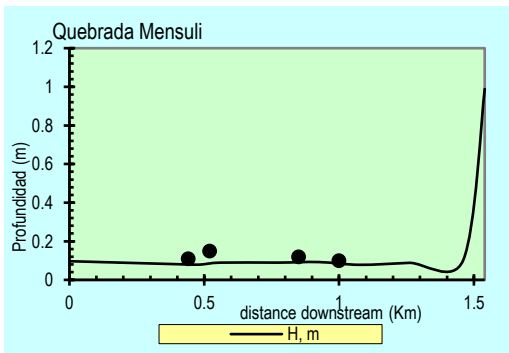


Figura 36. Resultados QUAL2Kw Profundidad modelado calibrado.

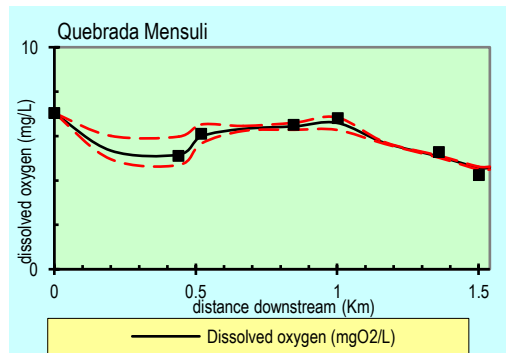


Figura 38. Resultados QUAL2Kw OD modelado calibrado.

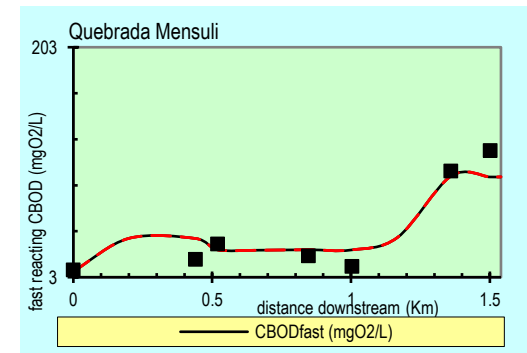


Figura 40. Resultados QUAL2Kw DBO Rápida modelado calibrado.

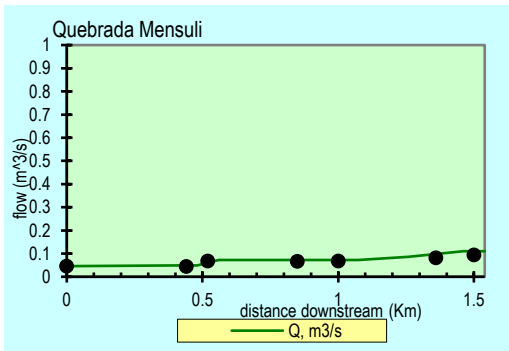


Figura 41. Resultados QUAL2Kw Caudal modelado validado.

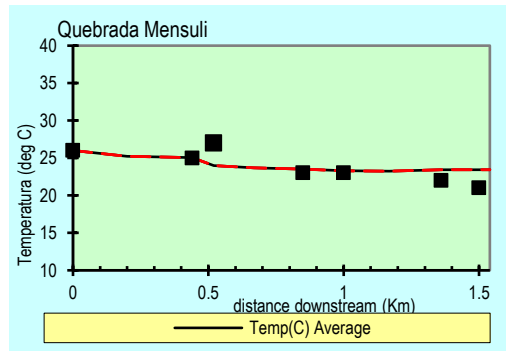


Figura 43. Resultados QUAL2Kw Temperatura modelado validado.

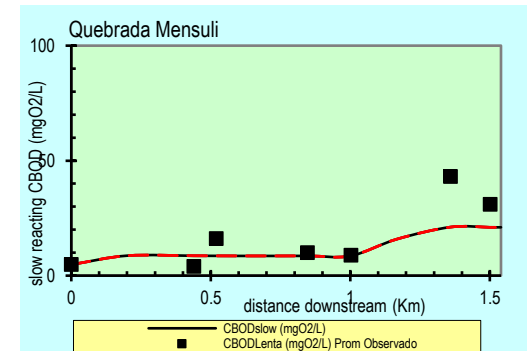


Figura 45. Resultados QUAL2Kw DBO Lenta modelado validado.

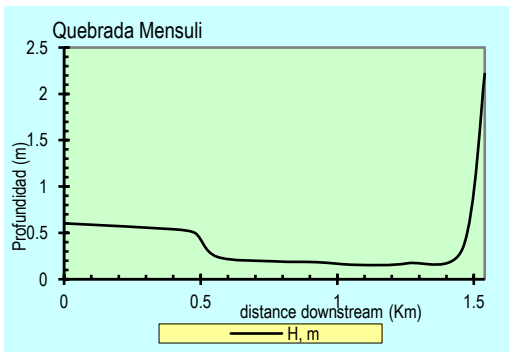


Figura 42. Resultados QUAL2Kw profundidad modelado validado.

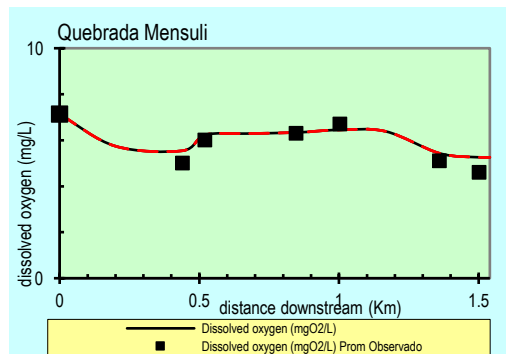


Figura 44. Resultados QUAL2Kw OD modelado validado.

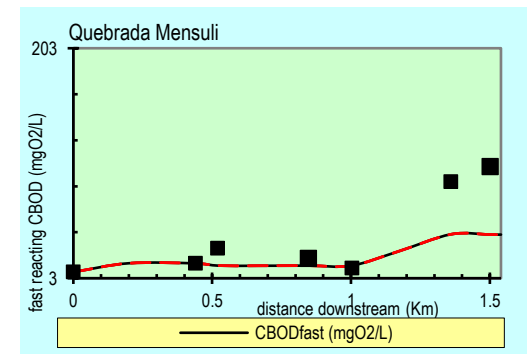


Figura 46. Resultados QUAL2Kw DBO Rápida modelado validado.

Como no se cuenta con objetivos de calidad para la quebrada Mensulí, se toma el valor de 20 mg/l para el análisis del factor de asimilación, este valor se toma de los objetivos del río Frio; el caudal ambiental utilizado en la formula corresponde a un valor calculado a partir de la metodología de porcentaje de descuento, referenciado por el IDEAM donde indica que el caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio, los caudales medios mensuales se toman de información secundaria del PORH del río Frio (CDMB, 2020), en la Tabla 35 se observa la información tomada del PORH con el caudal ambiental de la quebrada Mensulí y el cálculo del factor se observa en la Tabla 36:

$$\alpha = \frac{W}{c} \quad W = W_0 + W_v = Q_{amb} * c_0 + Q_v * c_v$$

Tabla 35. Calculo de caudal ambiental quebrada Mensulí.

MICROCUENCAS RIO FRIO	CAUDAL MEDIO MENSUAL m ³ /S											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
QUEBRADA MENSULÍ O LA ESTANCIA	0,157	0,099	0,106	0,166	0,127	0,152	0,121	0,124	0,169	0,279	0,128	0,124
MICROCUENCAS RIO FRIO	CAUDAL AMBIENTAL m ³ /S											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
QUEBRADA MENSULÍ O LA ESTANCIA	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03

Tabla 36. Valores factor de asimilación.

Vertimiento	(Q _{amb}) Caudal ambiental (m ³ /s)	(C ₀) DBO (mg/l) antes del vertimiento	(Q _v) Caudal del vertimiento (m ³ /s)	(C _v) DBO (mg/l) a la salida	(C) objetivo de calidad DBO mg/L	α (m ³ /s)
1	0,02	9,2	0,0005	18,5	20	0,01
2	0,02	9,2	0,0012	18,5	20	0,01
3	0,02	9,2	0,0009	18,5	20	0,01
4	0,02	9,2	0,0003	18,5	20	0,01
5	0,02	21,6	0,0002	12,5	20	0,02
6	0,02	12,5	0,0086	95,2	20	0,05
7	0,02	95,2	0,0002	113	20	0,10

El caudal ambiental es de 0.02 m³/s tomados del 25% del caudal mensual mínimo de la quebrada Mensulí; el factor de asimilación de la corriente para la DBO se encuentra entre 0.01 m³/s y 0.10 m³/s en el tramo de análisis de la quebrada Mensulí, en los vertimientos identificados.

Conclusiones

Los vertimientos identificados en el tramo de estudio en la quebrada Mensulí, se catalogan como aguas residuales domésticas, las cuales son procedentes de las actividades domésticas de instituciones y restaurantes ubicados paralelos a la quebrada. Dentro del recorrido se encuentran siete puntos de vertimiento presentados con caudales de descarga de 0,5 l/, 1,2 l/, 0,9 l/s, 0,3 l/s, 0,2l/s, 8,6 l/s y 0,2 l/s; la descarga de mayor volumen la genera la proveniente de un lavadero de vehículos ubicada en la parte final del tramo.

La carga contaminante de DBO para los siete vertimientos identificados en la quebrada Mensulí son: 5.79 kg/d vertimiento 1, 14,83 kg/d vertimiento 2, 12,99 kg/d vertimiento 3, 4,33 kg/día vertimiento 4, 1,69 kg/d vertimiento 5, 212,51 kg/d vertimiento 6, y 3,42 kg/d vertimiento 7.

La modelación de la calidad de la quebrada Mensulí se realizó mediante el modelo predictivo del software QUAL2Kw, realizando una segmentación de la corriente de tres tramos de 0,5 km. Con esta metodología utilizada se comprobó que el modelo de simulación de la calidad del agua de la quebrada Mensulí es confiable en las variables de OD y DBO y se encuentra calibrado y verificado.

Se observa que el impacto generado por los vertimientos realizados a la quebrada Mensulí en los primeros 800 metros no es tan impactante, ya que se alcanza a registrar una recuperación del oxígeno disuelto producida por la materia orgánica de los vertimientos. Lo contrario ocurre en los dos últimos tramos de modelación, donde se evidencia el aumento de las concentraciones de materia orgánica y la disminución del oxígeno disuelto en los tramos.

6. Recomendaciones

Es importante en la modelación de la calidad del agua por medio del software QUAL2Kw, sectorizar el tramo de estudio, en segmentos que no sean inferiores a 500 metros, ya que se presentan problemas de estabilidad y del modelo. A su vez es importante identificar adecuadamente los datos ingresados al modelo en cada uno de los segmentos, para evitar problemas en la calibración del modelo y el aumento de la incertidumbre de este.

Se recomienda incorporar los análisis hidrológicos, hidráulicos, hidromorfológicos en los estudios de calidad de agua, ya que brindan información importante para la generación de escenarios que permitan generar que el modelo se utilice como una herramienta de gestión de los recursos hídricos.

Es importante aumentar la longitud del tramo estudiado en la presente tesis, con el fin de conocer los impactos generados por los vertimientos y la afectación de la corriente hídrica aguas abajo, debido a la fuerte presión antrópica que se presenta.

Es importante anotar que el presente trabajo de grado, se realiza con fines académicos, por lo cual es una herramienta en construcción, encontrándose en una fase inicial, lo cual no permite ser un instrumento de planificación, debido a sus limitaciones en datos tomados en campo.

Referencias Bibliográficas

- ACA, A. C. del agua. (2006). Protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos. *Agencia Catalana de l' Aigua*, 1–62. <https://doi.org/B-21.888-2006>
- Adams, C., Loftin, K. A., Adams, C., Asce, M., Wang, Y., Loftin, K., & Meyer, M. (2002). Removal of Antibiotics from Surface and Distilled Water in Conventional Water Treatment Processes Removal of Antibiotics from Surface and Distilled Water in Conventional Water Treatment Processes. *Environmental Engineering*, 9372(MARCH), 253–260. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2002\)128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128)
- Camacho, L. a., & DíazGranados, M. (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y de calidad del agua en ríos-Caso Río Bogotá. *Seminario Internacional La Hidroinformática En La Gestión Integrada de Los Recursos Hídricos*, 0, 73–82. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2017.02663>
- Cardona, C. A. (2009). Desarrollo de un modelo espaciotemporal de la hidrodinámica y la temperatura de un cauce fluvial: caso de estudio Río Fucha. *Repositorio Institucional Pontificia Universidad Javeriana*. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/3825/CardonaAlmeidaCesarAntonio2009.pdf?sequence=1>
- Carrillo Quintero, J. M. (2016). *Estudio para evaluar la incidencia del lixiviado generado en el carrasco, sobre la calidad del agua de la quebrada la Iglesia y un tramo del Río de Oro en el área metropolitana de Bucaramanga*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Castro Huertas, M. A. (2015). *Aplicación del qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia*. <http://www.bdigital.unal.edu.co/51032/>
- CDMB, B. C. A. R. para la D. de la M. de Bucaramanga. (2004). *Estudio de Plan de Ordenamiento Ambiental de la Subcuenca del Río de Oro, Área de Jurisdicción de la CDMB*.
- CDMB, B. C. A. R. para la D. de la M. de Bucaramanga. (2013). *POMCA RÍO ALTO LEBRIJA ACTUALIZACIÓN* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CDMB, C. A. R. P. la D. de la M. de B. (2020). *Redes de Monitoreo Hidro-Climatológicas*. <http://caracoli.cdmb.gov.co/cai/rhc/redcalidad.html>
- CDMB, S. D. O. Y. P. I. D. T. (2018a). *Informe anual calidad de agua 2018*. 41.
- CDMB, S. D. O. Y. P. I. D. T. (2018b). *Informe del estado de los recursos naturales 2018*. 94.
- Celorio, M. L. S. (2011). DESARROLLO E INTEGRACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. In *DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE*.
- Chaparro Díaz, M. N. (2013). *Simulación Para el estudio de la Calidad del Agua en un tramo de la microcuenca Río Frío Quebrada M Aranzoque*.

- Chapra, S. C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland press.
- Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. w. (1994). Hidrología Aplicada. In McGRAW-HILL (Ed.), *Potencia*.
- Fan, C., Ko, C., & Wang, W. (2009). *An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation*. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.011>
- Fuentes Rivas, R. M. R. L. J. A. J. M. M. del C. E. S. M. (2015). Caracterización de la materia orgánica disuelta en agua subterránea del Valle de Toluca mediante espectrofotometría de fluorescencia 3D. *Rev. Int. Contam. Ambiente*, 31, 253–264.
- Holguín, J. (2014). Calibración Del Modelo De Simulación De La Calidad Del Agua Qual2Kw Del Río Palo Con Fines De Ordenamiento Del Recurso Hídrico. In *Convenio Crc - Funaru*. http://crc.gov.co/files/GestionAmbiental/RHidrico/INFORME_MODELACION_RIO_PALO_ULTIMA.pdf
- Holguin-Gonzalez, J. E., Boets, P., Alvarado, A., Cisneros, F., Carrasco, M. C., Wyseure, G., Nopens, I., & Goethals, P. L. M. (2013). Integrating hydraulic, physicochemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the River Cuenca in Ecuador. *Ecological Modelling*, 254, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.01.011>
- IGAC, I. G. A. C. (2016). *Cartografía Básica Digital IGAC Escala*. 0–150.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Informe anual recursos naturales 2016*.
- MINAMBIENTE, M. de A. y D. S. (2015). *Decreto 1076 de 2015 Decreto único reglamentario sector Ambiente*.
- MINAMBIENTE, M. de A. y D. S. (2018). *Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas superficiales continentales*. 39. http://www.andi.com.co/Uploads/Guía_modelación_Final_aguasuperficialcontinental.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. (2018). *Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales*.
- Navarro Carrascal, O. E. (2004). *Representación social del agua y de sus usos* (Universidad del Norte Colombia, Ed.; U. Norte). Psicología desde el Caribe. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21301409>
- OMS, O. M. de la S. (2004). Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud. *Organización Mundial de La Salud*, 3.
- Pelletier, G., & Chapra, S. (2008). *Manual QUAL2KW*.
- Quiroz Fernández, L. S., Izquierdo Kulich, E., & Menéndez Gutiérrez, C. (2016). *Modelación Matemática de la capacidad de autodepuración de corrientes superficiales. Caso de estudio: Río Portoviejo, Ecuador*. VII (2), 64–70.

- Ramalho, R. S. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Rivera Gutiérrez, J. V. (2016). *Determinación de las tasas de oxidación, nitrificación y sedimentación en el proceso de autopurificación de un río de montaña*. 24, 314–326.
- Romero Rojas, J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. *JA Romero Rojas, Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño*, 17–23.
- Suárez Alonso, M. L., & Vidal Abarca Gutiérrez, M. R. (2012). Ecosistemas ríos y riberas: conocer más para gestionar mejor. *Ambienta: La Revista Del Ministerio de Medio Ambiente*, 98, 134–142.
<http://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/Dinamicas/pdfs/versionpdf/rios.pdf>
- UNESCO, D. de I. P. de las N. U. (1997). *Cumbre para la Tierra + 5*.
<http://www.un.org/spanish/conferences/cumbre&5.htm>
- UNESCO, O. de las N. U. para la E. la C. y la C. (2017). *Aguas Residuales El recurso desaprovechado*.
<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Zhang, R., Qian, X., Li, H., Yuan, X., & Ye, R. (2012). Selection of optimal river water quality improvement programs using QUAL2K: A case study of Taihu Lake Basin, China. *Science of the Total Environment*, 431, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.063>