



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DE LA
QUEBRADA TONCHALÁ DE LA CIUDAD DE SAN JOSÉ DE CUCUTA (NORTE DE
SANTANDER)**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**DÍAZ ZUÑIGA, MARIA PAULA
GUEVARA SERRANO, JORGE IVAN**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2020**



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DE LA
QUEBRADA TONCHALÁ DE LA CIUDAD DE SAN JOSÉ DE CUCUTA (NORTE DE
SANTANDER)**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**DÍAZ ZUÑIGA, MARIA PAULA
GUEVARA SERRANO, JORGE IVAN**

**DIRECTOR
DARWIN MENA RENTERIA
Ing. Ambiental y Sanitario
MSc. en Evaluación de Recursos Hídricos.**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2020**



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

DEDICATORIA

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad y a todas las personas que hicieron posible este trabajo de grado.

María Paula Díaz Zúñiga

Quiero dedicar esta hermosa etapa de mi vida académica a mi tía Sandra Guevara por ser siempre mi apoyo, mi pedestal y por estar en cada momento de mi vida cuando lo necesito, a mi hermosa esposa y mis hijos por ser pacientes, tolerantes y apoyarme cada día y noche en la consecución de este trabajo.

Jorge Iván Guevara Serrano



AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso por darme la oportunidad de culminar con éxito mis estudios de especialización, segura que serán de provecho en mi carrera profesional. A mis padres por brindarme confianza y comprensión en todo momento. A Felipe por su ayuda y apoyo en este proceso. A mi compañero de tesis por permitirme trabajar mano a mano con él y a mi asesor por su orientación y compartir sus conocimientos.

María Paula Díaz Zúñiga

Expresar mis más sinceros agradecimientos a Dios por permitirme llevar a buen término esta etapa tan importante en mi vida, a mi tía Sandra Guevara porque sin ella esto no hubiera sido posible, al ingeniero Darwin Mena por sus aportes, su conocimiento y paciencia para conmigo, a mi compañera María Paula por ayudarme a salir de esos momentos de dificultad con una sola palabra, al ingeniero Jorge Enrique Arenas por su apoyo, al ingeniero Jesús David Garavito por sus asesorías y por supuesto a toda mi hermosa familia.

Jorge Iván Guevara Serrano



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA
TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	1
INTRODUCCIÓN	2
1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO	4
1.1. ANTECEDENTES	4
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3 JUSTIFICACIÓN	8
1.4 OBJETIVOS	9
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	9
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.5. MARCO CONCEPTUAL.....	10
1.6. METODOLOGÍA.....	17
1.6.1. Descripción del área de estudio	17
1.6.2 Procedimiento para la caracterización morfométrica de la subcuenca.	19
1.6.2.2 Delimitación de la subcuenca de la quebrada Tonchalá	20
1.6.3 Procedimiento para estimar el régimen de caudales, máximos, medios y mínimos para la subcuenca de la quebrada Tonchalá.....	25
1.6.4 Procedimiento para establecer los índices de sostenibilidad de la quebrada (IUA, IRH, IVH).	31
• Índice de uso de agua (IUA).....	31
• Índice de retención y regulación hídrica (IRH)	32
• Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico	33
1.6.5 Procedimiento para determinar la calidad el agua a partir del Índice de calidad del agua (ICA) y los Índices de contaminación (ICO's).	34
2. RESULTADOS.....	36
2.1. Parámetros morfométricos de la Subcuenca	36
2.1.1. Variables físicas de la cuenca	36
2.1.3. Parámetros morfométricos asociados al relieve.....	39
2.1.4. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes.....	42



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

2.2. Desarrollo del modelo hidrológico de la subcuenca de la quebrada Tonchalá para estimar el régimen de caudales.....	44
2.2.1 Oferta hídrica mensual.....	60
2.2.2. Variación temporal de los caudales	62
2.2.3. Curva de duración.....	63
2.3. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO AGUA.....	65
2.3.1. Índice de uso de agua (IUA)	65
2.3.2. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)	68
2.3.3 Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico	68
2.4. Determinación del índice de calidad del agua (ICA) y de los índices de contaminación (ICO'S) de la subcuenca de la quebrada Tonchalá.....	69
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
5. REFERENCIAS.....	82



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación área de estudio, quebrada Tonchalá.....	18
Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología utilizada.	19
Figura 3. Modelo de Elevación Digital y la Extracción de la zona de la Subcuenca quebrada Tonchalá... ..	20
Figura 4. Subcuenca de la Quebrada Tonchalá delimitada	21
Figura 5. Curva de Strahler	24
Figura 6. Ubicación de las estaciones utilizadas en el proyecto	26
Figura 7. Ubicación estación limnigráfica Astilleros	29
Figura 8. Área, perímetro y longitud de cauce de la Subcuenca	37
Figura 9. Curva Hipsométrica de la Subcuenca Quebrada Tonchalá	41
Figura 10. Red hídrica y número de orden de los drenajes de la Subcuenca Quebrada Tonchalá.	42
Figura 11. Delimitación estación Astilleros.	45
Figura 12. División de la cuenca de la estación Astilleros.....	45
Figura 13. Modelo hidrológico cuenca Astilleros	46
Figura 14. Base de datos de las estaciones en Rs-Minerve cuenca Astilleros.....	47
Figura 15. Serie de datos de caudales medios diarios estación Astilleros para el proceso de calibración..	47
Figura 16. Calibración del modelo de la cuenca Astilleros modelo GR4J.....	48
Figura 17. Histograma de Calibración del modelo GR4J.....	49
Figura 18. Serie de datos de caudales medios diarios estación Astilleros para el proceso de validación..	51
Figura 19. Validación del modelo de la cuenca Astilleros modelo GR4J.....	51
Figura 20. Histograma de validación del modelo GR4J.....	52
Figura 21. División de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá.....	54
Figura 22. Modelo hidrológico subcuenca Quebrada Tonchalá.	55
Figura 23. Base de datos de las estaciones en Rs-Minerve subcuenca Quebrada Tonchalá..	55
Figura 24. Validación del modelo hidrológico de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá.....	56
Figura 25. Obtención de resultados del modelo hidrológico de la subcuenca Quebrada Tonchalá..	57
Figura 26. Histograma de caudales 1989-2019 subcuenca Quebrada Tonchalá.	57
Figura 27. Caudales máximos subcuenca Quebrada Tonchalá..	58
Figura 28. Caudales medios subcuenca Quebrada Tonchalá.	59
Figura 29. Caudales mínimos subcuenca Quebrada Tonchalá..	59
Figura 30. Histograma oferta hídrica mensual..	61
Figura 31. Variación temporal de caudales..	63



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Figura 32. Curva de duración de caudales diarios subcuenca Tonchalá.	64
Figura 33. Caudal medio.	67
Figura 34. Ubicación del punto de muestreo de CORPONOR en la subcuenca de la Quebrada Tonchalá, 200 m antes de la confluencia con el Río Zulia.....	71
Figura 35. Consolidado punto de muestreo 2016-2018-2019-2020 en cuanto análisis en campo	72
Figura 36. Consolidado punto de muestreo 2016-2018-2019-2020 en cuanto análisis del laboratorio..	73
Figura 37. Consolidado punto de muestreo 2016-2018-2019-2020 en cuanto a ICA e ICO's.	74



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA
LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Listado de estaciones utilizadas en el proyecto.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2. Descripción estación Astilleros.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3. Clasificación del IUA.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4. Categorías del IRH</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 5. Vulnerabilidad del recurso hídrico. IVH</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 6. Interpretación de índices de contaminación del agua (ICO's).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 7. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 8. Clasificación de la cuenca según su área.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 9. Valores de área entre curvas</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 10. Índices estadísticos de calibración GR4J.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 11. Periodos de calibración y validación</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 12. Parámetros obtenidos en la calibración del modelo GR4J para la cuenca Astilleros.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 13. Índices estadísticos de validación GR4J.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 14. Comparación de indicadores estadísticos del modelo GR4J.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 15. Oferta hídrica mensual multianual.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 16. Concesiones subcuenca quebrada Tonchalá</i>	<i>65</i>



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo se enmarcó en realizar la caracterización hidrológica y de calidad del agua de la subcuenca de la quebrada Tonchalá en el municipio de San José de Cúcuta del departamento Norte de Santander – Colombia. Los resultados de los parámetros morfométricos que describen físicamente una subcuenca ligeramente alargada con baja susceptibilidad a las crecientes, en cuanto al modelo hidrológico se realizó una calibración y validación en una parte de la cuenca del río Zulia partiendo de la estación de caudal Astilleros ya que la subcuenca de la quebrada Tonchalá no contaba con estaciones de caudal dentro de su perímetro y así de esta manera se estimó el régimen de caudales con los cuales se obtuvo la oferta hídrica. Finalmente, la calidad del agua se encuentra dentro de la categoría de mala llegando a valores de 0.442 obedeciendo en su mayoría a contaminación por materia orgánica proveniente de residuos municipales evaluados en un solo punto de muestreo por parte de CORPONOR.

Palabras claves: Qgis, RsMinerve, GR4J, índices de sostenibilidad, ICO's.

ABSTRACT

The main objective of this work was framed in carrying out the hydrological and water quality characterization of the sub-basin of the Tonchalá stream in the municipality of San José de Cúcuta of the Norte de Santander department – Colombia. The results of the morphometric parameters that physically describe a slightly elongated sub-basin with low susceptibility to floods, in terms of the hydrological model, a calibration and validation was carried out in a part of the Zulia river basin starting from the Astilleros flow station since the Tonchalá stream sub-basin did not have stations of flow within its perimeter and thus in this way the flow regime with which the water supply was obtained was estimated. Finally, water quality is in the poor category, reaching values of 0.442, mostly due to contamination by organic matter from municipal waste evaluated at a single sampling point by CORPONOR.

Key words: Qgis, RsMinerve, GR4J, sustainability indicators, ICO's.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que se ha planteado la humanidad a lo largo de los años es el manejo integral del recurso hídrico, ya que, debido a la dinámica social y sectorial, cada vez se realiza una mayor presión sobre el recurso y de una u otra manera alteran las condiciones naturales en cuanto a cantidad y calidad del mismo. Por lo tanto, su conocimiento se vuelve necesario en cuanto a la distribución, estado, dinámica y presiones, constituyendo el soporte para la planificación del territorio y la toma de decisiones sobre el mismo (IDEAM, 2018).

El presente documento tiene como objetivo realizar la caracterización hidrológica y de calidad del agua de la subcuenca de la quebrada Tonchalá, ubicada en los municipios de San Cayetano y San José de Cúcuta del departamento Norte de Santander, donde se establece una problemática ambiental asociada a los vertimientos municipales y de industrias que son arrojados a la quebrada que a su vez desemboca en uno de los cuerpos de agua más importantes de la región el Río Zulia, por lo que es necesario iniciar con estudios que aporten y permitan la consecución exitosa de instaurar una línea base de esta subcuenca.

Actualmente, la Quebrada Tonchalá es una de las fuentes de agua más contaminadas, puesto que recibe aproximadamente el 30% de los residuos líquidos municipales de la ciudad de Cúcuta. Además, la reducción de la cantidad del recurso es significativa, y como referencia se tiene que la cascada ubicada a la altura del sector de Pozo Azul, uno de sus principales atractivos turísticos desapareció hace aproximadamente 7 años (Consortio Zulia, 2018). Los vertimientos a la quebrada Tonchalá provienen del municipio y de las industrias que son arrojados directamente a la quebrada, por lo cual es necesario iniciar estudios de diagnóstico ambiental con el objeto de instaurar una línea base para la caracterización de esta subcuenca. El presente trabajo tiene como objetivo realizar una caracterización hidrológica y de calidad del agua de la subcuenca de la

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

quebrada Tonchalá, ubicada en los municipios de San Cayetano y San José de Cúcuta del departamento Norte de Santander.

Por lo anterior, generar información acerca de la caracterización hídrica de esta subcuenca es de vital importancia para que las instituciones y autoridades ambientales generen estrategias futuras para optimizar su manejo y conservación. Por consiguiente, este trabajo planteó una caracterización morfométrica, una estimación de caudales mínimos, medios y máximos, el cálculo de índices de sostenibilidad hidrológicos, así como un análisis fisicoquímico y microbiológico que proporcionaron la determinación de algunos índices de contaminación (ICO's), con ayuda de softwares como QGIS; con el cual, se realizó la delimitación del área de estudio y permitió determinar los parámetros morfométricos de la subcuenca. A su vez el RS-MINERVE facilitó el procesamiento de las variables hidroclimáticas para obtener un modelamiento lluvia–escorrentía y de esta forma se alcanzaron los resultados para el análisis de la subcuenca.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1. ANTECEDENTES

En Colombia se viene haciendo un gran seguimiento a variable como la temperatura y la precipitación, pues estas son vitales para el determinar el comportamiento hidrológico de los cuerpos de agua y, además marcan las tendencias del cambio climático. De este modo el IDEAM desde 1969 con aval de la Organización Meteorológico Mundial (OMM), hace seguimiento de estas variables climatológicas en el país con el desarrollo de una red básica nacional de monitoreo (IDEAM, 2015).

La Quebrada Tonchalá atraviesa los municipios de San Cayetano y San José de Cúcuta del departamento Norte de Santander y presenta una problemática marcada en cuanto a cantidad y calidad, a pesar de esto no se encontraron trabajos de investigación o proyectos de desarrollo que evidencien una descripción real o establecimiento de una línea base que aporte información fehaciente a las entidades territoriales para su planificación y ordenación.

Sin embargo, se pueden destacar trabajos de gran índole nacional realizados en diferentes municipios de Colombia, de los cuales se podrá conjugar una metodología integral acorde para subsanar la falta de información de esta subcuenca que es de gran importancia para la ciudad, es así que, en el municipio de La Mesa, Cundinamarca se realizó un estudio realizado por Otálora Viracachá (2019), en el cual se realizó la identificación de puntos de vertimiento, captaciones, una caracterización físico química, estimación del índice de la calidad del agua (ICA) e índices de contaminación (ICO) como el ICOMO e ICOSUS, los cuales se obtuvieron a partir del software ICATest. Versión 1.0, una herramienta para la valoración de la calidad del agua desarrollada por la Universidad de Pamplona (Otálora Viracachá, 2019).

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Así mismo, en el proyecto de investigación realizado por Restrepo & Pimiento (2018), calcularon los parámetros físicos y morfométricos de su zona de estudio y de esta manera obtener sus principales características utilizando el Software QGIS, lo que permitió realizar un modelo lluvia-escorrentía necesario para llevar a cabo la relación oferta-demanda del área de estudio esto mediante el software de modelación para América Latina y el Caribe Hydro-BID. Para dicha modelación fue necesario que los investigadores tomaran datos de entrada tales como precipitación acumulada diaria en cm, temperatura media diaria en °C, series de caudales suministradas por el IDEAM. (Restrepo & Pimiento, 2018).

Otro trabajo de relevancia para nuestra investigación fue el realizado por Díaz Gonzalez & Suarez Rodriguez (2019), el cual tuvo como finalidad obtener índices de sequía mediante la modelación hidrológica implementando Hydro-BID y con estos identificaron los impactos potenciales del cambio climático sobre el régimen hidrológico del área en estudio. Los autores establecieron tres fases. En la primera etapa realizaron una calibración al modelo, en la segunda, desarrollaron la modelación de los caudales futuros y, por último, con ayuda de la modelación obtuvieron un indicador de sequía hidrológico para plantear diferentes medidas de prevención en la zona. (Díaz Gonzalez & Suarez Rodriguez, 2019).

Por último, es pertinente citar el trabajo de Vasquez Rangel, Herrera Lopez, & Gutierrez Rey, (2014), en cual se utilizaron los softwares ArcGis 10.1 y HEC-GEOHMS 4.2 para procesar los datos morfométricos y calcular los caudales pico de la cuenca en estudio (Vasquez Rangel, Herrera Lopez, & Gutierrez Rey, 2014).



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel global, actualmente el planeta se enfrenta a diversos problemas frente a la gestión del recurso hídrico, pues la demanda de agua aumenta, mientras que el recurso se ve afectado por las acciones antrópicas como, la explotación desmedida de las fuentes, la contaminación, el mal uso y desperdicio entre otras; además, por fenómenos climáticos que afectan el ciclo natural del agua y principalmente su disponibilidad de agua (Arango Ruiz, 2013). De no emprender labores correctivas esta problemática seguirá empeorando. Es por esto que el agua ha sido incluida en la carta de los derechos humanos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), pues los efectos de la mala gestión y planeación del agua recaen sobre la vida cotidiana de las poblaciones pobres, que a menudo sufren por la falta de acceso al agua potable (UNESCO, 2003).

La gestión del recurso hídrico en Colombia, ha ido evolucionando en el tema dado la gran necesidad de lograr una concientización sobre conservación de los recursos naturales, especialmente el uso y ahorro del agua. En relación con lo anterior, en el país en la última década varios sectores han trabajado para un desarrollo de normatividad, políticas y líneas de acción encaminadas al manejo responsable del recurso hídrico. Sin embargo, existen varios factores que limitan dicho desarrollo como la falta de estudios técnicos para la caracterización hidrológica de las cuencas en gran parte del territorio nacional, lo que puede conllevar a futuro una posible afectación a nivel económico, social y ambiental (Ocampo Lopez, 2012).

Por lo tanto, es importante avanzar en la caracterización hidrológica de todos los cuerpos hídricos del país, con el fin de obtener información acerca del comportamiento de las cuencas, y de este modo afrontar la problemática mundial frente a la buena gestión del recurso hídrico.

La Quebrada Tonchalá atraviesa gran parte de la ciudad de San José de Cúcuta, actualmente está recibiendo la mayoría de los vertimientos de la ciudad y desemboca en uno de los cuerpos de



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

agua más importantes de la región, como es el Río Zulia. Como colaboración a la solución de este problema ambiental de la subcuenca; se hace una caracterización hidrológica de la quebrada, para de este modo tener información hidrológica y de calidad del agua que permita conocer el estado actual del agua de la Quebrada Tonchalá, la cual es de gran importancia para la ciudad.

La identificación del estado hidrológico actual y la calidad del agua de la Quebrada Tonchalá, centrados en la disminución de su caudal y la contaminación de la quebrada, permitirá plantear acciones futuras para el beneficio del entorno y la población del área de influencia; por lo que es importante que se desarrollen indicadores hidrológicos, análisis morfométricos y de calidad de agua, en la subcuenca y así poder determinar su comportamiento particular y su influencia en la región.

1.2.1 Pregunta de investigación

¿Cuál es el estado actual de la quebrada Tonchalá respecto a los aspectos hidrológicos y de calidad del agua?



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

1.3 JUSTIFICACIÓN

En consecuencia con la Política nacional de gestión integral del recurso hídrico (PNGIRH) en Colombia, la cual busca el uso y aprovechamiento eficiente del agua, es necesario que los cuerpos hídricos sean estudiados, para que de este modo sean utilizados adecuadamente y dar cumplimiento al propósito de la PNGIRH, ya que los cuerpos hídricos juegan un papel muy importante en la sociedad, porque son fuente de agua para los seres vivos, albergan gran cantidad de ecosistemas con elevada biodiversidad, se relacionan a su vez con la planeación de territorio y el desarrollo económico en torno a la fuente de agua, entre otras.

Con base en lo anterior, es relevante estudiar y caracterizar la subcuenca de la Quebrada Tonchalá de la ciudad de Cúcuta (Norte de Santander), puesto que es un cuerpo hídrico con diferentes problemáticas ambientales, como lo es la disminución del caudal en diferentes épocas del año y la calidad deficiente del mismo, queriendo entonces conocer el comportamiento hidrológico y de calidad de esta fuente de agua.

Este trabajo de investigación servirá de apoyo para estudios futuros de los entes competentes en el cuidado y vigilancia en torno al recurso hídrico en la zona de estudio, como lo es la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), las poblaciones aledañas y para las diferentes organizaciones académicas que se interesen por estudiar la subcuenca de la quebrada Tonchalá. Los resultados obtenidos del desarrollo de esta investigación, servirán para establecer una línea base que sirva como guía para las instituciones ambientales y para los habitantes del corregimiento del Carmen del Tonchalá.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización hidrológica y de calidad del agua de la subcuenca de la quebrada Tonchalá.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización morfométrica de la subcuenca.
- Estimar el régimen de caudales, máximos, medios y mínimos para la subcuenca de la quebrada Tonchalá.
- Establecer los índices de sostenibilidad de la quebrada (IUA, IRH, IVH).
- Determinar la calidad el agua a partir del Índice de calidad del agua (ICA) y los Índices de contaminación (ICO's).



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

1.5. MARCO CONCEPTUAL

La gestión del recurso hídrico en Colombia se rige por lo definido en la Política Nacional de Gestión del Recurso Hídrico (PNGIRH), la cual tiene como objetivo principal promover el uso eficiente y la preservación del recurso, de este modo si se pretende dar cumplimiento a lo establecido en dicha política es preciso realizar diagnósticos en los cuerpos de agua que nos muestren el estado actual de los mismos (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010).

En Colombia se han llevado a cabo diversos estudios en diferentes zonas del país, con el fin de caracterizar el recurso hídrico y de este modo poder prevenir situaciones y emergencias desarrolladas a los cuerpos de agua que cruzan el país como ríos y quebradas. Uno de los documentos más robustos en este tema es el Estudio Nacional del Agua (ENA) desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cual tiene como fin establecer la situación actual y los escenarios futuros en torno al recurso hídrico en el país. Dicho estudio contempla variables como la oferta y la demanda, la calidad y la disponibilidad, y los riesgos asociados a las características propias de cada cuerpo de agua y también a la interacción del mismo con el entorno y las poblaciones aledañas (IDEAM, 2014).

El recurso hídrico se evalúa teniendo en cuenta el medio que lo rodea, por lo que para este proyecto de investigación es importante tener claro el concepto de cuenca hidrográfica, la cual es un área o unidad territorial en donde confluyen las aguas de un cuerpo hídrico, ya sea un río, quebrada, lago o laguna, como efecto de la precipitación atmosférica, esta se delimita por los puntos con las cotas más altas del terreno y que se conoce como divisoria de aguas (Rodríguez Orjuela, 2015).

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Luego de tener claro que es una cuenca hidrográfica, se puede referir a las características morfológicas, las cuales brindan una descripción física-espacial del terreno, que permite tener unos resultados preliminares de las características ambientales con base en la descripción geométrica de las formas de la superficie, también permite que se realice la comparación entre cuencas hidrográficas para el análisis de una zona determinada. La morfometría a su vez proporciona el aprovechamiento hídrico y la generación de respuesta ante eventos climáticos y la influencia en el transporte de sedimentos en la cuenca. Los parámetros de forma, relieve y red de drenajes son básicos para determinar las características morfológicas, las cuales a su vez son clave para llevar a cabo una modelación hidrológica (Gaspari, y otros, 2012).

Así como las características morfológicas de la cuenca son importantes para su caracterización, lo mismo ocurre con las variables climáticas, el clima es uno de los factores ambientales que influyen en el territorio, para una buena gestión del recurso hídrico es importante comprender los procesos y saber cómo estos ocurren en el área de estudio. El IDEAM caracteriza y pronostica las condiciones climáticas como aporte a la planificación territorial, esto por ser el órgano rector en meteorología en el Colombia. El clima se define como las condiciones atmosféricas predominantes en un periodo de tiempo determinado, sobre una zona específica; el periodo con el que generalmente se caracteriza el clima en una región es de 30 años, donde mediante el cálculo de promedios de las mediciones realizadas por estaciones climatológicas en este periodo de tiempo se estiman variables como la temperatura, la precipitación, la humedad relativa, entre otras (IDEAM - UNAL, 2018).

Estas variables climáticas pueden servir de insumo para el desarrollo de modelos hidrológicos que permitan conocer que va a pasar con la cantidad de agua disponible de las fuentes de agua en los tiempos futuros y más aún, considerando que en la actualidad el cuerpo hídrico en estudio se

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

ha visto afectado por la disminución en la cantidad de agua en diferentes épocas del año, modificando el comportamiento y la distribución del agua en el cuerpo hídrico, por lo que la modelación hidrológica entra a ser una de las herramientas que bien se puede utilizar para estudiar, a partir del pasado, presente y escenarios futuros, el posible comportamiento y la cantidad en la fuente de agua con una vista al futuro. Lo cual permitirá una planificación de esa área de estudio mucho más óptima; a fin de garantizar el mínimo efecto en la calidad de vida de los seres vivos (Avalos Lingan, 2017).

Para esta investigación la modelación hidrológica se llevará a cabo en el software RS MINERVE el cual permite realizar simulaciones de la formación de la escorrentía superficial y el flujo de propagación. Además, facilita la modelación con redes hidrológicas e hidráulicas complejas de acuerdo con un esquema conceptual semidistribuido. Dentro de este programa encontramos diferentes tipos de modelo que se pueden utilizar, para esta investigación se utiliza el GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) desarrollado en Francia, con el cual se pueden obtener mediante los datos de precipitación y evapotranspiración media diaria las series de caudales (CORAS HUAYLLANI, 2019).

Al realizar la modelación y correr el modelo hidrológico, el programa a trabajar antes descrito solicita trabajar con indicadores de bondad de ajuste, los cuales no son variables de estado que describen alguna condición existente o deseada. Sino que, indican si una maniobra de acción prescrita alcanza su efecto deseado. Los indicadores de bondad de ajuste describen lo bien que se ajusta los datos simulados con los datos observados (ALIAGA ARAUJO, 2017).

El objeto comparador del software utilizado para la modelación ofrece ocho valores de indicadores de bondad, pero para esta investigación se trabajaron con tres de estos:

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- El primero determina cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación, lo que se denomina coeficiente de Nash- Sutcliffe. Si los valores observados están entre 0.0 y 1.0 son considerados niveles aceptables de desempeño, pero si toma un valor de 1.0 se considera que la simulación es perfecta (ALIAGA ARAUJO, 2017).
- Segundo para observar el grado de relación lineal entre los datos simulados y observados utilizamos el coeficiente de correlación de Pearson, el cual está definido en el intervalo $[-1, 1]$, si el coeficiente es igual a 0 no existe relación lineal, pero si se aproxima a 1 o -1 existe una perfecta relación lineal positiva o negativa (ALIAGA ARAUJO, 2017).
- Y por último, la estimación simétrica entre la inversa de lo simulado y lo observado denominado Bias Score, el cual está en una rango de 0.0 a 1.0, donde más cercano de la modelación a 1.0 nos indica que se tiene la mejor representación del modelo (ALIAGA ARAUJO, 2017).

Por otro lado, el ENA diferentes versiones apoya sus estudios en una serie de indicadores que tienen como propósito responder a las necesidades de seguimiento y de evaluación del estado y la dinámica del recurso hídrico, de este modo para esta investigación es importante analizar la sostenibilidad hídrica del cuerpo de agua en estudio con el desarrollo de los siguientes indicadores, definidos por (IDEAM, 2018):

1) Indicadores del sistema hídrico

- Índice de retención y regulación hídrica (IRH). Hace referencia a la cantidad de humedad que puede ser retenida al interior de las cuencas.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- Índice de uso superficial del agua (IUA). Indica que cantidad de agua está siendo utilizada por las empresas del sector industrial y económico ubicadas dentro de la cuenca en un periodo específico de tiempo.

2) Indicadores de vulnerabilidad

- Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH): Está relacionado con el nivel de vulnerabilidad de una fuente hídrica para mantener la oferta necesaria para sus actividades ecosistémicas y el abastecimiento de la población especialmente en épocas secas o en periodos con fenómenos ENSO se establece mediante este índice.

En relación con lo anterior, es relevante hablar sobre la calidad de los recursos hídricos. Los cuerpos de agua son utilizados para satisfacer las necesidades del medio ambiente y la sociedad, pues ellos en muchas ocasiones son generadores de energía, provisionan agua para el consumo humano, animal y riego, son hábitat para gran variedad y cantidad de especies animales y vegetales, sirven de recarga de acuíferos subterráneos, entre otras, pero sin importar en gran servicio ecosistémicos que presta y la importancia vital que tiene para el hombre, el deterioro de estas fuentes de agua ha sido una problemática creciente (Ledesma, Bonansea, Rodriguez, & Sánchez Delgado, 2013). Varios factores naturales y principalmente humanos contribuyen al incremento de la contaminación, entre ellos la falta de: cultura ambiental del hombre, planificación territorial, control de la aplicación de la normativa vigente, monitoreo de calidad en las fuentes de agua entre otros.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Para evaluar la calidad de agua a nivel nacional e internacional se han desarrollado diferentes indicadores tanto de calidad como de contaminación. A continuación, se relacionan aquellos implementados en Colombia y que serán desarrollados en esta investigación:

- Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA). Este índice fue desarrollado por el IDEAM, con este se hace un estimativo para observar en cuál de las cinco categorías se encuentra la calidad del agua de un cuerpo hídrico, esto teniendo como base los datos obtenidos de las variables necesarias para su estimación esto hace parte de la metodología. La ecuación que define este índice es la siguiente (Otálora Viracachá, 2019):

$$ICA_{njt} = \left(\sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \right)$$

Donde,

- ✓ ICA_{njt} : Es el Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.
 - ✓ W_i : Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.
 - ✓ I_{ikjt} : Es el valor calculado de la variable i, en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada en el trimestre k, del período de tiempo t.
- n: Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; para este caso aplicara como seis (Otálora Viracachá, 2019).



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- Índice de contaminación por trofia (ICOTRO)

Uno de los nutrientes más importantes para la vida es el Fosforo Total, para poder hacer su análisis químico se debe realizar mediante los ortofosfatos (mg/L). Analizar la cantidad de fosforo en el agua es importante ya que este estimula la eutrofización (Cañas Arias, 2010).

Los rangos estándar de clasificación para determinar qué grado de eutrofización presenta el cuerpo de agua son:

- ✓ Oligotrofia: < 0.01
- ✓ Mesotrofia: $0.01 - 0.02$
- ✓ Eutrofia: $0.02 - 1.00$
- ✓ Hipereutrofia: > 1.00

- Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO)

En este índice se relacionan diferentes parámetros fisicoquímicos como la demanda bioquímica de oxígeno, el porcentaje de saturación de oxígeno y los coliformes totales, los cuales juntos diferentes efectos de contaminación orgánica (Otálora Viracachá, 2019).

- Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS)

Las partículas suspendidas orgánicas e inorgánicas que están presentes en el agua generan una concentración de sólidos suspendidos generando un grado de contaminación en el agua (Cañas Arias, 2010).

- Índice de Contaminación por pH (ICOpH)

Algunos minerales y el CO₂ producido por los seres vivos y la atmósfera pueden alterar el pH del agua, por lo que este índice complementario muestra condiciones ambientales especiales entorno al valor del pH (Cañas Arias, 2010).(Otálora Viracachá, 2019).



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

1.6. METODOLOGÍA

1.6.1. Descripción del área de estudio

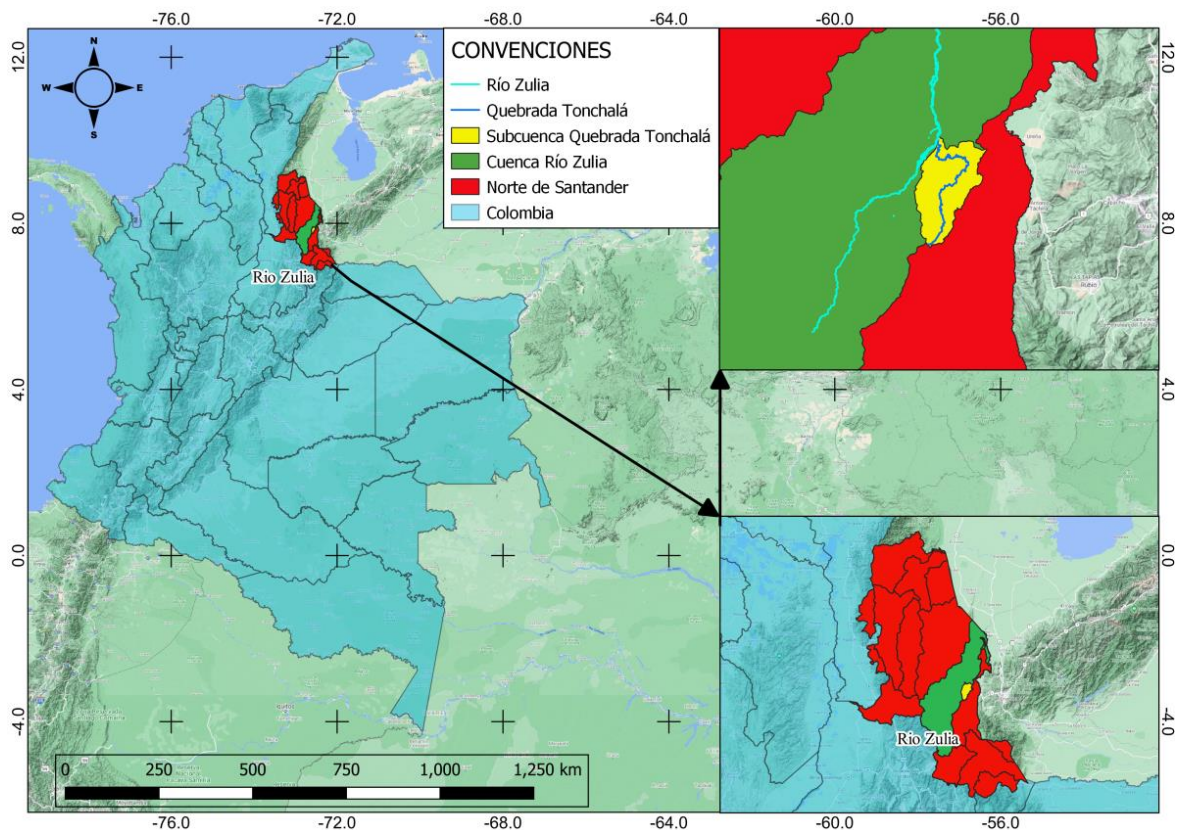
El área de estudio considerado es la Quebrada Tonchalá la cual nace a una altura en el sector conocido como Ayacucho en el municipio de San Cayetano – Norte de Santander con la confluencia de las Quebradas San Isidro y Monetonera con coordenadas de Googles Maps 7°47'17.2"N 72°35'17.4"W de latitud al norte del ecuador. Esta unidad de análisis, junto con sus tributarios dentro de lo que se destacan vertimientos municipales, atraviesa los municipios de San Cayetano y de San José de Cúcuta hasta su desembocadura en el Río Zulia a unos 1.5 km aproximadamente antes del puente Mario Ospina Pérez aproximadamente a los 200 m.s.n.m. que une los municipios de El Zulia y San José de Cúcuta.

Las características climáticas principales de esta subcuenca se dan con un comportamiento de carácter tropical con una tendencia bimodal de precipitaciones debido a la zona de influencia intertropical con una cantidad máxima de lluvia anual de 47,7 mm, siendo los meses de abril y noviembre los cuales presentan mayor concurrencia de lluvias oscilando a lo largo del año con una temperatura máxima entre 30 y 34 °C y una temperatura mínima entre 22 y 24 °C (NOAA, 2020).

Por otro lado, las actividades económicas que se llevan a cabo a lo largo de esta subcuenca son principalmente la minería del carbón y actividades de ecoturismo, además de asentamientos urbanos y rurales.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA



En la figura 2, se observa el esquema metodológico o flujograma con las actividades desarrolladas en la investigación. Para el desarrollo de la misma, se planteó un análisis de la información existente, la cual se correlacionó con los índices morfométricos, hidrológicos y de contaminación con el fin de establecer una línea base como punto de partida para futuras investigaciones en la zona de estudio.

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

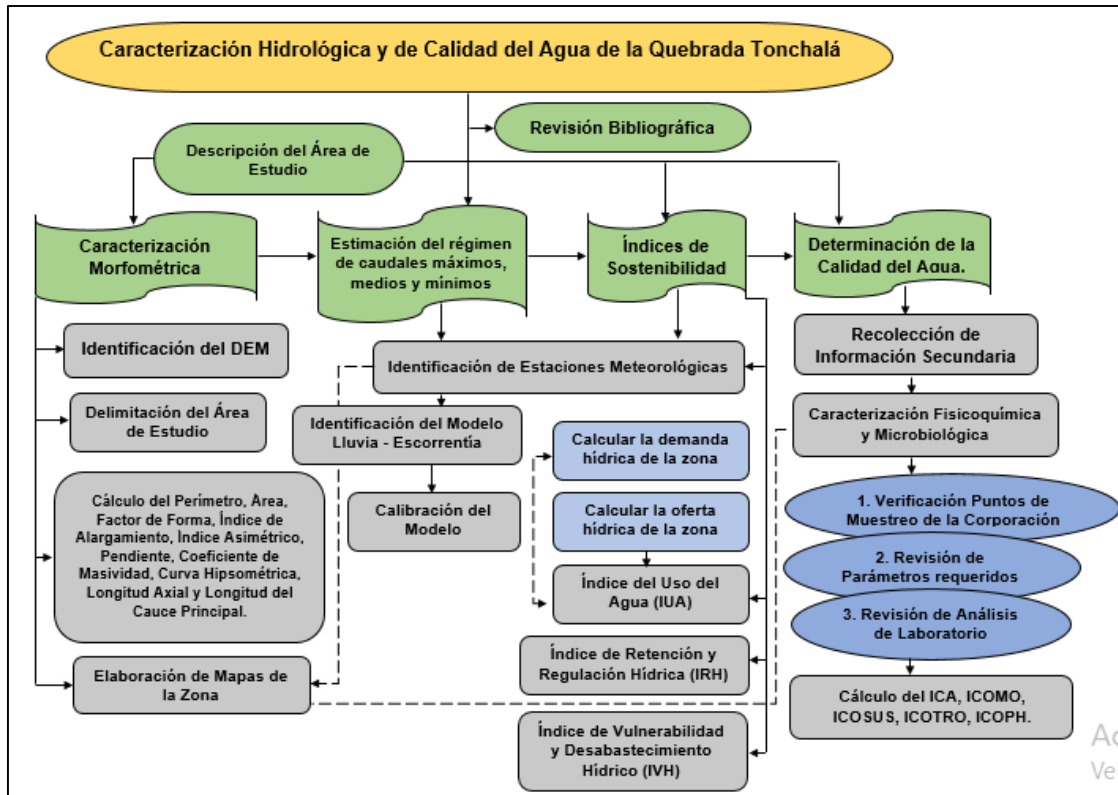


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología utilizada. Fuente: Elaboración propia.

1.6.2 Procedimiento para la caracterización morfométrica de la subcuenca.

1.6.2.1. Obtención del Modelo de Elevación Digital (DEM)

El modelo de elevación digital (DEM), se obtuvo a través de la página <https://search.asf.alaska.edu/#/>, donde se buscó el DEM marcando la zona de estudio en el mapa pre visualizado de la interfaz y a partir de la imagen obtenida se realizó una extracción para conocer las diferentes elevaciones en la zona de interés en un resolución 12.5 * 12.5 pixeles (Subcuenca quebrada Tonchalá).



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

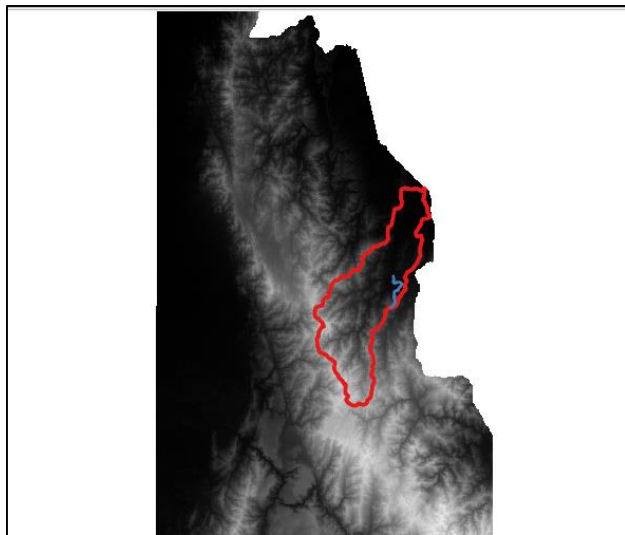


Figura 3. Modelo de Elevación Digital y la Extracción de la zona de la Subcuenca quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración Propia

1.6.2.2 Delimitación de la subcuenca de la quebrada Tonchalá

Para la delimitación de la subcuenca luego de contar con el DEM, se procede a su corrección con el fin de obtener un DEM sin depresiones, para ello se busca el aplicativo GRASS en la caja de herramientas de procesos del software Qgis, luego se seleccionó Raster, y allí se utiliza el algoritmo `r.fill.dir`.

Posterior a lo anterior, se debe hallar la dirección y acumulación de flujo de las fuentes hídricas dispuestas en el DEM, para ello utilizamos el algoritmo `r.watershed`, después con el raster obtenido en el paso anterior el software Qgis automáticamente delimita la cuenca que se está buscando y para eso es necesario conocer el punto de salida de la cuenca luego de seleccionar dicho punto utilizamos el algoritmo `r.water.outlet`.

Por último, luego de tener la subcuenca en formato raster se procede a convertirla a una imagen vectorial mediante el algoritmo `r.to.vect`, con el fin de comprobar que la delimitación



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

realizada por el software Qgis es óptima, se procede a extraer las curvas de nivel del DEM y se superpone la capa de drenaje sencillo a escala 1:25.000 del IGAC y de este modo realizar una delimitación manual y contrastarla con la delimitación automática.



Figura 4. Subcuenca de la Quebrada Tonchalá delimitada. Fuente: Elaboración propia

1.6.2.3 Obtención de los parámetros morfométricos de la subcuenca

Para la obtención de los parámetros morfométricos de la subcuenca es necesario primero hallar las variables físicas de la cuenca como lo es el área, el perímetro y la longitud del cauce principal las cuales se determinan con ayuda de QGis y algoritmo “*estadísticas básicas para campo*”, ya con estos valores se procede a determinar los parámetros morfométricos que nos describirán algunas características físicas del área de estudio, a continuación, se establecerán dichos parámetros:



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- **Factor Forma (Fr)**

Para la determinación del factor forma es necesario conocer los valores de área (A) y longitud axial (l) de la Subcuenca y aplicar la ecuación.

$$F_f = \frac{A}{l^2}$$

Un valor de F superior a 1, nos indica el grado de achatamiento, a medida que el área aumenta, la relación disminuye, lo cual expresa que existe una tendencia al alargamiento de las cuencas.

- **Índice de compacidad (kc)**

Para la determinación del índice de compacidad es necesario conocer los valores de Área y Perímetro de la subcuenca y aplicar la ecuación.

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Este coeficiente expresa la forma de la cuenca en torno a su similitud con las de formas redondas, con los siguientes rangos de clasificación:

Un intervalo de 1 a 1,25 nos indica que es de forma redonda a oval redonda.

Un intervalo de 1,25 a 1,5 nos indica que es de forma oval redonda a oval oblonga.

Un intervalo de 1,5 a 1,75 nos indica que es de oval oblonga a rectangular oblonga.

- **Índice Alargamiento (ia)**

Para hallar este índice es necesario conocer la longitud axial y el ancho máximo de la subcuenca, de esta forma podemos establecer el comportamiento en cuanto a su alargamiento, para ello se aplica la siguiente ecuación.

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

Cuando se presentan valores mayores a 1 el área es más larga que ancha, siguiendo una forma más alargada.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- **Pendiente media**

Para el cálculo de la pendiente media de la subcuenca se realizó el método de Alvord el cual consiste en la aplicación de la siguiente ecuación:

$$S_m = \frac{D * \Sigma L_c}{A}$$

En donde D representa las diferencias de alturas de curvas de nivel y Lc la sumatoria de la longitud total de las curvas, estos dos valores se obtuvieron mediante un análisis al mapa de curvas de nivel, en el cual primero se hizo el recorte de las curvas de nivel a la subcuenca con Qgis mediante el geoproceso “cortar” luego se calculó la longitud y sumatoria total de las longitudes con el algoritmo “estadísticas básicas para campo”, además cabe mencionar que, el intervalo de las curvas a trabajar es de 25m.

La clasificación de acuerdo a la pendiente media de la cuenca se establece de la siguiente manera:

- ✓ Entre 0-3% el tipo de relieve se considera Plano.
- ✓ Entre 3-7% el tipo de relieve se considera Suave.
- ✓ Entre 7-12% el tipo de relieve se considera Mediamente accidentado.
- ✓ Entre 12-20% el tipo de relieve se considera Accidentado.
- ✓ Entre 20-35% el tipo de relieve se considera Fuertemente accidentado.
- ✓ Entre 35-50% el tipo de relieve se considera Muy fuertemente accidentado.
- ✓ Entre 50-75% el tipo de relieve se considera Escarpado.
- ✓ Entre >75% el tipo de relieve se considera Muy escarpado.

- **Elevación media**

Para la elevación media de la cuenca se aplica la siguiente ecuación:



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

$$E_m = \frac{\sum(A_i * e_i)}{A}$$

Donde e_i representa el promedio de elevación entre dos curvas consecutivas y A_i el área entre dos curvas consecutivas, para la obtención de estos valores se utilizó el mapa del cual se generaron polígonos a través de las curvas de nivel de este, para así poder hacer un cálculo del área existente entre las curvas.

- **Curva hipsométrica**

Para la elaboración de una curva hipsométrica es necesario calcular el porcentaje sobre el área inferior que se calcula gracias al porcentaje del área entre curvas sobre el área total de la cuenca, luego se procede a graficar esto y así se obtiene la curva.

Con la Curva de Strahler y según la forma que arroje la curva hipsométrica hallada podremos determinar si el cuerpo hídrico está en etapa joven (Curva A), etapa de madurez (Curva B) o etapa de vejez (Curva C). (Asociación geológica Argentina, 1979).

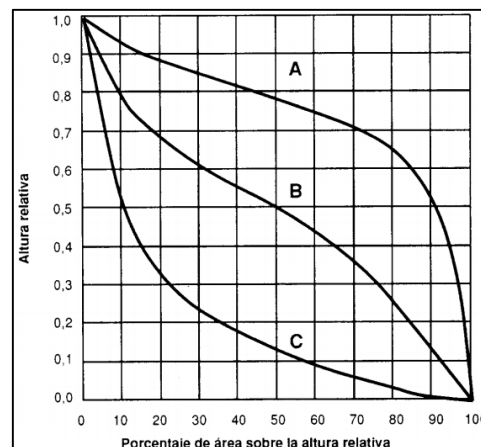


Figura 5. Curva de Strahler. Fuente: (Fernandez Anaya, 2012)



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- **Coeficiente orográfico**

El coeficiente orográfico es la relación entre el cuadrado de la elevación media (h) y el área total (A). Para estimar el coeficiente orográfico simplemente se debe aplicar una ecuación utilizando valores que ya hemos calculado anteriormente, tales como la elevación media y el área.

$$C_o = \frac{H^2}{A}$$

- **Numero de orden**

Para el cálculo del número de orden, se utilizó la herramienta “*Stream order*”, sobre la red hídrica, así se generó un mapa donde se pudo observar el orden de los diferentes cuerpos de agua pertenecientes a la cuenca.

- **Densidad de drenaje**

El valor de densidad de drenaje (Dd) de la subcuenca, fue estimada con la red hídrica y las herramientas *calculate geometry* y *Statistics*, donde Li es la longitud de cada uno de los drenajes en unidades de Km y A es el área de la cuenca en unidades de Km².

$$Dd = \frac{\sum li}{A}$$

1.6.3 Procedimiento para estimar el régimen de caudales, máximos, medios y mínimos para la subcuenca de la quebrada Tonchalá.

El primer paso estimar el régimen de caudales es realizar la modelación hidrológica, la cual se llevó a cabo con el software libre RS-MINERVE (Routing System Minerve), esta herramienta de modelación se ha trabajado en diferentes estudios hidrológicos en países como Perú, España, Francia, Suiza, Corea del Sur, Inglaterra, Brasil, Túnez y Nepal (Tellez Rojas, 2016).



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Rs Minerve permite modelar con estructuras de control como compuertas, reservorios, aliviaderos, desviaciones, uniones, turbinas, bombas e hidroeléctricas y de este modo simular la formación de la escorrentía superficial y la obtención de caudales, además tiene en cuenta procesos hidrológicos frecuentes como nieve, escorrentía superficial y subterránea (Tellez Rojas, 2016).

Para iniciar la modelación en dicho software es necesario alistar previamente la información de entrada como lo son la precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal, de las cuencas o subcuencas a trabajar con el modelo. De este modo, para llevar a cabo la modelación hidrológica de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá, fue necesario extraer las series de tiempo de las estaciones hidrometereológicas ubicadas en la zona de influencia, propiedad del IDEAM, lo cual se realizó con ayuda del sistema de información geográfica QGIS, obteniendo las siguientes estaciones:

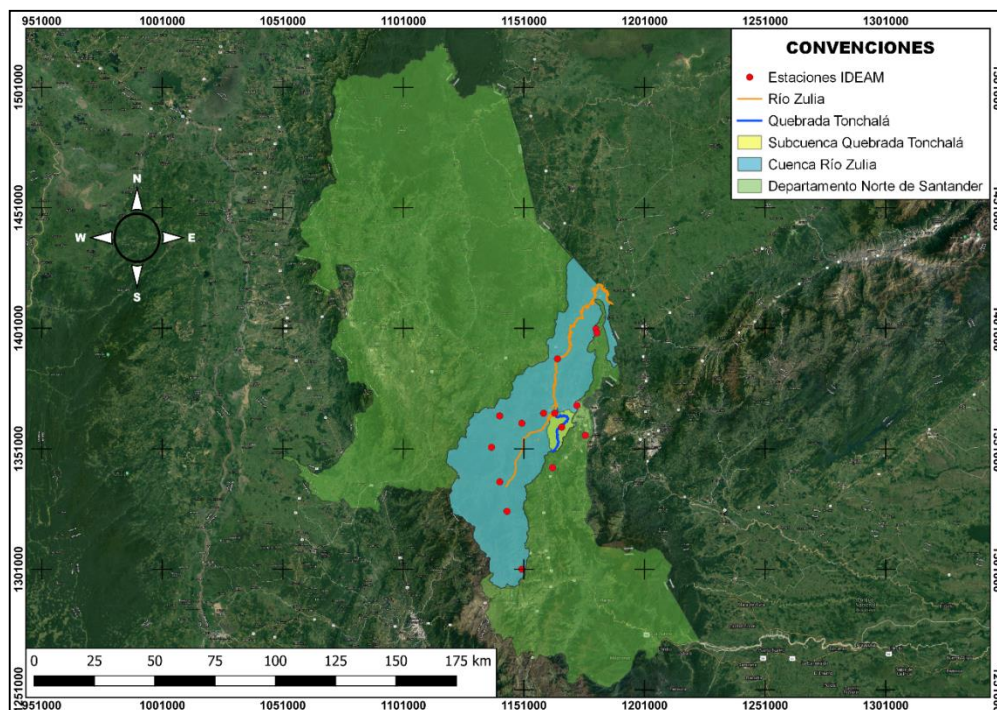


Figura 6. Ubicación de las estaciones utilizadas en el proyecto. Fuente: Elaboración propia



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Tabla 1. *Listado de estaciones utilizadas en el proyecto.*

Nº	CODIGO	NOMBRE	CATEGORIA	ESTADO	X	Y	h (m)
1	16020190	Cornejo	Pluviométrica	Activa	1159172	1365788	250
2	16015010	Aeropuerto Camilo Daza	Sinóptica Principal	Activa	1172949	1369034	250
3	16025010	Carmen de Tonchalá	Climática Principal	Activa	1166700	1360007	285
4	16020030	Santiago	Pluviométrica	Activa	1150148	1361641	411
5	16020010	Gramalote	Pluviométrica	Activa	1140946	1364685	1020
6	16020280	Urimaco	Pluviométrica	Activa	1163769	1365743	221
7	16020110	La Caldera	Pluviométrica	Activa	1150092	1301104	2875
8	16020080	Cucutilla	Pluviométrica	Activa	1144008	1325116	1280
9	16020050	Arboledas	Pluviométrica	Activa	1140998	1337306	925
10	16025030	Salazar	Climática Principal	Activa	1137553	1351692	860
11	16027280	Astilleros	Limnigráfica	Activa	1164913	1388366	140
12	16010060	La Jarra	Pluviométrica	Activa	1181315	1399125	87
13	16020340	Planadas	Pluviométrica	Activa	1180879	1400782	100
14	16010020	Don Juana la 2	Pluviométrica	Activa	1162867	1343214	770
15	16010010	Villa del Rosario	Pluviométrica	Activa	1176459	1356601	522

Fuente: Elaboración propia

Posterior a identificar las estaciones óptimas para la zona de estudio se realizó la solicitud al IDEAM de la información meteorológica diaria de temperatura y precipitación y de este modo poder determinar el periodo de tiempo a trabajar con base en los datos con los que cada una de las estaciones seleccionadas contaba, de este modo se estipulo el periodo de trabajo para estas variables desde el 01 enero del año 1989 hasta el 31 de diciembre del año 2019.

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Adicional a lo anterior, se realizó un análisis visual de toda la serie de tiempo con el fin de evaluar el porcentaje de datos faltantes para cada estación y así determinar la metodología de análisis posterior de los datos, ya que la homogeneidad e inconsistencia en la secuencia hidrológica representa uno de los aspectos más importantes del estudio en la hidrología contemporánea, es así que se llevó a cabo el análisis estadístico y de consistencia de la información entregada por el IDEAM y así comprobar si los datos con los que se cuenta son consistentes.

Posterior a efectuarse la distinción de los datos meteorológicos de cada una de las estaciones se procede a diseñar el modelo acorde a la realidad de la subcuenca, así mismo, es necesario contar con una estación Limnimétrica o Limnigráfica con el objetivo de establecer como punto de referencia la cantidad de caudal que escurre en un punto determinado del área de estudio y de este modo efectuar la calibración y validación respectiva. Sin embargo, se evidenció que la subcuenca de la Quebrada Tonchalá no contenía estación Limnimétrica o Limnigráfica que pudiera servir de base para realizar el punto de control comparativo durante la modelación. De este modo se tomó la estación más cercana a la subcuenca de la Quebrada Tonchalá ubicada sobre el margen derecho del Río Zulia con datos de caudal a paso diario como se observa en la figura 7.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

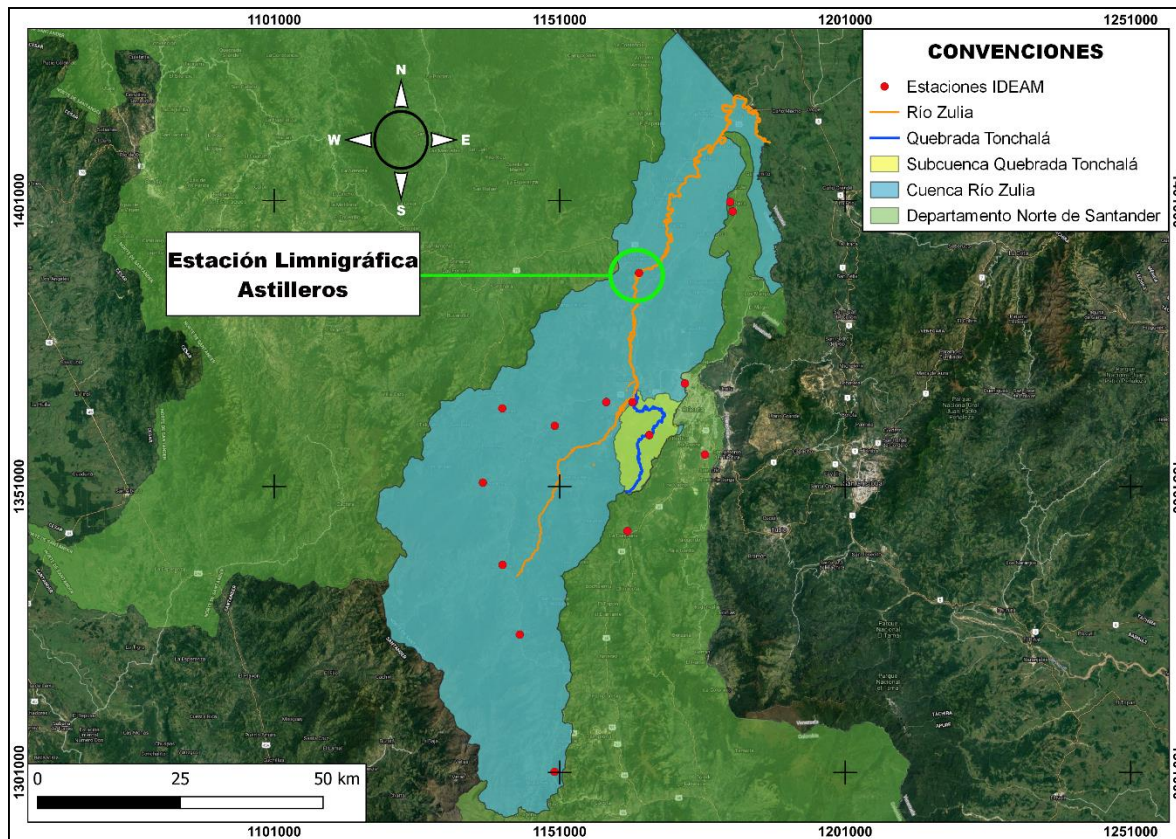


Figura 7. Ubicación estación limnigráfica Astilleros. Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Descripción estación Astilleros

Nº	CODIGO	NOMBRE	CATEGORIA	ESTADO	X	Y	h (m)
1	16027280	Astilleros	Limnigráfica	Activa	1164913	1388366	140

Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia en la imagen, solo existen dos estaciones dentro de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá las cuales no son de categoría limnimétrica o limnigráfica, por lo que fue necesario tomar la estación Astilleros ya que era la estación que mejor representaba cantidad y consistencia en sus datos.

Con esta información, se procede a realizar el diseño del nuevo modelo, el software RS MINERVE contiene diferentes modelos hidrológicos de lluvia – escorrentía, entre ellos GSM,

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

SOCONT, HBV, GR4J y SAC - SMA. Aunque esta gran variedad de modelos dificulta la elección puntual de uno para una aplicación en particular. Según los criterios de Camones Cano, 2015 el modelo que mejor se ajusta a nuestro objetivo es GR4J (Génie Rural á 4 paramètres Journalier) por la determinación de parámetros, ya que por su estructura realiza la representación de descargas medias diarias con cuatro parámetros y requiere de mínima información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar dicha serie de caudales, ya que el área de estudio no cuenta con mucha información relevante para el proyecto. Por otro lado, la regionalización, la problemática, la posibilidad de simulación y la facilidad de utilización fueron otros de los determinantes para su elección.

Luego de determinar el modelo a usar se procede a introducir los datos de entrada creando así una base de datos que permitirá calibrar el modelo para su posterior validación y de este modo poder determinar los valores X_1 , X_2 , X_3 y X_4 los cuales son los parámetros que mejor comportamiento o tendencia tuvieron mientras la calibración del modelo, estos serán los parámetros utilizados en el área de estudio de la quebrada Tonchalá para hallar los datos de caudal.

Luego de obtener los datos de caudal del modelo realizado, se obtiene mediante el programa EXCEL¹, la media mensual de cada año, el valor máximo mensual de cada año, el valor mínimo mensual para cada año realizando posteriormente el cálculo del promedio para cada mes por todos los años de los valores máximos, medio y mínimos calculados,

¹ EXCEL de Microsoft Office de Windows 10 Home Single Language 2019



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

1.6.4 Procedimiento para establecer los índices de sostenibilidad de la quebrada (IUA, IRH, IVH).

Los índices de sostenibilidad desarrollados en esta investigación se determinan con base en lo estipulado en el Estudio nacional del agua 2014, como se muestra a continuación:

- **Índice de uso de agua (IUA)**

Relaciona la cantidad de agua utilizada por los sectores que disponen de ella, en un periodo de tiempo determinado, sea anual o mensual, y una unidad espacial de análisis como lo es una cuenca hídrica; con respecto a la oferta hídrica superficial disponible para suplir las necesidades demandadas. (IDEAM, 2014)

Para el cálculo de dicho índice se emplea la siguiente ecuación:

$$IUA = \left(\frac{Dh}{Oh} \right) * 100$$

Dónde:

Dh: demanda hídrica

Oh: Oferta hídrica disponible

Para el cálculo de la Demanda hídrica se consideran par este estudio las concesiones de agua suministradas por COROPONOR.

Para el cálculo de la oferta hídrica disponible se usa la siguiente ecuación:

$$Oh = OT - Qamb$$

Dónde:

OT: Es la oferta hídrica total en el área y tiempo de estudio

Qamb: Caudal ambiental.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

La oferta hídrica total se realizó mediante la suma de los caudales promedio mensual multianual los caudales arrojados por la modelación hidrológica realizada en RS-MINERVE y el caudal ambiental se tomó según el 25% de la oferta disponible dispuesto por el IDEAM.

Para su interpretación se hace uso de la clasificación dispuesta por el ENA la cual se menciona en la siguiente tabla:

Tabla 3. *Clasificación del IUA*

RANGO	CATEGORIA IUA
>100	Crítico
50,1 – 100	Muy alto
20,1 – 50	Alto
10,1 – 20	Moderado
1 – 10	Bajo
<=1	Muy bajo

Fuente: (IDEAM, 2014)

- **Índice de retención y regulación hídrica (IRH)**

El IRH mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas basándose en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales de dicha cuenca. Su determinación se realiza a partir de las curvas de duración de caudales medios mensuales, encontrando la relación entre el área bajo la curva por debajo de la línea de caudales medios sobre el área (al 50%) y el área de toda la curva de duración (Sistema de Información del Recurso Hídrico, 2012). Esto se halla con la siguiente ecuación:

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Dónde:

Vp: Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales mensuales.

Vt: Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales mensuales.

Para su interpretación se hace uso de la clasificación dispuesta por el ENA la cual se menciona en la siguiente tabla:

Tabla 4. *Categorías del IRH*

RANGO	CATEGORIA IRH
>0,85	Muy alto
0,75 -- 0,85	Alto
0,65 -- 0,75	Medio
0,50 -- 0,65	Bajo
< 0,50	Muy bajo

Fuente: (IDEAM, 2014)

- **Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico**

Representa la fragilidad del sistema hídrico para ofrecer un caudal de abastecimiento de agua, que, ante amenazas o eventos como EL Niño, podría presentar un déficit de agua. Este relaciona mediante la matriz observada en la tabla 5 el índice de uso de agua y el índice de retención y regulación hídrica (García Herrán, 2013).

Para su interpretación se hace uso de la clasificación dispuesta por el ENA la cual se menciona en la siguiente tabla:



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Tabla 5. Vulnerabilidad del recurso hídrico. IVH

Vulnerabilidad del recurso hídrico relación IRH – IUA					
IUA Extremo = porcentaje (Oferta/demanda)		Índice de regulación			
Rango	Categoría	Alta	Moderado	Baja	Muy baja
<1	Muy bajo	Muy baja	Baja	Media	Media
1 - 10	Bajo	Baja	Baja	Media	Media
10 - 20	Moderado	Media	Media	Alta	Alta
20 - 50	Alto	Media	Alta	Alta	Muy alta
50 - 100	Muy alto	Media	Alta	Alta	Muy alta
> 100	Crítico	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

Fuente: (IDEAM, 2014)

1.6.5 Procedimiento para determinar la calidad el agua a partir del Índice de calidad del agua (ICA) y los Índices de contaminación (ICO's).

Esta se lleva a cabo mediante una recopilación de información secundaria que produce la CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE LA FRONTERA NORORIENTAL (CORPONOR), con el fin de identificar los puntos de muestreo establecidos sobre esta fuente hídrica hasta el año 2020 y poder revisar como varia los índices espacial y temporalmente, el cálculo de los índices se realizó en el programa de EXCEL a través de una hoja de cálculo ya establecida por la corporación. Para su interpretación se hace uso de la siguiente clasificación para ICO's y para el ICA establecida por el IDEAM:



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Tabla 6. Interpretación de índices de contaminación del agua (ICO's).

ICO	GRADO DE CONTAMINACIÓN	ESCALA DE COLOR
0 - 0.20	NINGUNA	
0.21 - 0.40	BAJA	
0.41 - 0.60	MEDIA	
0.61 - 0.80	ALTA	
0.81 - 1.00	MUY ALTA	

Fuente: (Zabala Dávila, 2018)

Tabla 7. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.

CATEGORÍAS DE VALORES QUE PUEDE TOMAR EL INDICADOR	CALIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	SEÑAL DE ALERTA
0.00 - 0.25	Muy mala	
0.26 - 0.50	Mala	
0.51 - 0.70	Regular	
0.71 - 0.90	Aceptable	
0.91 - 1.00	Buena	

Fuente: (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2013)

Luego de establecer los valores de los índices a estudiar se valoran con las dos tablas anteriores y se procede a determinar la calidad del agua para la quebrada Tonchalá con base en la información secundaria del laboratorio ambiental de Corponor.



2. RESULTADOS

2.1. Parámetros morfométricos de la Subcuenca

Con base en lo estipulado en la metodología a continuación se encuentran los parámetros morfométricos de la subcuenca que nos muestran las características físicas del área en estudio.

2.1.1. Variables físicas de la cuenca

Las características físicas relativas a la Subcuenca, se determinaron a partir de la subcuenca previamente delimitada.

- **Área**

Después de realizar la respectiva delimitación de la subcuenca, en Qgis por medio de la “calculadora de campos” se halló la geometría y se obtuvo que el área es de 125,497 km², lo cual indica según la Tabla 6, que es una subcuenca pues se encuentra en el rango de 100 a 300 km².

Tabla 8. Clasificación de la cuenca según su área.

Área (km ²)	Nombre
> 5	Unidad
5-20	Sector
20-100	Micro cuenca
100-300	Sub-cuenca
>300	Cuenca

Fuente: (Reyes Trujillo, Barroso, & Carvajal Escobar, 2010)



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- **Perímetro (P)**

La subcuenca de la quebrada Tonchalá tiene un perímetro de 59,343 Km, que indica la longitud de la línea envolvente o divisoria de la cuenca.

- **Longitud del cauce principal**

Este al igual que los dos anteriores se determinó a través del software Qgis, obteniendo que la longitud del cauce principal es de 38,172 km. A su vez se calculó la longitud máxima o axial de la subcuenca obteniendo 18,875 km como resultado, esto con ayuda de la “regla” de la barra de herramientas de Qgis, seleccionando los dos puntos más lejanos en la subcuenca.

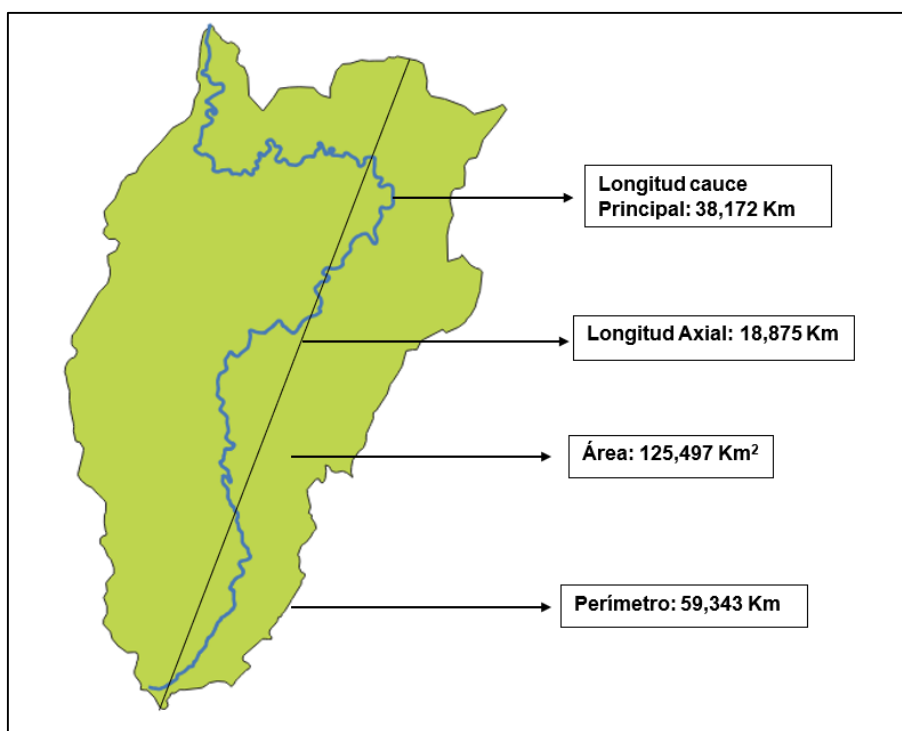


Figura 8. Área, perímetro y longitud de cauce de la Subcuenca. Fuente: Elaboración Propia



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

2.1.2. Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca

- **Factor Forma (Fr)**

Para la determinación del factor forma se reemplazó en la ecuación correspondiente, como se muestra a continuación:

$$F_f = \frac{A}{l^2}$$
$$F_f = \frac{125.497 \text{ Km}^2}{(18.875 \text{ Km})^2}$$
$$F_f = 0.352$$

A partir del valor obtenido en el cálculo del factor forma, teniendo en cuenta que es menor a 1, se puede decir que la subcuenca es ligeramente alargada (como se puede observar en los mapas de la subcuenca) y posee baja susceptibilidad a la formación de crecientes.

- **Índice de compacidad (k_c)**

Para la determinación del índice de compacidad se aplicó la ecuación necesaria como se muestra a continuación:

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$
$$K_c = 0.28 * \frac{59,343 \text{ km}}{\sqrt{125,497 \text{ k m}^2}} = 1,483$$

A partir del resultado obtenido de k_c se puede identificar que la subcuenca tiene una forma oval redonda a oval oblonga con una susceptibilidad baja a las crecientes.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- **Índice Alargamiento (I_a)**

Al igual que los índices anteriores se realizó el respectivo remplazo en la formula y de este modo obtener el resultado del índice de alargamiento.

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

$$I_a = \frac{18,875 \text{ km}}{10,129 \text{ km}} = 1,863$$

Como el I_a es mayor a 1 se puede establecer que la subcuenca presenta forma relativamente alargada.

2.1.3. Parámetros morfométricos asociados al relieve

- **Pendiente media**

Se realizó el método de Alvord, aplicando la ecuación correspondiente.

$$S_m = \frac{D * \Sigma L_C}{A}$$

$$S_m = \frac{D * \Sigma L_C}{A}$$

$$S_m = \frac{0,025 \text{ Km} * 911,077 \text{ Km}}{125,497 \text{ Km}^2}$$

$$S_m = 0,18$$

Según el porcentaje de la pendiente obtenida a partir de la ecuación anterior, se concluye que el tipo de relieve es Accidentado ya que al multiplicar su resultado por cien da 18.15%.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

• Elevación media

Para la aplicación de la cuenca fue necesario primero hallar los valores entre las curvas, los cuales se pueden observar en la tabla 9. Posterior a esto se aplicó la fórmula establecida anteriormente en la metodología.

$$E_m = \frac{\Sigma(A_i * e_i)}{A}$$

$$E_m = \frac{64834,06}{125,497}$$

$$E_m = 517,618 \text{ Km}$$

Tabla 9. Valores de área entre curvas

No.	Cotas Intervalo		Cota Media	Área Parcial	Área Acumulada (km ²)	Ai*Ei	% Área Total
1	191	285	238	41.323	125.290	9827.98683	100
2	285	378	332	27.990	83.967	9278.685	67
3	378	472	425	9.648	55.977	4102.008	45
4	472	566	519	6.377	46.329	3308.60017	37
5	566	659	613	5.196	39.952	3182.55	32
6	659	753	706	5.225	34.756	3689.72083	28
7	753	847	800	5.324	29.531	4258.31267	24
8	847	940	894	4.471	24.207	3994.8385	19
9	940	1034	987	5.018	19.736	4953.60233	16
10	1034	1128	1081	4.350	14.718	4701.625	12
11	1128	1221	1175	3.299	10.368	3874.6755	8
12	1221	1315	1268	2.643	7.069	3351.7645	6
13	1315	1409	1362	2.171	4.426	2956.54017	4
14	1409	1502	1456	1.497	2.255	2178.8835	2
15	1502	1596	1549	0.758	0.758	1174.26833	1
						64834.0613	

Fuente: Elaboración Propia



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- **Curva hipsométrica**

Mediante la relación entre el promedio de elevación y el porcentaje sobre el área superficial de la subcuenca se pudo realizar la curva hipsométrica, la cual muestra la variación de la altitud de la cuenca en un área determinada.

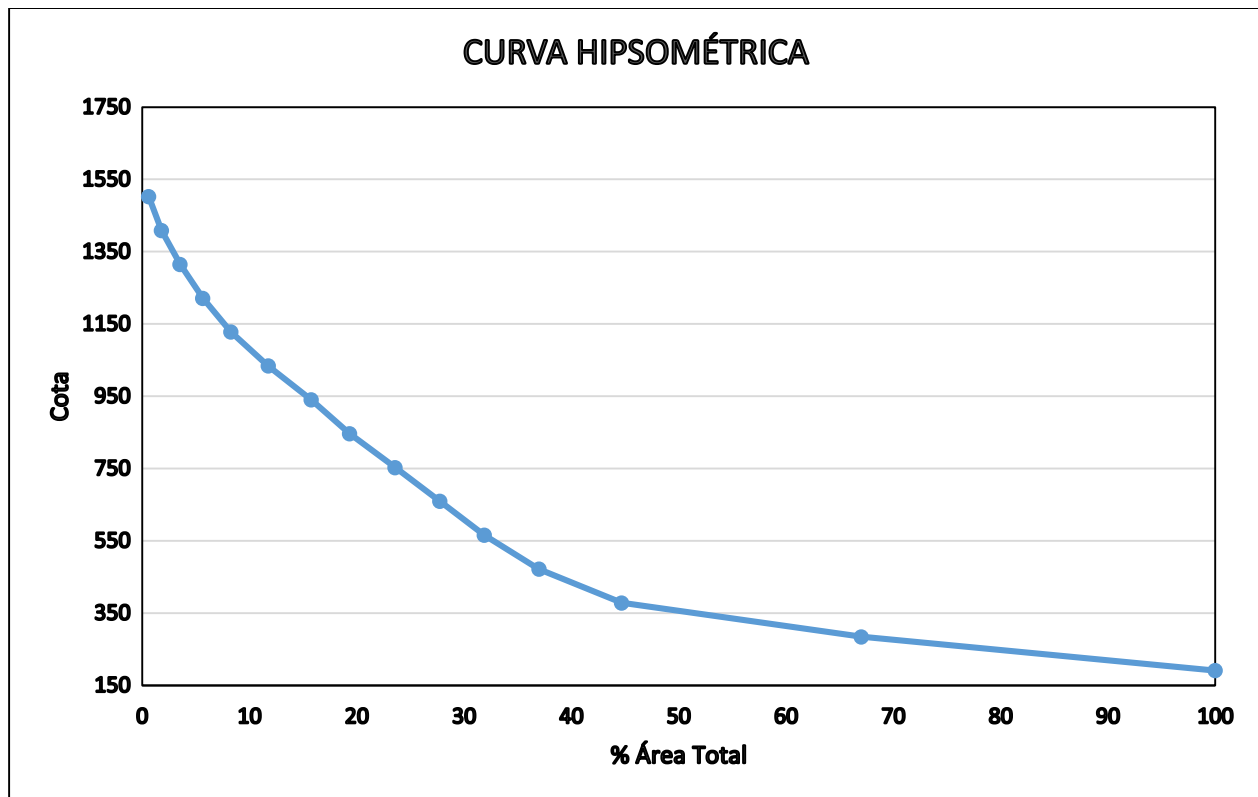


Figura 9. Curva Hipsométrica de la Subcuenca Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia

La curva hipsométrica muestra la distribución del área de toda la cuenca a lo largo de las cotas que se presente. Ésta curva se realizó a partir de la herramienta Qgis generando las curvas de nivel y las áreas entre ellas por medio de una estadística zonal, como se muestra en la tabla 9.

Por el mismo comportamiento cóncavo hacia arriba se dice que la quebrada está ya en etapa de vejez según la curva de Strahler. (Asociación geológica Argentina, 1979).



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- **Coeficiente orográfico**

Para estimar el coeficiente orográfico simplemente se debe aplicar una ecuación utilizando valores que ya hemos calculado anteriormente, tales como la elevación media y el área.

$$C_o = \frac{(0,518 \text{ Km})^2}{125,497 \text{ Km}^2}$$

$$C_o = 0,00412$$

El valor obtenido, representa que el relieve es poco accidentado, por lo que su potencial de degradación es bajo. Este coeficiente aumenta si la altura media es mayor, este parámetro es importante para medir la degradación de la cuenca.

2.1.4. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes

- **Número de orden**

Se generó un mapa donde se pudo observar el orden de los diferentes cuerpos de agua pertenecientes a la cuenca.

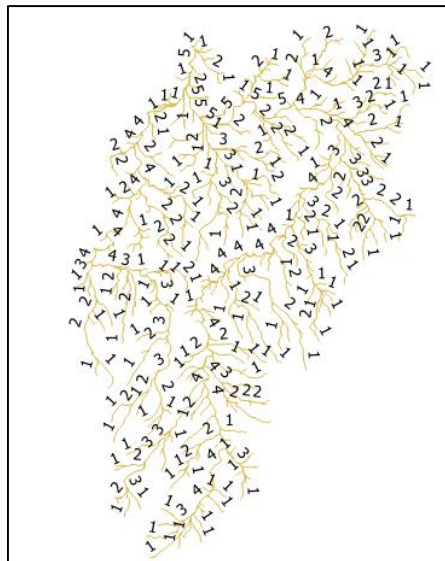


Figura 10. Red hídrica y número de orden de los drenajes de la Subcuenca Quebrada Tonchalá.
Fuente: elaboración propia



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

El número de orden de las cuencas representa el número de ramificación y drenajes del cauce principal de una cuenca. Para la subcuenca de la quebrada Tonchalá, el número de orden mayor es 5, lo que indica que es una subcuenca que cuenta con un gran número de ramificaciones.

En cuanto al aprovechamiento se puede decir, que la mayor parte del recurso hídrico es utilizada para fines agropecuarios y mineros, se destina en su gran mayoría para el riego de todo tipo de cultivos, para el cuidado del ganado que pertenece a la zona y la minería allí asentada.

- **Densidad de drenaje**

El valor de densidad de drenaje (D_d) de la subcuenca fue de 2,58 Km/Km², donde L_i es la longitud de cada uno de los drenajes en unidades de Km y A es el área de la cuenca en unidades de Km².

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

$$D_d = \frac{324,025 \text{ Km}}{125,497 \text{ Km}^2}$$

$$D_d = 2,58 \text{ Km/ Km}^2$$

La densidad de drenaje (D_d), al haber registrado un valor entre 0,5 y 3,5 km/km² implica que es una cuenca medianamente drenada, lo cual implica que tiende a presentar problemas de erosión por causa de la escorrentía.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

2.2. Desarrollo del modelo hidrológico de la subcuenca de la quebrada Tonchalá para estimar el régimen de caudales

Como se evidencia en la metodología se concluye la necesidad de establecer un nuevo modelo, como punto de referencia la estación Astilleros, lo que desencadena la delimitación de una nueva área de estudio con el fin de realizar la calibración y posterior validación para así de esta manera obtener los parámetros del modelo elegido y usarlos en la subcuenca de la Quebrada Tonchalá.

Seguido a la delimitación de Astilleros se procede a realizar la división de la nueva cuenca en las subcuencas principales que la comprenden, calcular áreas y coordenadas de sus centroides que posteriormente se usarán como las coordenadas de las estaciones virtuales a crear en el modelo, puesto que se usara esa información para poder realizar la distribución espacial de la precipitación de las estaciones meteorológicas por medio de la metodología de los polígonos de Shepard, como se muestra a continuación:



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

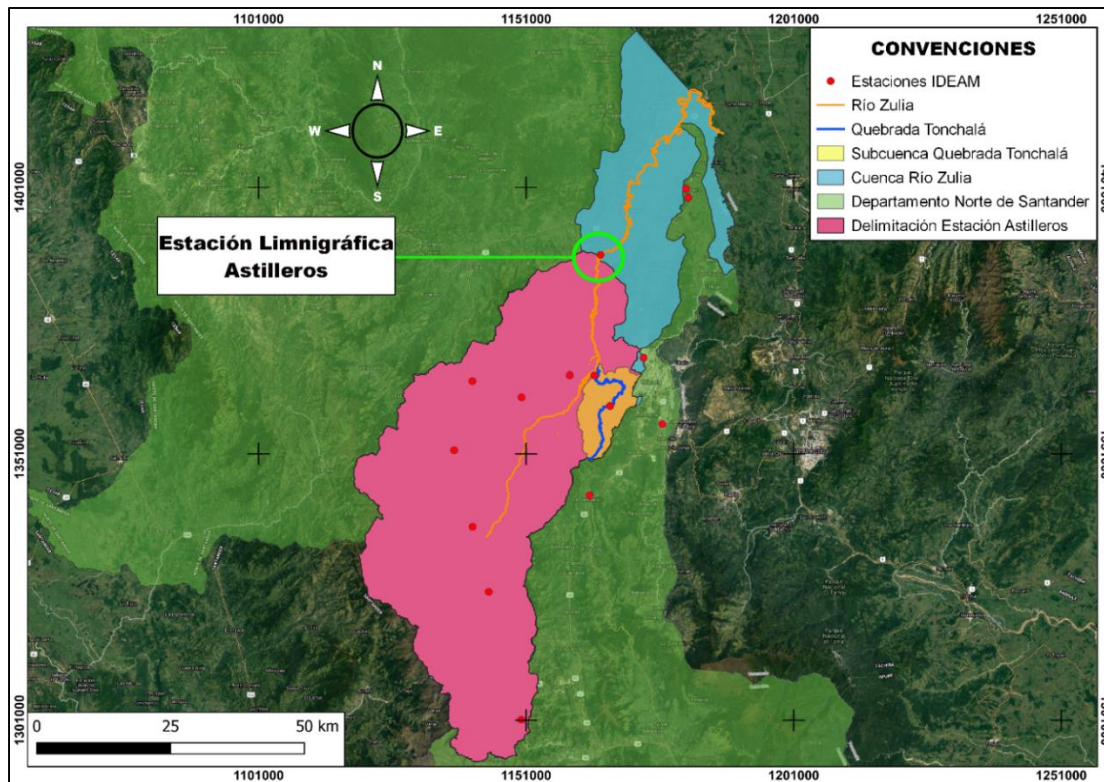


Figura 11. Delimitación estación Astilleros. Fuente: Elaboración propia.

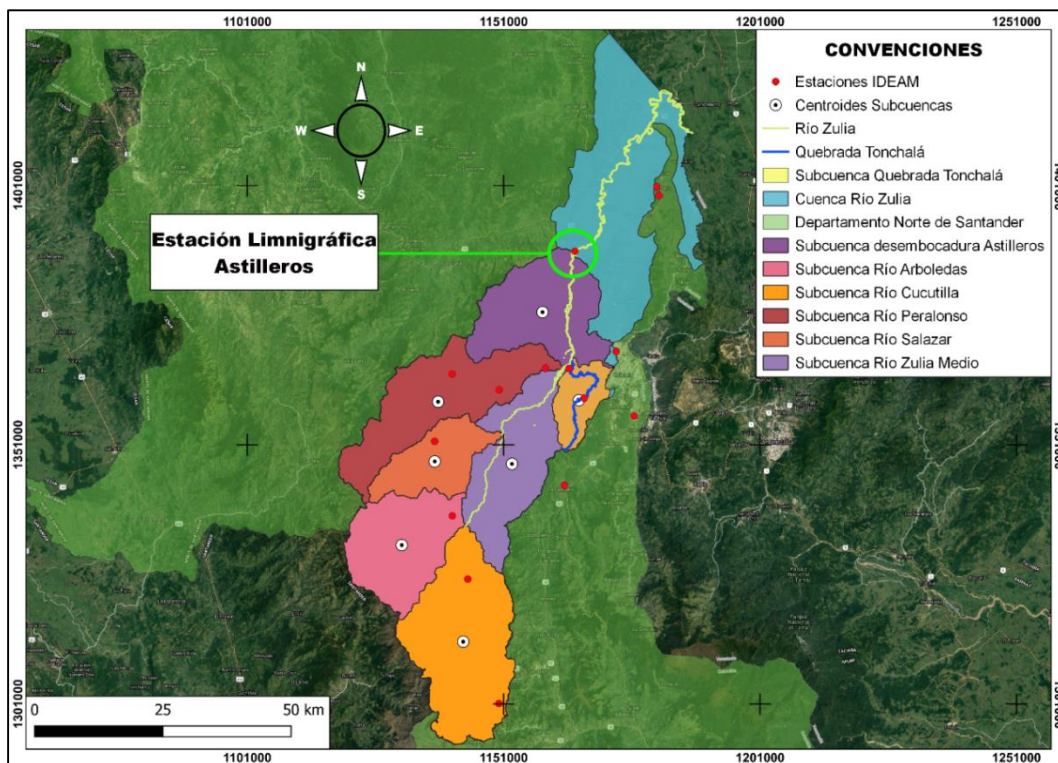


Figura 12. División de la cuenca de la estación Astilleros. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Ya con el modelo definido se procede a la construcción del modelo hidrológico de la nueva cuenca que tiene como base la estación Astilleros.

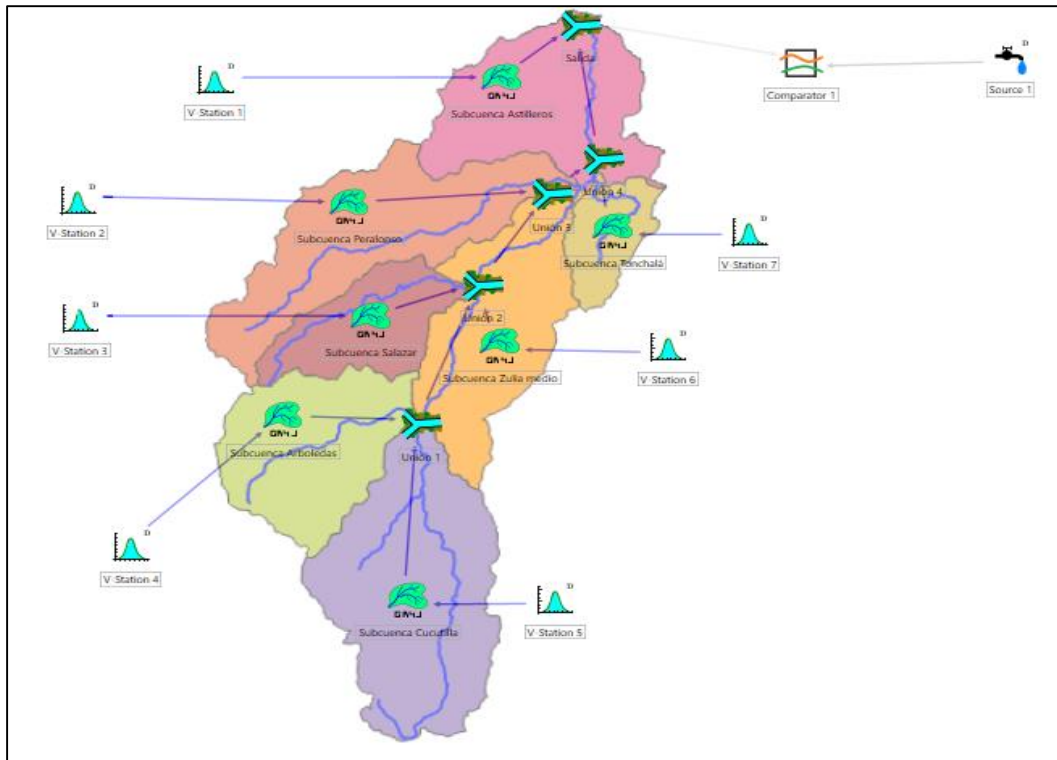


Figura 13. Modelo hidrológico cuenca Astilleros. Fuente: Elaboración propia.

Seguido a esto, es necesario crear la base de datos con las variables de precipitación y temperatura y programar el sistema informático Rs-Minerve para el cálculo de la evapotranspiración por medio de la metodología de TURC (1955–1961), conectamos la base de datos al modelo, establecemos el tiempo de la serie de datos del 01-01-1989 al 31-12-2019, validamos el modelo e iniciamos la simulación. Posterior a lo anterior, se introduce la serie de datos de caudales del tiempo elegido para realizar la calibración el cual comprende desde el 01 de julio de 2007 hasta el 31 de enero de 2011. Obteniendo los siguientes datos:



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

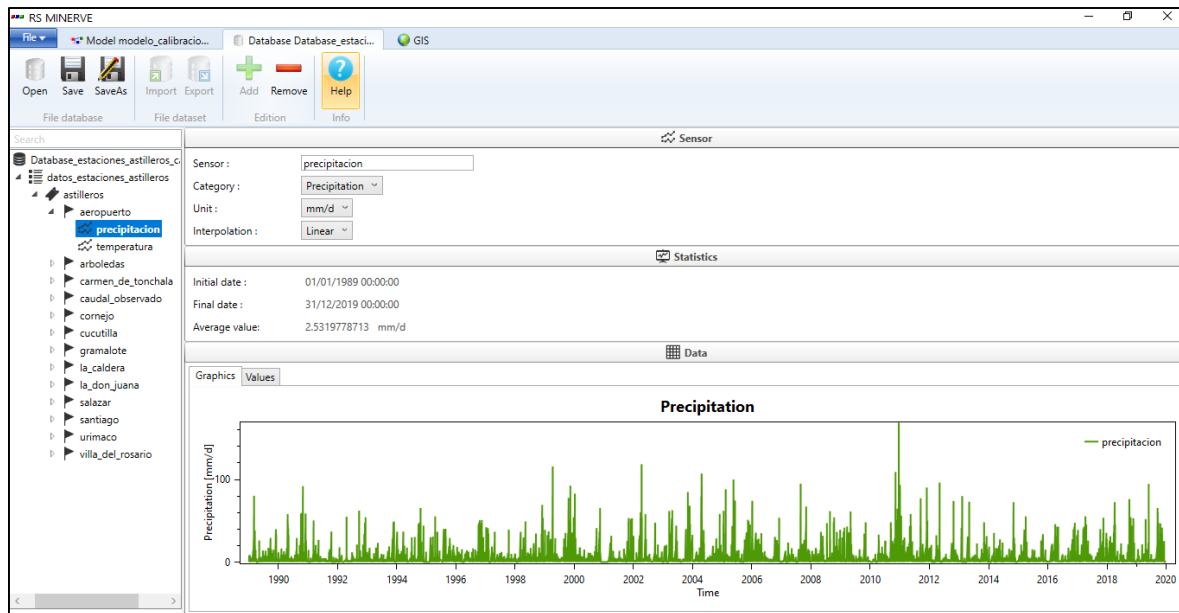


Figura 14. Base de datos de las estaciones en Rs-Minerve cuenca Astilleros. Fuente: Elaboración propia.

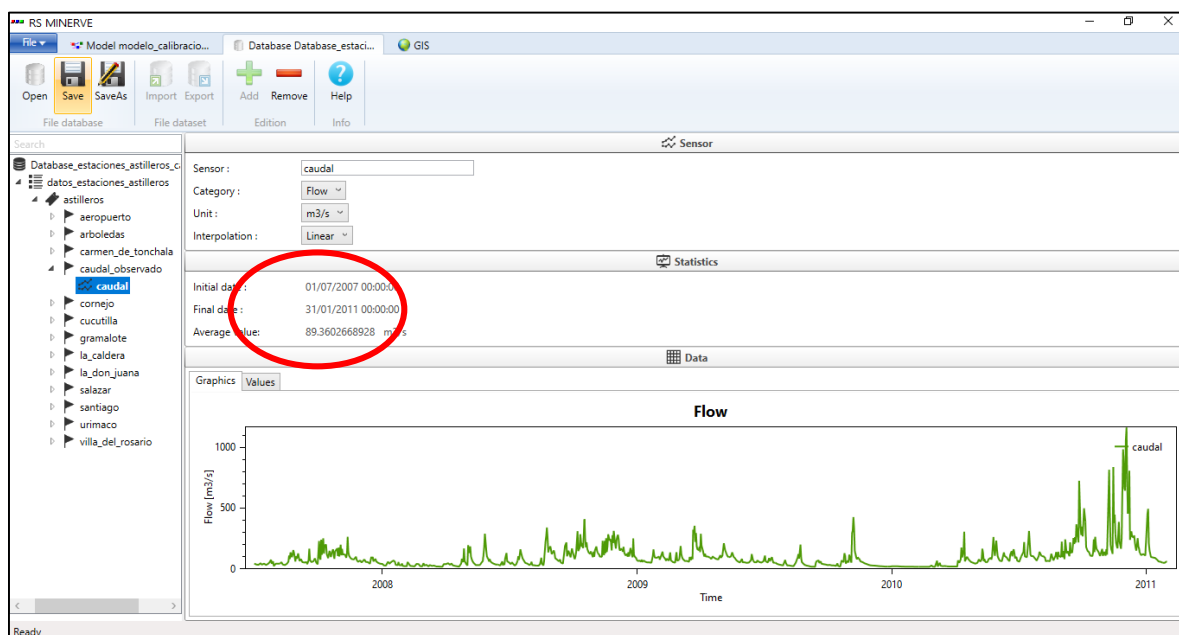


Figura 15. Serie de datos de caudales medios diarios estación Astilleros para el proceso de calibración. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Procedemos abrir el módulo “Calibrador” y así preparar el modelo para ser calibrado conectando la salida de la estación Astilleros con la selección del modelo y el “Comparator 1”, establecemos la selección de los parámetros en modo “Random” lo cual hace referencia a la elección de los mismos por defecto como condiciones iniciales, establecemos el peso de las variables elegidas de la Función Objetivo (OF) que después de realizar varias simulaciones, estableciendo diferentes pesos, se obtuvieron mejores resultados al darle peso a los parámetros estadísticos de Nash-Sutcliffe (4), coeficiente de correlación de Pearson (4) y Bias Score (2) debido a que son los parámetros que se necesitan para poder determinar cuánto de la variabilidad de las observaciones son explicadas por la simulación y a su vez poder describir el grado de relación lineal entre los datos simulados y los datos observados.

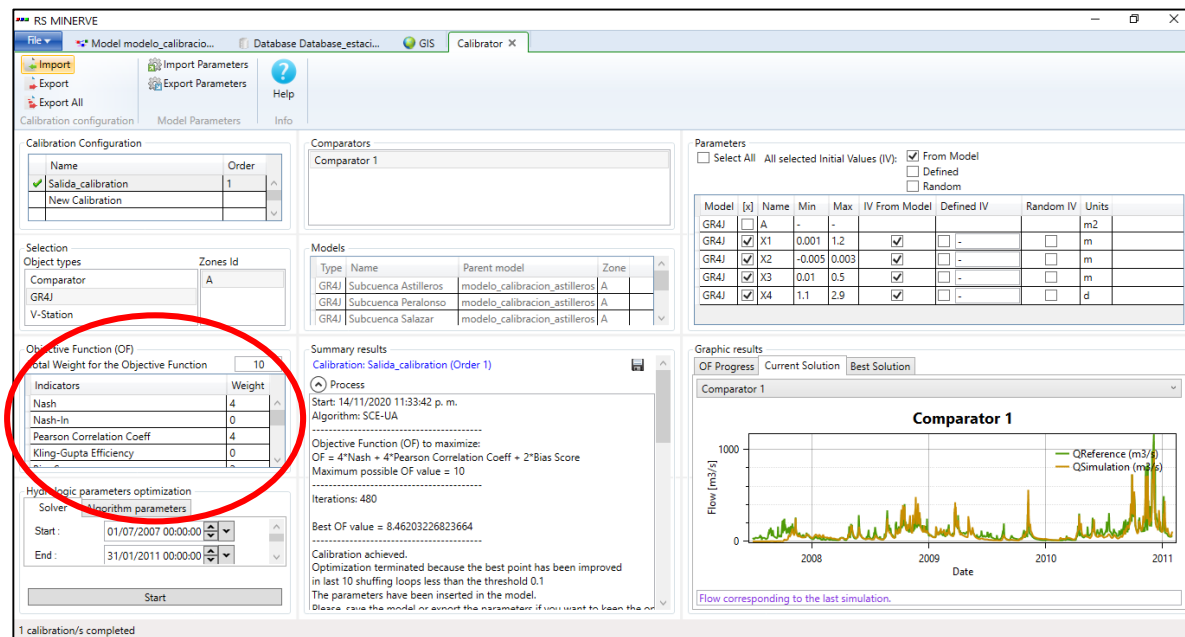


Figura 16. Calibración del modelo de la cuenca Astilleros modelo GR4J. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

En la optimización de los parámetros hidrológicos seleccionamos el algoritmo de calibración Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA) y seleccionamos el periodo de tiempo del 01 de julio de 2007 al 31 de enero de 2011 y corremos.

Es así como se obtuvo los siguientes resultados de calibración para el área de estudio descrita anteriormente.

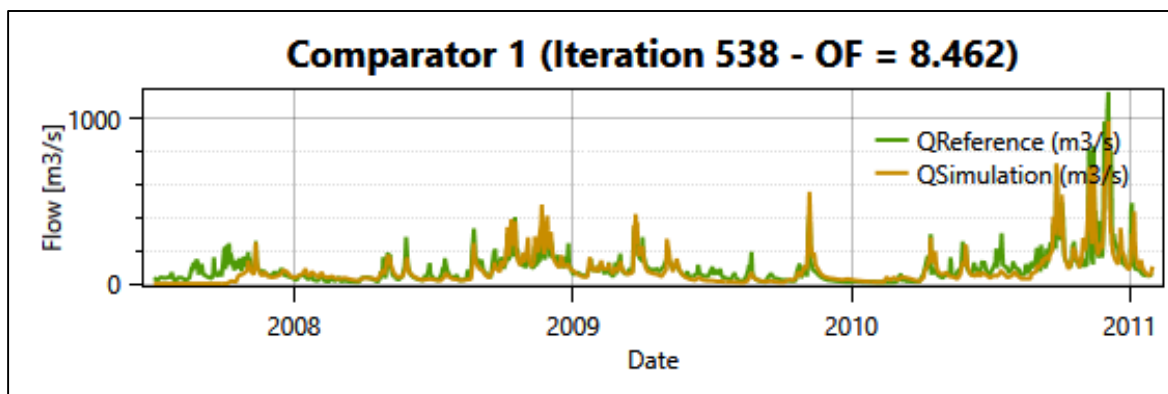


Figura 17. Histograma de Calibración del modelo GR4J. Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar 553 interacciones de posibles combinaciones globales de optimización de los parámetros, finalmente la iteración 538 fue la q mejor representó el proceso y se llegó a unos índices estadísticos de Nash y coeficiente de correlación de Pearson muy buenos como los muestra la tabla 10.

Tabla 10. Índices estadísticos de calibración GR4J.

MODELO	INDICADOR	VALORES	VALOR IDEAL
GR4J	Nash-Sutcliffe	0.7458	1
	Pearson Correlation Coeff	0.8749	1
	Kling – Gupta Efficiency	0.8200	1
	Bias Score	0.9897	1
	RRMSE	0.5881	0
	Relative Volume Bias	-0.0922	0
	Normalized Peak Error	-0.1520	0

Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Ya con los datos de los parámetros X_1 , X_2 , X_3 Y X_4 , obtenidos mediante la calibración, se procede a realizar la validación de los mismos en un periodo de tiempo diferente al de calibración para poder evaluar la capacidad predictiva de cada uno de ellos.

Tabla 11. *Periodos de calibración y validación*

ESTACIÓN LIMNIGRÁFICA	PERIODO DE CALIBRACIÓN	PERIODO DE VALIDACIÓN
Astilleros (16027280)	01 Julio 2007 – 31 Enero 2011	01 Septiembre 2015 – 30 Junio 2018

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. *Parámetros obtenidos en la calibración del modelo GR4J para la cuenca Astilleros.*

PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR
X_1	m	0.5345949
X_2	m	-0.0012405
X_3	m	0.1216651
X_4	d	1.7399622

Fuente: Elaboración propia.

Obtenidos los parámetros durante el proceso de calibración y validados por unos indicadores estadísticos de bondad de ajuste, los cuales se acercan a los valores óptimos establecidos teóricamente, se procede a realizar la validación de los mismos ingresando los datos de caudales medios diarios del intervalo de tiempo seleccionado.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

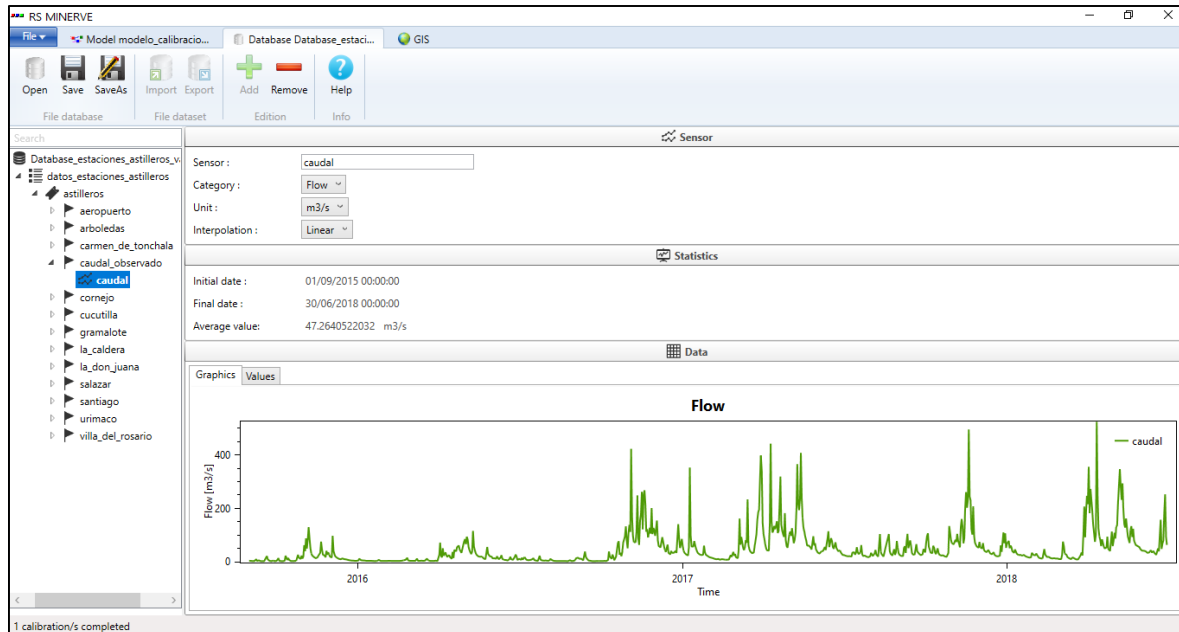


Figura 18. Serie de datos de caudales medios diarios estación Astilleros para el proceso de validación. Fuente: Elaboración propia.

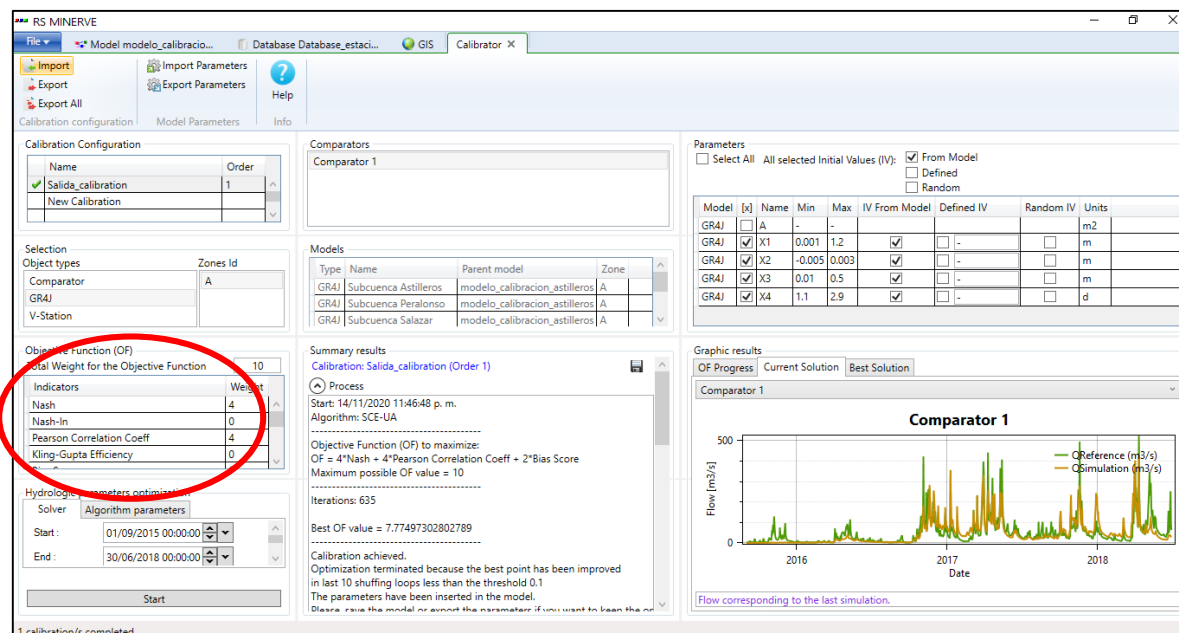


Figura 19. Validación del modelo de la cuenca Astilleros modelo GR4J. Fuente: Elaboración propia.

Es así como se obtuvo los siguientes resultados de validación para el área delimitada de la cuenca Astilleros.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

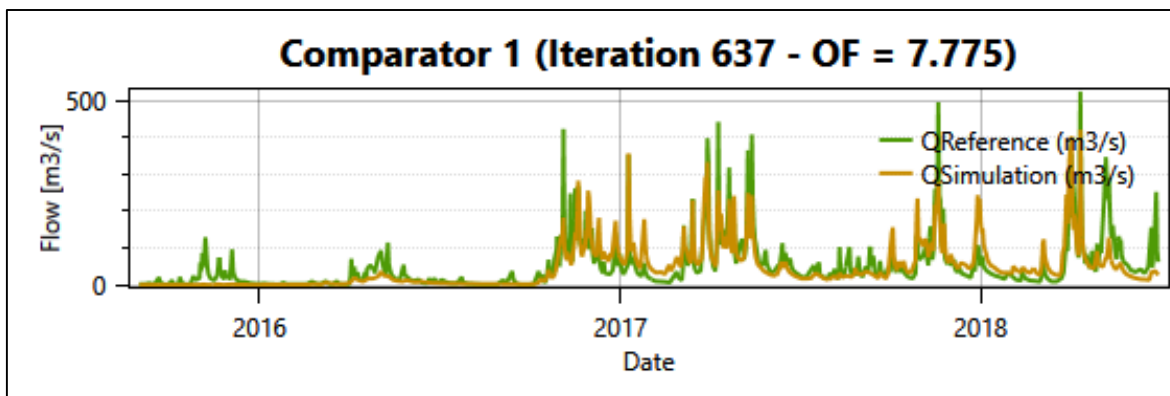


Figura 20. Histograma de validación del modelo GR4J. Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar 682 interacciones de posibles combinaciones globales de optimización de los parámetros, finalmente la iteración 637 fue la q mejor representó el proceso y se llegó a unos índices estadísticos de Nash y coeficiente de correlación de Pearson muy buenos como los muestra la tabla 13.

Tabla 13. Índices estadísticos de validación GR4J.

MODELO	INDICADOR	VALORES	VALOR IDEAL
GR4J	Nash-Sutcliffe	0.6401	1
	Pearson Correlation Coeff	0.8063	1
	Kling – Gupta Efficiency	0.7906	1
	Bias Score	0.9948	1
	RRMSE	0.8142	0
	Relative Volume Bias	-0.0673	0
	Normalized Peak Error	-0.1976	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Comparación de indicadores estadísticos del modelo GR4J.

INDICADORES ESTADÍSTICOS	CALIBRACIÓN (2007-2011)	VALIDACIÓN (2015-2018)	VALORES IDEALES
-----------------------------	----------------------------	---------------------------	--------------------



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Nash-Sutcliffe	0.7458	0.6401	1
Pearson Correlation Coeff	0.8749	0.8063	1
Kling – Gupta Efficiency	0.8200	0.7906	1
Bias Score	0.9897	0.9948	1
RRMSE	0.5881	0.8142	0
Relative Volume Bias	-0.0922	-0.0673	0
Normalized Peak Error	-0.1520	-0.1976	0

Fuente: Elaboración propia.

Los índices estadísticos de bondad de ajuste descritos en la tabla 14 se ajustan a los valores ideales, evidenciando que los parámetros obtenidos para el periodo de calibración, que posteriormente fueron validados en un espacio de tiempo diferente, tienen la capacidad de representar el comportamiento de la información observada.

Posterior a lo anterior, se procede a realizar la división de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá con base en su comportamiento hidrográfico y de esta manera realizar el cálculo de las áreas y la obtención de los centroides para poder construir el modelo hidrológico que más se acople al área de estudio.

Para obtener los datos de caudal asociados al área de interés es necesario construir el modelo y realizar la creación de la base de datos con la diferencia de que esta vez solo se realizara con estaciones meteorológicas que están dentro y cercanas a la subcuenca de la Quebrada Tonchalá, se valida y se procede a correr el modelo diseñado.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

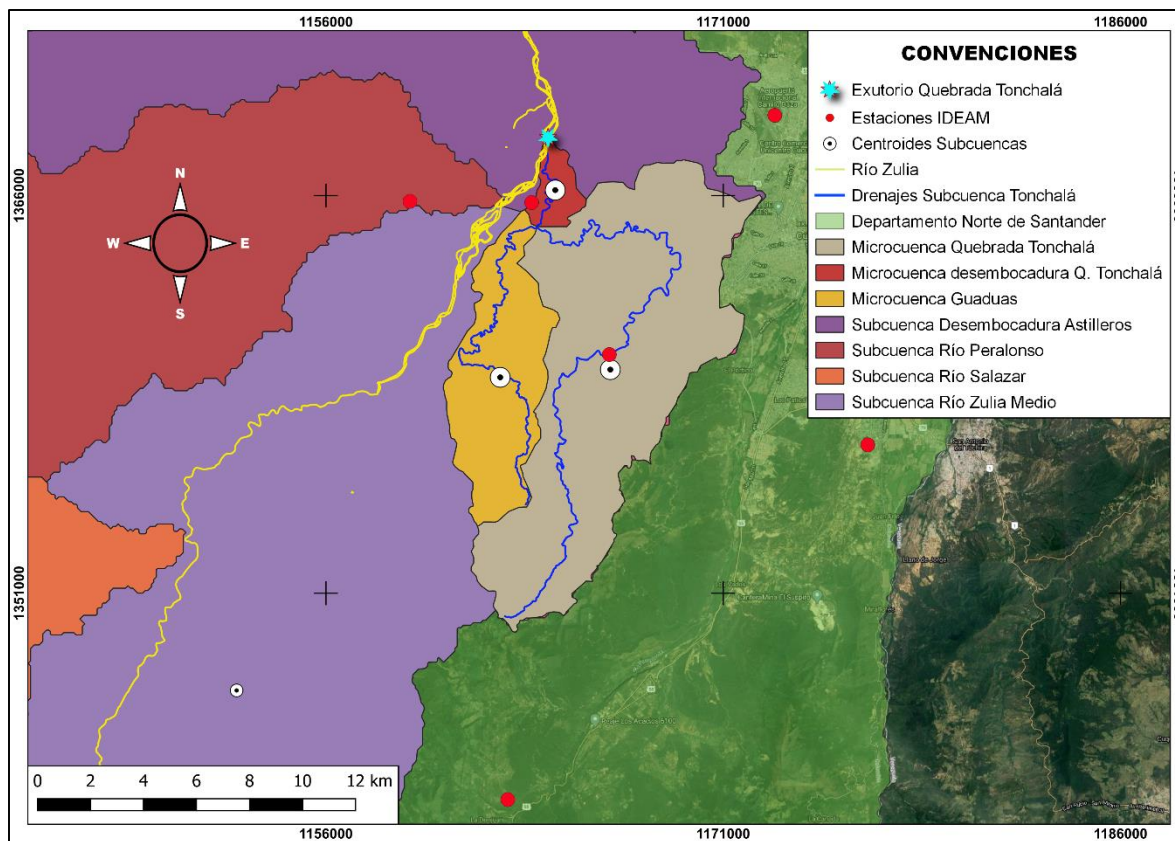


Figura 21. División de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia.

Se procede a realizar la construcción del modelo de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá en el sistema informático Rs-Minerve tomando el mismo modelo usado (GR4J) en la cuenca Astilleros, así mismo, se inicia a introducir los valores de las áreas de cada una de las microcuencas, los valores de los parámetros X_1 , X_2 , X_3 y X_4 obtenidos durante el proceso de calibración y validados mediante los indicadores de bondad de ajuste y los cuales confirman la certeza de la información que se recolectará al correr el modelo de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá y por último se ingresan las coordenadas de los centroides de cada una de las microcuencas en las estaciones virtuales ingresadas para cada una de las microcuencas.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

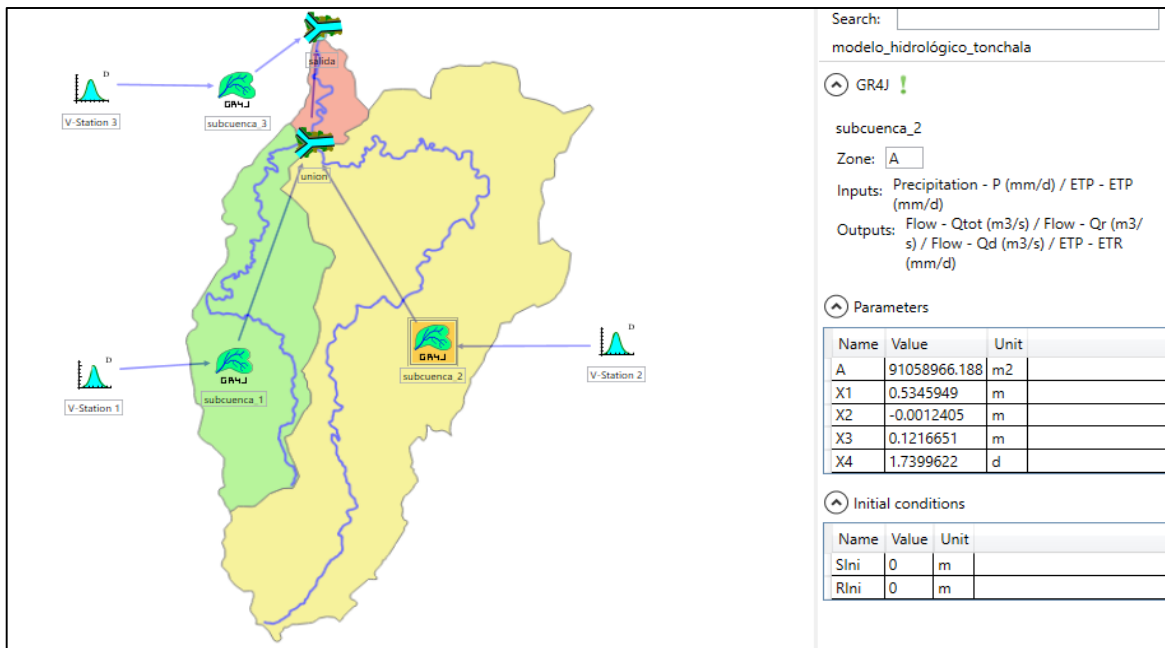


Figura 22. Modelo hidrológico subcuenca Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración Propia

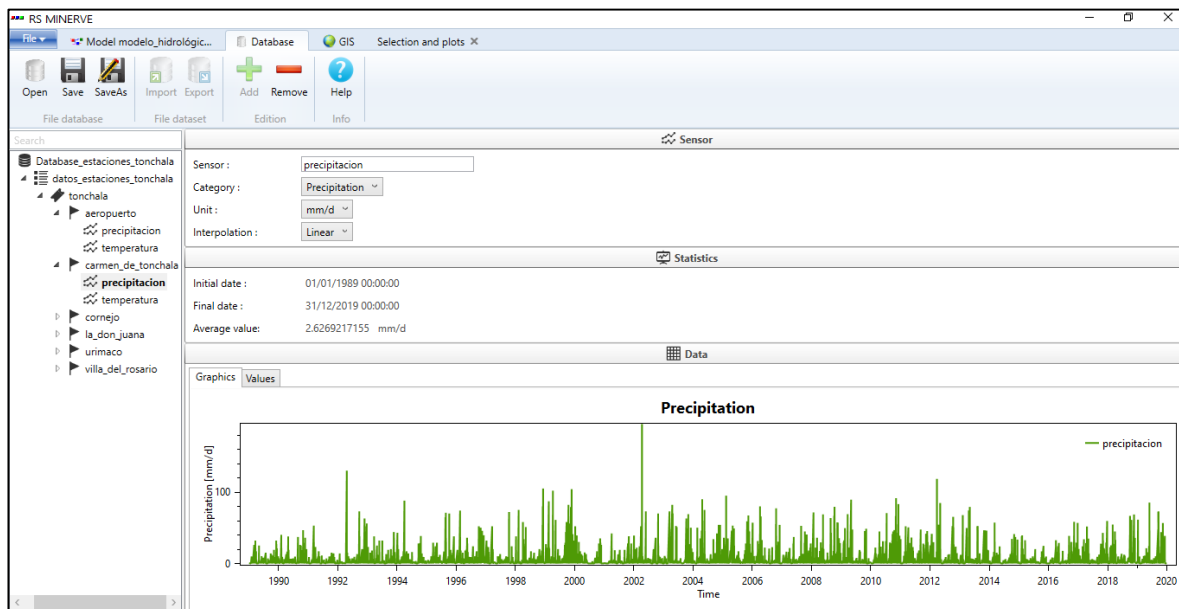


Figura 23. Base de datos de las estaciones en Rs-Minerve subcuenca Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Por lo anterior se procede a correr el modelo hidrológico GR4J diseñado para la subcuenca de la Quebrada Tonchalá después de haber sido validado por el sistema informático Rs-Minerve para el intervalo de tiempo desde el 01 de enero de 1989 hasta el 31 de diciembre del 2019 con el objetivo de obtener la serie de caudales diarios para el área de estudio y estimar el régimen de caudales máximos, medios y mínimos para la subcuenca.

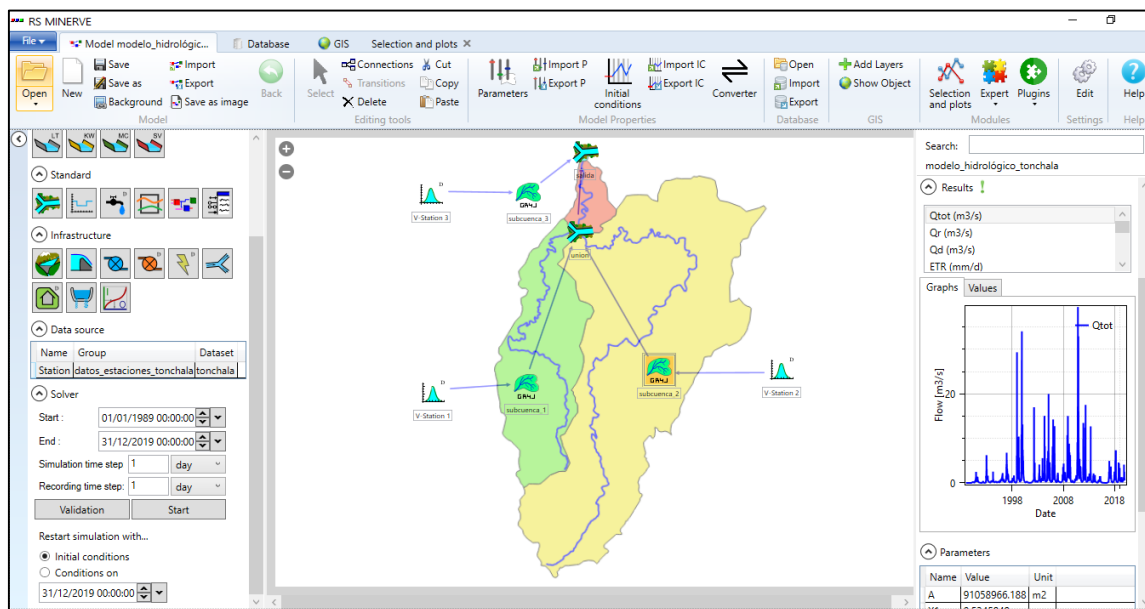


Figura 24. Validación del modelo hidrológico de la subcuenca de la Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia.

Mediante el módulo de “Selection and plots” de Rs-Minerve los resultados obtenidos para el modelo GR4J, son los siguientes:



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

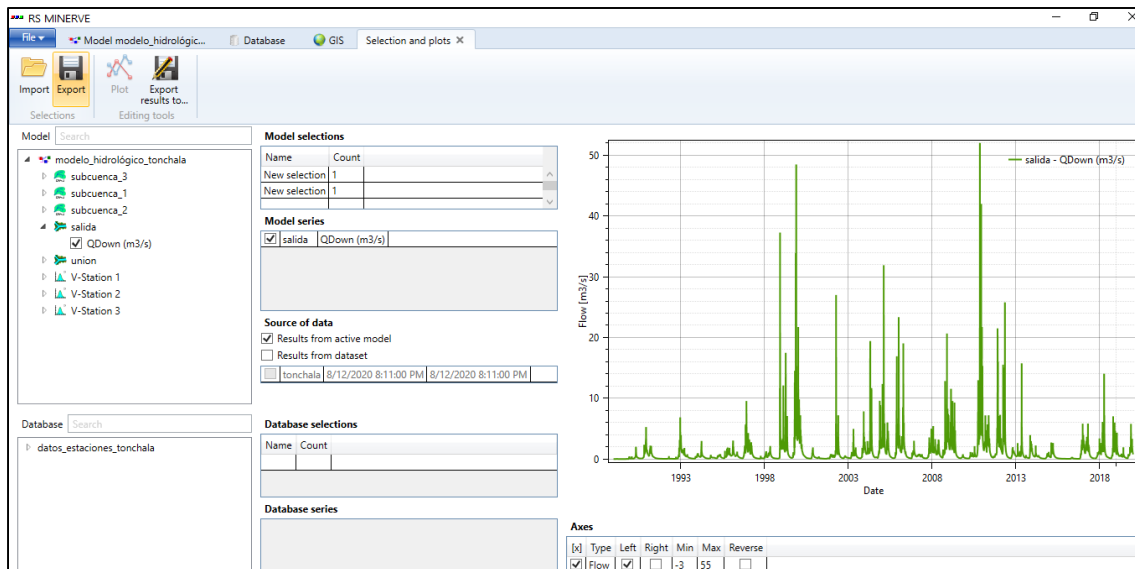


Figura 25. Obtención de resultados del modelo hidrológico de la subcuenca Quebrada Tonchalá.
Fuente: Elaboración propia.

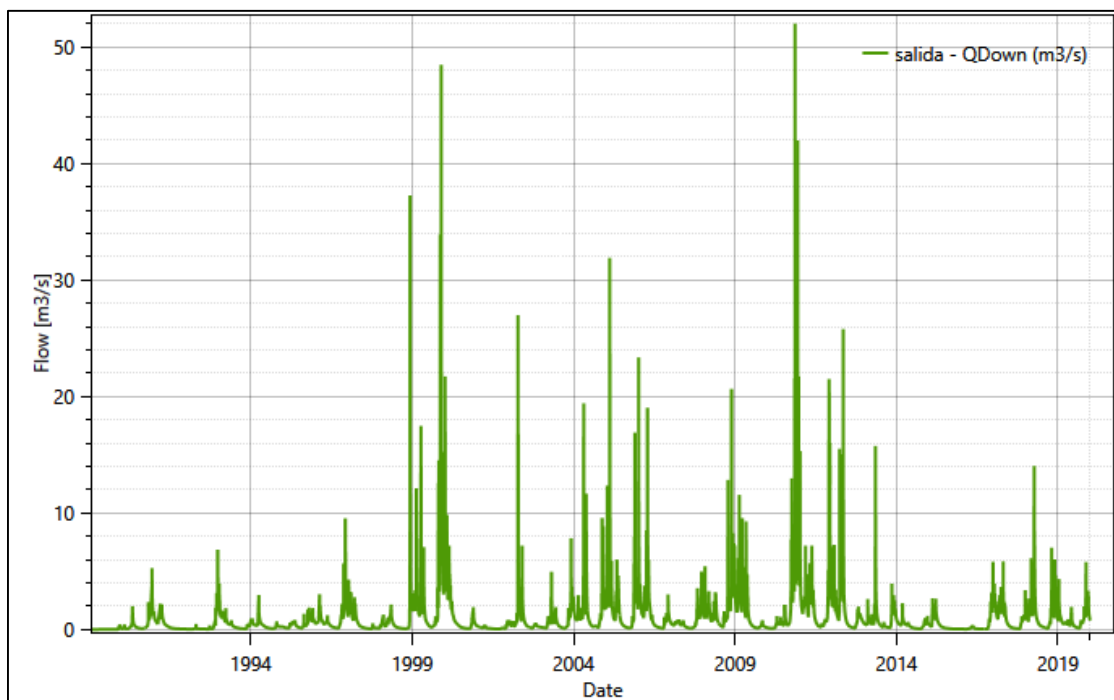


Figura 26. Histograma de caudales 1989-2019 subcuenca Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

Después de obtener el histograma de la serie de caudales para el periodo de tiempo de 1989 hasta el 2019 podemos concluir que, según sus picos más altos se han presentado dos periodos de fuertes precipitaciones, el primero en la fecha del 25 de noviembre de 1999 con un caudal de $48.477 \text{ m}^3/\text{s}$ y el segundo para la fecha del 09 de noviembre de 2010 con un caudal de $52.014 \text{ m}^3/\text{s}$ coincidiendo con los años en donde se ha presentado el fenómeno climatológico de la Niña.

Paso seguido, se realizó la exportación de los resultados en formato .CSV y se procedió a realizar el cálculo de los caudales máximos, medios y mínimos del exutorio de la Quebrada Tonchalá desde 1989 hasta el 2019, obteniendo lo siguiente:

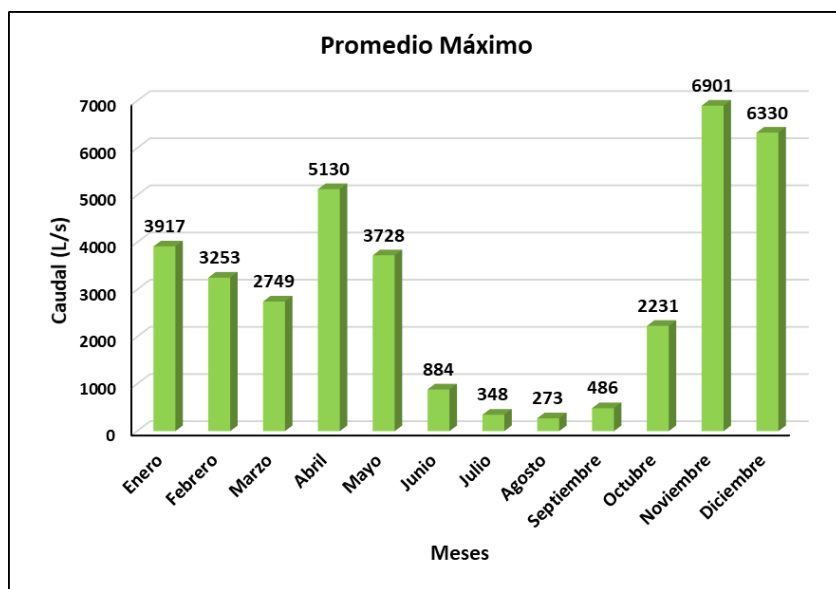


Figura 27. Caudales máximos subcuenca Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

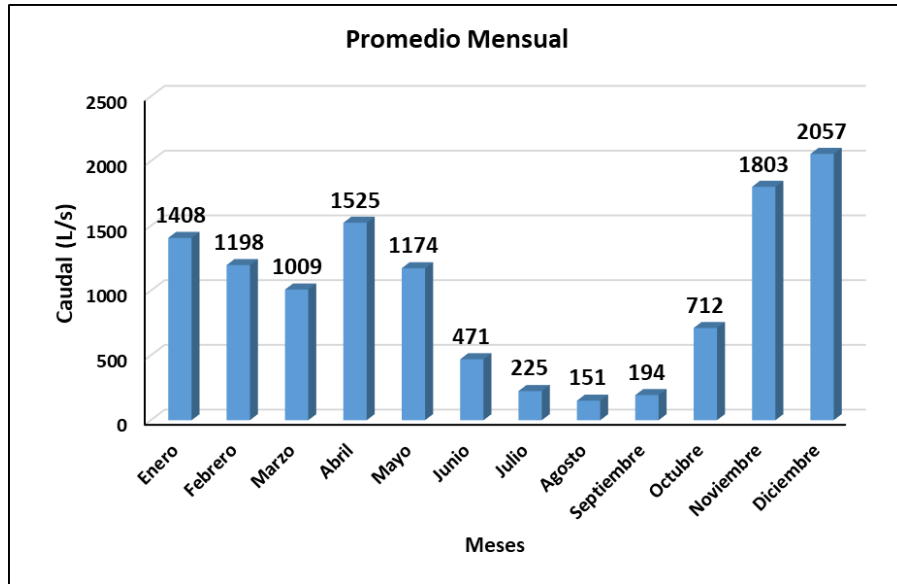


Figura 28. Caudales medios subcuenca Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia.

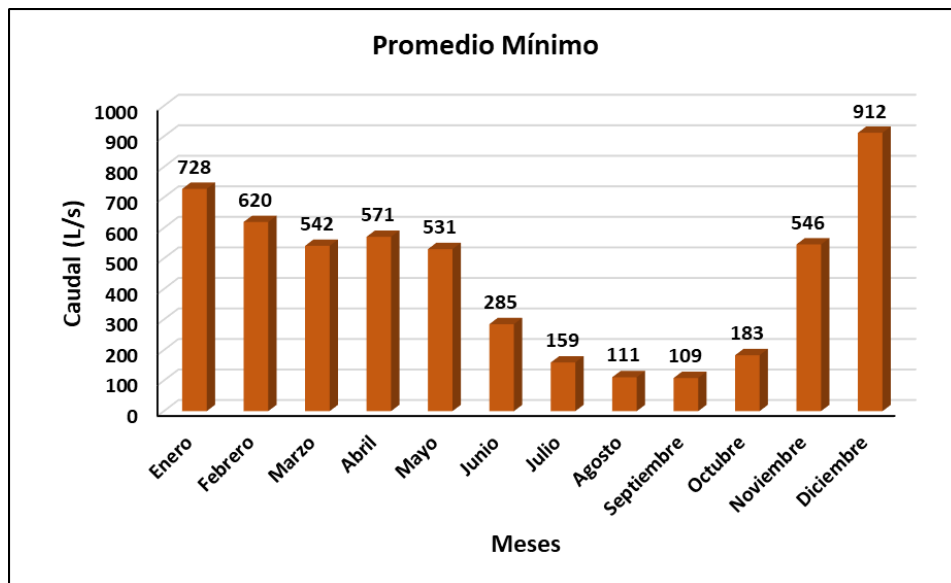


Figura 29. Caudales mínimos subcuenca Quebrada Tonchalá. Fuente: Elaboración propia.

Ya con la información de los caudales medios, máximos y mínimos arrojados por la modelación podemos realizar la hidrología de la cuenca y estimar la oferta y la variación temporal de los caudales.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

2.2.1 Oferta hídrica mensual.

La oferta hídrica es una expresión de la esorrentía superficial, es decir, es la proporción de agua que luego de haberse precipitado no se evapotranspiró ni se infiltró en el suelo y por lo tanto se escurrió hacia los cauces principales de los ríos y demás corrientes superficiales (Caudal) (IDEAM, 2014).

Según un estudio realizado por La Corporación Autónoma de Nariño (Corponariño): “El conocimiento del caudal del río, su confiabilidad y extensión de la serie del registro histórico son variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial. Cuando existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio del río es la oferta hídrica de esa cuenca” (CORPONARIÑO, 2010).

Para determinar la oferta hídrica mensual de la cuenca se tomó los datos de caudal arrojados por el modelo hidrológico de RS-MINERVE. La oferta hídrica mensual se halló convirtiendo el caudal medio mensual en el volumen mensual, como se muestra a continuación:

$$Oferta\ hídrica\ mensual\ (m^3) = Q \frac{m^3}{s} * \frac{86400s}{1día} * Días\ segun\ el\ mes$$

Tabla 15. *Oferta hídrica mensual multianual.*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Caudal medio (m3/s)	1.41	1.19	1.01	1.52	1.17	0.47	0.22	0.15	0.19	0.71	1.8	2.06
Días del mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Oferta hídrica (m3)	3776544	2878848	2705184	3939840	3133728	1218240	589248	401760	492480	1901664	4665600	5517504

Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

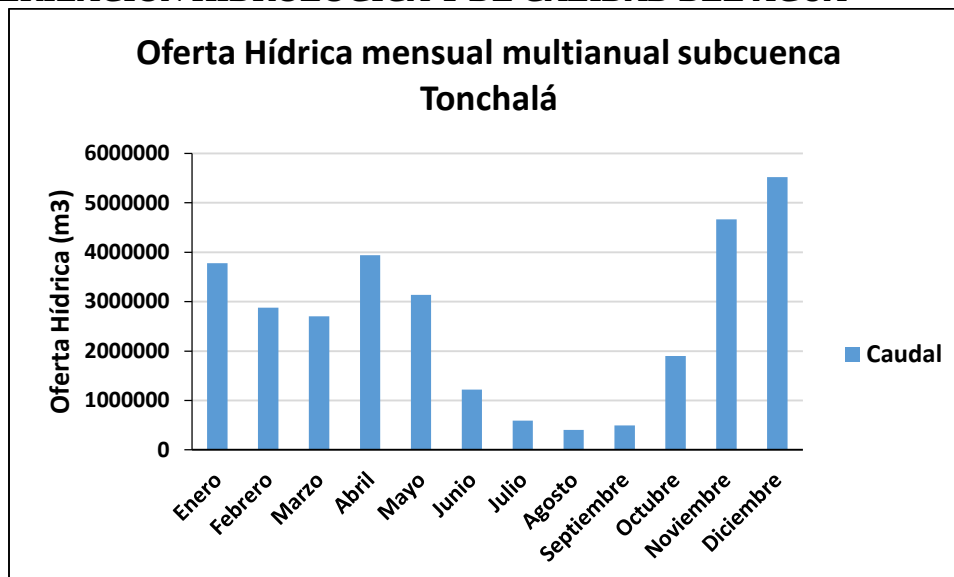


Figura 30. Histograma oferta hídrica mensual. Fuente: Elaboración propia.

En esta gráfica se puede observar que los meses con mayor oferta hídrica son los de noviembre y diciembre y los de menor oferta hídrica son los de agosto y septiembre. Se observa que en esta disponibilidad de agua superficial se demarca el régimen bimodal colombiano y que por lo tanto todas las decisiones con respecto al manejo del recurso hídrico deben estar planeadas con respecto a la época lluviosa y menos lluviosa del año.

En este gráfico se puede observar que la oferta es directamente proporcional a la precipitación y además dan un indicio hacia qué meses se pueden presentar déficits de abastecimiento o excedentes y así soportar el manejo indicado del recurso hídrico, de tal forma que se le pueda dar el mejor provecho sin ecosistemas que sostienen el agua disponible.

Sin embargo es importante aclarar que con el fin de preservar el recurso hídrico y las sus condiciones naturales se establece que solo una parte de esta escorrentía o caudal puede ser usada para las actividades socioeconómicas o de beneficio, esta oferta se define como la “oferta hídrica disponible” la cual considera una parte de la oferta hídrica total para mantener y conservar los



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

ecosistemas fluviales y las necesidades de los usuarios aguas abajo (caudal ambiental) (IDEAM, 2014).

El caudal ecológico se tomó según el 25% de la oferta disponible dispuesto por el IDEAM.

$$\text{Caudal ambiental} = 0.99 \frac{m^3}{s} * 0,25 = 0.248 \frac{m^3}{s}$$

Caudal ambiental: de acuerdo con el Decreto 3930 de 2010, se define como: “Volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas” (Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, 2010).

$$\text{Oferta hídrica disponible o neta} = \text{Oferta total} - Q \text{ ambiental}$$

$$\text{Oferta hídrica disponible o neta} = 0.99 \frac{m^3}{s} - 0.248 \frac{m^3}{s}$$

$$\text{Oferta hídrica disponible o neta} = 0.742 \frac{m^3}{s}$$

2.2.2. Variación temporal de los caudales

La variación de caudales es un factor importante a tener en cuenta en el análisis de una cuenca hidrográfica debido a que se observa el comportamiento del caudal a través del tiempo para una serie de años considerable y da inicio sobre su comportamiento en para los siguientes años.

Se elaboró el histograma de variación de los caudales medios, máximos y mínimos multianuales para observar la tendencia y los cambios de la cuenca a través del tiempo.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

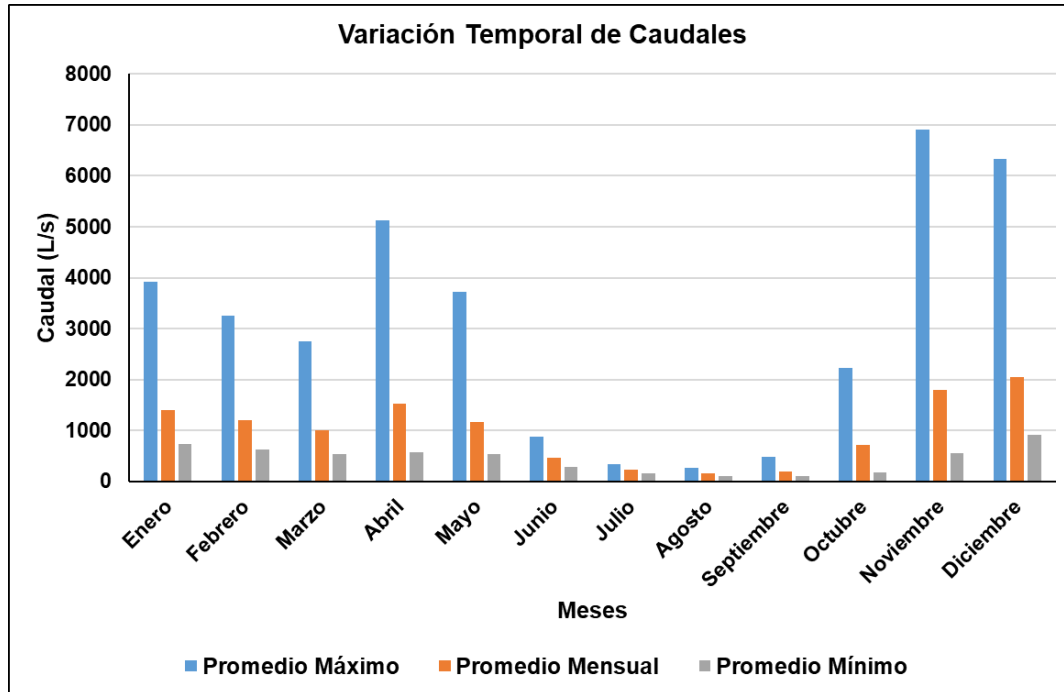


Figura 31. Variación temporal de caudales. Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico se observa un régimen netamente pluvial, pues el comportamiento de los caudales presenta fluctuaciones dependientes de la intensidad de la precipitación. En los meses de noviembre y diciembre se observan los picos de los caudales máximos, debido a que son meses con altas precipitaciones, generando así un aumento del caudal a causa del incremento de la escorrentía que alimenta el cauce. En todas las gráficas analizadas el mes de agosto ha sido el mes más crítico en cuanto a la disponibilidad de agua superficial, por otra parte, el mes de noviembre presenta los mayores caudales reportados.

2.2.3. Curva de duración.

Las curvas de duración de caudales básicamente indican el período en términos de porcentaje del tiempo en que un determinado caudal es excedido o igualado en magnitud. Las curvas de duración indican con claridad la persistencia del parámetro en estudio, sea alto, medio o bajo, y



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

suministran información sobre el carácter torrencial o no torrencial, perenne o intermitente de la corriente. El área bajo la curva de duración de caudales representa el caudal promedio con el cual puede determinarse el volumen total que fluye a través de la estación para cualquier período deseado de tiempo (Universidad del Valle, 2002).

Para realizar la curva de duración de la subcuenca, se tomaron los caudales diarios, estos caudales se ordenaron de mayor a menor, se le asignó la posición del dato a cada uno, posterior a esto se procedió a hallar el porcentaje de tiempo de permanencia tomando la posición del dato y dividiéndola en el número total de datos más uno, por último, se divide en cien. Se grafican los caudales y el porcentaje del tiempo de permanencia como se observa a continuación.

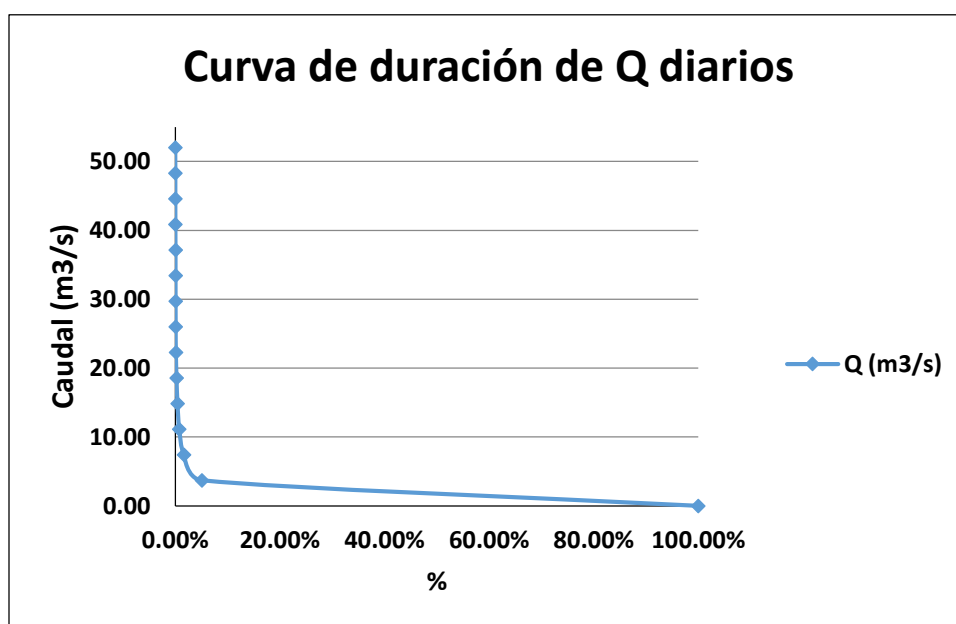


Figura 32. Curva de duración de caudales diarios subcuenca Tonchalá. Fuente: Elaboración propia

La curva de duración de caudales diarios nos indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Además, la curva indica el valor del caudal en



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

función de la frecuencia de su ocurrencia, de este modo tenemos que para un 90% de persistencia se obtiene 0,058 m³/s de caudal, la importancia de este porcentaje se usa especialmente para el análisis hidrológico en proyectos de centrales hidroeléctricas. El 75% de persistencia para nuestra área de estudio corresponde a 0,121 m³/s es importante resaltar este dato pues en este nivel de porcentaje se hacen generalmente las asignaciones de agua o los proyectos hídricos. Con la curva de duración también podemos estimar el caudal medio o de persistencia del 50% correspondiente para este caso a 0,342 m³/s.

Los caudales más pequeños que son los que predominan en la serie diaria son los que tienen mayor porcentaje de persistencia y por lo que el porcentaje de tiempo en el cual son excedido o igualados también el alto.

2.3. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO AGUA.

2.3.1. Índice de uso de agua (IUA)

Para el cálculo de dicho índice se emplea la siguiente ecuación:

$$IUA = \left(\frac{Dh}{Oh} \right) * 100$$

Para el cálculo de la Demanda hídrica se consideraron las concesiones de agua suministradas por COROPONOR, obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 16. Concesiones subcuenca quebrada Tonchalá

N	FUENTE	USO	CAUDAL (m ³ /día)
1	TONCHALA	AGROPECUARIO	216
2	GUADUAS	PSICULTURA	259,2
3	GUADUAS	PSICULTURA	432
4	EL FRAILE	RIEGO	432
5	EL RODEO	AGROPECUARIO	432



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

6	SANTO TOMÁS	AGROPECUARIO	17,28
7	LA PALMITA	AGROPECUARIO	673,92
8	TONCHALA	PSICULTURA	336,96
9	LA VOLADORA	AGROPECUARIO	86,4
10	GUADUAS	AGROPECUARIO	86,4
11	GUADUAS	INDUSTRIAL	86,4
12	EL FRAILE	AGROPECUARIO	492,48
13	MIRAFLOREZ	AGROPECUARIO	60,48
14	MIRAFLOREZ	AGROPECUARIO	691,2
15	MIRAFLOREZ	AGROPECUARIO	220,32
16	TONCHALA	AGROPECUARIO	43,2
17	GUADUAS	AGROPECUARIO	14,688
18	TONCHALA	AGROPECUARIO	6,048
19	TONCHALA	RIEGO	30,326
Total			55628,24

Fuente: CORPONOR, 2019.

La demanda obtenida esta expresada en m³ por día al hacer conversión obtenemos el siguiente resultado:

$$Dh = 0,64 \text{ m}^3/\text{s}$$

Cabe mencionar, que los datos utilizados para determinar la demanda provienen de las concesiones autorizadas por CORPONOR, es importante indicar que no se tiene en cuenta el consumo doméstico de agua porque las poblaciones asentadas en la subcuenca de la quebrada Tonchalá se abastecen de fuentes hídricas como el río Zulia.

Para el cálculo de la oferta hídrica disponible se usa la siguiente ecuación:

$$Oh = OT - Qamb$$



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

La oferta hídrica total se realizó mediante el promedio de los caudales mensuales multianuales encontrados en la modelación hidrológica realizada en RS-MINERVE y el caudal ambiental se tomó según el 25% de la oferta disponible dispuesto por el IDEAM.

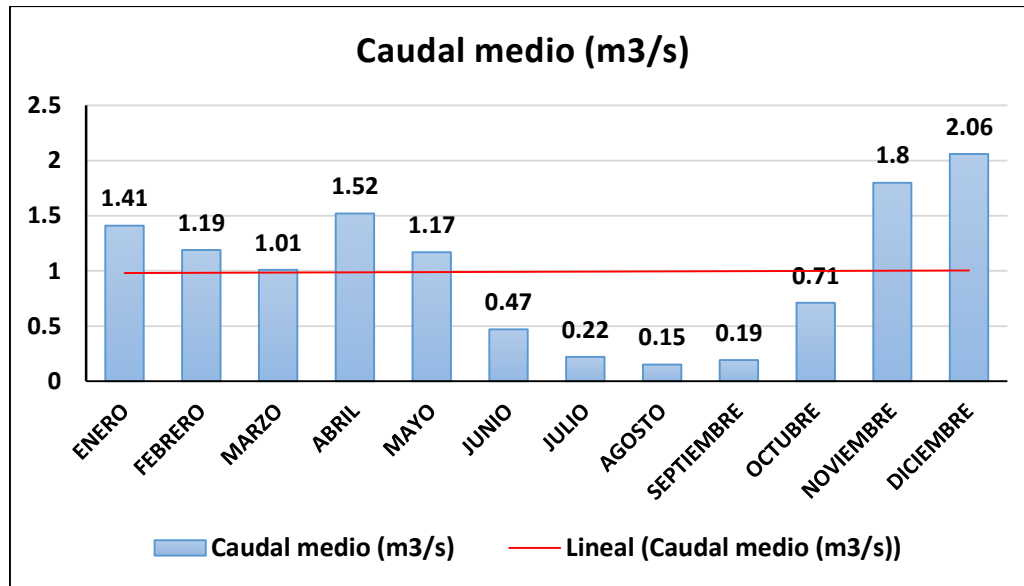


Figura 33. Caudal medio. Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se evidencia el comportamiento del caudal medio mensual multianual de donde se tomó la oferta total, se logra observar que el caudal de la quebrada concuerda con los niveles de precipitación de la zona mostrada anteriormente por las estaciones climatológicas.

Por lo anteriormente expuesto, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$Oh = 0.99 - 0.248$$

$$Oh = 0.742 \text{ m}^3/\text{s}$$

Obteniendo un índice de uso de agua de:

$$IUA = 86.25\%$$

Para la subcuenca de la quebrada Tonchalá se presenta un índice de uso de agua (IUA) de 86.25% , con categoría de Muy Alto. Esto muestra que la cantidad de agua demandada para esta

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

cuenca es alta con relación a la ofertada, teniendo en cuenta el caudal ambiental que es vital para la subsistencia de los ecosistemas presentes.

2.3.2. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

Este índice se halla con la siguiente ecuación:

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

El cálculo se realizó con el valor del volumen representado por el área bajo la línea del caudal medio y de los caudales totales, se extrajo de los valores de los caudales medios diarios obtenidos mediante la aplicación del modelo lluvia escorrentía.

$$IRH = \frac{4122,8}{11233,4}$$

$$IRH = 0,36$$

Según el valor obtenido se presenta una muy baja retención y regulación hídrica (correspondiente al color rojo), por lo que las comunidades asentadas en la subcuenca Tonchalá podrían presentar problemas de desabastecimiento hídrico lo que condicionaría el desarrollo de las múltiples actividades antrópicas ejercidas en la zona.

Esto indica que la cuenca tiene un nivel de retención de humedad muy baja lo que no da paso a una alta disponibilidad del recurso.

2.3.3 Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico

Este relaciona el índice de uso de agua y el índice de retención y regulación hídrica (García Herrán, 2013). A partir de esto, se puede concluir que el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, relacionando el IUA con categoría de Muy Alto y el IRH con

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

categoría de Muy bajo, tiene categoría de Muy Alto; es decir son muy altamente vulnerable ante eventos amenazantes o fenómenos como El Niño.

2.4. Determinación del índice de calidad del agua (ICA) y de los índices de contaminación (ICO'S) de la subcuenca de la quebrada Tonchalá

Se evidenció que la Corporación proceso información de los muestreos realizados a la Quebrada Tonchalá respecto a muestras compuestas y simples tomadas al agua en los años 2016, 2018, 2019 y 2020 pero solo para un punto de muestreo ubicado 200 m antes de la confluencia con el Río Zulía. Para el 18 de abril del 2016 no se pudo calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA), el Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO), el Índice de Contaminación por pH (ICOPH) y el Índice de Contaminación Trófica (ICOTRO) ya que para el año en cuestión el laboratorio de la Corporación no realizó análisis de Turbiedad, Conductividad Eléctrica, Fosforo Total, Nitrógeno Total, pH y Temperatura haciendo imposible calcularlos debido a que estos análisis fisicoquímicos de laboratorio son imprescindibles para cuantificar los índices. Por otro lado, se resalta que para ese año solo se pudo computar el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) arrojando un valor de 0.041 lo que indica ningún grado de contaminación por este parámetro.

Para la fecha del 15 de marzo del 2018, la corporación realizó un muestreo compuesto de doce horas, permitiendo realizar los cálculos tanto para la jornada de la mañana como para la jornada de la tarde arrojando resultados negativos para tres índices de cinco calculados. El ICA para este punto de muestreo arrojó un valor de 0.43 con calificación del agua MALA para ambas jornadas de muestreo. El ICOMO demostró un valor de 1.00 para ambas jornadas de trabajo con una calificación de MUY ALTA, así mismo el ICOTRO probó estar en un alto grado de eutrofización para ambas jornadas de muestreo con una calificación de Hipereutrófico, por lo anterior se

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

evidencia el mal estado de la fuente hídrica en aquel tiempo producto de los vertimientos municipales provenientes de la ciudad de San José de Cúcuta. Por otro lado, los índices del ICOSUS y el ICOPH estuvieron en NINGÚN grado de contaminación.

Para el año de 2019, la corporación realizó tres muestreos a lo largo de todo el año para las fechas del 01 de marzo, 15 de julio y 27 de septiembre del año en cuestión. En cuanto al ICA los tres muestreos arrojaron una calificación de MALA, el ICOMO computo un grado de contaminación MUY MALA para los muestreos del 15 de julio y el 27 de septiembre, en cuanto a la fecha del 01 de marzo no se encontraron registros de temperatura para realizar el cálculo, para el ICOTRO en cuanto a los muestreos realizados en las fechas de 01 de marzo y el 15 de julio el grado de contaminación fue de Hipereutrófico mientras que para el realizado en la fecha del 27 de septiembre presento una leve mejoría determinando el grado de contaminación en Eutrófico. Tal como se presentó en el 2018 los índices de contaminación por solidos suspendidos y por pH para las fechas del 15 de julio y el 27 de septiembre no presentaron grado de contaminación mientras que para el muestreo realizado en la fecha del 01 de marzo de 2019 solo se realizó el cálculo para el ICOSUS presentando NINGÚN grado de contaminación ya que no había registro de pH para tal época.

En cuanto al año 2020, presento una leve mejoría en todos los índices calculados. El ICA presento una calificación de REGULAR con 0.61 de valor, mientras que el ICOMO mantuvo la misma tendencia visualizando un grado de contaminación ALTO, así como el ICOTRO que se mostró en eutrófico. En cuanto al ICOSUS y al ICOPH, aunque presentaron unos leves incrementos computaron sus grados de contaminación en 0.220 y 0.161 respectivamente, solo el ICOSUS pasando de NINGUN a BAJO grado de contaminación.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

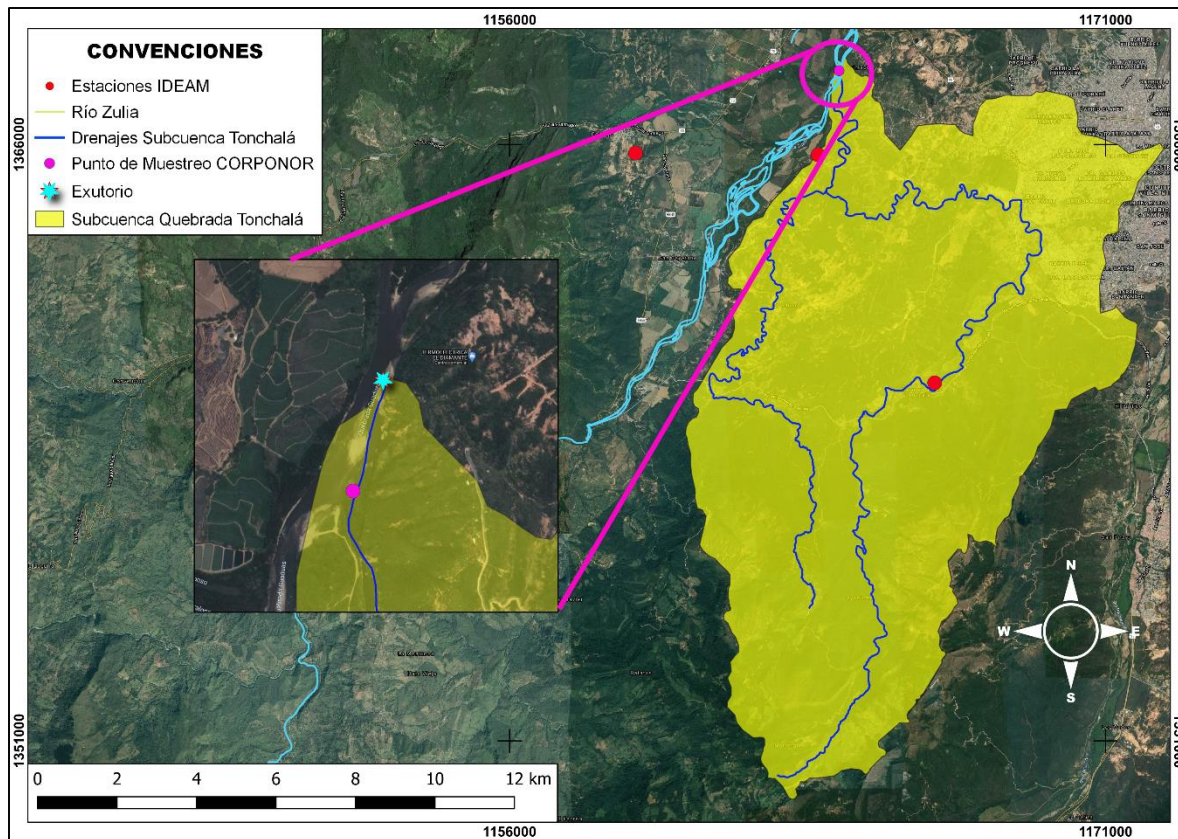


Figura 34. Ubicación del punto de muestreo de CORPONOR en la subcuenca de la Quebrada Tonchalá, 200 m antes de la confluencia con el Río Zulia. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

IDENTIFICACIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO					ANÁLISIS EN CAMPO	
NOMBRE	X	Y	h	AÑO	TEMPERATURA DEL AGUA (°C)	pH
Quebrada Tonchalá-Antes de la confluencia con el Río Zulia	1164294	1367861	201	2016-04-18	Sin Registro	Sin Registro
Quebrada Tonchalá-Antes de la confluencia con el Río Zulia	1164317	1367625	204	2018-03-15	28.3	7.50
Quebrada Tonchalá-Antes de la confluencia con el Río Zulia	1164317	1367625	204	2018-03-15	30.4	7.48
Quebrada Tonchalá-Antes de la confluencia con el Río Zulia	Sin Registro	Sin Registro	Sin Registro	2019-03-01	Sin Registro	Sin Registro
Quebrada Tonchalá-Antes de la confluencia con el Río Zulia- Proyecto Área en exploración	1164295	1367947	198	2019-07-15	30.6	7.70
Quebrada Tonchalá-Antes de la confluencia con el Río Zulia- Proyecto Área en exploración	1164250	1367834	199	2019-09-27	28.1	7.47
Quebrada Tonchalá-Antes de la confluencia con el Río Zulia	1164231	1367922	200	2020-02-24	27.4	8.53

Figura 35. Consolidado punto de muestreo 2016-2018-2019-2020 en cuanto análisis en campo.
Fuente: Elaboración propia

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

FECHA	ANÁLISIS DE LABORATORIO										CAUDAL (l/s)
	TURBIEDAD (UNT)	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (uS/cm)	OXIGENO DISUELTO (mg/L)	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)	DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO DBO5 (mg/L)	DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO DQO (mg/L)	NITROGENO TOTAL KJELDAHL (mg N/L)	FOSFORO TOTAL (mg P/L)	COLIFORMES TOTALES (NMP/100ml)	COLIFORMES FECALES (NMP/100ml)	
2016-04-18	Sin Registro	Sin Registro	2.85	20.4	19.5	49.9	Sin Registro	Sin Registro	24X10 ⁶	93X10 ⁵	367
2018-03-15	19.0	664	0.00	29.5	38.9	114	18.4	1.66	11X10 ⁶	11X10 ⁶	607
2018-03-15	18.0	681	0.00	23.5	39.6	122	20.6	1.62	11X10 ⁷	75X10 ⁵	Sin Registro
2019-03-01	55.0	677	0.35	37.4	43.1	95.7	24.9	1.94	11X10 ⁷	46X10 ⁶	Sin Registro
2019-07-15	120	896	0.00	25.2	81.8	178	36.6	3.41	11X10 ⁷	46X10 ⁶	319
2019-09-27	17.0	585	0.60	12.0	37.6	68.1	13.4	0.947	46X10 ⁶	24X10 ⁶	Sin Registro
2020-02-24	100	93.3	2.25	80.0	15.5	44.4	10.9	0.78	21X10 ⁶	11X10 ⁵	Sin Registro

Figura 36. Consolidado punto de muestreo 2016-2018-2019-2020 en cuanto análisis del laboratorio. Fuente: Elaboración propia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

FECHA	ICA		ICO'S			
	ICA	CALIFICACIÓN DEL AGUA	ICOMO	ICOSUS	ICOPH	ICOTRO
2016-04-18	Sin Registro		Sin Registro	0.041	Sin Registro	Sin Registro
2018-03-15	0.43	MALA	1	0.069	0.0055	HIPEREUTRÓFICO
2018-03-15	0.43	MALA	1	0.051	0.0051	HIPEREUTRÓFICO
2019-03-01	0.44	MALA	Sin Registro	0.092	Sin Registro	HIPEREUTRÓFICO
2019-07-15	0.43	MALA	1	0.056	0.011	HIPEREUTRÓFICO
2019-09-27	0.48	MALA	0.97	0.016	0.0049	EUTRÓFICO
2020-02-24	0.61	REGULAR	0.72	0.220	0.161	EUTRÓFICO

Figura 37. Consolidado punto de muestreo 2016-2018-2019-2020 en cuanto a ICA e ICO's.
Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia en las figuras anteriores CORPONOR ha desarrollado diferentes muestreos en el área de estudio, donde se evidencia que el ICA durante los años 2018 y 2019 se ha mantenido en la clasificación de MALA, no es hasta 2020 donde este índice mostro una leve mejoría pasando a la categoría de REGULAR, es necesario seguir haciendo los muestreos para observar si efectivamente las condiciones del agua en este cuerpo de agua mejoraron o se debe a

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

factores del tiempo en que se llevó a cabo el muestreo. Para el caso de ICOMO se evidencia que del 2018 al 2020 ha ido disminuyendo levemente, caso contrario al ICOSUS y al ICOPH quien han ido aumentando un poco con el paso del tiempo, es decir que han mejorado un poco las características de calidad para estos dos parámetros sin embargo siguen mostrando la mala calidad del agua de la quebrada Tonchalá. En el ICOTRO la concentración de fosforo ha disminuido un poco cambiando de valoración, pasando de Hipereutrófico a Eutrófico, el ICOSUS refleja la concentración de sólidos suspendidos y muestra relación directa con el ICOTRO (concentración de fósforo total) durante la época de lluvias, aunque el porcentaje de explicación de una variable en otra es muy bajo se evidencia que las dos tienden a mejorar un poco para el 2020.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Conforme a los resultados adquiridos en este trabajo se identifica que la subcuenca de la quebrada Tonchalá en cuanto a los parámetros morfométricos se enfoca en la baja susceptibilidad a las crecientes con una distribución de área de terreno en su mayoría de poca elevación encontrándose en etapa de vejez lo que es directamente proporcional a una degradación baja.

Durante la recopilación de información secundaria se evidenció que el área de trabajo no contaba con estudios técnicos ni información suficiente para analizar y caracterizar hidrológicamente. Sin embargo, este trabajo realiza un gran aporte técnico no solo para el área de estudio seleccionada sino para toda la cuenca del río Zulia en cuanto a los parámetros obtenidos durante la etapa de calibración y validación del modelo hidrológico, de usar GR4J de RS-Minerve, para cualquier subcuenca o microcuenca dispuesta en ella y que no cuente con información suficiente de estaciones hidrometeorológicas y así de esta manera las entidades territoriales puedan llevar a cabo proyectos de modelación y proyección de cantidad de sus fuentes hídricas de menor orden pero de gran importancia para la comunidad.

Cabe destacar, que la expresión de escorrentía superficial que se procesó, se extrajo netamente de los días que presentaron lluvia mediante cálculos espaciales y temporales de la misma. Es así, que no se tienen datos de caudal de los días que no presentan precipitación, lo cual es el producto natural de la regulación climática de las montañas donde nace la quebrada Tonchalá. Por otro lado, en el exutorio de la subcuenca se ha realizado un aporte de caudal de los vertimientos municipales de agua proveniente de otras fuentes hídricas y que no ha sido captada aguas arriba de la quebrada. Sin embargo, se observó que en esta disponibilidad de agua superficial se demarca el régimen bimodal colombiano y que por lo tanto todas las decisiones con respecto al



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

manejo del recurso hídrico deben estar planeadas con respecto a la época lluviosa y menos lluviosa del año.

Un factor importante a tener en cuenta es la duración de los caudales de la oferta hídrica calculada, que para una quebrada tan pequeña pudiera ser atractiva con $0.99 \text{ m}^3/\text{s}$ calculando índices como el del uso del agua dentro de la categoría de “Muy Alto”, así mismo, cuando se dirige la mirada a dicha grafica se puede ver con claridad que los caudales que prevalecen en un 75 y 90 % corresponde a $0.121 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.058 \text{ m}^3/\text{s}$, respetivamente, lo que a su vez coincide con el índice de retención y regulación hídrica dentro de la categoría de baja correspondiente al color rojo por lo que las comunidades asentadas en la subcuenca Tonchalá presentan problemas de desabastecimiento hídrico lo que condicionaría el desarrollo de las múltiples actividades antrópicas ejercidas en la zona siendo altamente vulnerable ante eventos amenazantes o fenómenos como El Niño.

Finalmente, el índice de calidad del agua y los índices de contaminación calculados obedecen a un solo punto de muestreo establecido por la Corporación situado aproximadamente 200 m antes de la confluencia con el río Zulia comprobando una mala calidad del agua y contaminación en su mayoría por materia orgánica proveniente de los vertimientos municipales de una parte de la ciudad de San José de Cúcuta, sin tener en cuenta los 37.9 km de longitud del cauce principal restantes y dispuestos de ser analizados y poder definir proyectos de mejora a lo largo del cauce principal identificando la zona más comprometida a dicha contaminación. Sin embargo, desde la corporación se han adelantado medidas de protección con enrocados y procesos de gestión para el establecimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la quebrada Tonchalá con el único objetivo de mejorar la calidad de este afluente del río Zulia.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

4. CONCLUSIONES

De acuerdo al estudio y análisis de la información hidrometeorológica, partiendo de la información concerniente para 31 años, así como el procesamiento de toda la información de las características morfológica de la zona de estudio y del procesamiento de información secundaria compartida por instituciones del orden regional y nacional, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

La pendiente media de la subcuenca es de 18.15% lo que indica que el tipo de relieve para nuestra área de estudio es accidentado. Por otro lado, tenemos que el factor de forma fue menor a 1 indicando que el área trabajada es ligeramente alargada con baja susceptibilidad a las avenidas lo cual podemos confirmar con el índice de compacidad y el índice de alargamiento los cuales arrojaron un valor de 1,483 y 1.863 respectivamente, identificando la subcuenca con una forma oval redonda a oval oblonga y relativamente alargada con una susceptibilidad baja a las crecientes.

Se obtuvo que el 55% de la subcuenca se encuentra entre cotas que van desde los 191 m.s.n.m. hasta los 378 m.s.n.m. presentando un comportamiento cóncavo hacia arriba en la curva hipsométrica lo que indica que la subcuenca se encuentra en estado de vejez según la curva de Strahel.

El índice orográfico de la subcuenca se presentó en un valor de 0,00412 representando un relieve poco accidentado por lo que su potencial de degradación es bajo.

Se encuentra que el número de orden de los drenajes del área de estudio es cinco (5) con un gran número de ramificaciones arrojando un valor de 2,58 Km/Km² en cuanto a la densidad de drenajes indicando una subcuenca medianamente drenada lo que implica que tiende a presentar problemas de erosión por causa de la escorrentía.

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

En el análisis gráfico y estadístico, no se encontró inconsistencia en la serie de precipitaciones por lo cual, se puede afirmar que las series de tiempo son lo suficientemente confiable para emplearlas en el proceso de modelamiento hidrológico.

Los índices estadísticos bondad de ajuste obtenido durante la prueba de calibración del modelo Astilleros para el periodo de tiempo comprendido del 01 de julio de 2007 al 31 de enero de 2011 se aproximan a los valores ideales, obteniendo el coeficiente de Nash-Sutcliffe con un valor de 0,7458 lo que traduce en niveles de desempeño buenos y que las descargas simuladas son mejores predictores que las observadas. Así mismo, el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0,8749 indicando que existe una relación lineal muy buena entre los datos simulados y observados.

Por otro lado, la validación de los parámetros obtenidos de la calibración del modelo Astilleros se simularon en el periodo del 01 de septiembre de 2015 hasta el 30 de junio de 2018, logrando muy buenos resultados de los índices estadísticos de bondad de ajuste, obteniendo el coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.6401 y el coeficiente de correlación de Pearson de 0.8063 indicando que los parámetros obtenidos durante la calibración anteriormente son válidos para realizar modelación hidrológica en cualquier territorio de la cuenca del río Zulia usando el modelo GR4J y los parámetros obtenidos.

Se obtuvieron los caudales máximos, medio y mínimos diarios del exutorio de la subcuenca de la quebrada Tonchalá desde 1989 hasta el 2019, presentado dos manifestaciones fuertes de crecidas, la primera para la fecha del 25 de noviembre de 1999 con un caudal de 48.477 m³/s y la segunda para la fecha del 09 de noviembre de 2010 con un caudal de 52.014 m³/s coincidiendo con los años en donde se ha presentado el fenómeno climatológico de la Niña, así mismo, se evidencia una variabilidad climática de ocurrencia de esas crecidas para 11 años.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

El mes de agosto ha sido el mes más crítico en cuanto a la disponibilidad de agua superficial, por otra parte, el mes de noviembre presenta los mayores caudales reportados.

El índice del uso del agua (IUA) propuesto por el IDEAM se establece en 86.25% ingresando dentro de la categoría de Muy Alto, asemejándose a la realidad que vive esta fuente hídrica, es de vital importancia aclarar que la demanda obtenida se tomó de fuentes oficiales de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) y no se tienen en cuenta tanto las captaciones ilegales como las sobre captaciones que se realizan a la misma.

Por otro lado, en cuanto al cálculo del índice de retención y regulación hídrica (IRH) se estimó en 0.36 indicando que la subcuenca tiene un nivel de retención de humedad “Muy bajo” lo que no da paso a una baja disponibilidad del recurso, la cuenca no cuenta con la capacidad de retener y regular el agua, lo que se traduce en que las comunidades asentadas en la subcuenca de la quebrada Tonchalá podrían presentar problemas de desabastecimiento hídrico lo que condicionaría el desarrollo de las múltiples actividades antrópicas ejercidas en la zona.

Con el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH) se concluye que se encuentra dentro de la categoría de “Muy Alto” es decir, son altamente vulnerable ante eventos amenazantes o fenómenos como el Niño.

La estimación del índice de calidad del agua (ICA) e índices de contaminación (ICO's) para la identificación de las características fisicoquímicas y microbiológicas de una fuente hídrica, permite que las personas que no poseen un conocimiento técnico de las variables procesadas en el laboratorio, puedan interpretar y conocer de una manera sintetizada, la situación en la que se encuentra cualquier sistema hídrico.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

La calidad de la quebrada Tonchalá para los años 2018 – 2019 vertida sobre el río Zulia se calificó como “Mala” de acuerdo al ICA valorado en promedio de 0.442 a diferencia del año 2020 presentando una mejoría categorizada en “Regular” con valor de 0.61.

En el análisis de los ICO’s se pudo observar, que los índices que evidencian una alta contaminación son el ICOMO e ICOTRO presentando desde 0.72 (Alta) hasta una calificación de 1 (Muy alta) en un estado de Eutrófico hasta Hipereutrófico, lo cual evidencia el grado de contaminación producto de los vertimientos municipales de la ciudad de San José de Cúcuta – Norte de Santander.

La subcuenca de la quebrada Tonchalá según los cálculos realizados no presenta contaminación para índices como el ICOSUS e ICOPH indicando ningún grado de contaminación.



CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

5. REFERENCIAS

- ALIAGA ARAUJO, I. J. (2017). Modelación hidrológica de la cuenca del río huallaga, aguas arriba del punto de control Santa Lorenza. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Arango Ruiz, A. (2013). Crisis Mundial del Agua. Produccion + Limpia, vol. 8 no.2.
- Asociación geológica Argentina. (1979). Aportes Hidrológicos. Buenos Aires: Revista y publicaciones.
- Avalos Lingan, R. F. (2017). Elaborar modelos hidrológicos al alcance de estudiantes universitarios. Ciencia y tecnología- Universidad Nacional Autónoma de Honduras, 177-192.
- Cañas Arias, J. S. (2010). Determinación y evaluación de índices de contaminación (ICOs) en cuerpos de agua. Bogotá D.C: Makro Construcciones LTDA.
- CONSORCIO ZULIA. (2018). Actualización del POMCA del Río Zulia (1602) Fase Diagnóstico Versión Final. Capítulo 8: Análisis Situacional. Convenio 034 de 2014 CORPONOR y el Fondo de Adaptación. San José de Cúcuta, Julio 2018. Consultado 6 de Marzo de 2021 en http://corponor.gov.co/publica_recursos/pomca/2019/zulia/2.FASE.DIAGNOSTICO.ZULIA.Final.pdf/01_ConsejoDeCuenca_Zulia_1602_vf_CORPONOR.pdf
- CORAS HUAYLLANI, N. (2019). Modelación hidrológica para la generación de caudales diarios en la subcuenca Shullcas. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- CORPONARIÑO. (2010). Ordenamiento del recurso hídrico. Miraflores: Corporación Autónoma Regional de Nariño.
- Díaz Gonzalez, P., & Suarez Rodriguez, A. M. (2019). Modelación hidrológica para el pronóstico de sequías en la cuenca del Río Pamplonita bajo escenarios de cambio climático. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Fernandez Anaya, O. G. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica Chinchao, distrito de Chinchao, provincia Huanuco, región Huanuco. Perú: Universidad Nacional Agraria De La Selva.
- Fernandez, N., Ramos, G., & Solano, F. (s.f.). Una herramienta informática para el análisis y valoración de la calidad del Agua. Pamplona: Universidad de Pamplona.

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

- García Herrán, M. (26 de Septiembre de 2013). Seminario – taller Uso de las cuentas de capital natural en la política pública WAVES. (IDEAM, Ed.) Recuperado el 3 de Noviembre de 2015, de https://www.wavespartnership.org/sites/waves/files/documents/WAVES-Presentaci%C3%B3n-ENA2010_sep_26_2013.pdf
- Gaspari, F., Rodriguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Buenos Aires: Asociación de Universidades Grupo Montevideo.
- IDEAM - UNAL. (2018). La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogota, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente.
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua (ENA). Bogotá D.C: Preliminares IDEAM.
- IDEAM. (2015). Nuevos escenarios de cambio climatico para colombia 2011 - 2100. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- IDEAM. (2018). Estudio Nacional del Agua (ENA). Bogotá D.C: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. Bogotá: IDEAM.
- La Opinión . (28 de Abril de 2016). Obtenido de Quebradas de Cúcuta están casi muertas por los desechos: <https://www.laopinion.com.co/cucuta/quebradas-de-cucuta-estan-casi-muertas-por-los-desechos-110870#OP>
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodriguez, C., & Sánchez Delgado, A. (2013). Calidad del agua en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión. Cordoba: ambi-agua.
- Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. (2010). Decreto 3930 de 2010. MVA.
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). Política Nacional para la gestión Nacional del Recurso Hídrico. Bogota D.C: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
- Montoya, A. H., & Carvajal, Y. (s. f.). Caracterización fisiográfica e Hidrológica: Cuenca hidrográfica del Río Cali. Ingeniería y Competitividad, 33-40.

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DEL AGUA

NOAA. (2020). National Centers for Environmental Information. Obtenido de Centro Nacional de

Datos Climaticos: <https://www.ncdc.noaa.gov/>

Ocampo Lopez, O. L. (2012). Análisis de la vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

Otálora Viracachá, M. C. (2019). Estrategia de gestión de la calidad fisicoquímica del agua, estudio de caso: microcuencas quebradas Carbonera y Quijana en el municipio de La Mesa, Cundinamarca. Bogotá D.C: Universidad Santo Tomás.

Restrepo, L. M., & Pimiento, M. (2018). Análisis de la relación oferta-demanda hídrica en la cuenca del Río Gualí bajo escenarios de cambio climático. Bogotá: Universidad Santo Tomás.

Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U., & Carvajal Escobar, Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Santiago de Cali: Programa Editorial Universidad del Valle.

Rodriguez Orjuela, E. (2015). Taller de intercambio de experiencias entre consejos de cuenca de Perú, Colombia y México. Consejo de cuenca del río Gualí. Cartagena: Minambiente.

Sistema de Información del Recurso Hídrico. (2012). Cálculo del Índice de retención y regulación hídrica, IRH, de la Cuenca de la quebrada La Mosca.

Tellez Rojas, A. F. (2016). Modelación hidrológica del sistema de explotación gállego-cinca de la confederación hidrográfica del ebro mediante el modelo de precipitación-escurrimiento HBV. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

UNESCO. (2003). Water for people, water for life. París: UNESCO/Mundi-Prensa Libros.

Universidad del Valle. (2002). Caracterización del Río Cauca . Hidrología.

Vasquez Rangel, C. A., Herrera Lopez, D. M., & Gutierrez Rey, Y. P. (2014). Caracterización morfométrica de la cuenca de la Quebrada Tatamaco, del municipio Villavieja del departamento del Huila, mediante el uso de la herramienta HEC-GEOHMS. 2014: Universidad Católica de Colombia.

Zabala Dávila, J. E. (2018). Determinación de los índices de calidad y contaminación del agua (Ica E Icos) sobre tramos superficiales del río de oro y Río Vetas para el análisis y verificación del cumplimiento de la normatividad colombiana. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander.