

**ANÁLISIS CLIMÁTICO E HIDROLÓGICO DE ÁREAS ABASTECEDORAS DEL
MUNICIPIO DE MANIZALES**

GLORIA MARCELA IBÁÑEZ RÍOS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
MANIZALES**

2019

Análisis climático e hidrológico de áreas abastecedoras del municipio de Manizales

Gloria Marcela Ibáñez Ríos

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Ángela María Álzate Álvarez

Docente - Tutora

Universidad Católica de Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Programa Ingeniería Ambiental

Trabajo de grado

Manizales, 2019

Contenido

GENERALIDADES	9
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Planteamiento del problema.....	12
Justificación.....	14
Objetivos.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos.....	16
Marco teórico.....	17
Antecedentes.....	17
Conceptualización.....	22
Marco normativo.....	34
Marco geográfico.....	36
METODOLOGÍA	40
Análisis de la información climática.....	41
Caracterización climática y geomorfológica.....	42
Análisis del régimen de caudales y las curvas de duración.....	42
RESULTADOS	42
Análisis de la información climática.....	43
Caracterización climática y geomorfológica.....	55
Geomorfología.....	55
Clima.....	62
Análisis del régimen de caudales y las curvas de duración.....	64
Variabilidad de la oferta hídrica en el área de estudio según indicadores ENA 2018.....	76
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Rangos y categorías del Índice de Retención y Regulación Hídrica	30
Tabla 2 - Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico	32
Tabla 3 - Parámetros fisiográficos y morfométricos cuenca del río Chinchiná y subcuencas Guacaica y río claro	38
Tabla 4 - Clasificación climática de Caldas.	62
Tabla 5 - Clasificación climática de Lang	62
Tabla 6 - Clasificación climática de Caldas – Lang	63
Tabla 7 - Clasificación climática de Manizales según Caldas-Lang	63
Tabla 8 - Caudales máximos y mínimos Romerales	66
Tabla 9 - IRH Romerales	66
Tabla 10 – Caudales máximos y mínimos Chinchiná	68
Tabla 11 - IRH Chinchiná	68
Tabla 12 - Caudales máximos y mínimos Cajones.	69
Tabla 13 – IRH Cajones.	69
Tabla 14 - Caudales máximos y mínimos California.	70
Tabla 15 – IRH California.	70
Tabla 16 - Caudales máximos y mínimos La Yé.	71
Tabla 17 – IRH La Yé.	71
Tabla 18 - Caudales máximos y mínimos La María.	72
Tabla 19 – IRH La María.	73
Tabla 20 - Caudales máximos y mínimos Olivares.	73
Tabla 21 – IRH Olivares.	73

Tabla 22 - Caudales máximos y mínimos Pinares.	74
Tabla 23 – IRH Pinares.	74
Tabla 24 - Resumen IRH.	75
Tabla 25 - Oferta hídrica en la cuenca del Río Chinchiná.	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico.	13
Figura 2 – Ciclo del Agua.	22
Figura 3 – Variabilidad y Cambio Climático.	24
Figura 4 - Interacciones en una cuenca hidrográfica.	25
Figura 5 - Sistemas que intervienen en una cuenca hidrográfica.	26
Figura 6 - Precipitación dentro de una cuenca.	27
Figura 7 - Unidades de medida de la precipitación respecto al área de una cuenca. Elaboración propia.	27
Figura 8 - Mapa índice de Retención y Regulación Hídrica.	31
Figura 9 - Localización geográfica de la cuenca del Río Chinchiná.	36
Figura 10 - Cuenca del Rio Chinchiná.	37
Figura 11 - Resumen del procedimiento metodológico.	41
Figura 12 - Datos de precipitación (1993 – 2017) - Estación La Fe.	43
Figura 13 - Datos de precipitación (1993 – 2017) - Estación Martinica.	44
Figura 14 - Datos de precipitación (1997 – 2017) - Estación Mirador.	44
Figura 15 - Datos de precipitación (1996 – 2017) - Estación Olivares.	45
Figura 16 - Datos de precipitación (2007 – 2017) – Estación Rio Blanco.	45
Figura 17 - Datos de precipitación (1997 – 2017) - Estación Romerales.	46
Figura 18 - Datos de precipitación (1993 – 2017) - Estación San Antonio.	46
Figura 19 - Régimen de precipitaciones diarias.	47
Figura 20 - Régimen de precipitaciones anuales.	48
Figura 21 - Régimen de precipitaciones mensuales.	48

Figura 22 - Régimen de precipitaciones mensual multianual.	49
Figura 23 - Curvas de Masa de las estaciones de precipitación.	50
Figura 24 - Curva doble masa de la estación La Fé.	51
Figura 25 - Curva doble masa de la estación Martinica.	51
Figura 26 - Curva doble masa de la estación Mirador.	52
Figura 27 - Curva doble masa de la estación Olivares.	52
Figura 28 - Curva doble masa de la estación Río Blanco.	53
Figura 29 - Curva doble masa de la estación Romerales.	53
Figura 30 - Curva doble masa de la estación San Antonio.	54
Figura 31 – Modelo de elevación digital – Manizales.	56
Figura 32 - Valores direcciones de flujo.	56
Figura 33 - Mapa de direcciones de flujo de Manizales.	57
Figura 34 - Mapa de Acumulación de Flujo de Manizales.	58
Figura 35 - Mapa de pendientes de Manizales.	59
Figura 36 – Mapa Red Hídrica de Manizales.	59
Figura 37 - Bocatomas que abastecen los acueductos de Manizales.	60
Figura 38 - Bocatomas Subcuenca del Río Guacaica.	61
Figura 39 - Bocatomas Subcuenca Río Chinchiná.	61
Figura 40 - Metodología calculo caudal ambiental.	65
Figura 41 - Curva de Duración de Caudales Romerales.	66
Figura 42 - Curva de Duración de Caudales Chinchiná.	67
Figura 43 - Curva de Duración de Caudales Cajones.	69
Figura 44 - Curva de Duración de Caudales California.	70

Figura 45 – Curva de Duración de Caudales La Yé.	71
Figura 46 - Curva de Duración de Caudales La María.	72
Figura 47 - Curva de Duración de Caudales Olivares.	73
Figura 48 - Curva de Duración de Caudales Pinares.	74

GENERALIDADES

Resumen

En el presente proyecto se lleva a cabo un análisis climático e hidrológico de las áreas abastecedoras de la ciudad de Manizales, con el fin de visualizar el comportamiento de la cuenca a través de un registro histórico de precipitaciones y caudales y así mismo recrear escenarios futuros, los cuales permitan tener una base para la elaboración de un sistema de alertas tempranas para los acueductos de la ciudad por escenarios de desabastecimiento. Para esto se espera obtener el régimen de lluvias y caudales, un análisis geomorfológico de la cuenca y la curva de duración de caudales donde se pueda comparar la oferta hídrica de las áreas abastecedoras con la demanda que presenta la población de Manizales.

Palabras clave: Precipitaciones – Caudales – Riesgo – Desabastecimiento – Oferta – Demanda

Abstract

In the present project, a hydrological and climate analysis of the supply areas of the city of Manizales is carried out, in order to see the behavior of the basin through a historical record of precipitations and flows and also to recreate future scenarios, which allow to have a base for the elaboration of a system of early warnings for the aqueducts of the city by shortage scenarios. For this, it is expected to obtain the rainfall and flow regime, a geomorphological analysis of the basin and the curve of duration of flows where the water supply of the supplying areas can be compared with the demand presented by the population of Manizales.

Keywords: Precipitations - Flows - Risk - Shortage - Supply – Demand

Introducción

El estudio de una cuenca hidrográfica que abastece el recurso hídrico de una población permite conocer sus dinámicas tanto actuales como históricas, y analizar cómo serán sus comportamientos futuros de acuerdo con variables como precipitación y temperatura.

Según el Plan Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico – PNGIRH – uno de los riesgos asociados al recurso hídrico es el déficit de agua, que genera problemas de disponibilidad, desabastecimiento y racionamiento del recurso, lo que genera efectos graves sobre la calidad de vida de la población y sus actividades económicas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Por lo anterior debe hacerse un adecuado análisis y gestión de las cuencas hidrográficas, conocer la variabilidad climática e hidrológica, la oferta y la demanda, los conflictos por el uso del agua, así como todas las variables que puedan aumentar la vulnerabilidad del recurso.

El área del presente estudio es la Cuenca del río Chinchiná, principalmente la subcuenca del río Guacaica y la subcuenca del río Chinchiná, que son las áreas de las cuales se abastecen los acueductos de la ciudad de Manizales.

La zona tropical donde se encuentran ubicadas estas áreas abastecedoras de acueductos hace que se presenten fluctuaciones climáticas que generan dos temporadas invernales y dos temporadas secas. Estas generan una alteración en la temperatura y precipitación dentro de la cuenca, y estos cambios producen un impacto directo en la hidrología de estas áreas, por lo que es fundamental realizar un buen análisis, tanto hidrológico, climático y geomorfológico, para así posteriormente proponer un sistema de alertas por desabastecimiento.

El presente trabajo muestra un análisis climático e hidrológico de las áreas de la cuenca del Río Chinchiná que abastecen los acueductos de la ciudad de Manizales. Para tal fin se plantearon tres fases: la primera comprende el análisis de la información climática, desde la recopilación de la información hasta la validación de la misma; la segunda fase desarrolla una caracterización climática y geomorfológica a partir de ArcGIS; por último, la fase final analiza el régimen de caudales y sus respectivas curvas de duración.

Planteamiento del problema

Colombia es un país caracterizado por la amplia oferta hídrica que posee, según el Estudio Nacional del Agua, ENA 2018, la oferta del país es tres veces mayor que la de toda Latinoamérica y seis veces superior a la oferta mundial (IDEAM, 2018).

Dicha oferta permite una gran variedad de ecosistemas dentro del territorio, además de diferentes ecosistemas estratégicos para el mantenimiento del abastecimiento hídrico, como son los páramos y humedales. Las zonas donde encontramos este recurso en mayor cantidad son en la región Amazónica, Orinoquía y Pacífico; mientras que las regiones con más concentración demográfica como la Andina y el Caribe presentan escasez en el recurso (El Universal, 2014).

El pasado director del Ideam, Ricardo José Lozano, habla de la importancia que tiene para cualquier población la presencia de la infraestructura de acueductos, además asegura que en el país estos no están contruidos de manera estratégica y la mayoría son vulnerables tanto al invierno como a la sequía y por tanto a que se presente un desabastecimiento hídrico para la población (El Universal, 2014).

En Colombia, existe el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH), con este se identifica la fragilidad de un sistema hídrico para mantener la oferta para el abastecimiento del agua ante amenazas (IDEAM, 2010), este se determina relacionando los rangos de Índice de Regulación Hídrica (IRH) y el Índice de Uso del Agua (IUA), siendo la categoría más baja un índice menor a 1 y la más crítica mayor a 100 (IDEAM, 2010).

En la figura 1 se muestra el mapa del IVH en Colombia, reportado en el Estudio Nacional del Agua (ENA) 2018, para año seco y para año medio, en el podemos observar la fragilidad de cada una de las zonas del país al desabastecimiento hídrico, se puede observar que las áreas hidrográficas más críticas son Magdalena – Cauca y Caribe, ya que son las zonas que presentan una amplia demanda hídrica tanto a nivel poblacional como de cada uno de los sectores económicos; teniendo en cuenta que Manizales se ubica dentro del área Magdalena -Cauca y según lo presentado en el mapa, la ciudad se encuentra en un nivel de vulnerabilidad medio para año medio, lo que nos indica que ante una amenaza, la oferta hídrica podría verse afectada muy fácilmente y para año seco tiene un IVH alto, indicando que ante un fenómeno del niño fuerte la cuenca estaría altamente susceptible al desabastecimiento. (IDEAM, 2018).

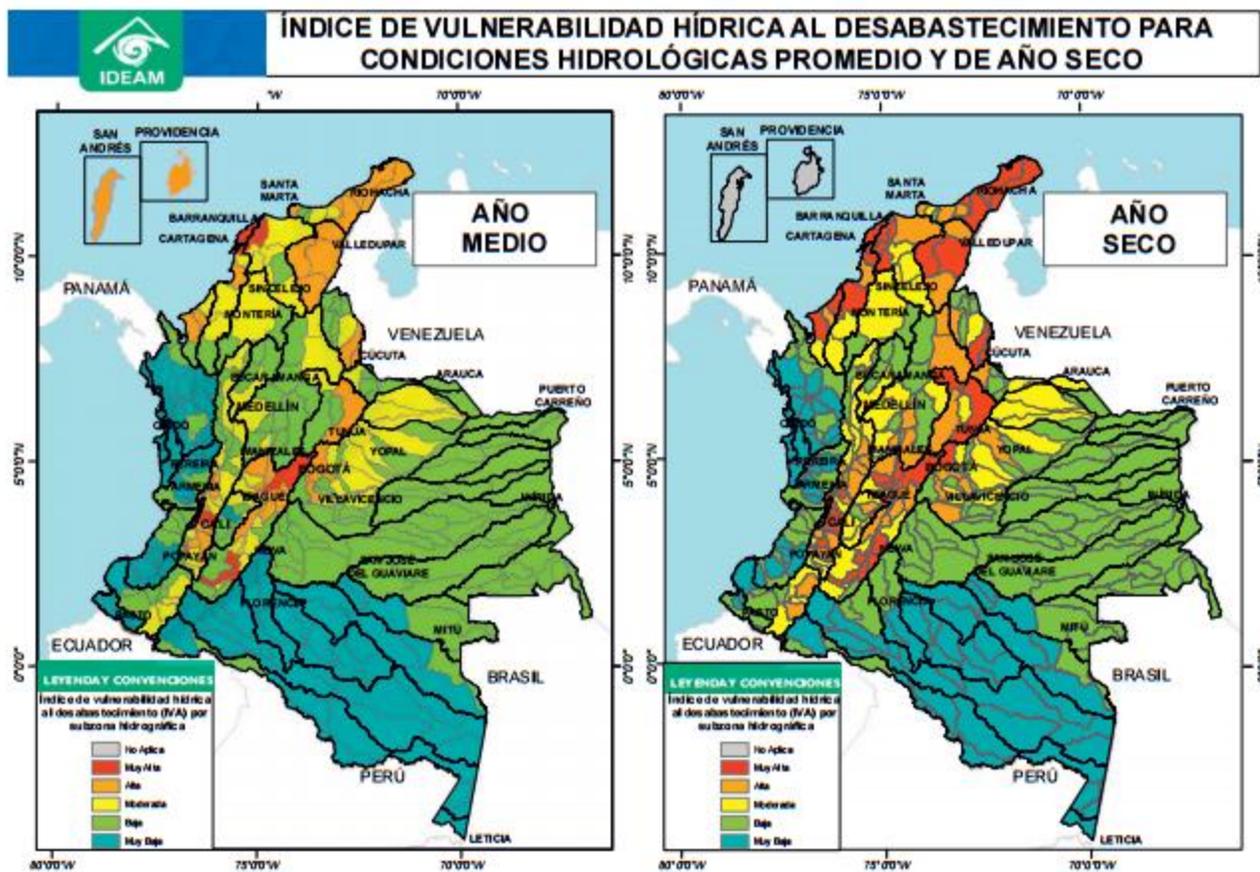


Figura 1 - Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IDEAM, 2018)

Por lo anterior este trabajo de investigación está enfocado a realizar el análisis tanto climático como hidrológico de las áreas abastecedoras de los acueductos de la ciudad de Manizales, para así poder obtener un registro del comportamiento de la Cuenca a través del tiempo y así mismo poder generar un escenario de riesgo para los acueductos de la ciudad, que además sirva como un sistema de alerta temprana y así evitar el desabastecimiento de la población en cualquier situación.

Justificación

Las cuencas hidrográficas, como áreas abastecedoras de los acueductos municipales son de gran importancia ya que proveen los bienes y servicios ecosistémicos a la población y esto los convierte en áreas de gran interés ambiental.

El aumento de las actividades antrópicas influye directamente en estas áreas, no solo por la destrucción de la flora y la fauna de los ecosistemas, sino también por la incidencia de todas estas actividades en la atmósfera, que a largo plazo generan un cambio en los regímenes climáticos, lo que afecta la temperatura, la precipitación y los caudales de las fuentes hídricas en un territorio.

Según la ficha técnica de escenarios de Cambio Climático 2011-2040 para Caldas, la temperatura media para el año 2040 aumentará en 0,9°C y la precipitación se incrementará en un 20,16% (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, 2015); esto producirá efectos graves en las cuencas con alta inclinación debido al aumento de la precipitación, y las altas temperaturas afectarían las coberturas nivales, disminuyendo su volumen.

El manejo, protección y gestión de estas áreas es de gran importancia para evitar que se presenten escenarios de riesgo que puedan afectar a la población. Partiendo desde el Decreto Ley 2811 de 1974 – Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente- en su artículo 314 determina que corresponde a la administración pública “Velar por la protección de las cuencas hidrográficas contra los elementos que la degraden o alteren y especialmente los que producen contaminación, sedimentación y salinización de los cursos de aguas o de los suelos” (República de Colombia, 1974), y en relación con lo anterior, en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico – PNGIRH – se establece como uno de sus principales objetivos “Proteger y recuperar las zonas de nacimientos de agua, así como los páramos, los subpáramos, las estrellas hidrográficas, las zonas de recarga de acuíferos y las microcuencas que surten los acueductos municipales” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Según el IDEAM, el pronóstico o análisis hidrológico permite predecir las condiciones de las fuentes hídricas (IDEAM, 2014), esto basado en un estudio del comportamiento de los cuerpos de agua y la probabilidad de que ocurran eventos extremos.

Actualmente el IDEAM cuenta con cerca de 100 estaciones hidrológicas en el país, que transmiten cada hora el comportamiento del nivel de los principales ríos del país y cuenta con un sistema denominado FEWS – Flood Early Warning System – que permite establecer las condiciones actuales y futuras de estos ríos y generar las alertas correspondientes (IDEAM, 2014).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es necesario establecer un sistema de análisis de las variables hidrológicas y climatológicas que afectan la cuenca del Río Chinchiná y sus respectivas microcuencas que abastecen los acueductos de la ciudad de Manizales, para así poder estimar las amenazas que se pueden presentar bajo el contexto de precipitación, temperatura y caudal, a partir de datos históricos y proyecciones.

Objetivos

Objetivo general

- Realizar un análisis climático e hidrológico de áreas abastecedoras del municipio de Manizales a partir de información temporal y espacial.

Objetivos específicos

- Analizar información temporal y espacial disponible
- Caracterizar geomorfológica y climáticamente la zona de estudio
- Realizar curva de duración de caudales a partir del régimen flujo

Marco teórico

En este capítulo se presentan los antecedentes de trabajos realizados respecto al tema a nivel internacional, nacional y local; además de los conceptos básicos que permitirá comprender mejor el tema y finalmente un marco normativo que dará un panorama de las diferentes leyes, resoluciones y políticas existentes en el país relacionadas con el tema de la investigación.

Antecedentes

Antecedentes a nivel internacional

Con el fin de mostrar los estudios y aplicaciones a nivel internacional del análisis climático e hidrológico y así obtener unas bases sólidas para el presente proyecto, se enuncian algunas investigaciones realizadas para el análisis de cuencas hidrográficas, sus objetivos y metodologías. Los estudios fueron seleccionados con base en su temática y la fecha de realización.

En el año 2013 en la ciudad de Madrid, España, se realiza una investigación basada en el análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España (Gonzales, Garrote e Iglesias, 2013). En la investigación se analiza el comportamiento de las distintas variables climáticas como precipitación, temperatura, evaporación y escorrentía, que intervienen en el ciclo hidrológico; analizando su situación actual y un escenario de cambio climático en el ámbito de todas las cuencas que cubren el territorio de España peninsular. Para el desarrollo de esta utilizaron 3 fases metodológicas:

1. Generación series variables climáticas: Donde realizan los cálculos estadísticos representativos de las variables en las cuencas hidrográficas, para obtener series de temperatura, precipitación, evaporación y escorrentía.
2. Comparación con datos observados: En este paso llevan a cabo un contraste entre series de escorrentía observados y series de escorrentía actuales para así obtener un sesgo.

3. Comparación de escenarios climáticos: Donde realizan un contraste entre la situación actual y el escenario de cambio climático de las variables, para obtener el coeficiente de variación.

Los resultados muestran que las proyecciones climáticas tienen un incremento en los valores medios de temperatura y una disminución en la precipitación, evaporación y escorrentía, además de un incremento en el coeficiente de variación (Gonzales, et al, 2013). Lo que les permite concluir que el análisis de proyecciones de cambio climático en situación actual y futura permiten representar el comportamiento hidrológico y la determinación de las variaciones de las variables climáticas como consecuencia del cambio climático (Gonzales, et al, 2013).

Otro caso a nivel internacional se presenta en el año 2014 en la Universidad Politécnica de Valencia, donde se desarrolla una tesis de grado titulada “Estudio del comportamiento hidrológico de una pequeña cuenca forestal” (Barbero, 2014). En esta investigación se lleva a cabo la determinación del caudal pico de escorrentía para una cuenca ubicada en la provincia de Valencia, con un tamaño de aproximadamente 800 Ha; esto con el fin de conocer la cantidad de agua que circula por la misma y poder analizar los procesos erosivos o inundaciones que podría causar.

Los datos necesarios para el análisis se realizan utilizando el Sistema de Información Geográfico ArcGIS, y los cálculos de escorrentía se llevan a cabo por el Método Racional y el Método de Número de Curva (Barbero, 2014).

Como conclusión a cerca de esta investigación es que se deja aún más clara la importancia del uso del SIG para este tipo de análisis, ya que permite automatizar en gran medida los procesos sin importar la cantidad de información que se trabaje, obteniendo así mejores resultados.

Antecedentes a nivel nacional

En Colombia se han realizado estudios a cerca del comportamiento de algunas cuencas hidrográficas que abastecen distintas poblaciones.

Uno de ellos se realizó en el año 2018 en la Universidad Católica de Colombia, el proyecto se denomina “Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la Quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare” (Díaz y Alarcón, 2018).

En esta investigación se lleva a cabo un balance hídrico de la cuenca de la Quebrada Niscota, para determinar si es una fuente potencial para el abastecimiento del acueducto que beneficia 6 veredas en el municipio de Nunchía (Díaz, Alarcón, 2018), para ello utilizan el siguiente proceso metodológico:

1. Búsqueda de la información necesaria: Se realiza la búsqueda de censos, datos meteorológicos, imágenes satelitales y mapas geológicos de la cuenca (Díaz, Alarcón, 2018).
2. Análisis de la información: Con ayuda del Sistema de Información Geográfica SIG se encuentran los diferentes parámetros morfológicos de la cuenca y con el software Hec Ras se determinan los caudales mínimos y máximos (Díaz, Alarcón, 2018).
3. Balance hídrico: Este permite conocer la oferta hídrica y compararla con la demanda hídrica requerida para abastecer a la población (Díaz, Alarcón, 2018).

De acuerdo con lo realizado anteriormente, concluyen que el caudal de la cuenca en todas las épocas del año se encuentra dentro del rango de valores necesarios para el abastecimiento hídrico de esta población (Díaz, Alarcón, 2018).

Esta investigación permite reconocer otro de los factores más importantes dentro del análisis hidrológico de una cuenca y es el cálculo de la oferta y demanda que tiene una población y poder analizar en qué momento se generará un desabastecimiento en los acueductos.

En la misma universidad, en el año 2017 se realiza la investigación “Análisis hidrológico de la microcuenca del río Urichare ubicada en el municipio de Lejanías, Meta” (Cruz y Narvaez, 2017).

El proyecto está enfocado en el desarrollo de un estudio técnico para iniciar obras de protección en la microcuenca del río Urichare, ya que este ha afectado a la población aledaña por crecientes en épocas de invierno (Cruz y Narvaez, 2017).

Para esto se determina la morfología de la microcuenca hidrológica, además se realiza un análisis y evaluación de la precipitación mediante registros históricos, obteniendo así las curvas de intensidad, frecuencia y duración, así como un modelo hidrológico de intensidad de lluvias de la microcuenca del río Urichare (Cruz y Narvaez, 2017).

Una vez llevada a cabo la anterior metodología, se realiza una modelación de la cuenca mediante el software Hec Ras para obtener el caudal máximo de la cuenca (Cruz y Narvaez, 2017). Esto es de gran importancia para la minimización del riesgo de inundación en las poblaciones estudiadas.

Antecedentes locales y regionales

En la ciudad de Manizales se han realizado pocos estudios en referencia al tema, a continuación, se citan 2 investigaciones encontradas.

En el año 2017, se realizó una tesis de maestría en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, con título “Estimación de la amenaza por déficit hídrico en acueductos municipales con problemas de abastecimiento en Caldas” (Marulanda, 2017).

Este trabajo tenía como objeto estimar cuál sería la amenaza por desabastecimiento hídrico en los acueductos de distintos municipios del departamento de Caldas; para esto utiliza una metodología dividida en 4 pasos (Marulanda, 2017):

1. Caracterización de la sequía meteorológica.
2. Régimen de la oferta frente a la demanda hídrica.
3. Curva de recesión entre condiciones medias y mínimas.
4. Análisis probabilístico de caudales mínimos.

Las conclusiones de esta investigación permiten identificar el déficit en la oferta hídrica para el desabastecimiento de los acueductos, reconocer la recurrencia de estos eventos y caracterizar las sequías para poder llevar a cabo medidas de adaptación y mitigación (Marulanda, 2017).

El anterior trabajo representa en parte lo que se quiere lograr en la actual investigación, generando un análisis a partir de series históricas, permitiendo así estar preparados para un evento de desabastecimiento hídrico.

Igualmente, en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, en el año 2012, se desarrolló un estudio denominado “Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático” (Ocampo, 2012).

En este estudio se incluye la caracterización física y climática de la cuenca del río Chinchiná, así como su balance hidrológico; la investigación estima las alteraciones en el régimen hidrológico y en la oferta hídrica por la variabilidad climática (Ocampo, 2012). Emplea distintos indicadores del régimen hidrológico que le permiten identificar que la cuenca tiene una baja capacidad de retención y regulación hídrica (Ocampo, 2012).

Los resultados obtenidos anteriormente son de gran importancia para esta investigación, ya que analiza a profundidad la cuenca del río Chinchiná, que es nuestra área de estudio, generando incluso un análisis de vulnerabilidad por desabastecimiento, lo que da otro sustento para el estudio que se realiza actualmente.

Conceptualización

Ciclo hidrológico

El agua es un recurso vital para todos los seres vivos. La UNESCO afirma que:

Aproximadamente el 70% de la superficie del globo está cubierta de agua, y menos del 3% de ella es agua dulce. Esta agua dulce se presenta en diversas formas: 79% en forma de hielos polares y 20% en forma de agua subterránea difícilmente accesible. Solo un 1% se encuentra fácilmente disponible en ríos, lagos y pozos (UNESCO - UNCCD, 1997).

El agua de nuestro planeta se encuentra siempre en constante movimiento; el ciclo del agua o ciclo hidrológico describe cada uno de esos movimientos sobre y dentro de la superficie terrestre, además de describir los cambios de estado que sufre el agua durante el proceso, pasando por líquido, vapor y sólido (USGS, 2017).

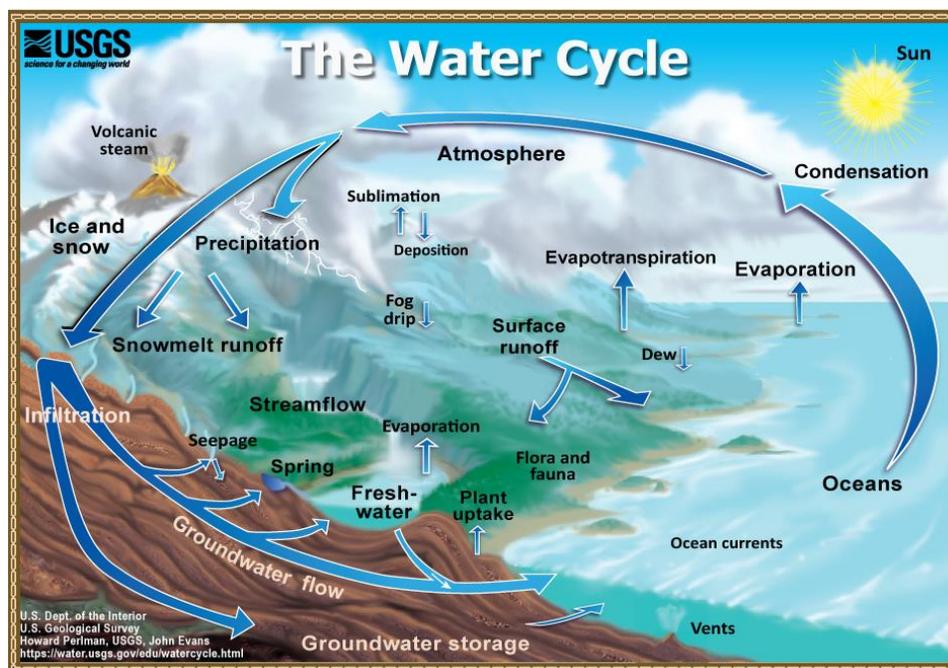


Figura 2 - Ciclo del agua - (USGS, 2017)

- **Evaporación:** Es el proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, la evaporación permite que el agua líquida ingrese de nuevo a la atmósfera en forma de vapor (USGS, 2018).
- **Condensación:** En este proceso el agua pasa de estado gaseoso a líquido, gracias a este proceso se forman las nubes y la niebla (USGS, 2018).
- **Precipitación:** Es el proceso donde el agua es liberada de las nubes en forma de lluvia, nieve o granizo, y es así como el agua retorna a la tierra (USGS, 2018).

Clima

Existen diversos factores que determinan el clima en el país, primero que todo influye la localización en la franja ecuatorial donde actúa la zona de convergencia intertropical, igualmente por su ubicación el país se ve afectado por los procesos que ocurren en el Océano Pacífico y Atlántico, además de la influencia que genera la gran extensión de vegetación como es la cuenca del Amazonas. La orografía también condiciona nuestro clima por las grandes cordilleras existentes que interactúan con los vientos alisios (IDEAM - UNAL , 2018).

La OMM (Organización Meteorológica Mundial) define clima como “Síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo de los elementos meteorológicos en dicho lugar” (OMM, 2012), el tiempo como “Estado de la atmósfera en un instante dado, definido por los diversos elementos meteorológicos” (OMM, 2012) y la variabilidad climática como “Desviación de las estadísticas del clima de un determinado periodo respecto a las estadísticas a largo plazo de dicho periodo” (OMM, 2012) mientras que cambio climático está definido como “Modificación a largo plazo del clima producida por uno o más de los siguientes factores: i) cambios internos dentro del sistema climático; ii) interacción entre componentes climáticos; iii) cambios en fuerzas externas originados por fenómenos naturales o actividades humanas” (OMM, 2012).

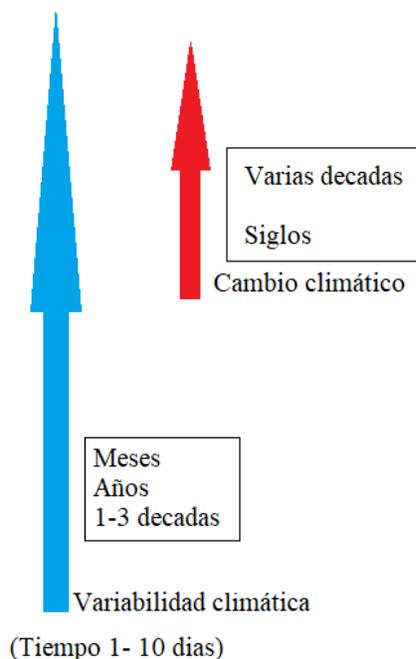


Figura 3 - Variabilidad y cambio climático (Elaboración propia)

La variabilidad climática puede dividirse en tres tipos: la variabilidad intraestacional que se presenta en el transcurso de una estación a otra; la variabilidad interanual que corresponde a las fluctuaciones en ciclos con periodos de más de un año; y la variabilidad interdecadal que se expresa en ciclos con periodos de más de 10 años (IDEAM - UNAL , 2018).

Por otra parte, el cambio climático muestra estas modificaciones del clima en ciclos de largo periodo, y este puede estar asociado a influencias externas como ciclos solares y cambios en la incidencia de los rayos solares, o por influencias externas tales como cambios en la composición atmosférica y procesos antrópicos (IDEAM - UNAL , 2018).

El cambio climático tiene una clara incidencia en la oferta hídrica, lo que a largo plazo producirá alteraciones en las dinámicas ecosistémicas y cambios en el ciclo hidrológico; lo cual traerá consigo cambios en la calidad del agua de las fuentes hídricas (Ministerio del Ambiente , S.F).

Cuenca Hidrográfica

Según el artículo 2.2.3.1.1.3 del Decreto 1076 de 2015, se entiende como cuenca hidrográfica “el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que,

a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, pág. 270).

En una cuenca hidrográfica interactúan recursos naturales y población, donde el factor determinante es el recurso hídrico (Charria, 2012).

El territorio de una cuenca crea una dependencia de sus habitantes al sistema hídrico, por lo que se debe lograr una buena gestión y manejo de estos recursos.

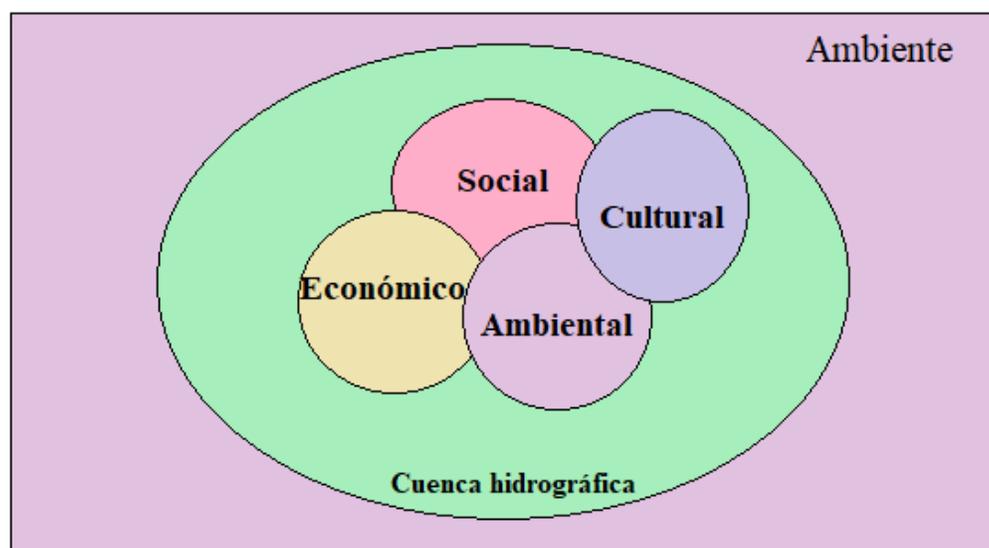


Figura 4 - Interacciones en una cuenca hidrográfica (Elaboración propia basada en (Charria, 2012))

Componentes de la cuenca hidrográfica

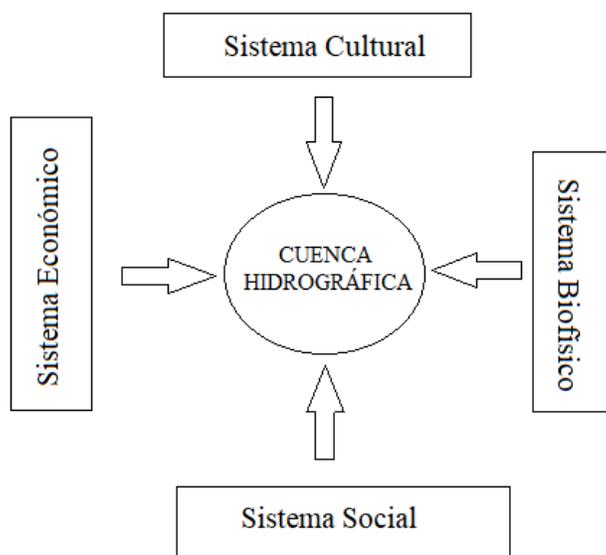


Figura 5- Sistemas que intervienen en una cuenca hidrográfica. Elaboración propia basada en (Charria, 2012)

- **Sistema biofísico:** Características como clima, suelo, hidrología, flora y fauna (Charria, 2012).
- **Sistema cultural:** Relacionado con las costumbres, creencias y normas de un lugar (Charria, 2012).
- **Sistema económico:** Se refiere a los sistemas de producción, consumo, ingresos y usos de la tierra en el territorio (Charria, 2012).
- **Sistema social:** Elementos demográficos, población, ocupación, edades, etc. (Charria, 2012).

Precipitación

Según (Moreno, 2003) se define como precipitación a la caída de agua sobre la superficie terrestre en cualquiera de sus formas, pero principalmente en estado líquido como lluvia.



Figura 6 - Precipitación dentro de una cuenca. Elaboración propia

Se suele expresar en unidades de longitud, como la altura de agua que cubriría un plano horizontal si no hubiera escorrentía, infiltración ni evaporación ($1\text{mm}=1\text{L}/\text{m}^2$)

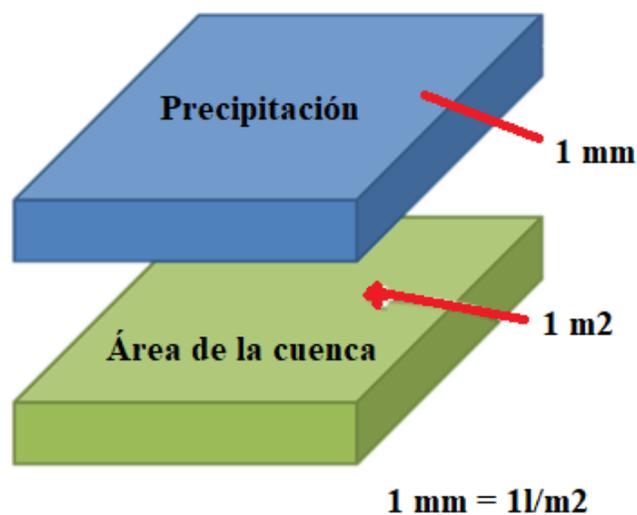


Figura 7 - Unidades de medida de la precipitación respecto al área de una cuenca.

Elaboración propia

Medidores de precipitación

- **Pluviómetro:** Es un instrumento que se emplea para recolectar y medir la precipitación. La cantidad de agua caída se expresa en milímetros de altura (Larrinaga, 2015).

- **Pluviógrafos:** Según (Alcides, 2013), es un instrumento meteorológico empleado en el estudio y análisis de la precipitación. Tiene como función registrar de forma continua la cantidad de precipitación en un periodo determinado, además puede registrar la intensidad de las lluvias y su variación en el tiempo.

Análisis de consistencia de los datos

Durante la obtención de información de las estaciones pluviométricas se pueden generar varios tipos de errores, como errores de observación, de transcripción, de cálculo, de copia y de impresión. Para determinar la consistencia de los datos se hace el análisis doble masa.

- **Análisis de doble masa:** Este método considera que, en una zona meteorológica homogénea, los valores de precipitación que ocurren en diferentes puntos de esta zona en periodos anuales o estacionales, guardan una relación de proporcionalidad que puede representarse gráficamente (Moreno, 2003).

El análisis se realiza mediante una gráfica en la cual se ponen las precipitaciones acumuladas a lo largo del tiempo de la estación en cuestión, con respecto a las estaciones de referencia. Esto nos permite analizar por medio de la pendiente la homogeneidad de los datos utilizados (Bateman, 2007).

Curva de masa

Según una guía de hidrología presentada por la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, una curva de masa se define como “La curva de precipitación acumulada en un determinado periodo, representada en un sistema de ejes en que se grafican los valores de tiempo en abscisas y de precipitación acumulada en ordenadas” (Segerer y Villodas, 2006).

Esta es una curva no decreciente, y la pendiente de la tangente en cualquier punto representa la intensidad instantánea en ese tiempo (Darwin, 2018).

Caudal

Se conoce como caudal al volumen del líquido que pasa por una sección normal de corriente de agua, medida en una unidad de tiempo (CEPIS, SF).

Medición del caudal

- **Vertedero:** Son aberturas sobre las que se desliza el líquido, se suelen usar para medir caudales en conducciones libres. Pueden ser rectangulares o triangulares.
- **Medición directa:** Se realiza midiendo el tiempo T en que se llena el volumen de una unidad.
- **Canaleta parshall:** Este posee un estrechamiento y un resalto, el cual sirve un caudal a semejanza de un vertedero.

Caudal Ambiental

Este es definido en el POMCA del Río Chinchiná como “El volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo” (Corpocaldas, 2013).

Curva de duración de caudales

Según lo propuesto por Denis Martínez de la Cruz en su trabajo “Estimación de CDC sintéticas mediante la aplicación de ecuaciones empíricas en los ríos del norte del Perú” se define la curva de duración de caudales como:

Para una cuenca, la CDC representa la relación entre la magnitud y la frecuencia de caudales diarios, semanales, mensuales, etc., permitiendo realizar estimaciones de porcentaje de tiempo en el cual un caudal determinado es igualado o excedido en el periodo de registro (Martínez de la Cruz, 2016).

La CDC es muy útil para determinar si una fuente hídrica es suficiente para abastecer la demanda hídrica de una población.

Indicadores hidrológicos

Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

Mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base a la distribución de las frecuencias de los caudales diarios, este índice está en el rango entre 0 y 1, siendo los más bajos los de menor retención (Orarbo, s.f).

Para el caso de la cuenca del Río Chinchiná, está en un promedio de 0,56 que se categoriza como bajo (Corpocaldas, 2013).

A continuación, se muestra una tabla con los rangos del Índice de Retención y Regulación Hídrica:

Rango de valores IRH	Categoría	Características
> 0.85	MUY ALTO	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy alta
0.75 - 0.85	ALTO	Capacidad de la cuenca para retener y regular alta
0.65 - 0.75	MEDIO	Capacidad de la cuenca para retener y regular media
0.5 - 0.65	BAJO	Capacidad de la cuenca para retener y regular baja
<0.5	MUY BAJO	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy baja

Tabla 1- Rangos y categorías del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IDEAM,2013)

En el Estudio Nacional del Agua, se muestra un mapa con el IRH para cada una de las regiones del país. En las áreas de Pacífico, Amazonía y Cauca se presenta alta capacidad para mantener y regular la humedad y se hace evidente la baja regulación en la zona

Magdalena-Cauca, Orinoco y Caribe. Las condiciones más críticas de regulación se dan en el departamento de la Guajira (IDEAM, 2018).

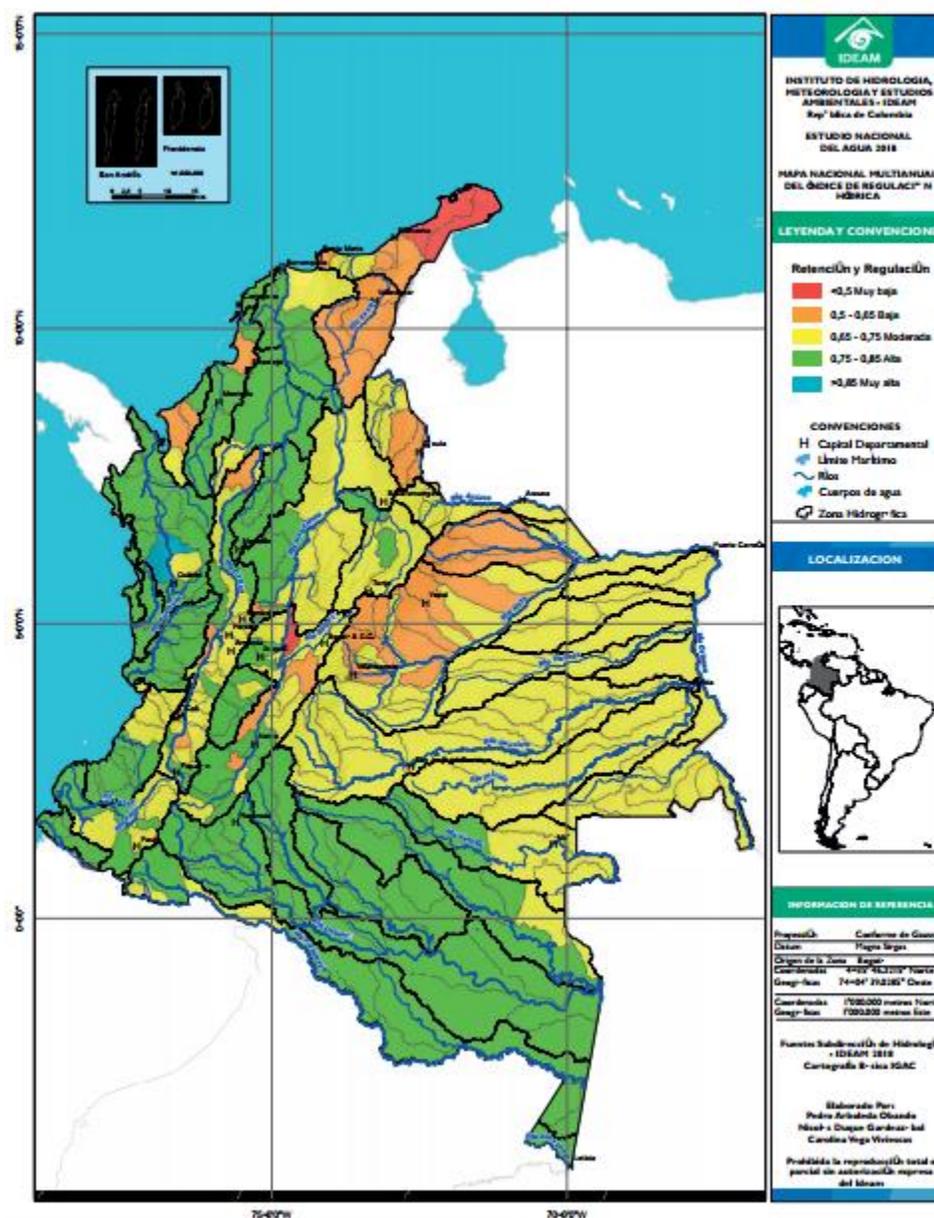


Figura 8 - Mapa índice de Retención y Regulación Hídrica (IDEAM, 2018)

Índice de Vulnerabilidad Hídrica por Desabastecimiento

Representa el grado de fragilidad de un sistema hídrico para mantener la oferta para el abastecimiento del agua (IDEAM, 2018). Se determina relacionando el Índice de Regulación Hídrica con el Índice de Uso de Agua (IDEAM, 2018).

A continuación, se muestra la tabla con las categorías del IVH presentada en el Estudio Nacional del Agua 2014:

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	Critico	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

Tabla 2- Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IDEAM, 2014)

SIG para la caracterización de cuencas hidrográficas

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es aquel que permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica (MinEducación, s.f). Estos están diseñados para capturar, almacenar, manipular y analizar toda la información de forma lógica y ordenada (MinEducación, s.f).

Dentro de un SIG, cada archivo tiene asociado una base de datos con variables georreferenciadas, lo que permite espacializar la información (Ocampo, 2012).

Actualmente existen diversos tipos de SIG, entre los principales están ArcGIS, Mapwindow, Quatum GIS entre otros, y uno de los principales procedimientos para lo que están siendo usados actualmente es para extraer características hidrológicas de un Modelo Digital de Elevación (DEM) (Ocampo, 2012).

Un DEM se define como “Una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo” (INEGI, s.f).

Software ArcGIS

Este es un sistema que permite recopilar, organizar, analizar y compartir información geográfica; es la plataforma líder en Sistemas de Información Geográficos (SIG) (ArcGIS Resources, sf).

Según la empresa mexicana SIGSA, líderes en SIG, ArcGIS permite realizar diferentes funciones (SIGSA, sf), tales como:

- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes
- Compilar información geográfica
- Crear y administrar bases de datos geográficas
- Resolver problemas con análisis espacial

Marco normativo

El desarrollo normativo ambiental colombiano parte desde el año 1972 cuando se realiza la Cumbre de la tierra en Estocolmo, en la cual se llevó a cabo un desarrollo a la política internacional del medio ambiente (Ramírez y Antero, 2013). Esta cumbre conllevó al desarrollo de la Ley 23 de 1973 donde se dictan disposiciones para la protección al medio ambiente (Congreso de Colombia, 1973).

A partir de esta ley surge en Colombia el Decreto Ley 2811 de 1974, en la cual se establece el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, donde se incluye todo lo relacionado con el uso y aprovechamiento del recurso hídrico; además se establece que el medio ambiente es objeto de interés social (República de Colombia, 1974).

Otro logro importante dentro del desarrollo normativo ambiental en el país es la Constitución Política de 1991, en la cual se incluyeron 49 artículos dirigidos a la protección del medio ambiente y los recursos naturales (Galvis, 2011).

También debe tenerse en cuenta la Cumbre de Río de Janeiro de 1992, donde se realizó la carta a la tierra, y a partir de esta se generó para Colombia la Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio de Ambiente, actualmente llamado Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ramírez y Antero, 2013).

Otra normativa importante a nivel nacional es la Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico (PNGIRH), desarrollada en el año 2010 para garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, considerando el agua como factor de desarrollo económico y bienestar social; articulando el uso eficiente al ordenamiento del territorio y a la conservación de los ecosistemas (Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010).

En materia del recurso hídrico, en el año 2007 se expide el Decreto 1323 de 2007 donde se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico – SIRH (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007), en el año 2010 se expide el Decreto 3930, el cual define los usos del agua y los residuos líquidos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010); y el Decreto 1640 de 2012 por medio del cual se reglamentan los instrumentos de planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (IDEAM , 2012); todos ellos contenidos en el

Decreto Único Reglamentario el Decreto 1076 de 2015 del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Marco geográfico

Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Chinchiná está localizada en la región Centro-Sur del departamento de Caldas, sobre la vertiente occidental de la cordillera Central; pertenece a la zona Hidrográfica Magdalena-Cauca y es el afluente más importante del río Cauca por su margen derecha. La extensión de la cuenca es de 1052.25 km², que corresponden al 14% del área total del departamento de Caldas. (Corpocaldas, 2013).

Localización geográfica de la cuenca del Río Chinchiná

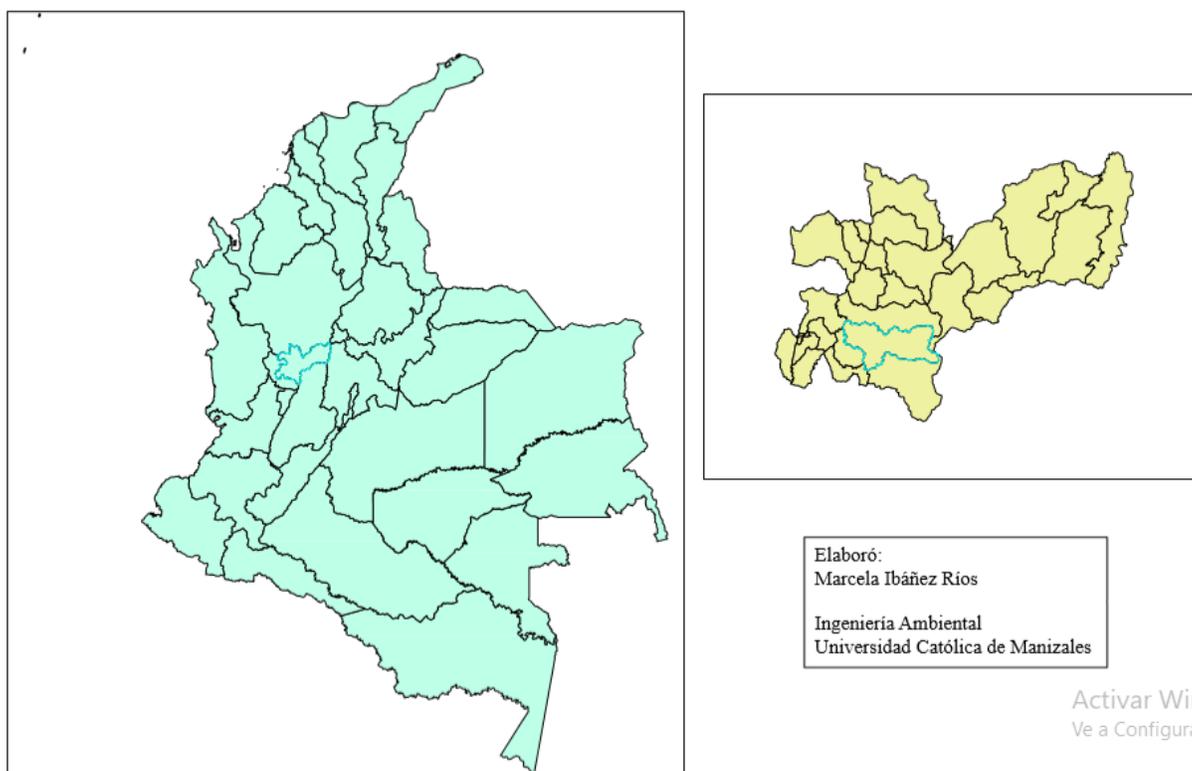


Figura 9 - Localización geográfica de la cuenca del Río Chinchiná

Características físicas de la cuenca

Red hídrica

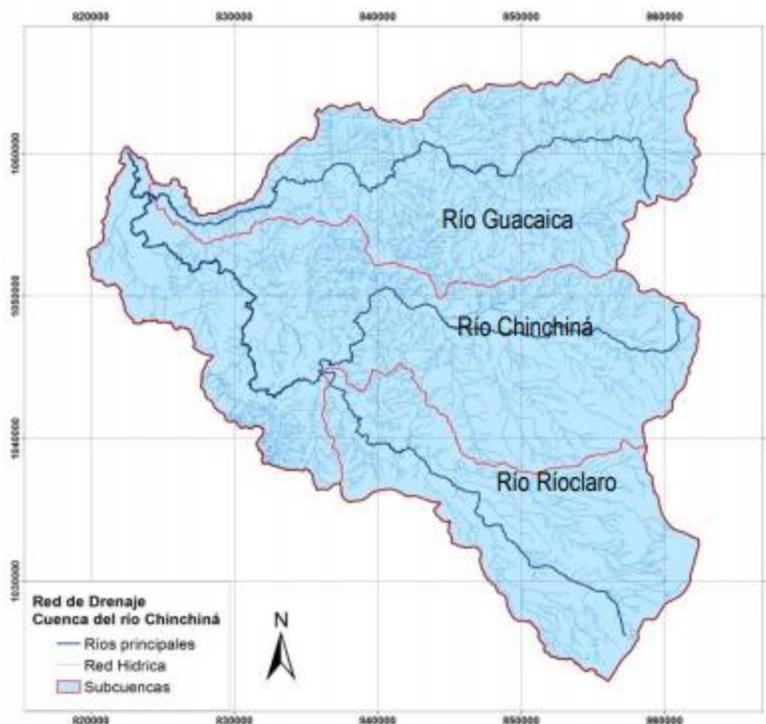


Figura 10 - Cuenca del Río Chinchiná (Corpocaldas, 2013)

La cuenca del Río Chinchiná se divide en 3 subcuencas, la subcuenca del Río Guacaica, la subcuenca del Río Chinchiná y la subcuenca de Río Claro, cada una compuesta por diferentes fuentes hídricas, según (Corpocaldas, 2013), toda la cuenca del Río Chinchiná se divide en 61 microcuencas:

- 1) **Subcuenca del río Guacaica:** Río Blanco y las quebradas Olivares, Moravia, El Crucero, Negra, Las Ánimas, Cajones, San Narciso, El Gus, Mina rica, San Juan, San Andrés, San Pedro, San Pablo, El Cofre, Farallones, Los Alpes, La Matilda, Dantas y los aferentes directos al río Guacaica (Corpocaldas, 2013, P. 18).
- 2) **Subcuenca del río Chinchiná:** Aferentes directos y las quebradas Carminales, los Lobos, Cartagena, El Purgatorio, Manzanares, El Rosario, Cameguadua, Los Cuervos, San

Juan o San Julián, San Miguel, El Arroyo, La Floresta, La Diana, El Chiflón, Marmato, Versailles, Palogrande, Camelia, 2515-002-091, La Monina, El Molino, El Perro, Manizales, Chupaderos, Palmichal, La María o Tolda Fría, La Oliva, La Rochela, La Zulia, El Diamante, La Siberia, La Negra. (Corpocaldas, 2013, P. 18).

3) Subcuenca del río Rioclaro: río Molinos y las quebradas Santo Domingo, La Bella, Las Nereidas, Juntas y los aferentes directos al Rioclaro (Corpocaldas, 2013, P. 18).

Fisiografía y Morfología de la cuenca

La cuenca del río Chinchiná se extiende en su parte más alta hasta los 5200 msnm en el Nevado del Ruiz y en su parte más baja a 800 msnm en su desembocadura en el río Cauca (Marín, 2015).

La cuenca se caracteriza por una topografía abrupta que consiste en altas pendientes y lecho rocoso (Corpocaldas, 2013).

Las principales características de la cuenca, como área, pendiente, coeficiente de forma, entre otros, se resumen en la siguiente tabla tomada del POMCA del Río Chinchiná presentado por Corpocaldas:

Parámetro	Unidades	Cuenca Chinchiná	Río Guacaica	Río Claro
Área	Km ²	1052.25	337.81	244.58
Perímetro	Km	184.35	117.57	91.26
Longitud cuenca	Km	49.72	38.64	29.31
Longitud cauce	Km	77.58	52.67	36.87
Pendiente media	%	36.18	37.38	40.28

Tabla 3 - Parámetros fisiográficos y morfométricos cuenca del río Chinchiná y subcuencas Guacaica y río claro (Corpocaldas, 2013)

Clima en la cuenca

El clima de la cuenca es de tipo intertropical con pequeñas fluctuaciones de temperatura en el año, grandes fluctuaciones diarias y una distribución bimodal de lluvias (2 periodos secos y 2 periodos húmedos), esto es causado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

La ZCIT es la zona de máxima nubosidad y lluvia, ocasionada por la convergencia de vientos alisios del Noreste y Sureste. En Colombia determina la presencia de lluvias por la interacción atmosférica entre la Orinoquía y el Pacífico (IDEAM , 2009).

Geología de la cuenca

Esta zona está constituida por rocas ígneas y metamórficas, y está cubierta en grandes extensiones de mantos de caída piroclástica (Corpocaldas, 2013).

Flora en la cuenca

Dentro de la cuenca del Río Chinchiná, se registran un total de 1266 especies de plantas vasculares, de las cuales 181 especies corresponden al grupo de los helechos y 085 a las angiospermas (Corpocaldas, 2013).

Las familias más diversas, de acuerdo con el número de géneros fueron, en su orden, Orchidaceae (47), Asteraceae (38), Rubiaceae (17) y Solanaceae (16) y en cuanto al número de especies, Orchidaceae (123), Asteraceae (76), Solanaceae (53), Piperaceae (52) y Araceae (50) (Corpocaldas, 2013, P. 43).

Fauna en la cuenca

Según los reportes e inventarios de la mastofauna del departamento de Caldas, reportados en el POMCA del Río Chinchiná, dentro de la cuenca se encuentran un total de 101 especies de mamíferos, de los cuales 82 pertenecen al municipio de Manizales y se registran 23 especies con algún grado de amenaza (Corpocaldas, 2013), también se encuentran 643 especies de aves y 63 especies de peces (Corpocaldas, 2013).

METODOLOGÍA

Materiales

En esta investigación se utilizó principalmente la herramienta Excel para el análisis y consignación de datos, también se utilizó el software ArcGIS en el campo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la realización de los mapas necesarios.

Tipo de investigación

Este trabajo se ha desarrollado como una investigación exploratoria y descriptiva.

La investigación exploratoria se centra en analizar e investigar aspectos concretos de la realidad que aún no han sido analizados en profundidad, en este tipo de investigación se encuentran patrones significativos dentro de datos analizados y la investigación descriptiva que se basa en realizar una descripción detallada de un fenómeno, no busca las causas sino el estado de la situación (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2010).

El análisis hidrológico y climático de una cuenca abastecedora ha sido un trabajo explorado en los últimos años en diferentes lugares, sin embargo, específicamente para las áreas abastecedoras de acueductos de la ciudad de Manizales no se cuentan con antecedentes, esto otorga el carácter exploratorio a la investigación, y el carácter descriptivo por el análisis que se realizará a los resultados obtenidos.

Este proyecto se realizó en tres fases: recopilación y análisis de información climática, caracterización climática y geomorfológica y análisis de régimen de caudales y curvas de recesión.

Métodos

Para la realización de este trabajo se planteó una metodología que consiste en tres fases principales:

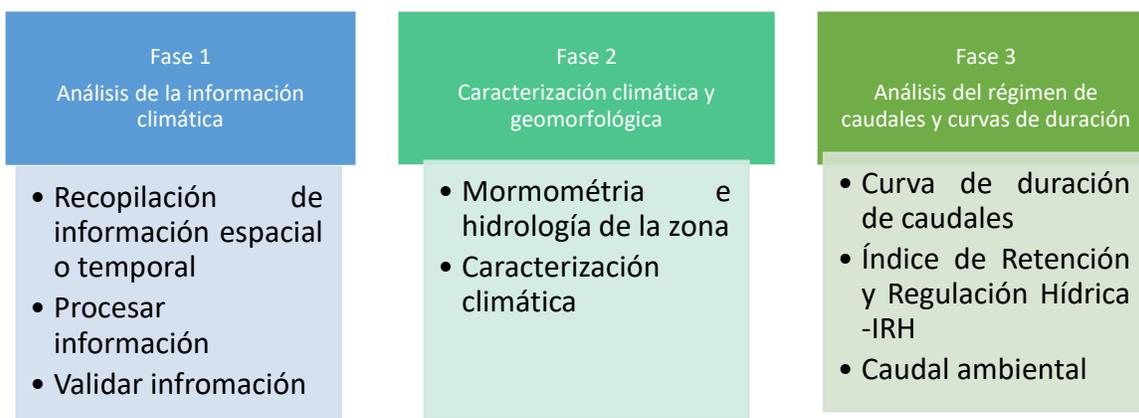


Figura 11 - Resumen del procedimiento metodológico

Análisis de la información climática

Inicialmente se realizó una solicitud de información climática de las estaciones de precipitación y caudales pertenecientes a la empresa Aguas de Manizales S.A.E.S.P, con la ayuda de Alejandro Marulanda Aguirre (Ingeniero Civil de la Universidad Nacional, especialista en Ingeniería hidráulica y ambiental, y magister en Recursos hidráulicos).

Una vez obtenida la información, se pasa al proceso de organización, donde se ordena la información de precipitación y caudales diaria desde el año 1993 hasta el año 2017.

Ya con las bases de datos listas, se valida la información eliminando datos erróneos y ya así queda completo el análisis de la información.

Terminado el proceso de validación de la información, se procede a graficar el régimen de lluvias de cada una de las estaciones individualmente, para observar el comportamiento que han tenido a través de los años. Seguido de esto se grafican las lluvias diarias de todas las estaciones, e igualmente se obtiene el régimen de precipitaciones anuales, mensuales y mensual multianual;

todo esto con el fin de analizar cómo han sido las lluvias a lo largo del tiempo en las subcuencas que surten los acueductos de la ciudad de Manizales.

Posteriormente se realizan las curvas de masa y curvas de doble masa de cada una de las estaciones, con el fin de observar cómo se comporta el régimen de lluvias de cada estación con respecto al promedio de todas las estaciones.

Caracterización climática y geomorfológica

En la segunda fase del proyecto se llevó a cabo un análisis y descripción de la geomorfología y el clima de la cuenca. Para esto se realizan diferentes mapas en el software ArcGIS, los cuales muestran el relieve de la zona y de acuerdo a esto se diseña el comportamiento que llevan las fuentes hídricas. Además, se presentan las longitudes de los ríos principales que recorren la ciudad y que hacen parte de las subcuencas abastecedoras y también se muestra la red hídrica en general. Seguido de esto se realiza un análisis del clima según la clasificación climática de Caldas-Lang.

Análisis del régimen de caudales y las curvas de duración

En esta fase se realiza el análisis de los regímenes de caudales para cada estación, a partir de estos datos diarios se construyen las Curvas de Duración de Caudales para realizar el análisis del tiempo en que los caudales son igualados o excedidos; y a partir de esto hallar la tendencia de regulación de cada estación.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos, siguiendo la metodología planteada.

Análisis de la información climática

Una vez definida el área de estudio, se procedió a realizar la consulta de entidades que realizan monitoreo hidroclimatológico de la zona.

Se trabajó con la información suministrada por la empresa Aguas de Manizales S.A E.S.P, con 7 estaciones de precipitación y 8 estaciones de caudal.

Para realizar un estudio hidrológico es esencial comprender el comportamiento de la precipitación, la cantidad de lluvias en un lugar es determinada por la nubosidad de la zona, la altitud y la orientación de las montañas (Jaramillo, 2005).

Para el estudio se analizaron los registros de precipitación diaria de las estaciones: La Fe (1993 – 2017), Martinica (1993 – 2017), Mirador (1997 – 2017), Olivares (1996 – 2017), Rio Blanco (2007 – 2017), Romerales (1997- 2017) y San Antonio (1993 – 2017).

A continuación, se presentan las gráficas de los datos obtenidos de cada estación de precipitación.

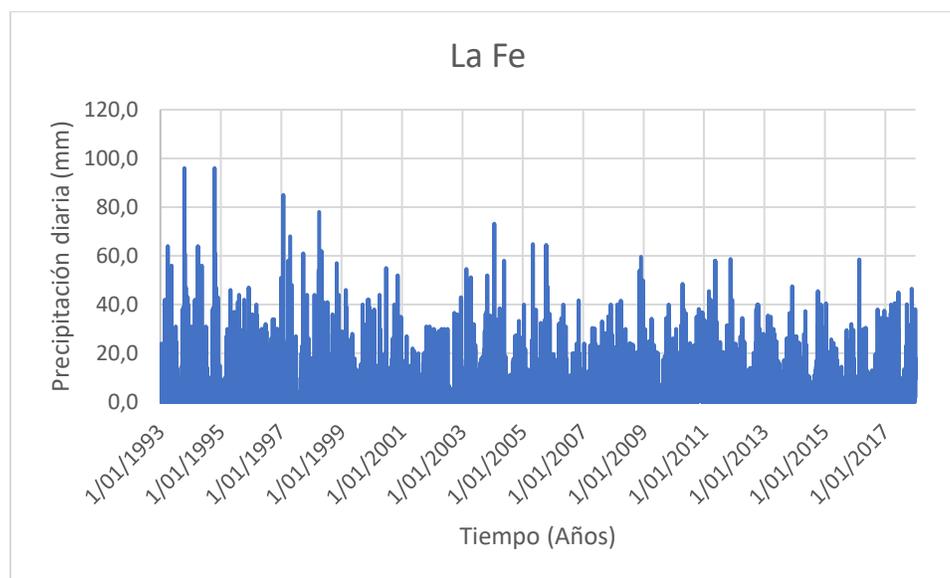


Figura 12 - Datos de precipitación (1993 – 2017) - Estación La Fe

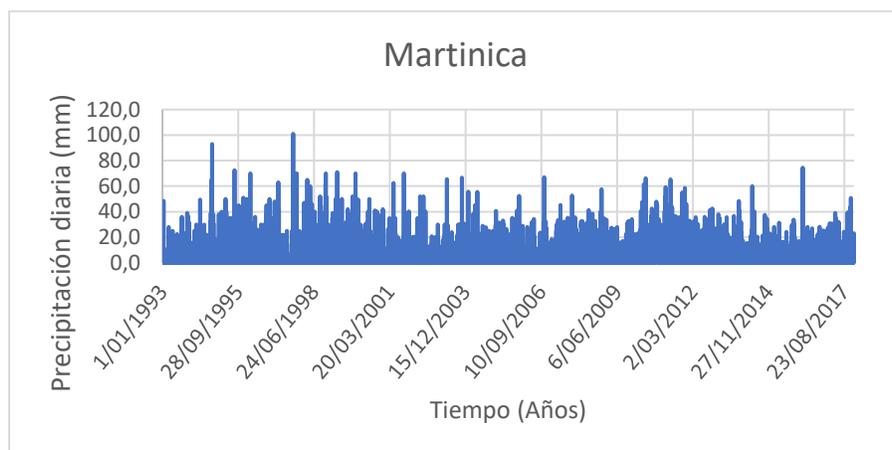


Figura 13 - Datos de precipitación (1993 – 2017) - Estación Martínica

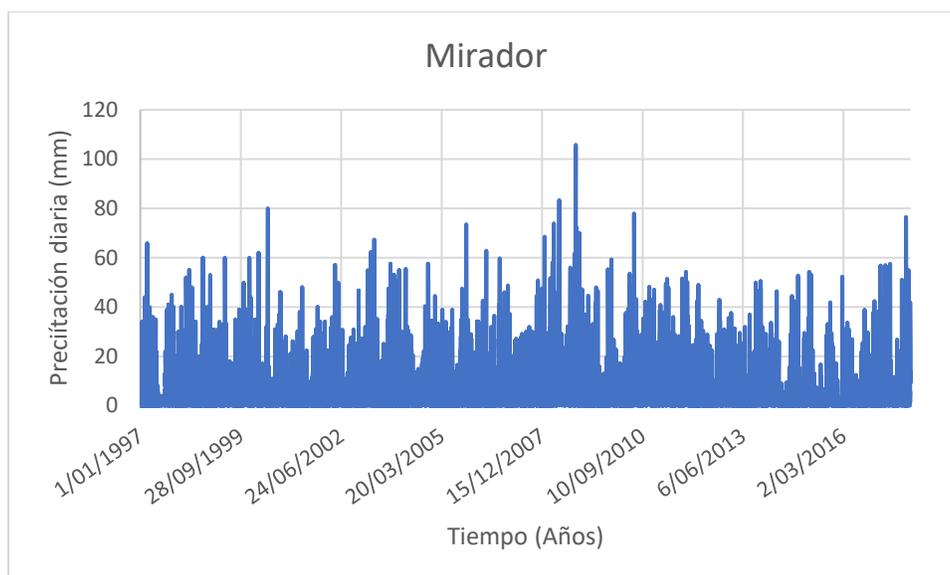


Figura 14 - Datos de precipitación (1997 – 2017) - Estación Mirador

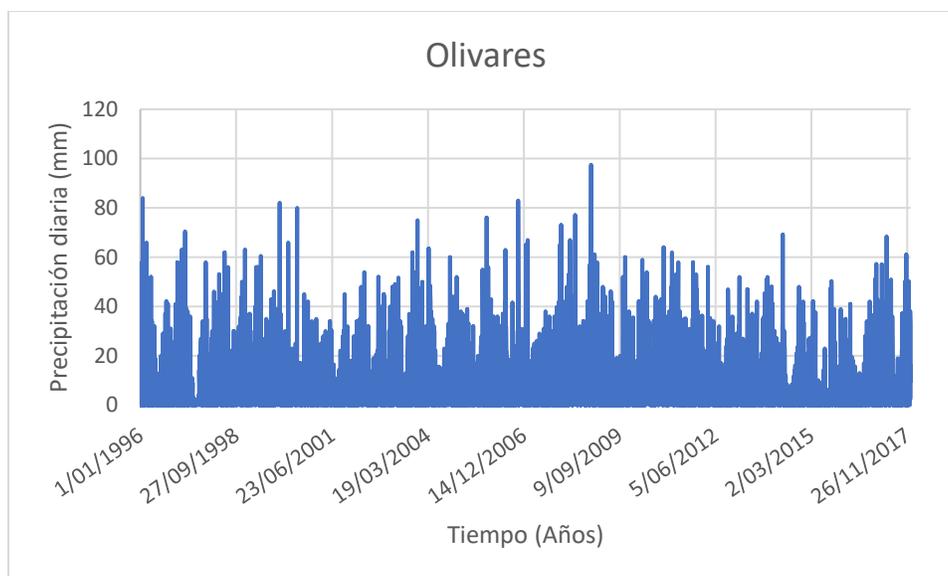


Figura 15- Datos de precipitación (1996 – 2017) - Estación Olivares

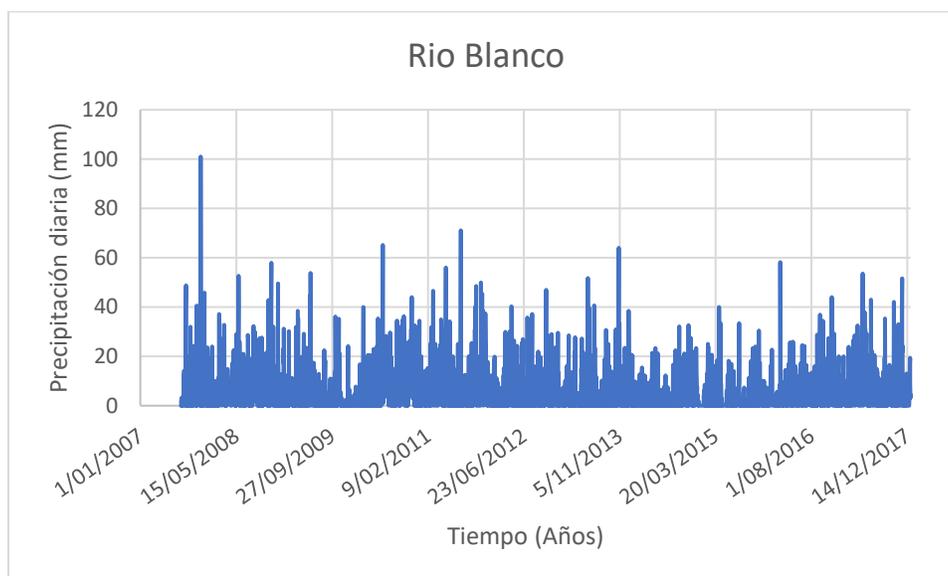


Figura 16 - Datos de precipitación (2007 – 2017) – Estación Rio Blanco

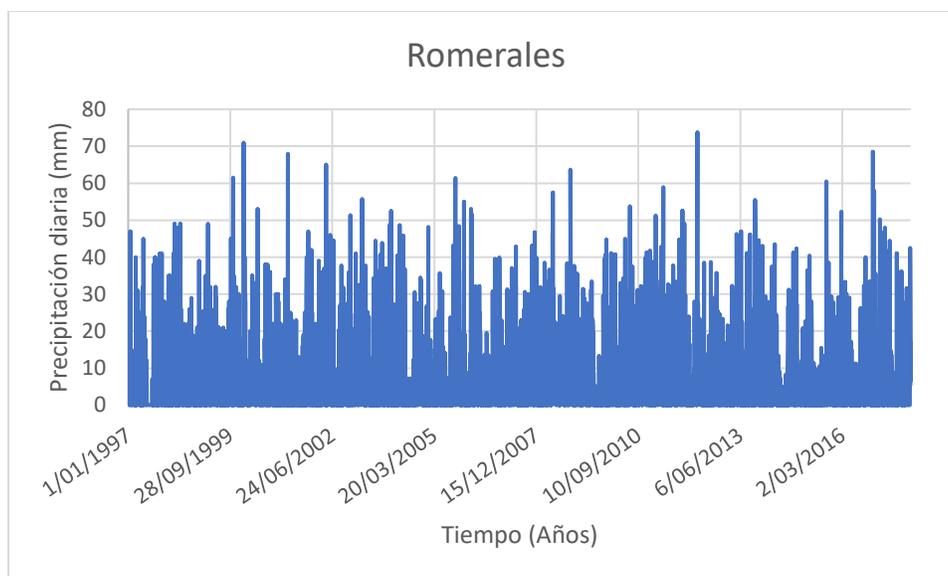


Figura 17 - Datos de precipitación (1997 – 2017) - Estación Romerales

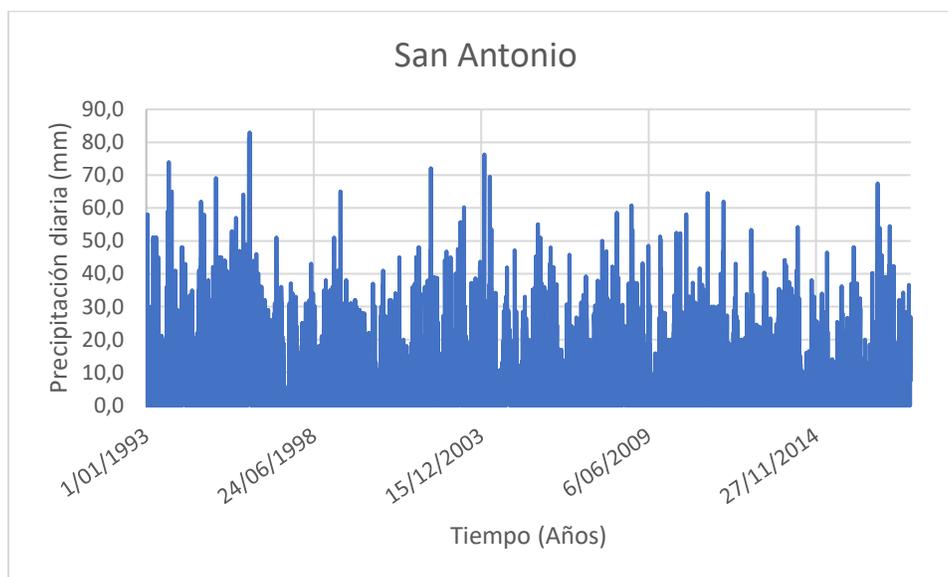


Figura 18 - Datos de precipitación (1993 – 2017) - Estación San Antonio

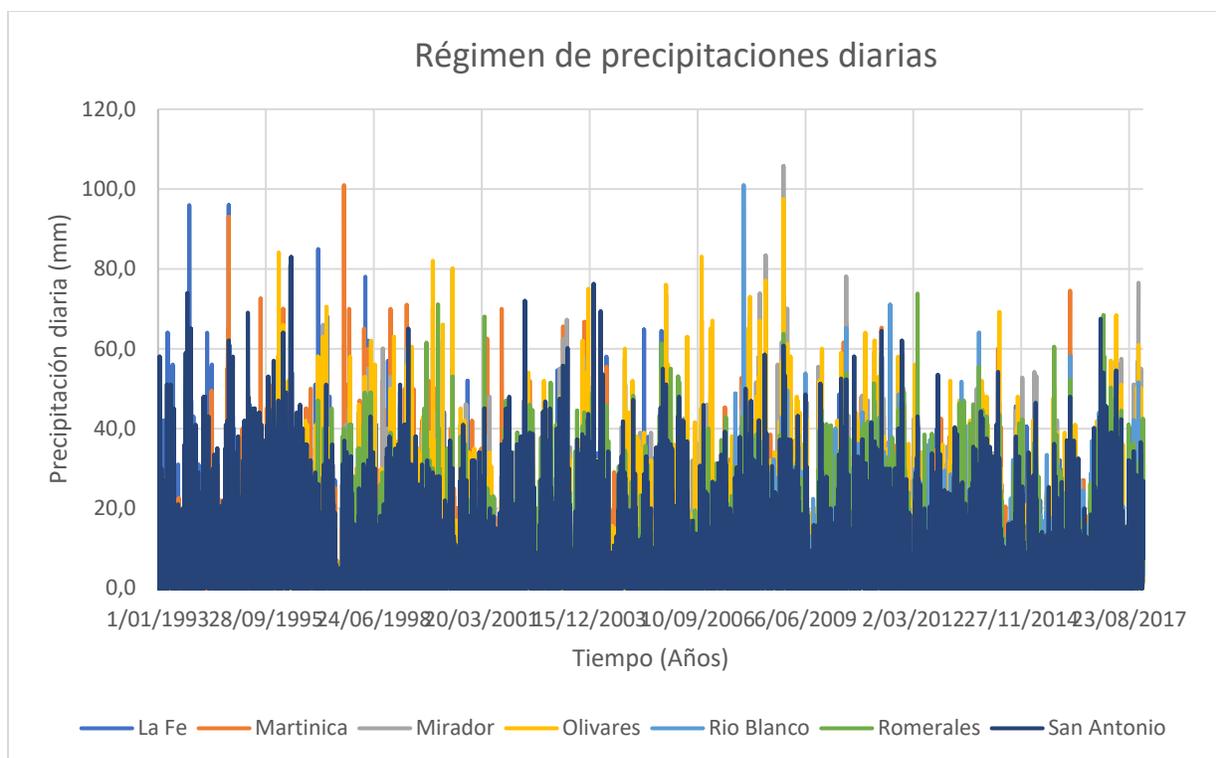


Figura 19 - régimen de precipitaciones diarias

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas relacionando todos los datos de precipitación de las 7 estaciones, se muestran los regímenes anuales, mensuales y mensuales multianuales de todas las estaciones presentes en la zona de estudio.

Para esto se utilizaron tablas dinámicas y sus respectivas gráficas, las tablas nos permiten resumir y presentar todos los datos obtenidos y en las gráficas se muestran las visualizaciones de estos datos, para así poder realizar análisis de patrones y tendencias.

En los gráficos dinámicos realizados se obtuvieron las sumas de todos los datos de cada estación por año y por meses.

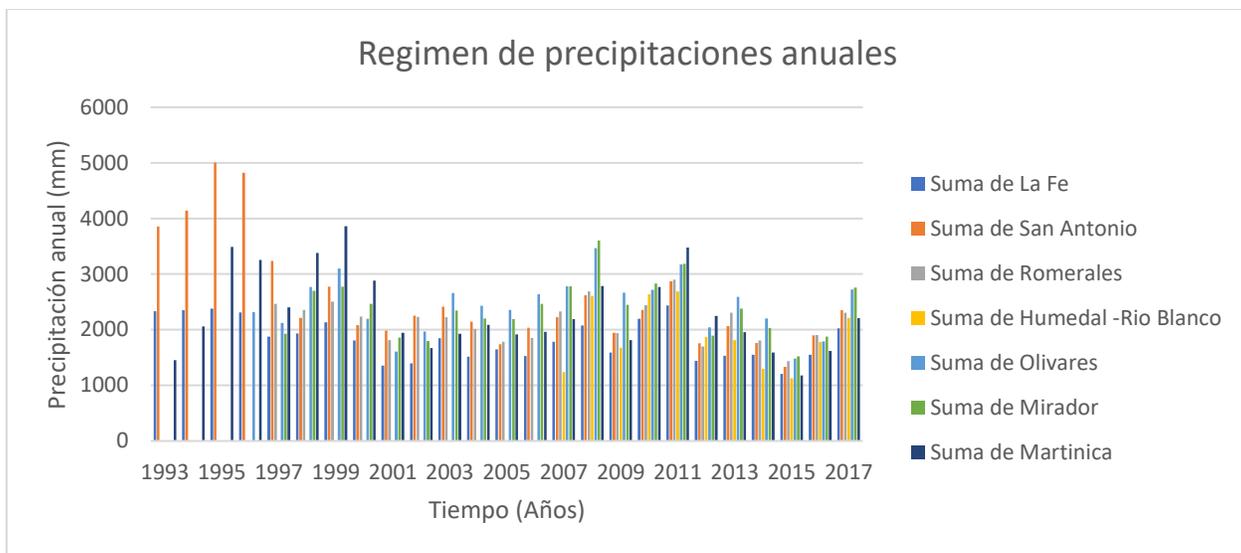


Figura 20 - Régimen de precipitaciones anuales

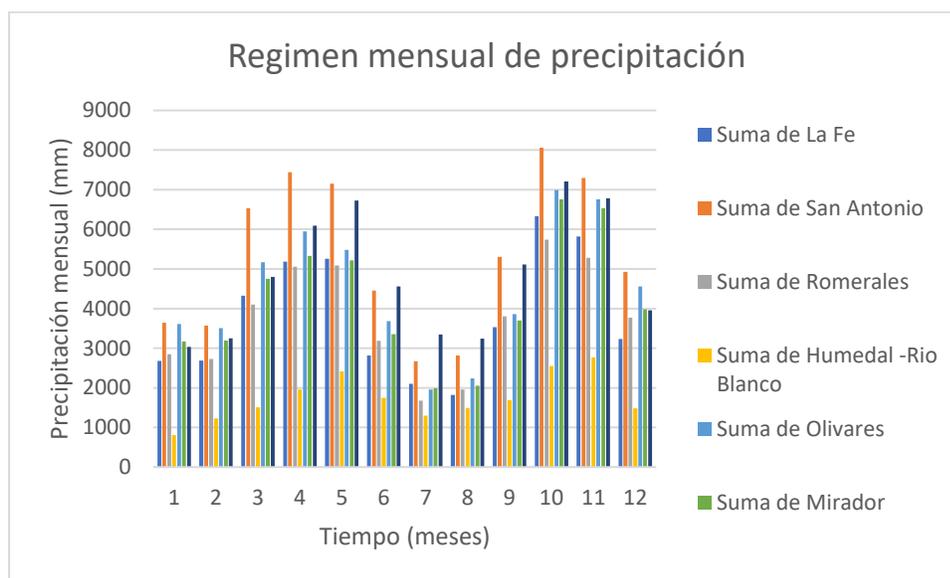


Figura 21 - Régimen de precipitaciones mensuales

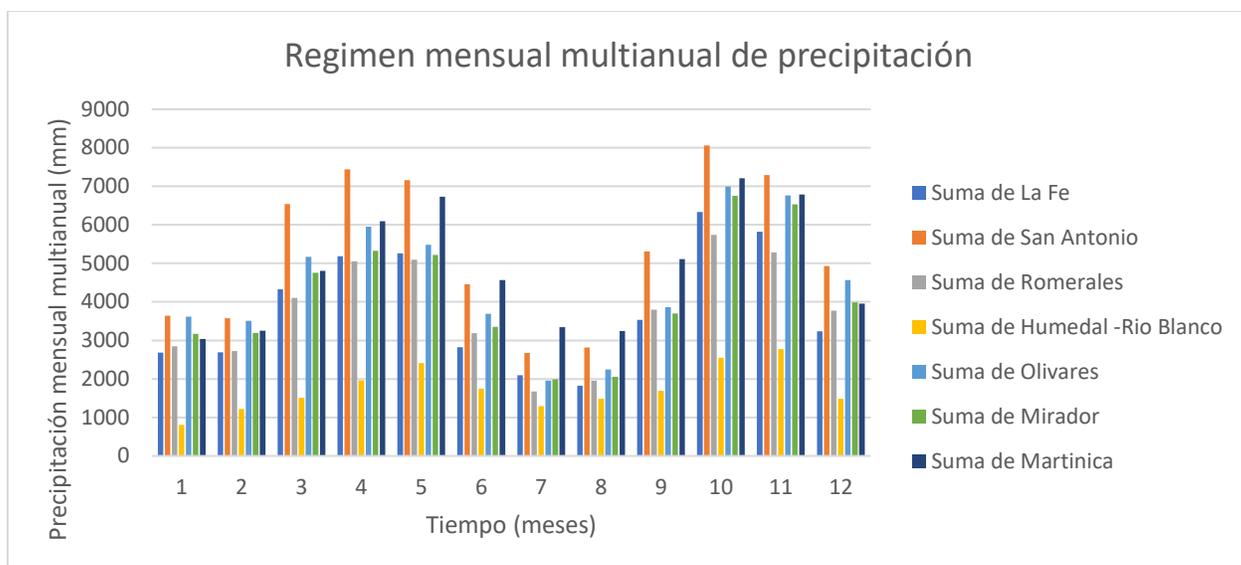


Figura 22 - Régimen de precipitaciones mensual multianual

Los gráficos muestran un comportamiento bimodal típico de la Zona de Confluencia Intertropical en la que se encuentra ubicada el área de estudio, con periodos de mayores precipitaciones en los meses de Abril - Mayo y Octubre – Noviembre.

El conocimiento del comportamiento de la precipitación permite conocer la disponibilidad de agua de la región, y así poder planificar de manera adecuada el territorio, gestionar el riesgo y el abastecimiento hídrico de la región, teniendo en cuenta la oferta, la demanda, la vulnerabilidad hídrica y la variabilidad climática.

CURVAS DE MASA - PRECIPITACIÓN

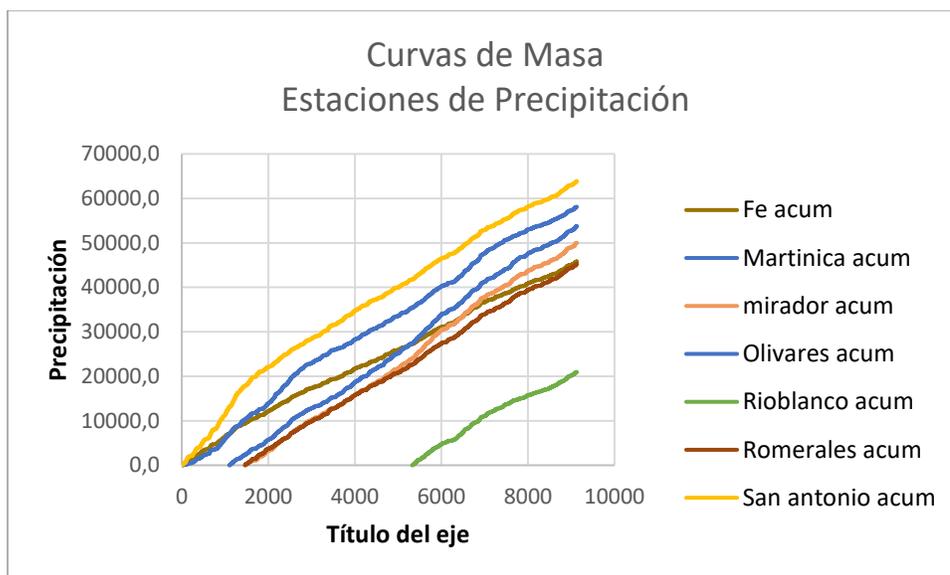


Figura 23 - Curvas de Masa de las estaciones de precipitación

La gráfica de curvas de masa nos permite ver el comportamiento de cada una de las estaciones con respecto al promedio de lluvias de todas ellas. En ella podemos observar que casi todas las estaciones se comportan de la misma forma, excepto la estación de Río Blanco; esto puede deberse a que esta estación poseía menor cantidad de datos, por lo que su margen de error es muy grande.

CURVAS DOBLE MASA – PRECIPITACIÓN

Para la validación de las series climáticas usadas se utilizó una metodología de análisis hidrológico con curvas de doble masa que permiten comparar el acumulado de una estación de referencia frente al promedio acumulado de las estaciones cercanas, así como el R^2 de cada estación. Este método permite realizar pruebas de homogeneidad y consistencia a las series históricas; los cambios en la pendiente de las series indican sucesos de origen natural o antrópico.

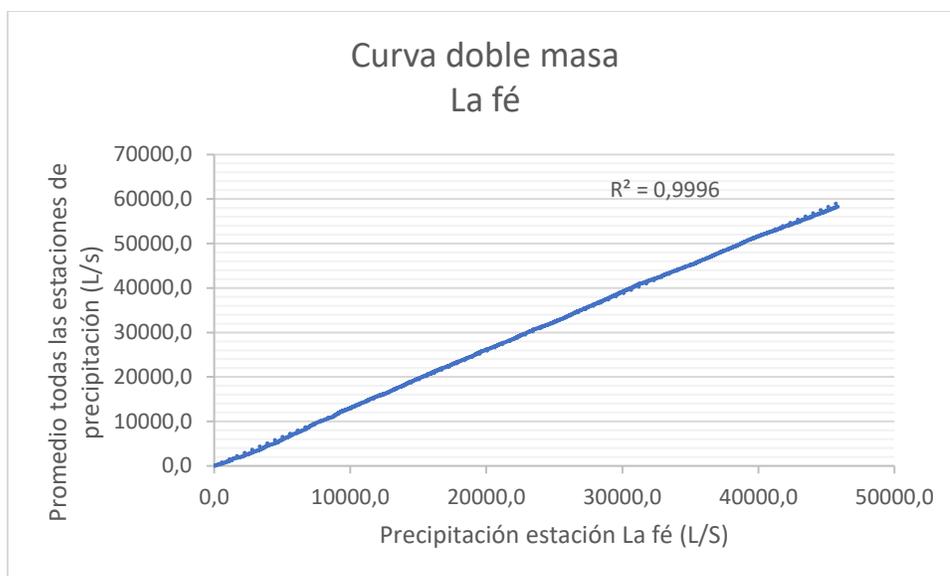


Figura 24 - Curva doble masa de la estación La Fé

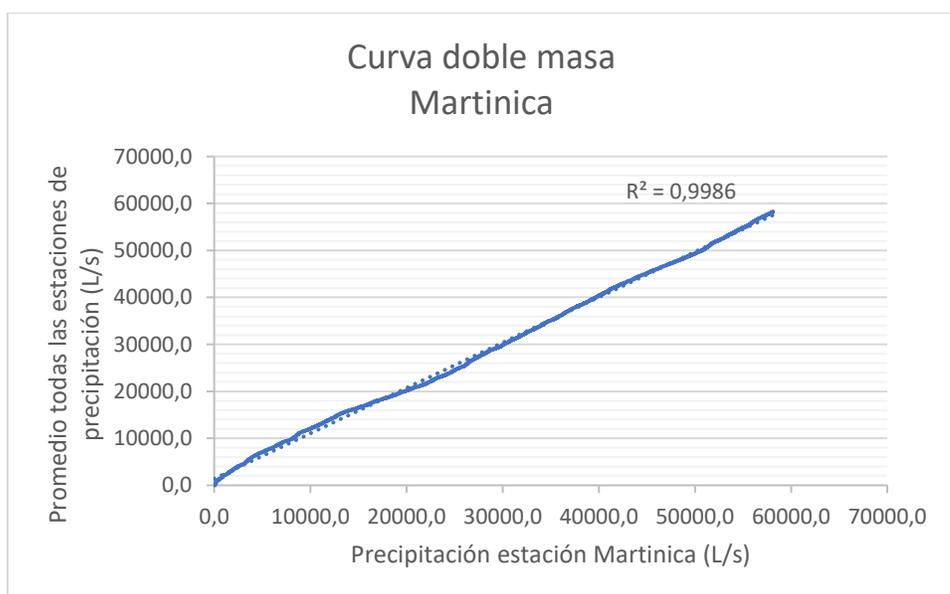


Figura 25 - Curva doble masa de la estación Martinica

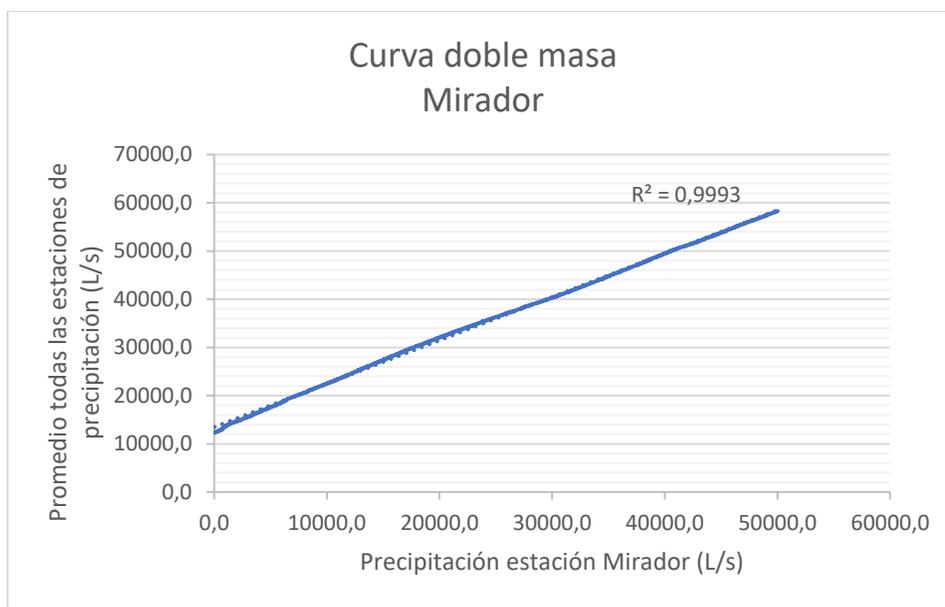


Figura 26 - Curva doble masa de la estación Mirador

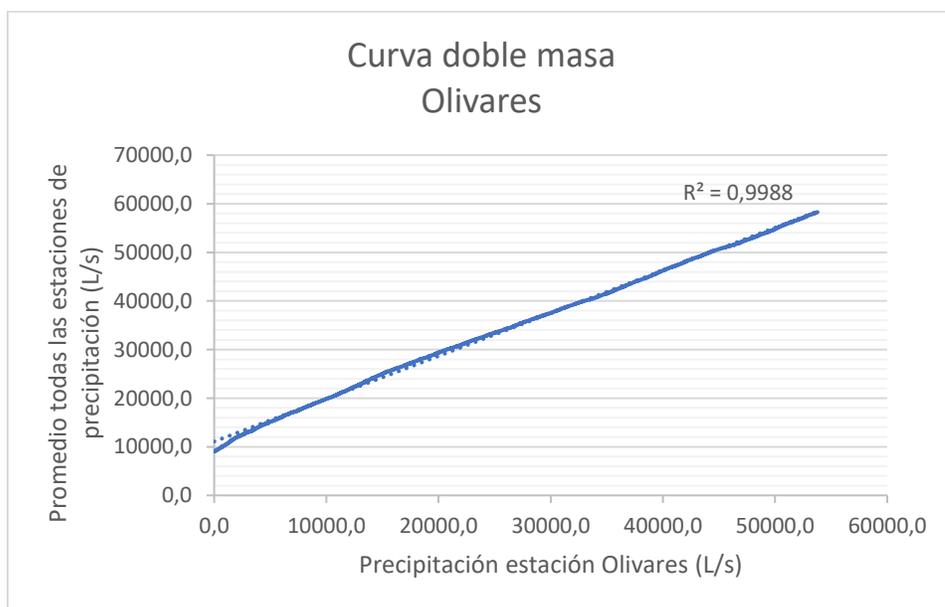


Figura 27 - Curva doble masa de la estación Olivares

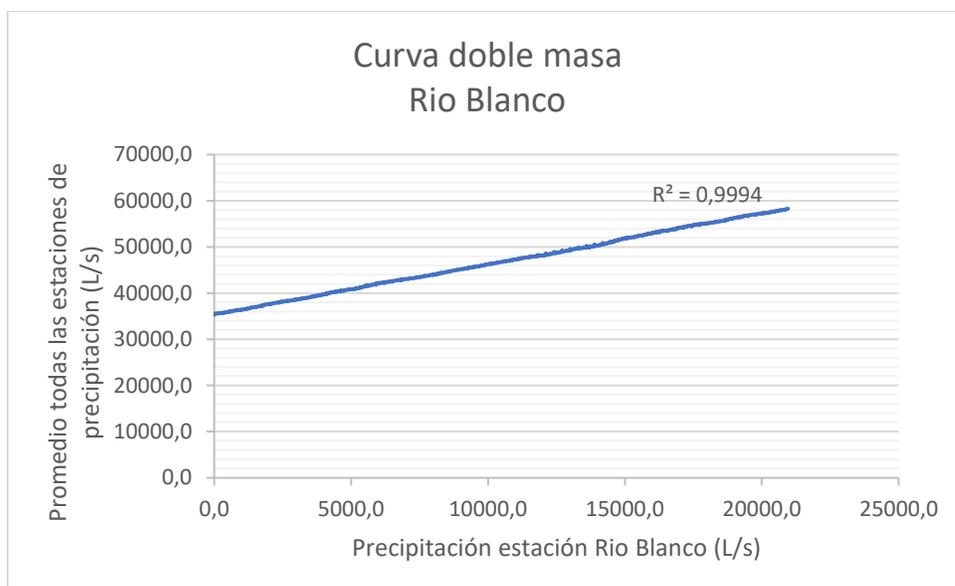


Figura 28 - Curva doble masa de la estación Río Blanco

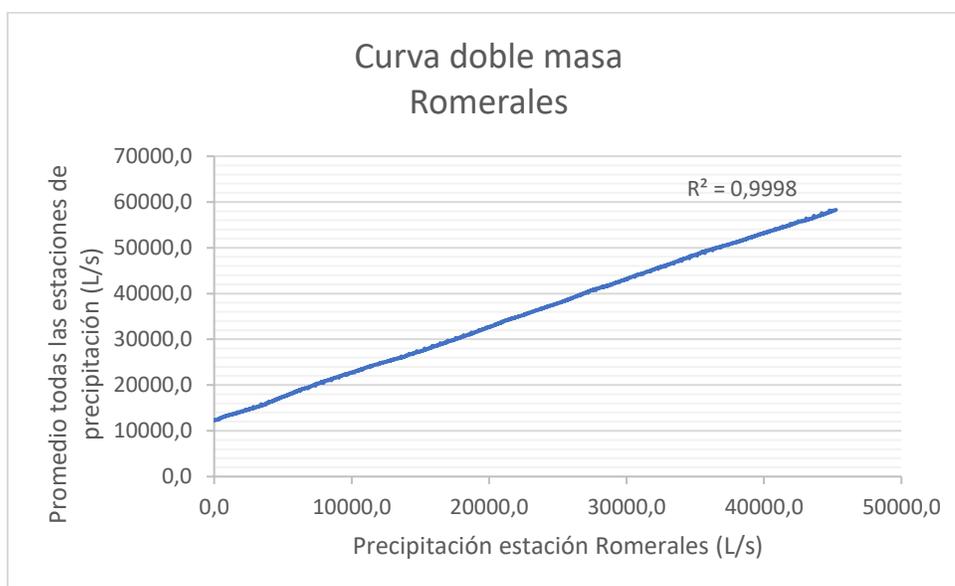


Figura 29 - Curva doble masa de la estación Romerales

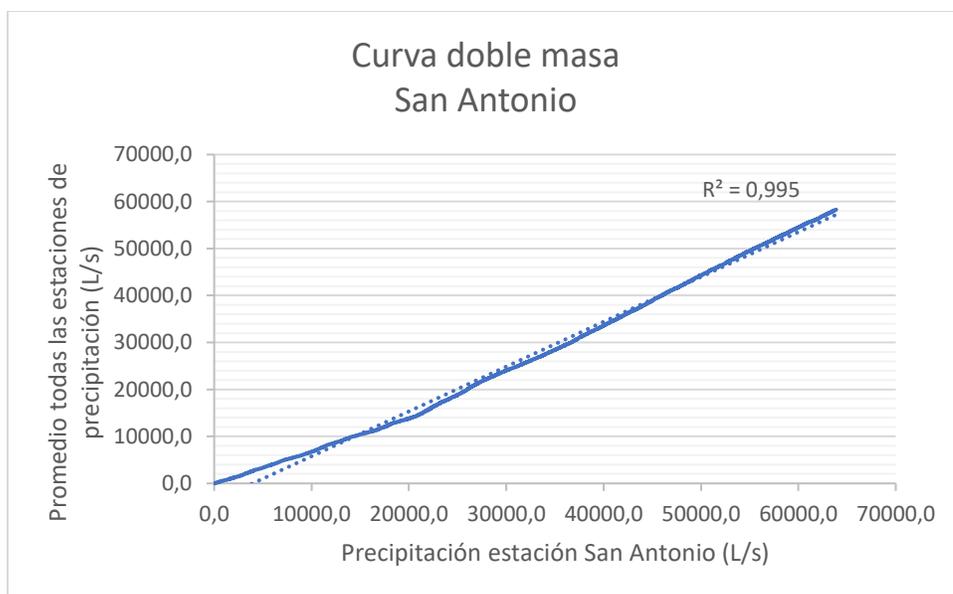


Figura 30 - Curva doble masa de la estación San Antonio

Los valores de R^2 obtenidos reflejan un valor cercano a uno (1), lo que indica una buena relación entre los datos acumulados y la tendencia lineal.

Los resultados obtenidos fueron consistentes, lo que nos permite garantizar la calidad y confianza de la información utilizada.

Caracterización climática y geomorfológica

Geomorfología

Para el desarrollo de la parte de la descripción geomorfológica del área de estudio, se contó con un modelo de elevación digital (DEM) obtenido de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Una vez obtenido el modelo de elevación digital y con ayuda del software ArcMap 10.4.1 se procede a realizar una corrección de esta imagen base, donde se llenan todos los sumideros, para así obtener una continuidad topográfica.

Se genera un mapa de pendientes, uno de direcciones de flujo donde se presentan unos colores asociados a la dirección que toma el agua desde cada celda hasta la siguiente con pendiente más pronunciada, también se genera un mapa de acumulación de flujo para la delimitación de los ríos que atraviesan la zona de estudio.

A continuación, se muestran los elementos cartográficos obtenidos:

El mapa del modelo de elevación digital fue realizado a partir e imágenes obtenidas de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos; con ayuda del software ArcGIS el primer paso a realizar fue la herramienta de llenado, la cual tiene como finalidad corregir todos los pixeles nulos y sin información con los que viene la imagen.

En el mapa se muestran los valores más altos de elevación en color azul y los más bajos de color rojo.

El municipio cuenta con áreas montañosas correspondientes a la cordillera central de los Andes, también cuenta con zonas planas al oriente y al occidente. Se observan alturas que van desde los 700 a los más de 3800 msnm.

Modelo de Elevación Digital - Manizales

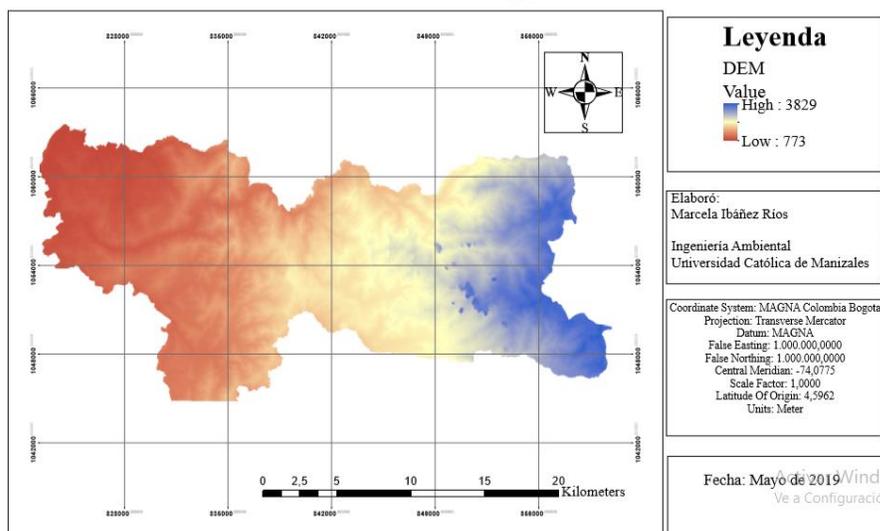


Figura 31 - Modelo de Elevación Digital - Manizales

Una vez obtenido este raster, se procede a definir las direcciones de flujo de los drenajes que alimentan un cuerpo de agua mayor.

La salida de la herramienta es un raster entero cuyos valores varían de 1 a 255 (Esri, 2016). Los valores para cada dirección desde el centro son los siguientes:

32	64	128
16	1	1
8	4	2

Figura 32 - Valores direcciones de flujo (Esri, 2016)

Lo que se puede observar en el mapa es que el color predominante es el rosado, que tiene asignado un valor de 16, que según la figura 33, es una dirección de flujo hacia la izquierda.

A continuación se muestra el mapa de direcciones de flujo:

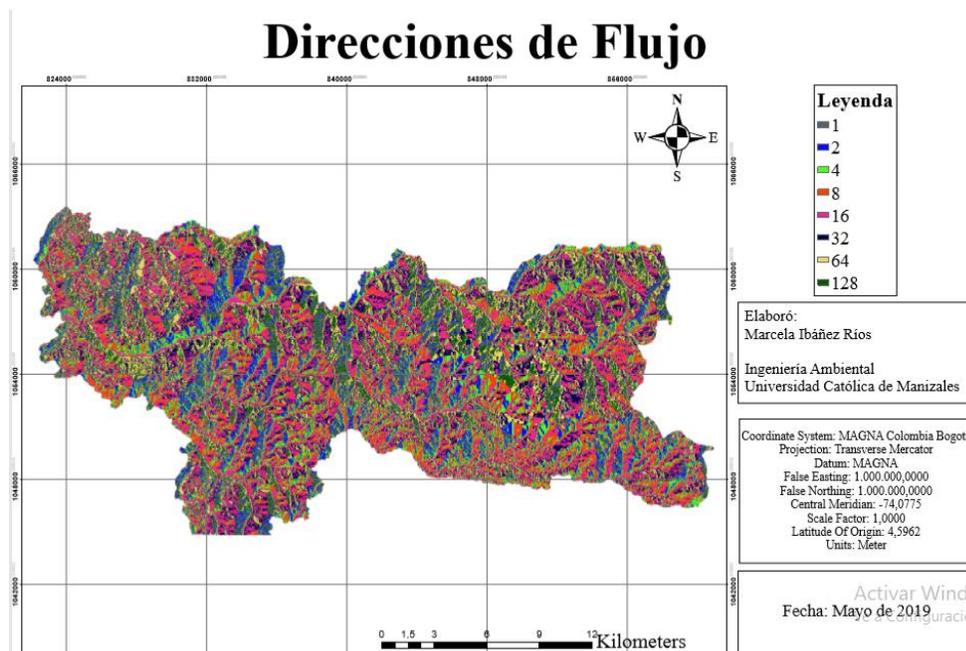


Figura 33- Mapa de direcciones de flujo de Manizales

Luego se requiere obtener hacia donde y en qué dirección los drenajes alimentan la cuenca, esto se realiza con la herramienta de acumulación de flujo.

El resultado es un ráster de flujo acumulado, que “está determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendiente” (Esri, 2016)

Este mapa nos permite ver en qué lugares se acumula el flujo de la cuenca y así poder identificar las principales corrientes hídricas.

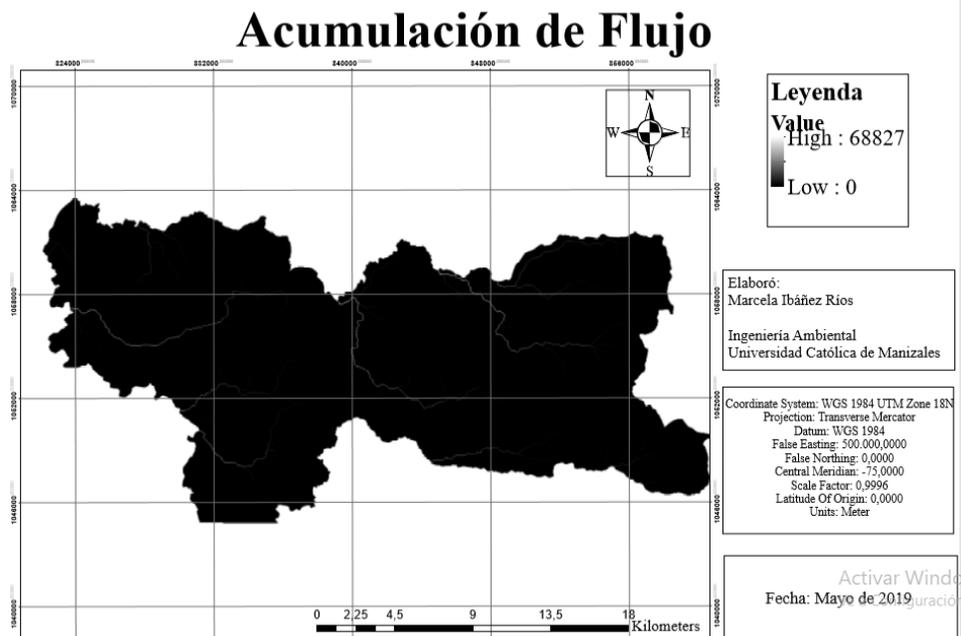


Figura 34 - Mapa de Acumulación de Flujo de Manizales

A continuación, se muestra el mapa de pendientes de la ciudad, estas nos permiten identificar las trayectorias del agua que escurre hacia los ríos, y la velocidad en la que lo hace, para así mismo saber cuánto tarda el agua de lluvia en llegar a los cauces de la red de drenaje (Corpocaldas, 2013).

La pendiente se mide en porcentaje, la ciudad de Manizales cuenta con pendientes desde el 0% hasta más del 85%; se observan altas pendientes donde nacen los drenajes y pendientes más suaves en las desembocaduras.

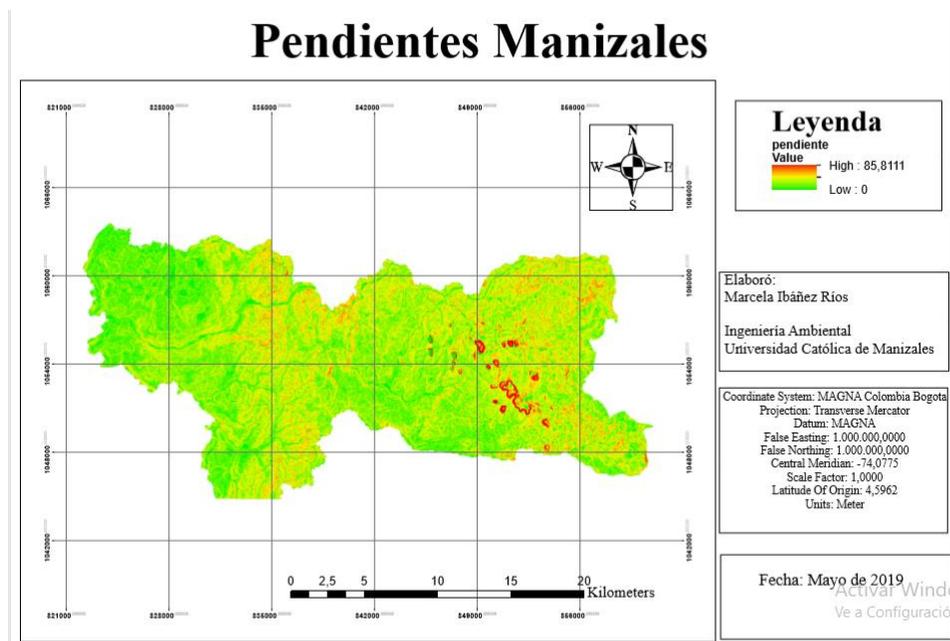


Figura 35 - Mapa de pendientes de Manizales

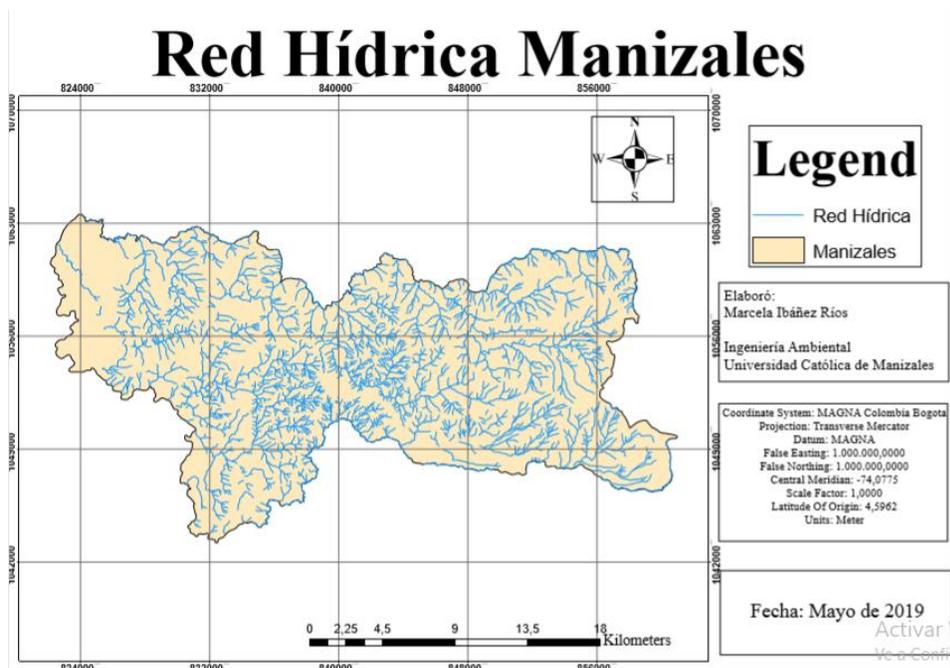


Figura 36 - Mapa Red Hídrica de Manizales

Distribución de bocatomas de las áreas abastecedoras de acueducto de Manizales

El sistema de acueductos de la ciudad de Manizales se surte de diferentes fuentes superficiales, donde son captadas las aguas y conducidas a las plantas de tratamiento Luis Prieto Gómez y Niza.

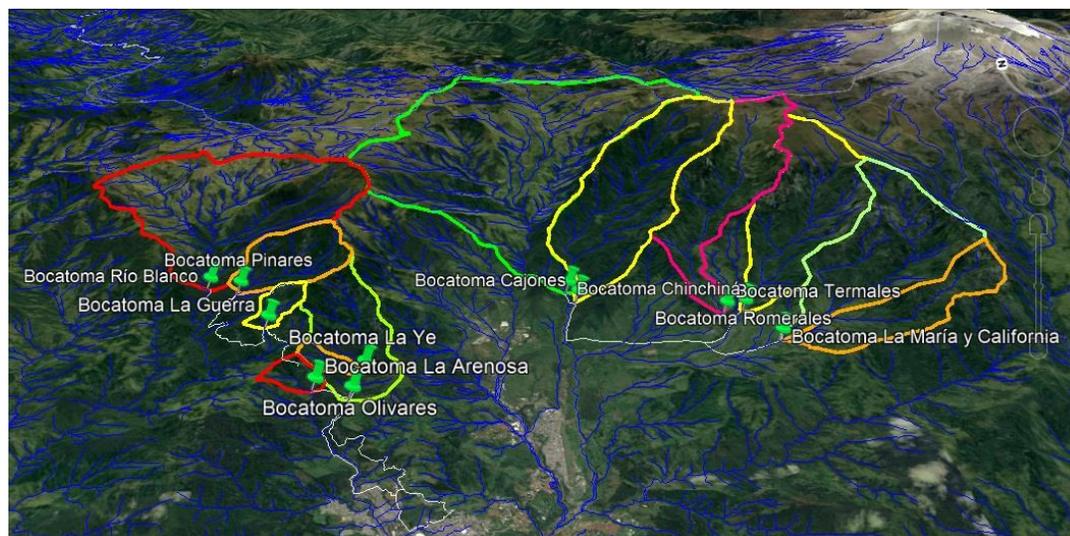


Figura 37 - Bocatomas que abastecen los acueductos de Manizales

En la figura 37 se muestran las fuentes que abastecen la Planta de Tratamiento Niza, estas son la vertiente de Río Blanco, quebrada Pinares, La Guerra, La Yé, La Arenosa y Olivares. Cada una es captada de forma individual y conducida por gravedad a la represa ubicada en la quebrada Olivares (Superservicios, 2018).

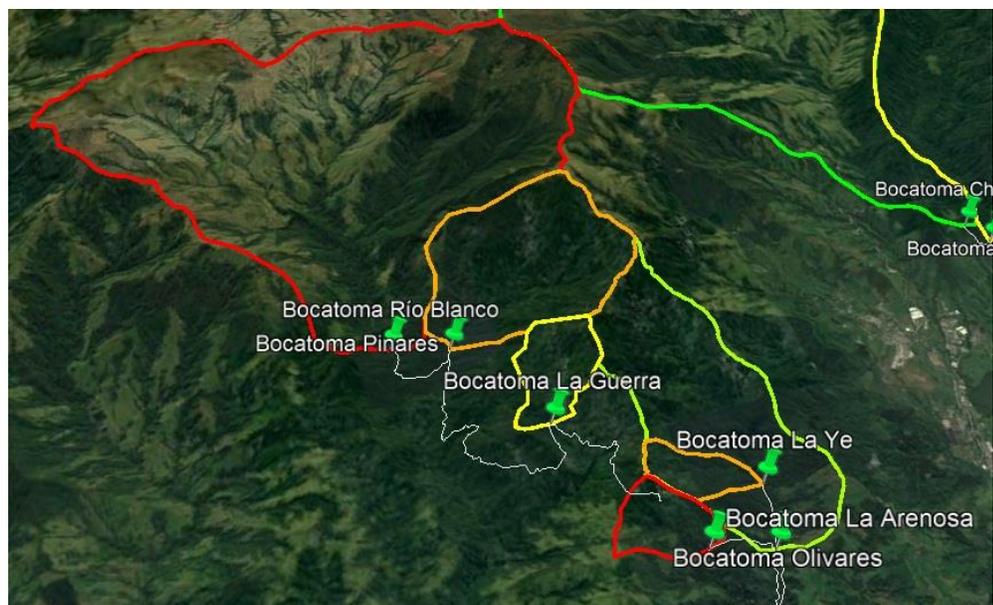


Figura 38 - Bocatomas Subcuenca del Río Guacaica

A continuación, se muestran las bocatomas de la Planta de Tratamiento Luis Prieto, donde se capta el agua del Río Chinchiná, quebrada Cajones, California, Romerales y La María. (Superservicios, 2018).

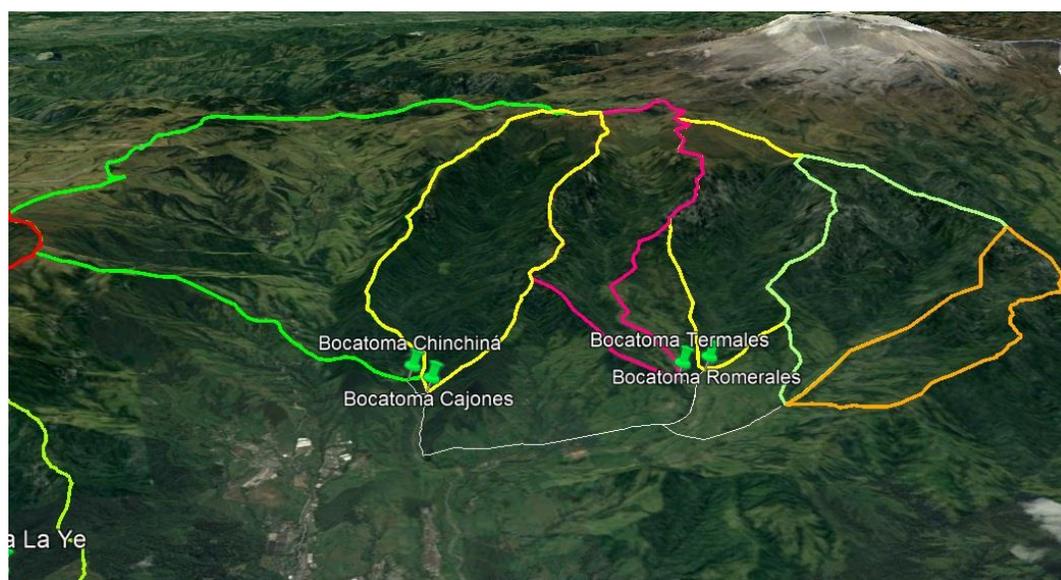


Figura 39 - Bocatomas Subcuenca Río Chinchiná

Clima

Para realizar la clasificación climática de la cuenca, se utiliza la clasificación de Caldas-Lang, la cual resultó de una combinación de la clasificación de Caldas y la Clasificación de Lang que se explican a continuación:

- **Clasificación de Caldas:** Considera únicamente el factor térmico, se fundamenta en la variación de la temperatura con la altura, y da como resultado los denominados pisos térmicos (IDEAM, sf).

Piso Térmico	Rango de Elevación	Rango de Temperaturas
Cálido	0 a 800	$T \geq 24^{\circ}\text{C}$
Templado	800 a 1800	$24^{\circ}\text{C} > T > 18^{\circ}\text{C}$
Frío	1800 a 2800	$18^{\circ}\text{C} > T > 12^{\circ}\text{C}$
Muy Frío	2800 a 3700	$12^{\circ}\text{C} > T > 6^{\circ}\text{C}$
Extremadamente Frío	3700 a 4700	$6^{\circ}\text{C} > T > 0^{\circ}\text{C}$
Nival	>4700	$T < 0^{\circ}\text{C}$

Tabla 4 - Clasificación climática de Caldas (IDEAM, sf)

- **Clasificación de Lang:** Esta considera variables como la precipitación media anual en mm y la temperatura media anual en $^{\circ}\text{C}$. Se hace una relación P/T para determinar el factor de Lang que describe las condiciones de humedad, dividiéndose en 6 categorías (IDEAM, sf).

Factor Humedad	Factor de Lang (P/T)
Desértico	0 a 20
Árido	20,1 a 40
Semiárido	40,1 a 60
Semihúmedo	60,1 a 100
Húmedo	100,1 a 160
Superhúmedo	>160

Tabla 5 - Clasificación climática de Lang (IDEAM, sf)

- **Clasificación de Caldas-Lang:** En 1962 se realizó la combinación de la clasificación de Caldas con la de Lang, obteniendo así 25 tipos de clima, que considera la temperatura y la humedad. Es una de las más utilizadas en el país, cada tipo de clima se nombra primero con la característica térmica y la segunda la humedad promedio.

Tipos de clima Caldas - Lang

Cálido Superhúmedo	Frío Superhúmedo
Cálido húmedo	Frío Húmedo
Cálido Semihúmedo	Frío Semihúmedo
Cálido semiárido	Frío Semiárido
Cálido Árido	Frío Árido
Cálido Desértico	Frío Desértico
Templado Superhúmedo	Páramo Bajo Superhúmedo
Templado Húmedo	Páramo Bajo Húmedo
Templado Semihúmedo	Páramo Bajo Semihúmedo
Templado Semiárido	Páramo Bajo Semiárido
Templado Árido	Páramo Alto Superhúmedo
Templado Desértico	Páramo Alto Húmedo
Frío Superhúmedo	Nieves perpetuas

Tabla 6 - Clasificación climática de Caldas – Lang (IGAC, 2014)

Teniendo en cuenta la clasificación climática de Caldas – Lang, en la siguiente tabla se muestran las variables necesarias para realizar esta caracterización para la ciudad de Manizales; se utilizan variables como altitud, precipitación, temperatura promedio y de acuerdo a esto se obtiene el índice de Lang, necesario para definir la humedad de la zona.

Manizales, Caldas	msnm	Precipitación	Temperatura	Índice de Lang (P/T)	Piso Térmico	Humedad	Clase de Clima	Símbolo
	2153	1878	15	125.2	Frío	Húmedo	Frío Húmedo	FH

Tabla 7 - Clasificación climática de Manizales según Caldas-Lang

Según lo anterior, el índice de Lang para las condiciones de precipitación y temperatura de Manizales, da un valor de 125,2, lo que indica con factor de humedad “Húmedo”, ya que está en el rango de 100,1 a 160 que se presenta en las tablas; y teniendo en cuenta los msnm a los que se encuentra la ciudad, se clasifica en el piso térmico frío; lo que nos arroja como resultado un clima Frío Húmedo (FH).

Análisis del régimen de caudales y las curvas de duración

Las CDC se construyen a partir de registros históricos de caudales diarios, para esto es posible regionalizar los resultados para indicar la tendencia de regulación de áreas instrumentadas (IDEAM, 2018).

Para esta investigación se utiliza la técnica de regionalización presentada en el Estudio Nacional del Agua 2018 (ENA), la cual consiste en asignar el CDC de las estaciones ubicadas en las diferentes sub-zonas a un cauce principal (IDEAM, 2018). Esta metodología se basa en la información proveniente de los caudales, por lo tanto, no se requiere incluir las características de la cuenca, lo que aporta sencillez al cálculo.

En esta fase se muestran las curvas de duración de caudales CDC, que se realizaron para cada una de las estaciones de caudal; que como se explicaba anteriormente nos muestra el porcentaje del tiempo en el cual los caudales son igualados o excedidos.

Se estima que, si la serie histórica utilizada para su realización es lo suficientemente buena, entonces la CDC es representativa del régimen de caudales de la corriente evaluada y por lo tanto puede ser utilizada para pronosticar el comportamiento futuro de los caudales (Lezama, 2011).

Las CDC presentadas son a partir de los registros históricos obtenidos de la empresa Aguas de Manizales S.A E.S.P, en ellas se observa en el eje Y la escala de caudal en L/s y en el eje X el tiempo de excedencia del caudal en porcentaje %.

Además, para cada una de las gráficas se anexa una tabla con la medición de distintos percentiles como $Q_0\%$ - $Q_{1-10\%}$ - $Q_{50\%}$ entre otros.

Según un estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia, los caudales del 0,1 % al 10% corresponden a caudales altos, los caudales del 20% al 60% son caudales medios y los caudales del 70% al 99% son caudales bajos (Salazar, 2016).

Además, para cada una de las estaciones de caudal se muestra el Índice de Regulación Hídrica -IRH- que es calculado a partir de la curva de duración de caudales diarios.

Este se calcula como una relación entre el volumen parcial equivalente al área bajo la línea de caudal medio y el volumen total equivalente el área bajo la CDC (IDEAM, 2018).

Este mide la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas; se mueve en un rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los de menor regulación (IDEAM, 2013).

Por último, en esta fase se realiza la identificación del caudal ambiental que debe mantener cada una de las corrientes, esto se realiza a partir de la metodología propuesta en el Estudio Nacional del Agua 2018, la cual plantea que para identificar el caudal ambiental se debe reconocer la regulación de cada zona a evaluar, si la regulación es de baja a moderada, se asume como caudal ambiental el valor de Q_{75} y si la regulación de moderada a alta se toma el valor de Q_{85} (IDEAM, 2018).



Figura 40 - Metodología calculo caudal ambiental (IDEAM, 2018)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

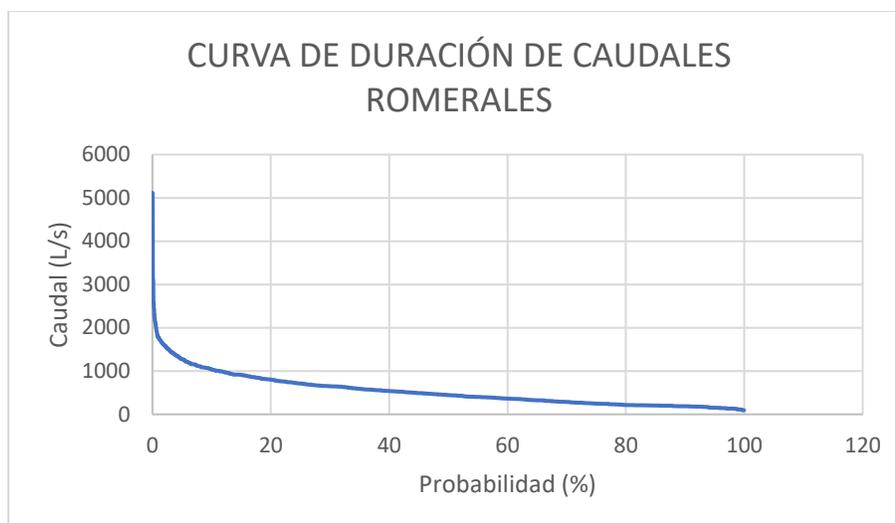


Figura 41 - Curva de Duración de Caudales Romerales

Qmax	Qmax	Q 50%	Q 75 %	Qmin	Qmin
Extremos	1 - 10%	Mediana		85-95%	Extremo
					95-100%
5000 (L/s)	1200 (L/s)	440 (L/s)	245 (L/s)	200(L/s)	130 (L/S)

Tabla 8 - Caudales máximos y mínimos Romerales

IRH 0,25

Tabla 9 - IRH Romerales

Según lo observado en la gráfica, la probabilidad de que el caudal de la fuente iguale o exceda los 5000 L/s es cercano al 0%, es un caudal que en muy pocas ocasiones se ha observado; el 50% del tiempo se ha alcanzado un caudal cercano a los 440 L/s y más del 95% del tiempo se supera un caudal de 130 L/s, lo que significa que la fuente no ha presentado caudales menores a ese valor en el periodo calculado.

Analizando la diferencia entre los caudales presentados con permanencia del 10% frente a caudales con permanencia del 90%, se puede concluir que existe una gran variación de los caudales a lo largo del tiempo.

El IRH para esta estación es de 0,25, es un índice menor a 0,5 y según lo estipulado por el IDEAM este supone que la capacidad de retención hídrica en este punto de la cuenca es muy baja.

Para el cálculo del caudal ambiental de esta corriente, se tuvo en cuenta que su IRH es de 0,25, por lo que se calcula de acuerdo al percentil del 75%; para este caso el caudal necesario para sostener el ecosistema y las actividades que allí se realizan es de más o menos 245 L/s.

Según lo anterior, la empresa de acueducto de la ciudad de Manizales debe velar porque en la captación de agua nunca se reduzca el caudal ambiental que necesita esta fuente hídrica, además de que, según lo analizado, esta corriente tiene muy poca regulación del agua por lo que ante una amenaza su caudal puede cambiar drásticamente y afectar no solo el ecosistema que allí habita sino a toda la población porque se reduce la cantidad de agua que puede ser tomada para su posterior potabilización.

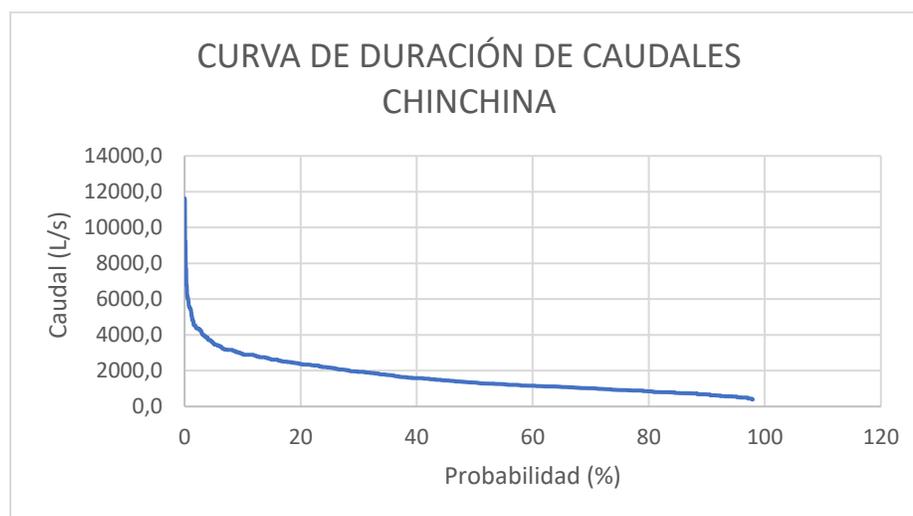


Figura 42 - Curva de Duración de Caudales Chinchiná

Qmax	Qmax	Q 50%	Q 75 %	Qmin	Qmin
Extremos	1 - 10%	Mediana		85-95%	Extremo
					95-100%

11500 (L/s)	2800 (L/s)	1350 (L/s)	920 (L/s)	750(L/s)	500 (L/S)
----------------	------------	------------	-----------	----------	-----------

Tabla 10 - Caudales máximos y mínimos Chinchiná

IRH

0,27

Tabla 11- IRH Chinchiná

Para la estación ubicada en la corriente Chinchiná, se tiene una probabilidad casi nula de que el caudal exceda los 11500 L/s, la mitad del tiempo estudiado, el caudal sobrepasa los 1300 L/s y casi el 100% del tiempo se superan los 500 L/s.

Según lo anterior, se puede observar la gran variación de caudales a lo largo del tiempo y el IRH de 0,27 representa lo que se mencionaba, esta corriente posee una capacidad muy baja para retener y regular el agua, de ahí que se presenten esa gran cantidad de variaciones de caudal.

Para la obtención del caudal ambiental, se toma igualmente el valor de Q75 por poseer un IRH bajo, y este dio como resultado 920 L/s.

Esta fuente hídrica se caracteriza por poseer caudales altos, pero con poca regulación de los mismos, por lo que también representa un reto si por alguna razón sus caudales se ven alterados; porque el caudal que necesita para mantener todas sus dinámicas naturales es relativamente alto y en épocas de bajas precipitaciones la corriente no podrá retener el agua necesaria y esto afecta igualmente la oferta hídrica de la ciudad.

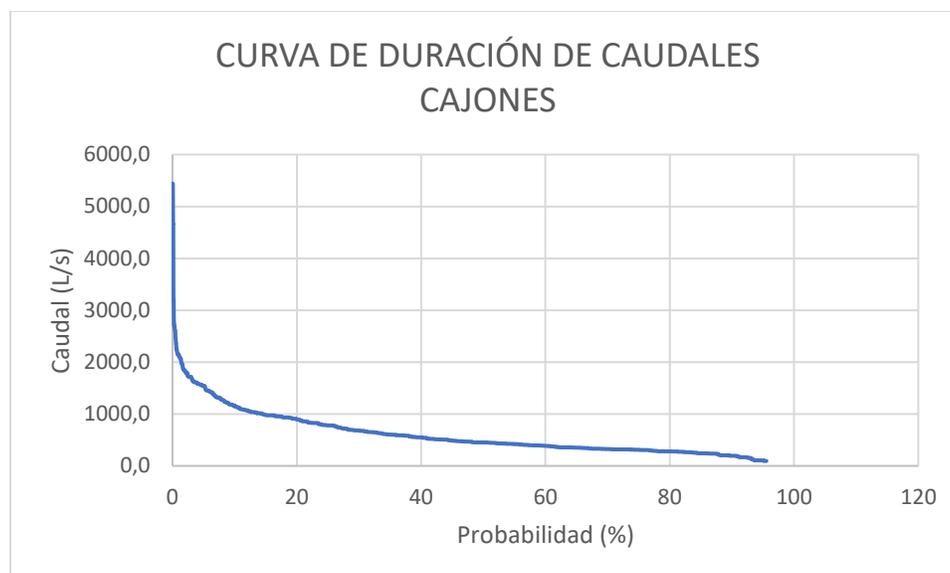


Figura 43 - Curva de Duración de Caudales Cajones

Qmax Extremos	Qmax 1 - 10%	Q 50% Mediana	Q 75 %	Qmin 85-95%	Qmin Extremo 95- 100%
5500 (L/s)	1200 (L/s)	450 (L/s)	310 (L/s)	240 (L/s)	95 (L/s)

Tabla 12- Caudales máximos y mínimos Cajones

IRH

0,24

Tabla 13 - IRH Cajones

Para la estación Cajones ocurre la misma situación que con las anteriores corrientes analizadas, posee un IRH muy bajo con gran variación de caudal, de entre los 5500 L/s y los 95 L/s. Es una corriente con muy poca retención y regulación.

El caudal ambiental para esta corriente es de 310 L/s más o menos, esta se calcula a partir del caudal que es superado el 75% del tiempo.

Al igual que en los casos anteriores, la oferta hídrica disponible para captación por parte de los acueductos tiene tendencia a verse afectada en caso de que se presente una amenaza climática.

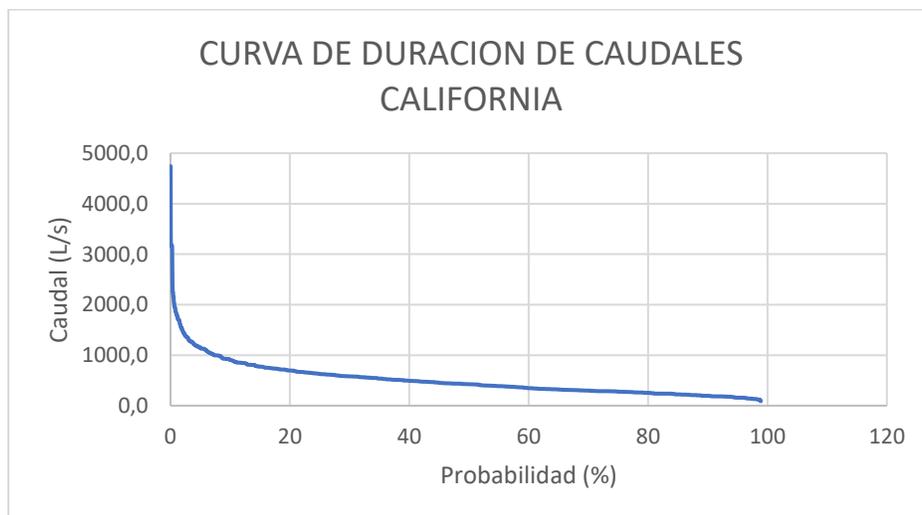


Figura 44 - Curva de Duración de Caudales California

Qmax	Qmax	Q 50%	Q 75 %	Qmin	Qmin
Extremos	1 - 10%	Mediana		85-95%	Extremo
					95-100%
4800 (L/s)	1300 (L/s)	425 (L/s)	275 (L/s)	220(L/s)	145 (L/S)

Tabla 14 - Caudales máximos y mínimos California

IRH 0,75

Tabla 15- IRH California

Para el caso de la corriente California, se presenta un comportamiento diferente a los presentados anteriormente, ya que, a pesar de las diferencias de caudales, el índice

Esta corriente presenta caudales extremos, con poca probabilidad de presentarse muy bajos, cercanos a los 550 L/s, y el caudal que se mantiene la mayoría del tiempo es de 25 L/s.

A pesar de ser una corriente con caudales bajos, la diferencia entre los que se presentan poco y los más comunes no es tan alta, de allí a que su IRH sea de 0,75, definiendo la corriente con una alta capacidad de retención y regulación del agua.

En esta corriente se identifican caudales bajos, pero con una buena regulación a lo largo del tiempo, por lo que para la identificación del caudal ambiental se toma el valor de Q85 que en este caso es de 45 L/s, que deben mantenerse para no afectar el ecosistema allí presente.

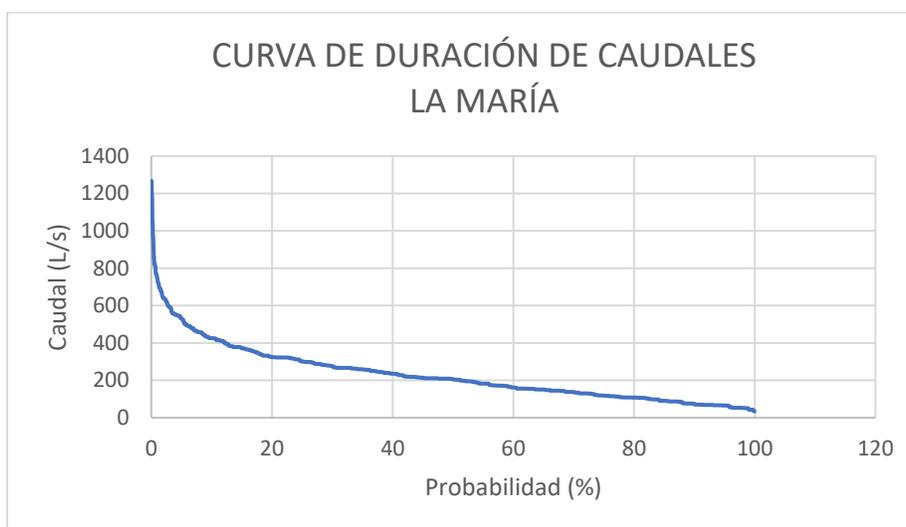


Figura 46 - Curva de Duración de Caudales La María

Qmax	Qmax	Q 50%	Q 75 %	Qmin	Qmin
Extremos	1 - 10%	Mediana		85-95%	Extremo
					95-100%
1260 (L/s)	430 (L/s)	200 (L/s)	115 (L/s)	85(L/s)	45 (L/S)

Tabla 18 - Caudales máximos y mínimos La María

IRH

0,27

Tabla 19 - IRH La María

Acá se presentan caudales máximos extremos de 1260 L/s y caudales mínimos de 45 L/s, a pesar de que no existe gran diferencia entre estos, la corriente nunca llega a caudales muy altos, de esto que el IRH para esta se de 0,27, que indica una capacidad muy baja para retener y regular el agua.

Esta fuente hídrica al tener un índice de regulación hídrica bajo, su caudal ambiental es calculado a partir del volumen de agua que se mantiene el 75% del tiempo, el valor obtenido es de 115 L/s.

Esta corriente también está sujeta a sufrir grandes cambios en su caudal por variaciones climáticas afectando a los acueductos de la ciudad.

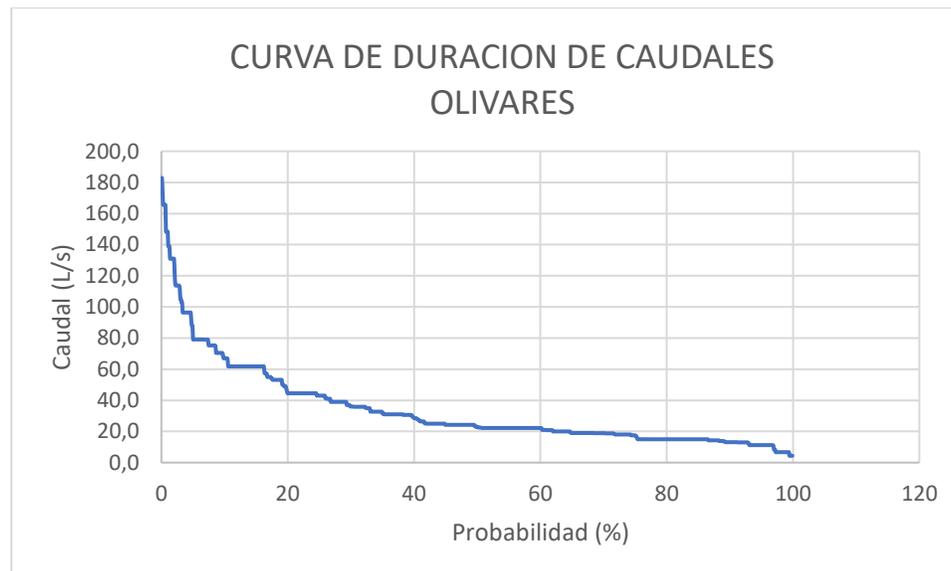


Figura 47 - Curva de Duración de Caudales Olivares

Qmax Extremos	Qmax 1 - 10%	Q 50% Mediana	Q 75 %	Qmin 85-95%	Qmin Extremo 95-100%
182 (L/s)	80 (L/s)	22 (L/s)	17 (L/s)	15(L/s)	6 (L/S)

Tabla 20 - Caudales máximos y mínimos Olivares

IRH 0,75

Tabla 21 - IRH Olivares

Como se puede observar, la corriente Olivares es una fuente hídrica con un caudal bajo, pero su variación a lo largo del tiempo no es mayor, pasando de caudales máximos de 182 L/s a caudales mínimos de 6 L/s, lo que nos indica que la corriente tiene buena regulación del agua, y esto se representa en su IRH alto de 0,75.

Esta corriente debe mantener un caudal ambiental de 17 L/s. Es una fuente que lleva caudales muy bajos, pero a pesar de esto la regulación del agua es muy buena y no tiene grandes variaciones en el tiempo.

Sin embargo, es una fuente que debe ser protegida de que no se alteren sus dinámicas y poder mantener el ecosistema.

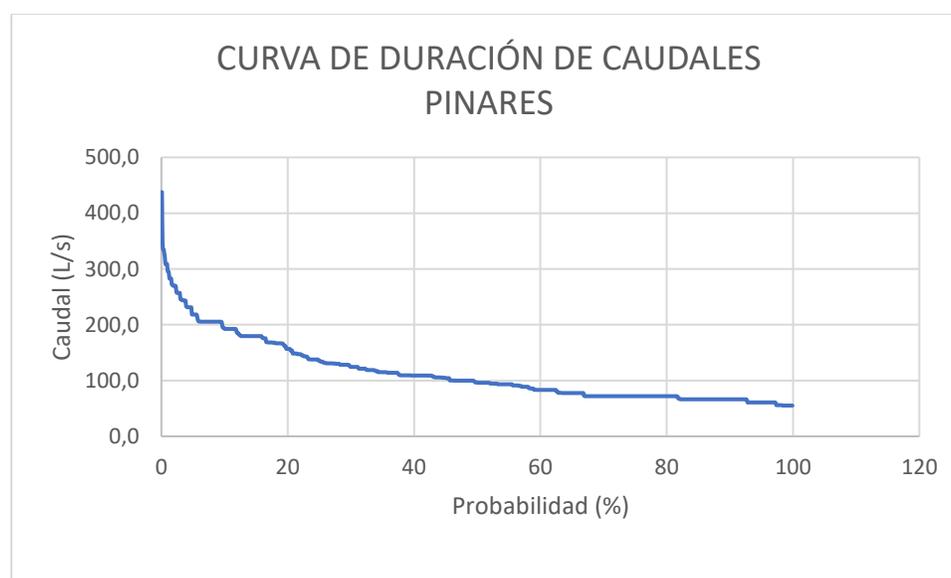


Figura 48 - Curva de Duración de Caudales Pinares

Qmax Extremos	Qmax 1 - 10%	Q 50% Mediana	Q 75 %	Qmin 85-95%	Qmin Extremo 95- 100%
450 (L/s)	192 (L/s)	96 (L/s)	70 (L/s)	65 (L/s)	55(L/s)

Tabla 22 - Caudales máximos y mínimos Pinares

IRH	0,75
-----	------

Tabla 23 - IRH Pinares

Para esta estación, se tiene igualmente un IRH alto, es una corriente con una buena regulación del agua pero que maneja caudales un poco bajos.

En este caso el caudal ambiental se calcula a partir del percentil del 85% por tener un índice de regulación hídrica alto, el resultado obtenido es que se debe mantener un caudal de más o menos 70 L/s para no afectar todos los procesos tanto naturales como antrópicos que se llevan a cabo en este lugar.

A continuación, se muestra el resumen de los Índices de Regulación y Retención Hídrica para cada una de las estaciones ubicada en cada corriente:

Estación	IRH	Categoría
Chinchiná	0,27	Muy bajo
Cajones	0,24	Muy bajo
California	0,75	Alto
La Ye	0,75	Alto
La María	0,27	Muy bajo
Olivares	0,75	Alto
Pinares	0,75	Alto
Promedio	0,54	Bajo

Tabla 24 - Resumen IRH

De acuerdo a lo establecido en la tabla 23, la cuenca del Río Chinchiná, que surte a los acueductos de la ciudad de Manizales posee un Índice de Retención y Regulación Hídrica bajo.

Por lo que se puede decir que los acueductos de Manizales y directamente la población, podrían presentar problemas de abastecimiento hídrico, lo que condicionaría el desarrollo de diferentes actividades tanto naturales como antrópicas ejercidas en esta zona.

El resultado obtenido fue de 0,54 y realizando la comparación con el dato oficial que se tiene en el POMCA del río Chinchiná, allí se reporta un IRH de 0,56; por lo que se puede tener un mayor grado de confianza en los resultados obtenidos.

Variabilidad de la oferta hídrica en el área de estudio según indicadores ENA 2018

A continuación, se muestra un análisis integrado del agua en las áreas abastecedoras de acueductos del municipio de Manizales presentadas anteriormente; sustentándose en la oferta total y disponible de la cuenca.

Área Km2	Oferta Total millones m3			Oferta Disponible millones m3		
	Año medio	Año seco	Año húmedo	Año medio	Año seco	Año húmedo
1055	796,5	224,9	2052,2	411,2	116,1	1059,3

Tabla 25 - Oferta hídrica en la cuenca del Río Chinchiná (IDEAM, 2018)

En la tabla 25, se muestran los resultados presentados en el ENA 2018 para la oferta hídrica total y oferta hídrica disponible en millones de metros cúbicos, tanto para año medio, año seco y año húmedo. Esta está relacionada directamente con las condiciones climáticas, su variabilidad y características geológicas del área.

La oferta total para año medio, que son las condiciones normales de la cuenca, es de 796,5 millones m³, pero no toda esta puede ser usada por el ser humano, un porcentaje debe ser conservado para mantener los ecosistemas; por esta razón la cantidad de agua se reduce a 411,2 millones m³ disponibles.

Teniendo en cuenta la oferta hídrica disponible para uso humano, se observa que esta tiene grandes variaciones según las condiciones de sequía o humedad, reiterando así que la cuenca tiene poca retención de agua y puede sufrir desabastecimiento fácilmente.

CONCLUSIONES

- El análisis de la información climática es un proceso muy relevante durante el estudio de una cuenca hidrográfica, para esto se recomienda el uso de datos diarios que permitan obtener tendencias significativas, e igualmente poder visualizar los eventos extremos que ocurren a lo largo del tiempo. Además, es fundamental validar los datos entregados por las estaciones hidroclimáticas, eliminando así datos erróneos que puedan alterar los resultados.
- El régimen de precipitaciones hallado a partir de datos históricos de las estaciones meteorológicas permite observar el comportamiento bimodal típico de la zona de estudio, con dos períodos de lluvia y dos períodos de verano; los tiempos de mayor precipitación en las estaciones estudiadas se presentan de abril a junio y de septiembre a noviembre.
- Durante el análisis de consistencia de datos realizado con la curva de masa y las curvas de doble masa, se demuestra la homogeneidad que deben tener los datos ya que pertenecen a la misma área geográfica. Todas las estaciones presentan una buena calidad de datos, reconocidos por los valores de R^2 cercanos a 1; y a partir de este se genera una incertidumbre por los datos de la estación Río Blanco, que muestran una tendencia diferente a las demás estaciones, esto es debido a la falta de información en esta área por lo que no se pudo obtener una consistencia en los datos pluviométricos.
- El análisis integrado de las áreas abastecedoras del municipio de Manizales, se llevó a cabo por medio de las curvas de duración de caudales que nos permiten conocer el caudal promedio para cada una de las corrientes e igualmente poder identificar la regulación que tienen los mismos y el caudal ambiental que debe mantenerse. Es una zona donde según las condiciones climáticas, la oferta hídrica cambia ampliamente y genera grandes presiones en los ecosistemas, e igualmente existe un amplio riesgo al desabastecimiento hídrico en épocas de bajas precipitaciones.
- Se presenta una amplia necesidad de desarrollar planes de contingencia y desarrollar acciones que regulan oferta hídrica en caso de ocurrencia de eventos de bajas precipitaciones, que generen desabastecimiento hídrico a la población.
- Todos los procesos climáticos y sus cambios a través del tiempo tienen gran influencia en el recurso hídrico y a su vez en los ecosistemas y comunidades asentadas sobre la cuenca hidrográfica. Por esta razón es importante tener en cuenta todos estos análisis en los

procesos de planificación de cuenca, ordenación de territorio y servicio de acueductos para la ciudad, integrando toda la información y mejorando su calidad para estudios futuros, para que así cada vez se puedan tomar decisiones más acertadas en el municipio.

- Los resultados han demostrado que las curvas de duración de caudales son necesarias para el proceso de calibración y validación hidrológica. Estas permiten identificar si en caso de ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática, las corrientes hídricas pueden suministrar la demanda de la población o si es necesario tomar medidas.

RECOMENDACIONES

- Para la cuenca del Río Chinchiná deben desarrollarse estudios de cambio climático en la zona, donde se planteen escenarios futuros de acuerdo a la variación de lluvias, variables del ciclo hidrológico, simulación de caudales, entre otras; esto con el fin de generar medidas de adaptación y mitigación para reducir los impactos de la variabilidad y vulnerabilidad climática.
- Para futuros trabajos, es necesario considerar los usos del suelo, deforestación, coberturas vegetales y su influencia en el régimen hidrológico, ya que este tema no fue abordado en la presente investigación, además es de gran importancia abarcar los efectos de los sectores económicos que presentan grandes usos de agua.
- Evaluar otros acueductos municipales en Caldas para definir las condiciones de abastecimiento de otras comunidades y cómo se pueden ver afectados por la variabilidad hidroclimática.

BIBLIOGRAFÍA

- ArcGIS Resources. (sf). Introducción a ArcGIS. ESRI. Recuperado de: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Barbero, I. (2014). Estudio del Comportamiento hidrológico de una pequeña cuenca forestal. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- CEPIS. (SF). Conceptos de hidrometría. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan3/041225/041225-04.pdf>
- Charria, W.G. (2012). El sistema complejo de la cuenca hidrográfica (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Congreso de Colombia. (1973). Ley 23 de 1973. Bogotá, D.C. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/leyes/2a-ley_0023_1973.pdf
- Corpocaldas. (2013). POMCA Chinchiná. Recuperado de: <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1508/2017/03-09/01-SintesisPOMCARioChinchina.pdf>
- Colombia: uno de los más ricos en recursos hídricos. (8 de abril de 2011). El Universal. Recuperado de: <https://www.eluniversal.com.co/ambiente/colombia-uno-de-los-mas-ricos-en-recursos-hidricos-18471-FPeu96564>
- Cruz, L y Narvaez, J. (2017). Análisis hidrológico de la microcuenca del río Urichare ubicada en el municipio de Lejanías, Meta. (Tesis de especialización). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, D.C.
- Darwin, A. (2018). Hietogramas y la Curva de Masa de Precipitación. Recuperado de: <https://www.scribd.com/document/371181950/El-Hietograma-y-La-Curva-Masa-de-Precipitacion>
- Díaz, L y Alarcón, J. (2018). Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la Quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare. (Tesis de especialización). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, D.C.
- Esri. (2016). Dirección de Flujo. ArcGIS for Desktop. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-direction.htm>

- Esri. (2016). Acumulación de Flujo. ArcGIS for Desktop. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-accumulation.htm>
- Galvis, G. (2011). 20 años de la constitución verde. Vanguardia. Recuperado de: <https://www.vanguardia.com/opinion/columnistas/gustavo-galvis-hernandez/20-anos-de-la-constitucion-verde-CCVL108569>
- Gonzales, D; Garrote, L e Iglesias, A. (2013). Análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España. Recuperado de: http://www.um.edu.uy/docs/fium_2013_3.pdf
- Hernandez, R; Fernandez, C y Baptista, M, (2010), *Metodología de la investigación*, México, McGrawHill.
- IDEAM. (2009). Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+clim%C3%A1tica+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>
- IDEAM. (2012). Decreto 1640 de 2012, compilado en el Decreto 1076 de 2015. Bogotá, DC.
- IDEAM y UNAL. (2018). La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. Recuperado de: <http://www.andi.com.co/Uploads/variabilidad.pdf>
- IDEAM. (2010). Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH). Bogotá. D.C: IDEAM. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/ivh>
- IDEAM. (2013). Índice de Regulación hídrica (IRH). Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/irh>
- IDEAM. (2018). Estudio Nacional del agua. Bogotá, D.C. Recuperado de: http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- IDEAM. (2014). Pronóstico Hidrológico. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/pronostico-hidrologico>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA. (2015). Nuevos escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100. Bogotá, D.C. Recuperado de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_dep_artamental.pdf

- IDEAM. (sf). Clasificación de los climas. Atlas clima. Recuperado de: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-text.pdf>
- IGAC. (2014). Instructivo Zonificación Climática. Grupo Interno de Trabajo de Levantamientos Agrológicos. Recuperado de: <http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/instructivos/2014/I40100-05%20-14%20V1%20Zonificacion%20climatica.pdf>
- INEGI. (s.f). Modelos Digitales de Elevación – MDE. México. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>
- Jaramillo, A. (2005). Clima Andino y Café en Colombia. CENICAFE. Chinchiná, Caldas.
- Larrinaga, H. (2015). Pluviómetro. Mexicali. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/giselllopez3/pluviometro>
- Lezama, C. (2011). La curva de duración de caudales. Mexico, D.C. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/59847671/La-curva-de-duracion-de-caudales>
- Martínez de la Cruz, D. (2015). Estimación de curvas de duración de caudal sintética mediante la aplicación de ecuaciones empíricas en los ríos del norte del Perú. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/alucarddns/exposicion-metodos-estadisticos-en-hidrologia>
- Marulanda, A. (2017). Estimación de la amenaza por déficit hídrico en acueductos municipales con problemas de abastecimiento en Caldas. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- Méndez, J y Hernández, A., Garrido, M., y Andalia, A. (2013). Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento. RIHA, 34(2).
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, D.C
- Ministerio del Ambiente. (SF). El cambio climático afecta los recursos hídricos. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.ambiente.gob.ec/el-cambio-climatico-afecta-los-recursos-hidricos/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto 1323 de 2007, compilado en el Decreto 1976 de 2015. Bogotá, DC.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto 1323 de 2007, compilado en el decreto 1076 de 2015. Bogotá, D.C
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Decreto 3930 de 2010, compilado en el Decreto 1076 de 2015. Bogotá, D.C
- Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). Plan Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible – Decreto 1076 de 2015. Bogotá, D.C
- Ministerio de Educación Nacional. (s.f). SI-GEO Sistema de Información Geográfico del Sector Educativo. Recuperado de: <https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190610.html>
- Moreno, A. (2003). Precipitación. Datos englobados y faltantes. Universidad de los Andes. Recuperado de: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/PRECIPITACION%20DATOS.pdf>
- Ocampo, O. (2012). Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- OMM. (2012). Glosario Hidrológico Internacional. Genova, Suiza. Recuperado de: http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- Orarbo. (s.f). Índice de Retención y Regulación Hídrica – IRH. Bogotá, D.C. Recuperado de: <https://www.orarbo.gov.co/es/indicadores?id=1308&v=1>
- Ramírez, V y Antero, J. (2013). Evolución de la normativa ambiental colombiana en función de las tendencias mundiales de desarrollo sostenible. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- República de Colombia. (1974). Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá, D.C.
- Salazar, J. (2016). Una metodología para la estimación de curvas de duración de caudales (CDC) en cuencas no instrumentadas. caso de aplicación para Colombia en los

departamentos de Santander y Norte de Santander. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C.

- Segerer, C y Villodas, R. (2006). Hidrología I, Unidad 5: Las Precipitaciones. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina
- SENAMHI. (2012). Cambio climático en la cuenca del Río Mantaro. Lima, Perú. Recuperado de: <https://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2015/06/Cambio-clim--tico-en-la-cuenca-del-R--o-Mantaro-Baja.pdf>
- SIGSA. (sf). Plataforma ArcGIS. Recuperado: <http://www.sigsa.info/productos/esri/plataforma-arcgis>
- Superservicios. (2018). Evaluación Integral De Prestadores Aguas De Manizales S.A. E.S.P. Bogotá D.C. Recuperado de: [file://srxpnclustervdi/FolderRedirection\\$/rse01/Descargas/eimanizales.pdf](file://srxpnclustervdi/FolderRedirection$/rse01/Descargas/eimanizales.pdf)
- UPCT. (2007). HIDROLOGIA BASICA Y APLICADA. Recuperado de: <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- UNESCO - UNCCD. (1997). Aprendiendo a luchar contra la desertificación. Guía educativa para el maestro. Italia y Suiza. Recuperado de: http://catalogue.unccd.int/5_Educ_Kit_UNESCO_spa.pdf
- USGS. (2017). USGS - Water Science School. Recuperado de: <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>
- USGS. (2018). *USGS - La Ciencia del Agua para Escuelas*. Recuperado de: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>