

**BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA ABASTECEDORA DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE “LUIS PRIETO GÓMEZ” EN LA VEREDA
GALLINAZO DE VILLAMARÍA CALDAS**



RAFAEL ANTONIO BÁRCENAS RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE
ECAPMA
MEDELLÍN
2017**

**Balance Hídrico de la cuenca abastecedora de la planta de tratamiento de
agua potable “Luis Prieto Gómez” en la vereda gallinazo de Villamaría
Caldas**

**Autor
Rafael Antonio Bárcenas Rodríguez**

**Trabajo aplicado presentado como opción de grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

**Director
Carlos Mario Duque Chaves
Ingeniero Ambiental MSc.**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela De Ciencias Agrícolas, Pecuarias Y Del Medio Ambiente
ECAPMA
MEDELLÍN
2017**

CONTENIDO

INTRODUCCION	11
1. OBJETIVOS.....	12
1.1. GENERAL.....	12
1.2. ESPECIFICOS.....	12
2. MARCO TEORICO	13
2.1. Ciclo Hidrológico del agua	13
2.2. Variables del ciclo hidrológico.....	15
2.3. Modelación con software especializado (ArcGIS 10.5).....	16
3. INFORMACION GENERAL Y ESPECIFICA ZONA DE ESTUDIO	17
3.1. Aspectos geográficos generales	17
3.2. Aspectos geográficos específicos de la zona de estudio	18
3.3. Orígenes del Agua	21
3.4. Clasificación climática	22
3.5. Caracterización climática	23
3.6. Ubicación de estaciones meteorológicas y/o pluviómetros para el cálculo de variables climáticas.....	24
3.7. Precipitación zona de estudio, años 1997 a 2013.....	25
3.8. Temperatura zona de estudio, años 1997 a 2013.....	27
3.9. Información bocatomas zona de estudio.....	28
3.10. Periodo de información disponible.....	30
3.11. Periodo de información disponible variables climáticas.....	32
3.12. Periodo de información disponible caudales.....	33
4. METODOLOGIA.....	35
5. Análisis y resultados precipitación zona de estudio.....	41
6. Análisis y resultados temperatura zona de estudio.....	49
7. Modelación clasificación climática	54
8. Determinación de la evapotranspiración.....	56
9. Análisis de caudales	64
9.1. Caudal Medio Puntual.....	64

9.2.	Curva de duración de caudales.....	65
10.	OFERTA HIDRICA.....	68
10.1.	Reducción de oferta hídrica por calidad.....	69
10.2.	Reducción de oferta mínima por caudal ecológico	70
11.	OFERTA HIDRICA NETA DISPONIBLE	71
12.	DEMANDA	72
13.	INDICE DE ESCASEZ	76
14.	COMPONENTES BALANCE HIDRICO PERIODO 1997-2013.....	78
14.1.	ENTRADAS	79
14.2.	SALIDAS.....	82
14.3.	ALMACENAMIENTO	83
14.4.	RESULTADO BALANCE HIDRICO	84
15.	PROYECCION DEL RECURSO HIDRICO	86
16.	CONCLUSIONES	89
	BIBLIOGRAFIA.....	91

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Ciclo Hidrológico del Agua. tomado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclodelh20.jpg	13
Ilustración 2	Ciclo Hidrológico en una Cuenca.....	14
Ilustración 3	División política de Caldas, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.	17
Ilustración 4	División de Subcuencas, CORPOCALDAS, fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	18
Ilustración 5	Microcuencas zona de estudio, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	19
Ilustración 6	Superficie microcuencas zona de estudio, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	19
Ilustración 7	Subcuenca, Chinchiná alta, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	20
Ilustración 8	División Zona de Estudio BH. Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	21
Ilustración 9	curvas de Nivel, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.	22
Ilustración 10	Ubicación de Estaciones y/o Pluviómetros zona de estudio, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	24
Ilustración 11	Grafico de Precipitación 1997 a 2013, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	26
Ilustración 12	Grafico de Temperatura Promedio 1997 a 2013, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	27
Ilustración 13	Ubicación de bocatomas zona de estudio, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.....	29
Ilustración 14	Grafica comportamiento precipitación La Fe, fuente propia.	42
Ilustración 15	Grafica comportamiento precipitación Martinica, fuente propia.	42
Ilustración 16	Grafica comportamiento precipitación San Antonio, fuente propia. .	42
Ilustración 17	Grafica comportamiento precipitación Romerales, fuente propia. ...	42
Ilustración 18	Grafica comportamiento precipitación Cedral, fuente propia.	43
Ilustración 19	Grafica comportamiento precipitación Gallinazo, fuente propia.....	43
Ilustración 20	Grafica comportamiento precipitación Montenegro, fuente propia. .	43
Ilustración 21	Grafica comportamiento precipitación Topacio, fuente propia.	43
Ilustración 22	Grafica comportamiento precipitación La Nubia, fuente propia.	44
Ilustración 23	Grafica comportamiento precipitación Las Brisas, fuente propia.	44
Ilustración 24	Grafica comportamiento precipitación Papayal, fuente propia.....	44
Ilustración 25	Grafica comportamiento precipitación Tesorito, fuente propia.....	44
Ilustración 26	Comparativo entre altura y precipitación, fuente propia.....	46
Ilustración 27.	Isoyetas zona de estudio, fuente propia.	47
Ilustración 28	Temperatura Multianual La Fe, fuente propia.....	50
Ilustración 29	Temperatura Multianual Tesorito, fuente propia.	50

Ilustración 30 Temperatura Multianual Las Brisas, fuente propia.	50
Ilustración 31 Temperatura Multianual La Nubia, fuente propia.....	50
Ilustración 32. Temperatura promedio/altura/estación, fuente propia.	51
Ilustración 33 Isotermas zona de estudio, fuente propia.....	53
Ilustración 34 Clasificación climática de Lang zona de estudio 1997-2013. Fuente propia.....	55
Ilustración 35 Comparación ETP Vs altitud. Fuente propia.....	61
Ilustración 36 ETP zona de estudio, fuente propia.....	62
Ilustración 37 ETP Holdridge zona de estudio, fuente propia.	63
Ilustración 38 CDC California, fuente propia.	65
Ilustración 39 CDC Termales, fuente propia.	65
Ilustración 40 CDC Romerales, fuente propia.....	66
Ilustración 41 CDC Cajones, fuente propia.	66
Ilustración 42 CDC Chinchiná, fuente propia.	67
Ilustración 43 Polígonos de Thiessen, fuente propia.	80
Ilustración 44 Balance Hídrico Microcuencas Abastecedoras. Fuente propia.	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 División y subdivisión de cuencas.....	20
Tabla 2 Estaciones y/o pluviómetros zona de estudio.	23
Tabla 3 Precipitación Promedio Multianual Zona de Estudio 1997 - 2013.....	25
Tabla 4. Temperatura Promedio Zona de Estudio 1997 a 2013.	27
Tabla 5 Detalle Bocatomas y Área respectiva de captación.	28
Tabla 6 Años de información obtenidos de cada estación meteorológica o pluviómetro.	30
Tabla 7 Información depurada a utilizar en la investigación de cada estación/pluviómetro.	31
Tabla 8 Rango de fechas de información obtenida de estaciones y pluviómetros.	32
Tabla 9 Información de Caudales Ofertados zona de estudio.	33
Tabla 10 Información de Caudales Captados en la zona de estudio.	33
Tabla 11 Valores de K_a	36
Tabla 12 Datos obtenidos de entidades facilitadoras.....	38
Tabla 13 Precipitación Media Multianual Zona de estudio.....	41
Tabla 14 Meses con mayor precipitación zona de estudio.	45
Tabla 15 Precipitación promedio según altitud de estaciones y/o pluviómetros. ...	46
Tabla 16 Temperatura promedio multianual (°C) zona de estudio.....	49
Tabla 17 Temperatura promedio/altura/estación.	51
Tabla 18 Clasificación climática - Caldas.....	54
Tabla 19 Clasificación de Lang.	54
Tabla 20 Métodos para calcular ETP.....	56
Tabla 21 Evapotranspiración promedio anual multianual Calculada en Excel 1997 - 2013 método de Thornthwaite.	57
Tabla 22 Evapotranspiración promedio anual multianual La Fe, método de Thornthwaite.	57
Tabla 23 Evapotranspiración promedio anual multianual La Nubia, método de Thornthwaite.	58
Tabla 24 Evapotranspiración promedio anual multianual Las Brisas, método de Thornthwaite.	58
Tabla 25 Evapotranspiración promedio anual multianual Tesorito, método de Thornthwaite.	59
Tabla 26 Evapotranspiración promedio anual multianual Calculada en Excel 1997 - 2013, método de Holdridge.....	59
Tabla 27 Evapotranspiración promedio anual multianual La Fe, método de Holdridge.	60
Tabla 28 Evapotranspiración promedio anual multianual La Nubia, método de Holdridge.	60

Tabla 29 Evapotranspiración promedio anual multianual Las Brisas, método de Holdridge.	60
Tabla 30 Evapotranspiración promedio anual multianual Tesorito, método de Holdridge.	60
Tabla 31 ETP zona de estudio Vs msnm.	61
Tabla 32 ETP en los sitios de interés de la zona de estudio.	63
Tabla 33 Caudales Medios Multianuales Fuentes Abastecedoras Zona de Estudio.	64
Tabla 34 Consolidado CDC de fuentes abastecedoras.	67
Tabla 35 Ofertas Hídricas teórica de fuentes abastecedoras.	68
Tabla 36 Caracterización de fuentes.	69
Tabla 37 Fuentes afectadas por calidad.	69
Tabla 38 Caudal Ecológico.	70
Tabla 39 Oferta Hídrica Neta Zona de Estudio.	71
Tabla 40 Total oferta hídrica neta multianual.	71
Tabla 41 Demanda según suscriptores multianual.	72
Tabla 42 consumo Facturado	73
Tabla 43 Caudal Captado Multianual.	74
Tabla 44 Comparación caudal captado versus facturado.	75
Tabla 45 Categorías e interpretación del índice de escasez.	76
Tabla 46 Índice Escasez algunas ciudades Colombia.	77
Tabla 47 Entrada General Balance Hídrico superficial.	79
Tabla 48 Precipitación total según área/microcuencas.	80
Tabla 49 Población municipio de Manizales y suscriptores del servicio de acueducto.	87
Tabla 50 Proyección vs Oferta.	88

RESUMEN

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica sobre los datos meteorológicos e hídricos particulares en una cuenca tiene un enorme potencial de aceptación en el mundo moderno por sus ventajas para tomar decisiones sobre modelaciones acertadas y acordes a la realidad, al generar panoramas, mapas, datos y nuevas variables con las cuales trabajar de una manera concordante con el medio, siguiendo los parámetros establecidos en la metodología aplicada, para posteriormente presentar mapas, análisis y resultados de la información obtenida mediante la fórmula de Thornthwaite y Holdridge para calcular la evapotranspiración, valiéndose de tablas en Excel se analiza la información de 17 años, organizándola y depurándola adecuadamente a los requerimientos necesarios de estudio como son la precipitación, la temperatura, los caudales para estimar oferta y demanda teniendo en cuenta el caudal ecológico según la curva de duración de caudales; proyectando el recurso hídrico según el crecimiento poblacional y la demanda que se abastece de la planta de tratamiento de agua potable “Luis Prieto Gómez”.

El balance hídrico hace referencia a la ecuación de la continuidad donde las entradas menos las salidas son iguales al almacenamiento del recurso del sistema evaluado, finalmente esta investigación será el punto de partida para muchas más en pro del futuro sostenible esperado de la cuenca gracias a la toma de las mejores opciones para el uso adecuado del recurso mediante nuevos proyectos que generen agua. Todo lo anterior conservando y cumpliendo el objetivo de estudio y aplicabilidad como profesional del medio ambiente de la UNAD.

Palabras Clave: Balance Hídrico, Cuenca Abastecedora, Precipitación, Evapotranspiración, Caudal Ecológico, Oferta y Demanda del Recurso Hídrico.

ABSTRACT

The application of the Geographical information systems on the particular meteorological and water data in a basin has an enormous acceptance potential in the modern world as its advantages to take decisions about guessed right and identical modeling to the reality, on having generated panoramas, maps, information and new variables with which to work in a concordant way with the way, following the parameters established in the applied methodology, later to present maps, analysis and results of the information obtained by means of the formula of Thornthwaite and Holdridge to calculate the evapotranspiration, using of stage in Excel the information of 17 years is analyzed, organizing it and purifying it appropriately to the necessary study requests as there are the precipitation, the temperature, the wealths to estimate supply and demand bearing in mind the ecological wealth as the curve of duration of wealths; projecting the water resource as the population growth and the demand that stocks up with the plant of treatment of drinking water “Luis Prieto Gómez”.

The water balance refers to the equation of the continuity where the earnings less the exits are equal to the storage of the resource of the evaluated system, finally this investigation will be the starting point for many other to the advantage of the sustainable future expected from the basin thanks to the capture of the best options for the suitable use of the resource by means of new projects that generate water. Everything previous preserving and fulfilling the target of study and applicability as professional of the environment of the UNAD.

Key words: Water balance, Cuenca Purveyor, Precipitation, Evapotranspiration, Ecological Wealth, Supply and demand of the Water Resource.

INTRODUCCION

En Colombia, el MADS¹ orienta a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible en la formulación de planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas –POMCAS, cuya metodología que sugiere la resolución 865 del 22 de julio de 2004, utiliza los conceptos de la UNESCO la cual es líder en el estudio del recurso hídrico a nivel mundial.

La empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P. se procura una planificación integral y eficiente de la gestión institucional en la cuenca, donde se hace necesario conocer a fondo y en detalle la oferta, así como su respectiva demanda puntual del recurso hídrico, siendo así, con el proyecto se pretende completar un vacío en cuanto al recurso en el área de estudio.

Este proyecto tiene por objetivo estimar el **Balance Hídrico** comprendido en el periodo del año 1997 al año 2013 de la cuenca con área de aferencia a la planta de agua potable “Luis Prieto Gómez” ubicada en la vereda Gallinazo del municipio de Villamaría, la cual es propiedad de la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P., para el desarrollo se utiliza como punto de partida la resolución 865 del 22 de julio de 2004 emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible); posteriormente se ajusta según su aplicabilidad valiéndose de diferentes estudios de datos meteorológicos e hídricos de la zona de estudio, mediante las ecuaciones de Thornthwaite y Holdridge por la relación de información obtenida para las mismas. Utilizando tablas en Excel se analiza, organiza y depura la información de mínimo 10 años, organizándola adecuadamente a los parámetros necesarios del estudio, obteniendo.

¹ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

Evaluar y diagnosticar la disponibilidad de agua actual y a futuro en la cuenca abastecedora de la planta de tratamiento de agua potable Luis Prieto Gómez, en el Municipio de Villamaría Caldas mediante la metodología de balance hídrico.

1.2. ESPECIFICOS

- Calcular la oferta del recurso hídrico, su demanda y estimar el balance hídrico existente en diferentes puntos de la cuenca abastecedora.
- Determinar el índice de escasez para la cuenca abastecedora.
- Proyectar la oferta/demanda hídrica a mediano y largo plazo del agua disponible en la cuenca aferente.

2. MARCO TEORICO

2.1. Ciclo Hidrológico del agua²

El ciclo del agua es un proceso continuo con diferentes fases donde el agua cambia de estado líquido a gaseoso por evaporación, escurre, se infiltra y se detiene o almacena ocasionalmente. Es decir que involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido debido a la energía del sol que genera evaporación y a la gravedad terrestre que hace descender el agua por precipitación y escurrimiento.

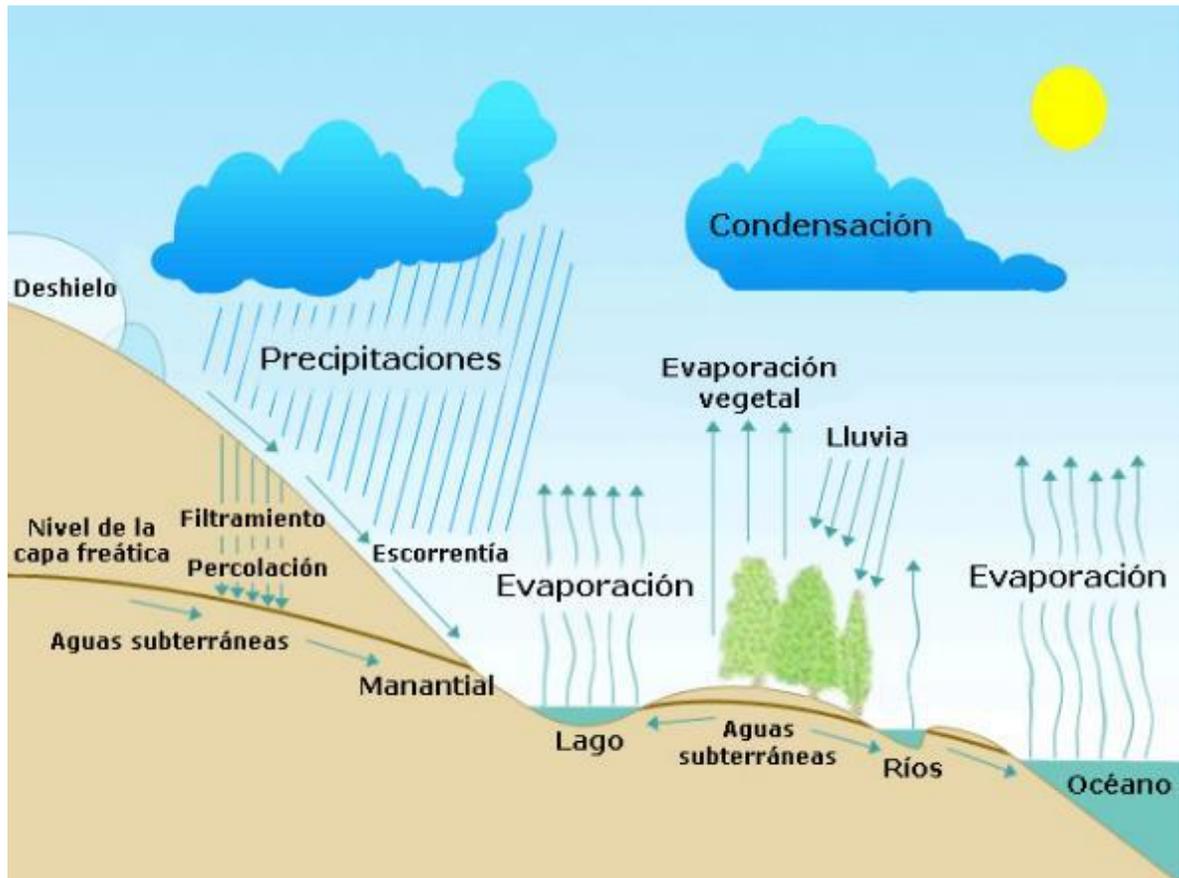


Ilustración 1 Ciclo Hidrológico del Agua. tomado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciclodelh20.jpg>

Las mediciones realizadas en las diferentes etapas o procesos del ciclo muestran un panorama acertado debido a que su cuantificación no es sencilla.

En la ilustración (2) se observa el ciclo general del agua que es usual en la zona de estudio como un sistema dinámico hidrológico.

² D. F. Campos Aranda, *Procesos del ciclo Hidrológico* (1983). San Luis Potosí México.

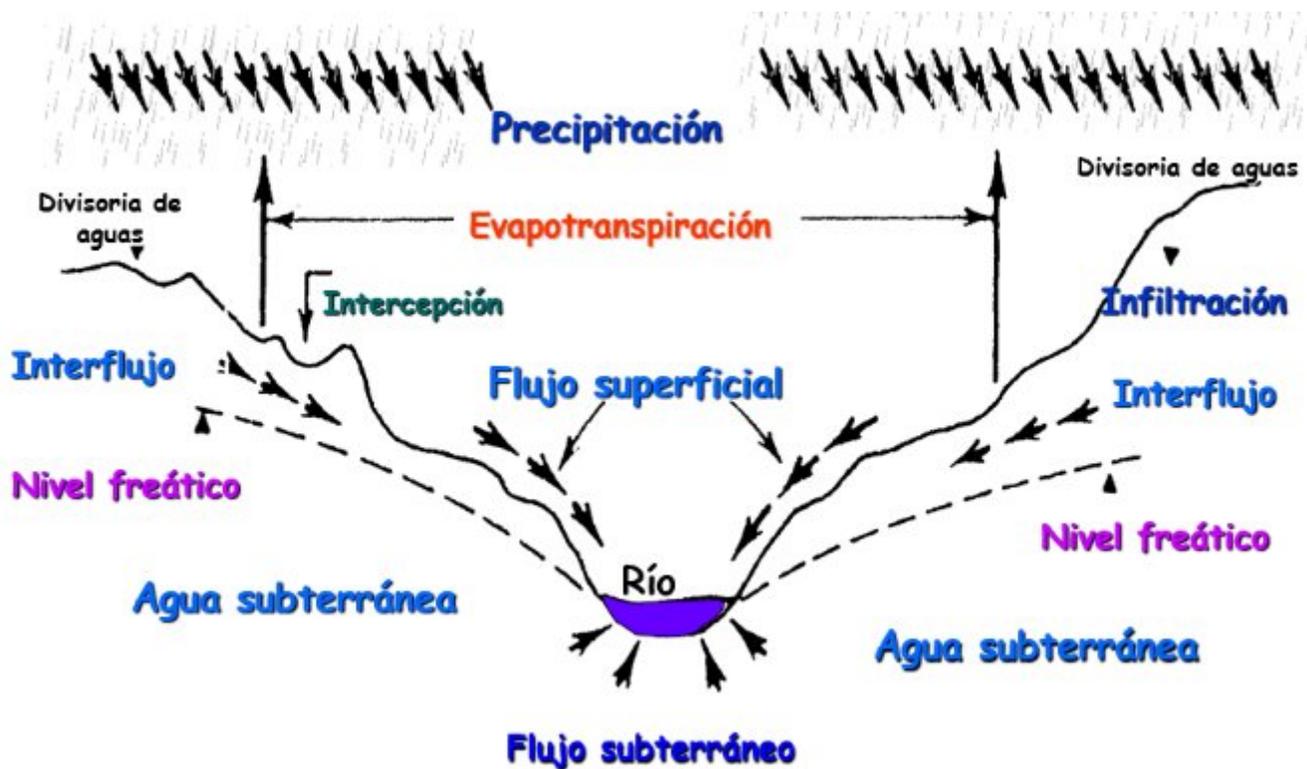


Ilustración 2 Ciclo Hidrológico en una Cuenca.

Generalmente los datos de cada una de las variables del ciclo hidrológico no se tienen en su totalidad por diversos factores como falta de estaciones, error humano, falla en equipos electrónicos, en fin, siendo necesario calcularlas mediante metodologías conocidas o aplicables según los datos disponibles y a su vez haciendo los cálculos más complejos o simples. La exactitud³ de las variables aumenta al hacerlo la superficie de la cuenca y en algunos casos se pueden deprecia dichas variables.

³ UNESCO, (1981) Métodos de cálculo del balance hídrico, Guía internacional de investigación y métodos, Instituto de hidrología de España/UNESCO. (página 20).

2.2. Variables del ciclo hidrológico⁴

2.2.1. Precipitación

Es la principal entrada del ciclo y por ello su medida debe ser lo más precisa y confiable ya que de ello depende la exactitud de los cálculos del balance hídrico. Al no contar con series de datos completas se deben estimar con métodos conocidos bien sean estadísticos, matemáticos, gráficos etc., subsanando dicho faltante de datos. El método que ofrece mayor confiabilidad es el de los mapas de isoyetas a la hora de calcular la precipitación de una zona.

2.2.2. Escurrimiento superficial o caudal de río

Su determinación exacta depende de la exactitud de la medida y el cálculo del caudal de la variación del mismo teniendo en cuenta el número de estaciones de aforo. La serie de datos deben ser homogéneas en el tiempo y donde dichos datos contengan periodos secos y húmedos, las variaciones del caudal con el tiempo se ajustan a la distribución estadística y se investigan mediante métodos probabilísticos. Un método usualmente utilizado es el de la curva de duración de caudales, método aritmético y estadístico.

2.2.3. Temperatura

Influye en otros factores como la evaporación y evapotranspiración, ya que si es alta genera mayor pérdida de agua y viceversa al ser baja. Generalmente se mide por medio de estaciones meteorológicas. Esta variable es inversamente proporcional a la altura es decir que a medida que se acerca al mar esta es mayor y viceversa al ascender.

2.2.4. Evaporación y evapotranspiración

La mayor pérdida de agua en el ciclo hidrológico es la combinación de la evaporación de agua del suelo, cuerpos de agua debido a la radiación solar y la transpiración de las plantas. Se calcula mediante fórmulas que estimen pérdida de agua por efectos climáticos o estimada por tanques evaporímetros.

⁴ UNESCO, (1981) Métodos de cálculo del balance hídrico, Guía internacional de investigación y métodos, Instituto de hidrología de España/UNESCO

2.2.5. Almacenamiento de agua o cambio de almacenamiento

Se traduce como la recarga de agua disponible, flujo subterráneo y cambios de nivel en ríos. Se puede calcular mediante la aplicación de la ecuación de conservación de masas o ecuación de la continuidad.

2.3. Modelación con software especializado⁵ (ArcGIS 10.5)⁶

Un SIG es un sistema computarizado particular para mapeo y análisis de datos geográficos debidamente organizados, procesados y analizados que proporcionan una base consistente para la toma de decisiones.

ArcGIS es un sistema de información geográfica que ofrece la posibilidad de manejar bases de datos de manera espacial por la gran magnitud de datos e información requerida para el cálculo de las variables. Hoy en día en internet se encuentra disponible una gran cantidad de datos que soportan la modelación hidrológica y además sin costo, los SIG son una herramienta potente e importante por su capacidad de representar o construir modelos (modelar) de la realidad aplicando procedimientos que arrojan aún más información sobre las tendencias de los datos.

La modelación de datos conlleva a realizar comparaciones, visiones, proyecciones, regresiones de los datos analizados garantizando la toma de decisiones acertadas.

⁵ Mancebo Quintana, S.; Ortega Pérez, E.; Valentín Criado, A. C.; Martín Ramos, B.; Martín Fernández, L. (2008) Libro SIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. Madrid, España, los autores.

⁶ ESRI. What is ArcGIS? Manual del Software ArcGIS 8. New York, USA. 2002. Publicado en formato digital en: www.esri.com.

3. INFORMACION GENERAL Y ESPECIFICA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Aspectos geográficos generales

El **Departamento de Caldas**⁷ está situado en el centro occidente de la región andina, localizado entre los **05°46'51"** y los **04°48'20"** de latitud norte, y los **74°38'01"** y **75°55'45"** de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 7.888 km² lo que representa el 0.69 % del territorio nacional. Limita por el Norte con el departamento de Antioquia, por el Este con el departamento de Cundinamarca, por el Sur con los departamentos del Tolima y Risaralda, y por el Oeste con el departamento de Risaralda.

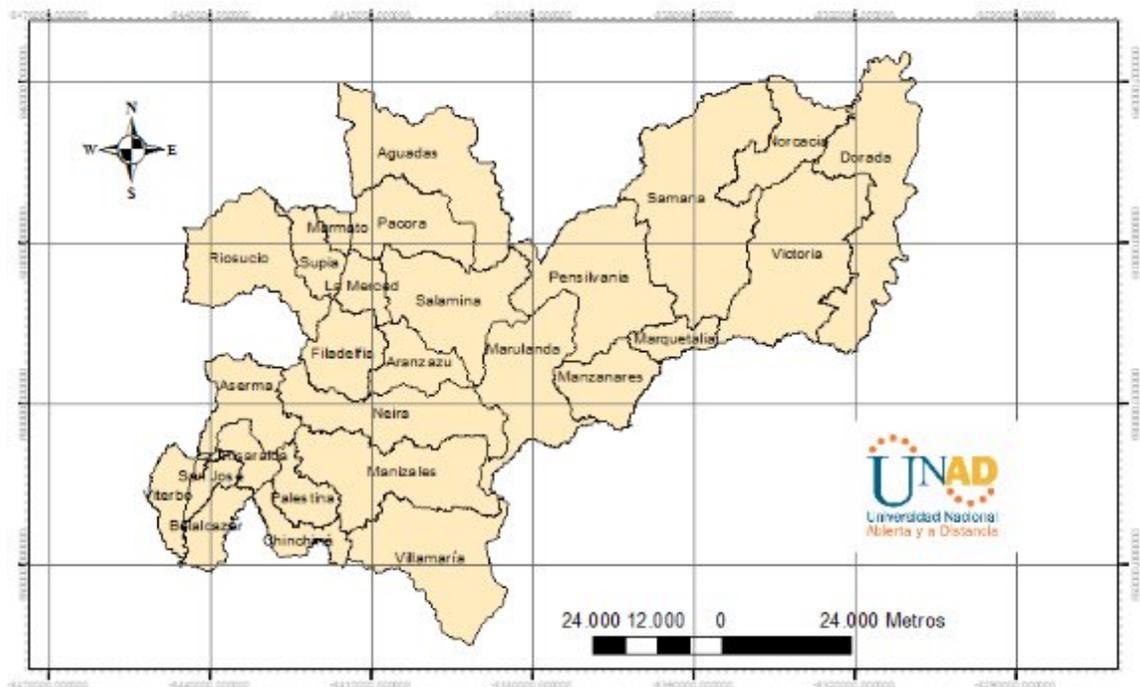


Ilustración 3 División política de Caldas, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

⁷ Toda Colombia, la cara amable de Colombia (2015). Caldas. Recuperado de: <http://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/caldas.html>

3.2. Aspectos geográficos específicos de la zona de estudio

Este proyecto se realiza principalmente para la parte alta de la cuenca del río Chinchiná, según la división generada por la autoridad ambiental CORPOCALDAS⁸ para la sectorización hídrica de la cuenca del río Chinchiná se tiene la siguiente división, ilustración (4):

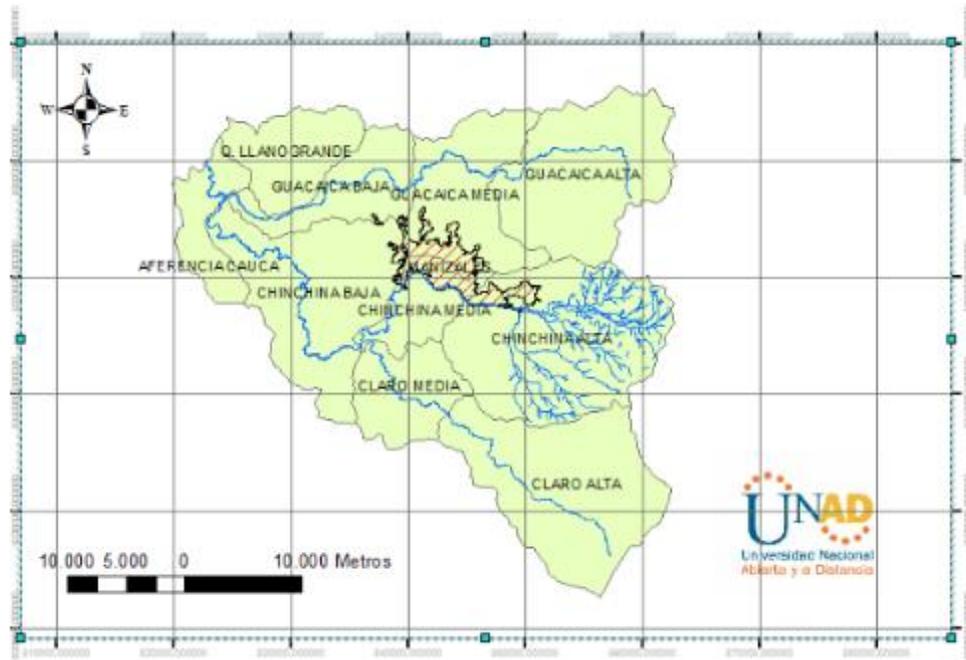


Ilustración 4 División de Subcuencas, CORPOCALDAS, fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

La cual tiene las siguientes coordenadas de ubicación para las microcuencas de Chinchiná, Cajones, Termales, Romerales y California:

- Al norte: 75°22'13,683"O 5°3'48,242"N.
- Al este: 75°20'4,259"O 4°58'26,647"N.
- Al sur: 75°22'19,309"O 4°56'52,739"N.
- Al oeste: 75°26'33,947"O 4°59'13,234"N

⁸ Corporación Autónoma Regional de Caldas.

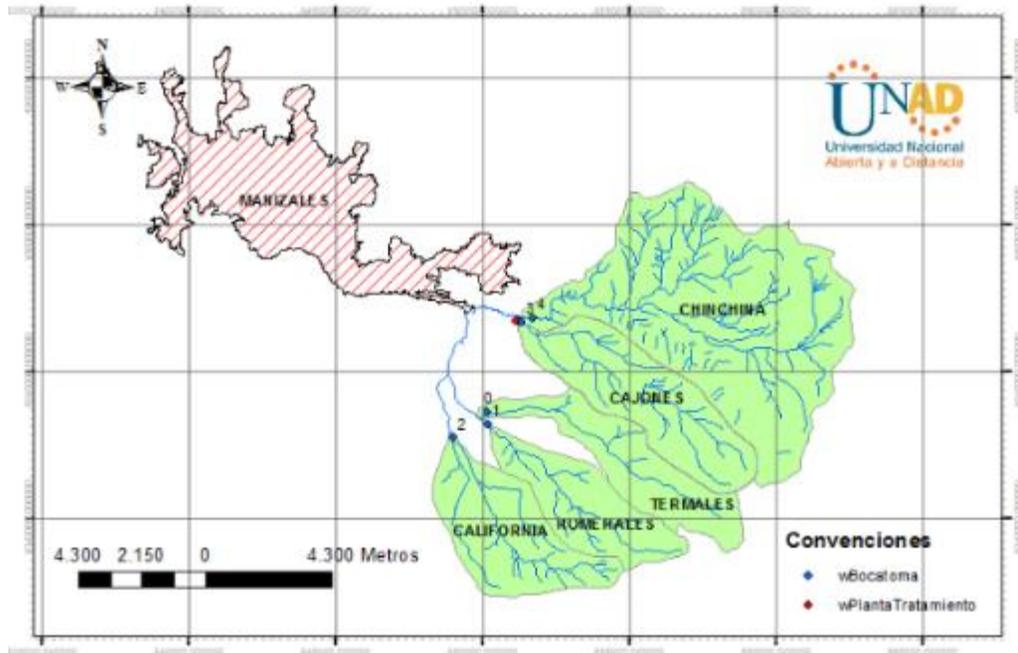


Ilustración 5 Microcuencas zona de estudio, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

En la ilustracion (6) se presenta el area (ha) de cada una de las microcuencas de la zona de estudio.

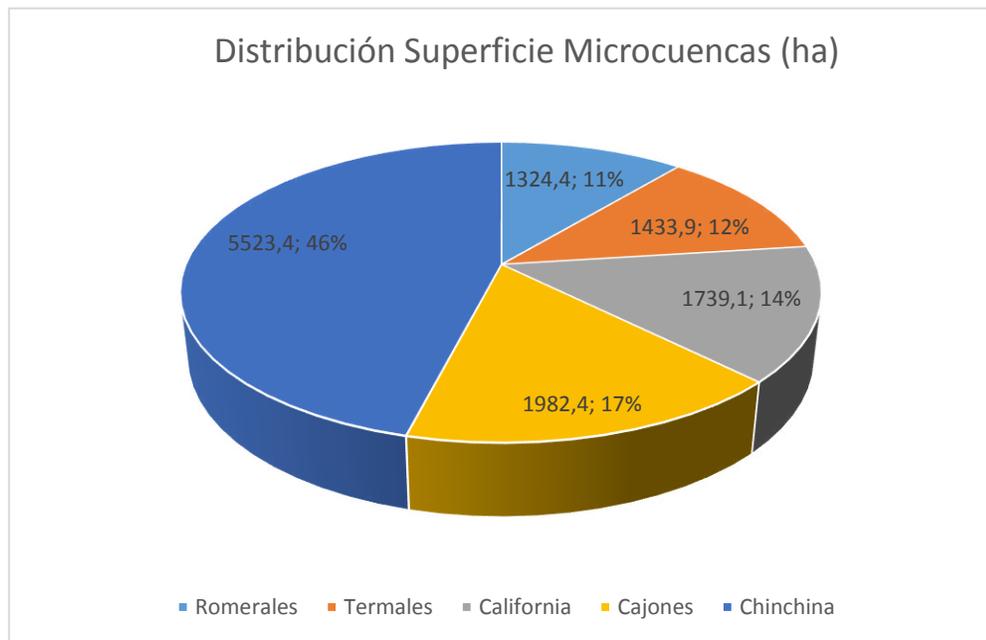


Ilustración 6 Superficie microcuencas zona de estudio, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

La zona de estudio tiene un área total de 12003,3 hectáreas teniendo en cuenta las cinco microcuencas y se divide de la siguiente manera: Tabla (1).

Tabla 1 División y subdivisión de cuencas.

AREA DE AFERENCIA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE LUIS PRIETO GOMEZ (ha)		
SUBCUENCA	MINICUENCAS	MICROCUENCAS
Chinchiná Alta (20766,7)	Manizales (44161,3)	Chinchiná (5523,4)
		Cajones (1982,4)
		Termales (1433,9)
	Villamaría (44072,4)	Romerales (1324,4)
		California (1739,1)

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P

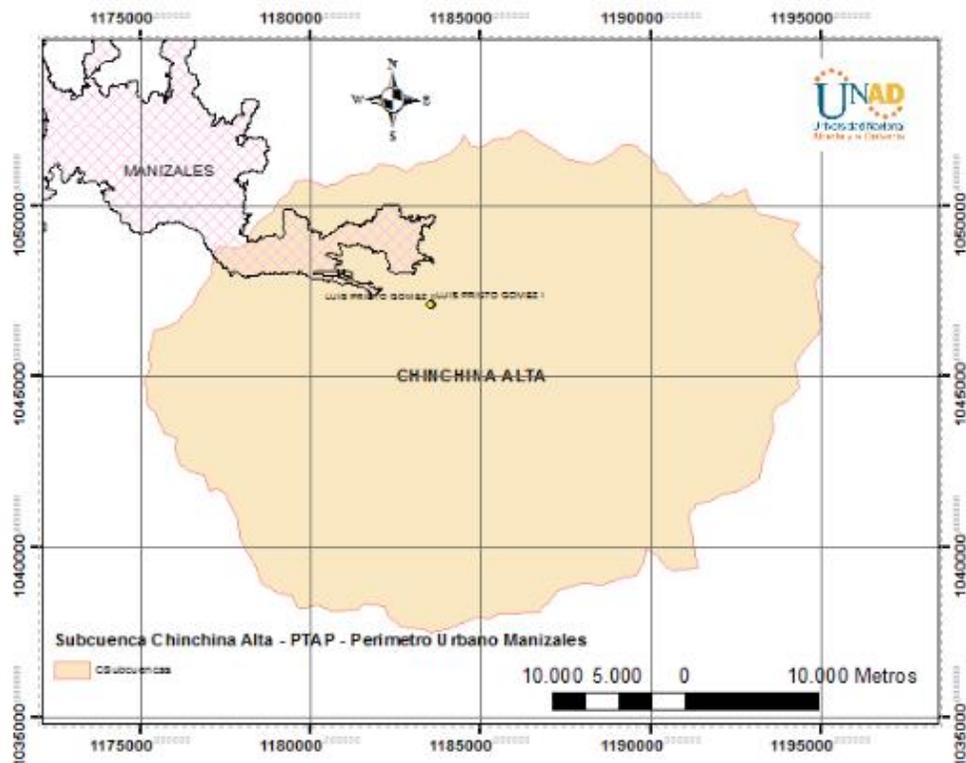


Ilustración 7 Subcuenca, Chinchiná alta, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P

A continuación, en la ilustración (8) se tiene el mapa con su respectiva división entre subcuencas, minicuecas y microcuencas donde se observa el área de aferencia a la zona de estudio que para este caso son las microcuencas antes mencionadas.

Es de anotar que la empresa Aguas de Manizales S.A E.S.P. no tiene un estudio anterior y puntual del área en mención, es decir de las microcuencas anteriormente citadas, su balance hídrico es de gran importancia para contrastar la información obtenida de la precipitación que a nivel general es muy buena en la zona de estudio.

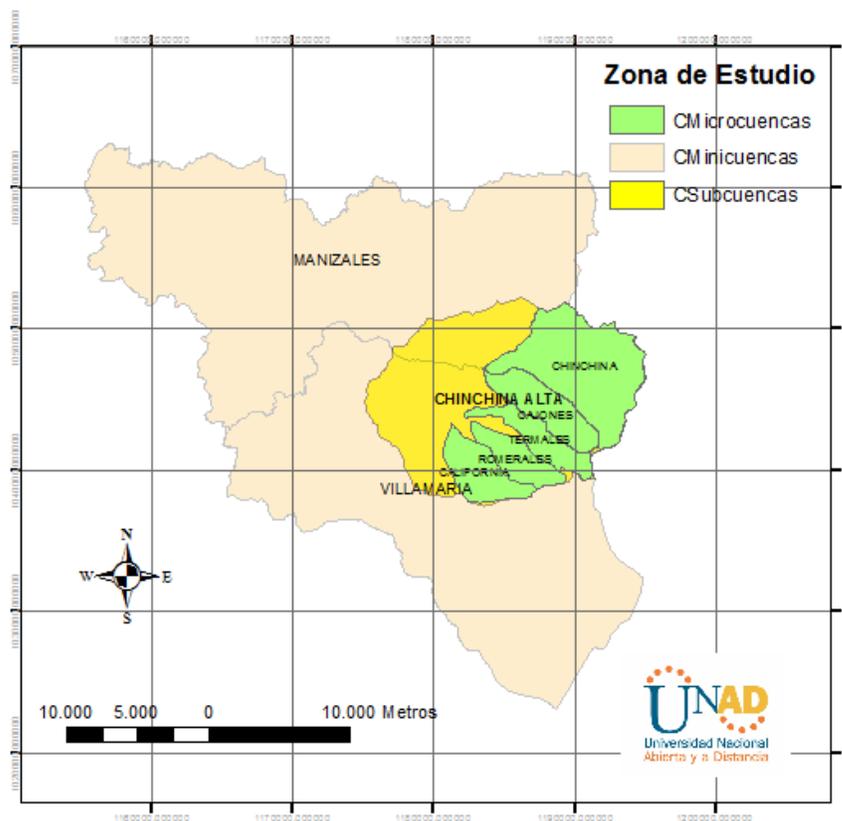


Ilustración 8 División Zona de Estudio BH. Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P

3.3. Orígenes del Agua⁹

El agua captada en la zona de estudio proviene de los Paramos y Humedales (Andinos), Nevado del Ruiz, de los ríos Chinchiná y Rio Claro a 5400 m.s.n.m., es decir de la zona alta de la cuenca del rio Chinchiná, donde el régimen de lluvias es Bimodal presentando dos periodos de invierno (alta precipitación)

⁹ Definición del índice de escasez e implementación del modelo de gestión integral del recurso hídrico WEAP en la cuenca alta del rio Chinchiná.

siendo los meses de mayor precipitación abril, mayo, junio y octubre, noviembre, diciembre respectivamente al año.

3.4. Clasificación climática

Aplicando la metodología Caldas-Lang (1962). Los parámetros básicos son la temperatura y la precipitación de cualquier clasificación climática debido a que utiliza la variación altitudinal de la temperatura, que indica los pisos térmicos y la efectividad de la precipitación que muestra la humedad. En un menor grado la evaporación, la humedad relativa y el brillo solar para dicha metodología aplicada puesto que se utilizan metodologías acorde a los datos disponibles.

Según el modelo climático de Caldas – Lang (1962) utilizado por el IDEAM, la zona de estudio se encuentra entre los pisos térmicos frío y paramo alto con un rango de altura entre los 2001 a 4600 m.s.n.m. ver ilustración (9), cuyas temperaturas se encuentran en intervalos de 7°C y los 17,5°C respectivamente, el tipo de clima en la zona es húmedo – superhúmedo.

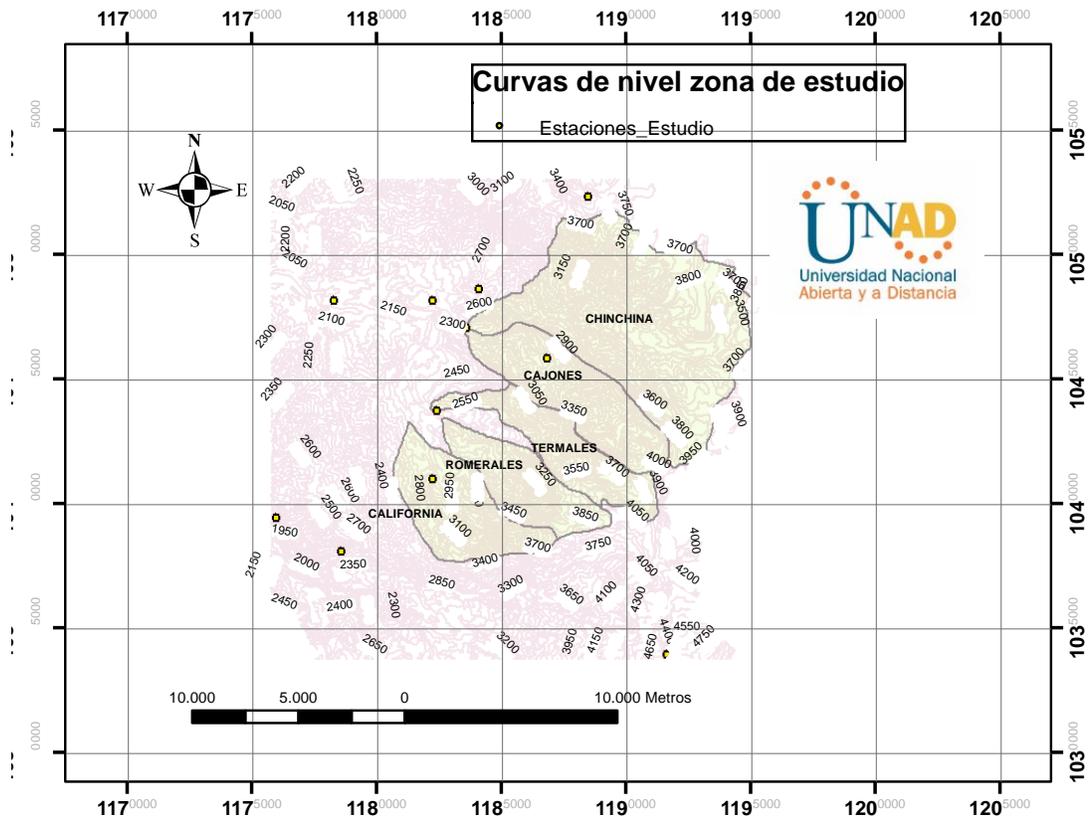


Ilustración 9 curvas de Nivel, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

3.5. Caracterización climática

El análisis de las variables climatológicas fue realizado a partir de los registros de las estaciones meteorológicas y pluviométricas ubicadas en la zona de estudio, administradas por Aguas de Manizales S.A. E.S.P., IDEAM y CHEC respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2 Estaciones y/o pluviómetros zona de estudio.

Estación y/o pluviómetro	Tipo	X	Y	Altitud	Entidad facilitadora
San Antonio California	Pluviómetro Estación	1182242,664	1041013,758	2562	Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
La Fe	Meteorológica	1186845,236	1045843,241	2782,8	Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
Romerales	Pluviómetro	1182401,776	1043749,475	2403,1	Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
Martinica	Pluviómetro Estación	1188474,878	1052316,897	3568,5	Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
Las Brisas	Meteorológica Estación	1191599,941	1033940,779	4150	IDEAM
Papayal	Meteorológica Estación	1175995,517	1039457,999	2220	IDEAM
Finca Tesorito	Meteorológica Estación	1182248,195	1048152,569	2290	IDEAM
La Nubia	Meteorológica	1178298,681	1048139,59	2058	IDEAM
Gallinazo	Pluviómetro	1183588,342	1047069,431	2311	CHEC
El Cedral	Pluviómetro	1184101,273	1048600,38	2475	CHEC
El Topacio	Pluviómetro	1187831,293	1041241,612	3597	CHEC
Montenegro	Pluviómetro	1178572,094	1038122,648	2325	CHEC

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P., CHEC, IDEAM

3.6. Ubicación de estaciones meteorológicas y/o pluviómetros para el cálculo de variables climáticas

Para tener un mejor concepto de ubicación de las estaciones y/o pluviómetros tanto en el interior como en el exterior de las microcuencas mencionadas anteriormente y que tienen una incidencia en el estudio mencionado, observamos la ilustración (10) que es ubicación de cada una en el plano utilizando coordenadas planas y altitud GPS.

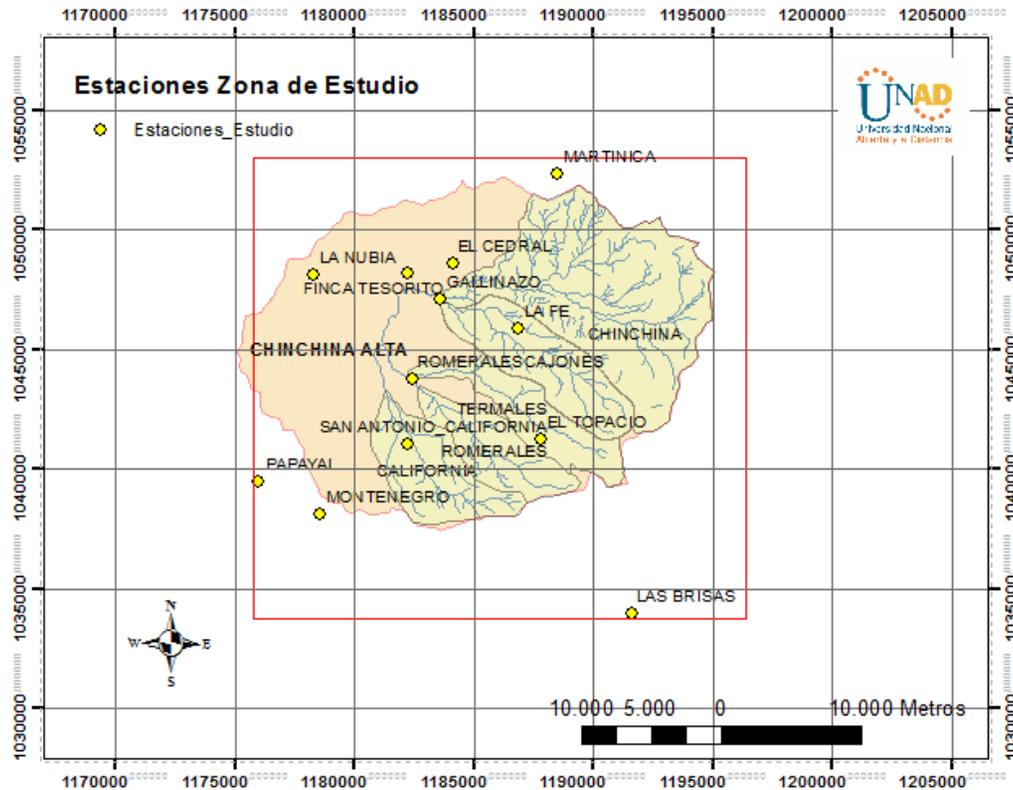


Ilustración 10 Ubicación de Estaciones y/o Pluviómetros zona de estudio, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

3.7. Precipitación zona de estudio, años 1997 a 2013

A continuación, se presentan los datos obtenidos de las diferentes entidades en la tabla (3), donde anteriormente se realizó una depuración de datos mediante regresión múltiple y la complementación respectiva de datos faltantes por el método deductivo para la generación de la misma.

Tabla 3 Precipitación Promedio Multianual Zona de Estudio 1997 - 2013.

Estación y/o Pluviómetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Precipitación Promedio Multianual
AGUAS La Fe	106,1	100,4	158,1	193,7	199,3	118,0	77,0	73,4	145,4	236,5	230,9	132,0	1770,7
AGUAS Martinica	123,3	136,2	191,7	246,6	279,3	197,1	138,3	128,9	207,9	265,8	244,1	169,3	2328,5
AGUAS Romerales	137,3	134,3	189,4	253,0	249,4	165,7	87,3	101,2	187,3	284,7	262,9	171,8	2224,4
AGUAS San Antonio	133,8	136,0	216,3	267,2	242,4	169,6	90,6	100,5	195,2	291,8	272,9	164,4	2280,8
CHEC Cedral	155,4	129,2	206,2	261,5	214,4	149,7	114,7	102,1	182,9	277,6	280,1	188,5	2262,3
CHEC Gallinazo	124,7	141,9	154,0	205,2	202,7	148,3	93,9	91,5	177,5	247,3	263,4	174,8	2025,3
CHEC Montenegro	113,4	122,6	182,2	250,7	187,6	121,6	81,0	84,0	128,2	233,5	216,5	136,4	1857,7
CHEC Topacio	132,9	122,1	198,0	230,0	242,1	137,2	83,4	106,7	187,0	280,7	236,6	135,5	2092,1
IDEAM La Nubia	64,2	63,9	79,2	93,0	91,5	72,7	41,2	39,2	67,2	116,1	104,1	74,9	907,2
IDEAM Las Brisas	91,4	88,2	125,0	171,1	188,6	115,2	66,4	78,2	110,4	198,9	162,6	95,7	1491,9
IDEAM Papayal	118,6	139,1	179,6	250,7	241,1	169,9	106,0	102,5	137,8	262,8	271,2	149,1	2128,4
IDEAM Tesorito	130,8	107,6	158,7	186,2	172,0	135,7	65,5	78,5	148,1	218,0	230,9	148,5	1780,4

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P., CHEC grupo EPM, IDEAM.

La ilustración (11) nos indica un régimen bimodal como se mencionó anteriormente; cuya tendencia invernal es en los meses de marzo, abril y mayo en un primer periodo, para el segundo periodo tenemos los meses de septiembre, octubre y noviembre respectivamente.

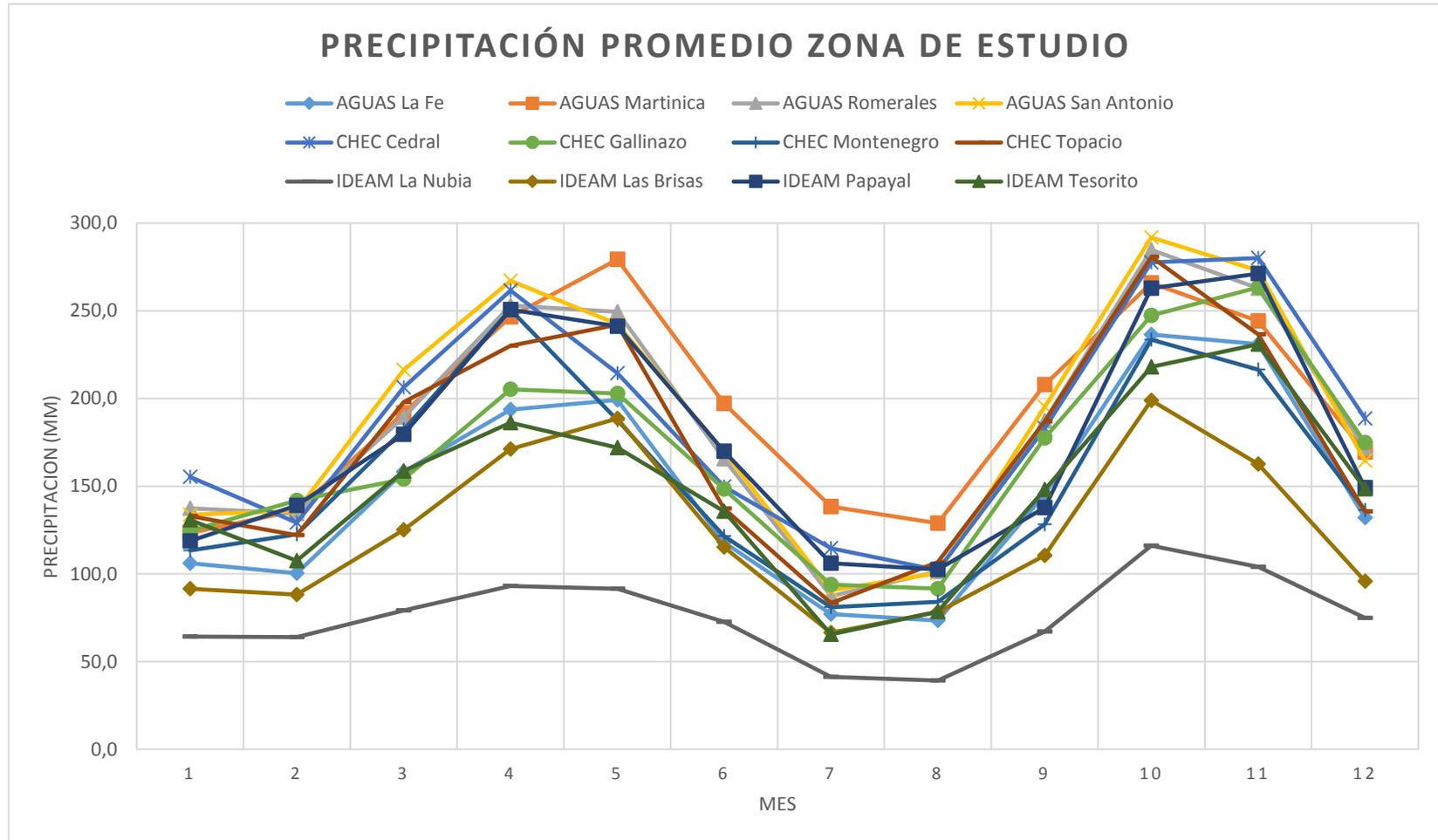


Ilustración 11 Grafico de Precipitación 1997 a 2013, Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

3.8. Temperatura zona de estudio, años 1997 a 2013

La temperatura promedio de la zona de estudio en las microcuencas varía desde los 4°C hasta los 18°C, ver tabla (4), dicha información se genera a partir de los datos obtenidos en las diferentes entidades colaboradoras en el proyecto. Para el ejercicio solo se cuenta con información de cuatro estaciones meteorológicas de donde se obtiene la temperatura de la zona.

Tabla 4. Temperatura Promedio Zona de Estudio 1997 a 2013.

Estación y/o Pluviómetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
AGUAS La Fe	12,2	12,4	12,5	12,5	12,6	12,5	12,4	12,5	12,2	12,1	12,0	12,1
IDEAM La Nubia	17,1	17,3	17,4	17,1	17,6	17,3	17,4	17,4	17,3	16,7	16,6	16,7
IDEAM Las Brisas	4,5	4,7	4,8	5,0	5,2	4,9	4,8	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6
IDEAM Tesorito	15,5	15,8	15,7	15,7	15,7	15,4	15,7	15,8	15,3	15,1	15,2	15,3

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

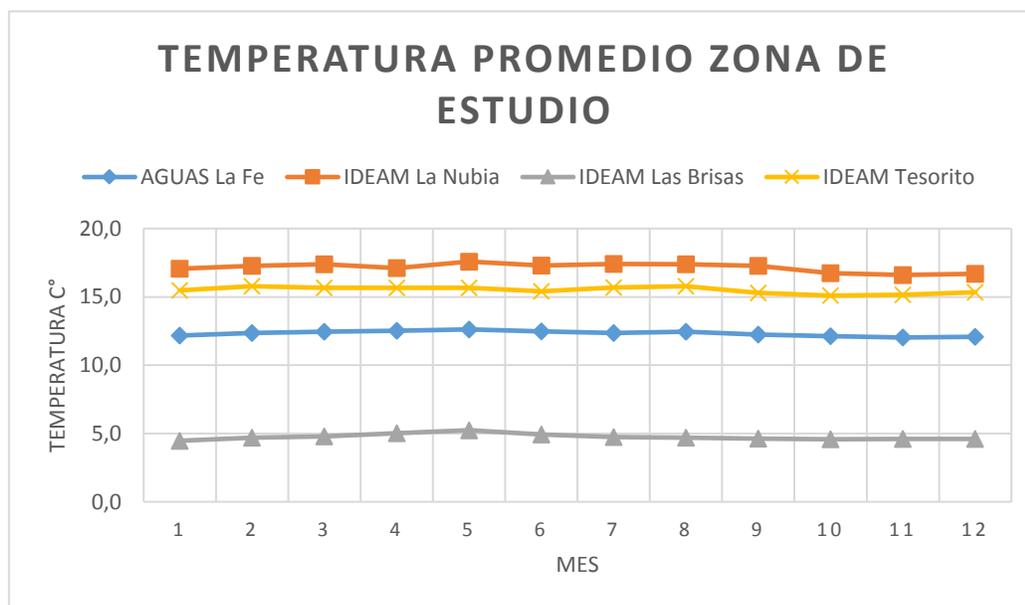


Ilustración 12 Gráfico de Temperatura Promedio 1997 a 2013, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

3.9. Información bocatomas zona de estudio

Este proyecto analiza el recurso hídrico que se oferta y se capta en las microcuencas abastecedoras mediante sus bocatomas del mismo nombre como son: Chinchiná, Cajones, Termales, Romerales y California con sus respectivas bocatomas ver la tabla (5) donde se presenta la información de las mismas y se complementa con la ilustración (13).

Tabla 5 Detalle Bocatomas y Área respectiva de captación.

Microcuenca abastecedora	Foto Bocatoma	Altitud (msnm)	Ubicación		Área Microcuenca (ha)
			X	Y	
Chinchiná		2360	1184080	1047191	5523,1
Cajones		2325	1183706	1047025	1982,4
California		2402	1181402	1043102	1739,1
Termales		2443	1182511	1043973	1433,9
Romerales		2421	1182587	1043550	1324,4

Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

En un día normal, el consumo para la ciudad de Manizales es de 1100 Litros/segundos, Manizales tiene días con un consumo máximo de 1300 Litros/segundos generalmente los sábados que es el día de mayor consumo según información suministrada y posiblemente debido al aumento del gasto por habitante.

La ilustración (13) presenta la ubicación de las bocatomas y la PTAP Luis Prieto Gómez en el plano mediante coordenadas planas y altura GPS.

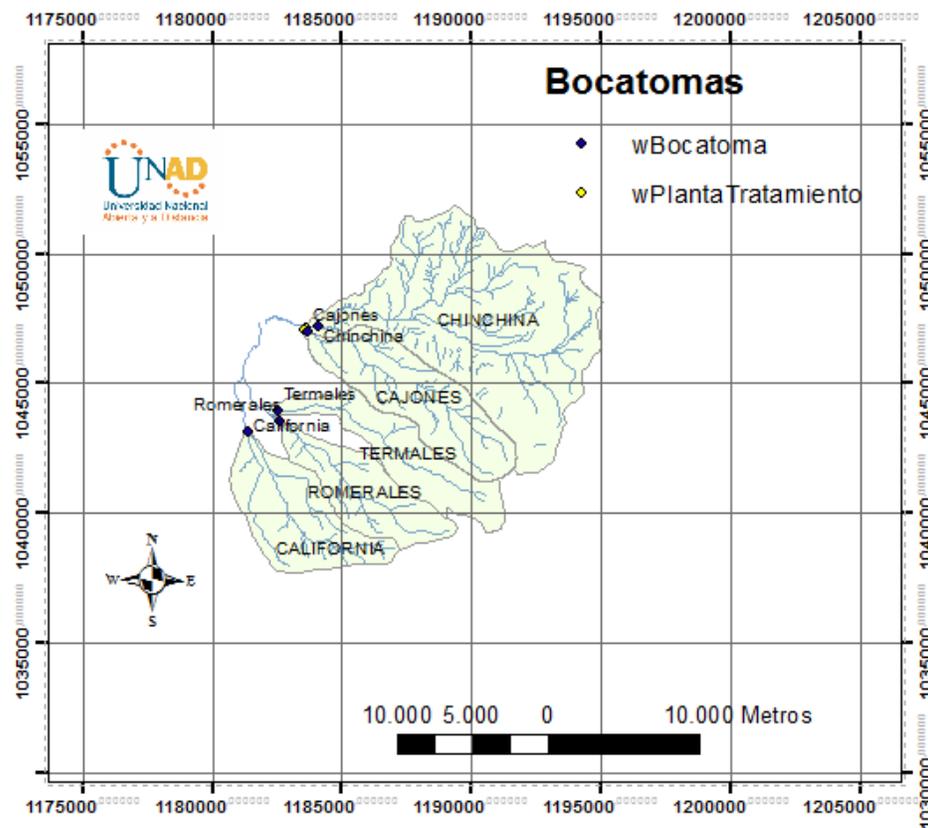


Ilustración 13 Ubicación de bocatomas zona de estudio, Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

A la fecha de realizar este estudio la bocatoma de Termales se encuentra fuera de servicio debido a problemas de minería y tratamiento, aunque se incluye en el balance hídrico puesto que hace parte del mismo, aunque no se capte el recurso.

3.10. Periodo de información disponible

La información obtenida de cada entidad colaboradora fue a nivel diario y mensual para la precipitación y temperatura, la cual se organizó de una manera uniforme (igualdad de formatos) en tablas de Excel para una mejor visión, análisis de la misma y su posterior modelación.

La tabla (6) nos indica el número de años de información por cada estación meteorológica o pluviómetro de la zona de estudio.

Tabla 6 Años de información obtenidos de cada estación meteorológica o pluviómetro.

ENTIDAD	ESTACION	TOTAL AÑOS DISPONIBLES
		23
Aguas de Manizales S.A. E.S.P.	San Antonio-california	
	La Fe	22
	Romerales	19
CHEC	Martinica	23
	Gallinazo	20
	El Cedral	20
	El Topacio	24
	Montenegro	20
	Las Brisas	34
IDEAM	Papayal	35
	Finca Tesorito	22
	La Nubia	30

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

Para la investigación se utilizó la siguiente información después de analizar los rangos de fechas disponibles en la base de datos, es decir, utilizar datos en un mismo rango de espacio y tiempo que para la investigación es de 17 años entre el mes de enero de 1997 y el mes de diciembre de 2013 respectivamente tabla (7).

Tabla 7 Información depurada a utilizar en la investigación de cada estación/pluviómetro.

ENTIDAD	ESTACION	MES INICIAL- AÑO	MES FINAL- AÑO	TOTAL, AÑOS DE ANALISIS
Aguas de Manizales S.A. E.S.P.	San Antonio-california	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	La Fe	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Romerales	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Martinica	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Gallinazo	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
CHEC	El Cedral	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	El Topacio	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Montenegro	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Las Brisas	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
IDEAM	Papayal	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Finca Tesorito	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	La Nubia	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

3.11. Periodo de información disponible variables climáticas

A continuación, en la tabla (8) se tienen los rangos de fechas de la información sobre las variables climáticas obtenida de cada entidad:

Tabla 8 Rango de fechas de información obtenida de estaciones y pluviómetros.

ENTIDAD	ESTACION	MES INICIAL-AÑO	MES FINAL-AÑO	AÑOS INFORMACION DISPONIBLE
	San Antonio-california	Ene 1993	Dic 2015	23
Aguas de Manizales S.A. E.S.P.	La Fe	Sep 1993	Dic 2015	22
	Romerales	Ene 1997	Dic 2015	19
	Martinica	Ene 1993	Dic 2015	23
	Gallinazo	Ene 1996	Ago 2015	20
	El Cedral	Nov 1995	Sep 2015	20
CHEC	El Topacio	Nov 1991	Jul 2015	24
	Montenegro	Ene 1996	Abr 2015	19
	Las Brisas	Oct 1981	Ago 2015	34
	Papayal	Ene 1980	Jun 2015	35
IDEAM	Finca Tesorito	Ene 1993	Nov 2014	22
	La Nubia	Ene 1985	Oct 2014	30

Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

3.12. Periodo de información disponible caudales

En cuanto a la información de caudal ofertado tabla (9) y caudal captado tabla (10) que fue suministrado por la entidad Aguas de Manizales S.A. E.S.P. se tiene lo siguiente:

Tabla 9 Información de Caudales Ofertados zona de estudio.

ENTIDAD	FUENTE	MES INICIAL- AÑO	MES FINAL- AÑO	TOTAL, AÑOS DE ANALISIS
Aguas de Manizales S.A. E.S.P.	Romerales	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Cajones	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Chinchiná	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	California	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años
	Termales ¹⁰	Enero 1997	Diciembre 2013	17 años

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

Es importante destacar que no se realiza captación en la bocatoma de Termales debido a problemas de minería y contaminantes aguas arriba, además de los costos y riesgos en el tratamiento necesario, pero se tiene en cuenta para el cálculo de los datos en la investigación ya que hace parte de la zona abastecedora.

Tabla 10 Información de Caudales Captados en la zona de estudio.

ENTIDAD	FUENTE	MES INICIAL- AÑO	MES FINAL- AÑO	TOTAL, AÑOS INFORMACION DISPONIBLE
Aguas de Manizales S.A. E.S.P.	Romerales	Enero 2008	Diciembre 2013	5 años
	Cajones	Enero 2008	Diciembre 2013	5 años
	Chinchiná	Enero 2008	Diciembre 2013	5 años
	California	Enero 2008	Diciembre 2013	5 años

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

¹⁰ No se capta de esta fuente debido a problemas de minería y tratamiento.

Se cuenta con una serie de 5 años de información sobre los caudales captados en cada bocatoma de la zona de estudio en mención.

Para el caudal ofertado en cada microcuenca se cuenta con una serie de 17 años de información suministrada para la investigación.

La información sobre caudales captados es muy corta para el análisis, aunque se contrasta directamente con el caudal facturado más adelante en este documento.

4. METODOLOGIA

Para la realización y ejecución de lo planteado en este proyecto, se trabaja con la información suministrada y organizada del área de estudio con cada una de las entidades vinculadas que para el ejercicio fueron: Aguas de Manizales S.A. E.S.P., CHEC¹¹ Grupo EPM y del IDEAM¹²; la información prestada por dichas empresas y/o entidades se filtra, se depura, se organiza, se analiza y se tabula de una manera acorde a la necesidad de la investigación, la información es veraz y de una procedencia sin tratamiento alguno a la misma, es decir de primera mano para las labores de cada entidad involucrada.

Mediante el uso del paquete ofimático Microsoft Office 365 Pro Plus; Word y Excel se generan tablas con la información obtenida y tabulada, se crean posteriormente tablas dinámicas y se analiza la información. Se generan tablas sencillas de datos con las coordenadas planas de las bocatomas, estaciones meteorológicas, pluviómetros y diferentes puntos de interés a utilizar mediante el ArcGIS 10.4 generando capas nuevas y manteniendo algunas necesarias para la posterior modelación de los datos mediante la función Kriging como elegida para el estudio y su aplicabilidad en la modelación de la investigación.

Dicha función es una herramienta de modelación en ArcGIS, la cual genera una superficie de salida estimada en valores, es considerado un método de interpolación geoestadístico que incluye la autocorrelación produciendo una superficie de predicción con certeza o precisión en las predicciones generadas. Dicha función se ajusta a una cantidad específica de puntos o a todos ellos dentro de un radio específico determinando así, un valor dependiendo de su ubicación.

En cuanto al uso de la herramienta los valores bajos en la varianza del ráster indican un alto grado de confianza mientras que los valores altos pueden requerir más datos para la modelación, en pocas palabras Kriging da valores a cada celda adyacente según la distancia de un punto indicado y sus valores correspondientes en el tiempo y sus relaciones espaciales generando un mapa de la superficie de predicción con valores.

La fórmula de Kriging¹³ se forma como una suma ponderada de datos:

$$\check{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

¹¹ Central Hidroeléctrica de Caldas, grupo EPM.

¹² Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

¹³ Consultado en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/tools/3d-analyst-toolbox/kriging.htm>

donde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

s_0 = la ubicación de la predicción

N = la cantidad de valores medidos

Para los cálculos de las variables climáticas como la evapotranspiración se aplica el método de Thorntwaite¹⁴ mediante la fórmula:

$$U_j = 1,6 k_a \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a$$

U_j = uso consuntivo en el mes j , en cm.

T_j = temperatura media en el mes j , en C°.

a, I = constantes.

K_a = constante que depende de la latitud y el mes del año, tabla (11).

Tabla 11 Valores de K_a

Latitud, grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,01
10	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
20	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,91
30	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
35	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
45	0,80	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
50	0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,70

Fuente F. Aparicio. Fundamentos de Hidrología.

¹⁴ (Aparicio, F,1982, Fundamentos de hidrología de superficie, Editorial Limusa, México. Página 56.)

La constante **I** (índice de eficiencia de temperatura) se calcula:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

Donde:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1,514}$$

Y **j** = número de mes.

La constante **a** se calcula:

$$a = 675 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 179 * 10^{-4} I + 0,492$$

También se utiliza el método de Holdridge¹⁵ con la fórmula:

$$ETP = 0,161452 * (\text{días}) * T$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencias en mm/mes.

días = días del mes a evaluar.

T = temperatura promedio del mes a evaluar.

Los anteriores métodos y formulas fueron seleccionados por la falta de información climatológica para lograr aplicar un método utilizando más variables, dichos métodos tienen gran acogida por sus resultados siendo una gran herramienta para trabajos de campo.

Para la modelación y generación de mapas temáticos se utilizó la información de las variables climáticas en las 12 estaciones y/o pluviómetros sobre toda el área de la cuenca, pero con los límites de la zona de estudio con el concepto de precipitación - temperatura media mensual, promedio multianual. Con la calculadora ráster se

¹⁵ SENA VIRTUAL

Comunidad Virtual de Aprendizaje Conceptos y Parámetros Básicos de un Sistema de Riego Agrícola (Cálculo del Balance Hídrico).

encontró la evapotranspiración y se realizaron las operaciones entre mapas, para finalmente calcular el balance hídrico de las microcuencas.

Como en toda base de datos climáticos por diferentes razones ajenas o no a los equipos o estaciones instalados para las diferentes mediciones; generalmente tienen datos faltantes o con algún tipo de error humano cuando no son automatizados, donde juega un papel importante el análisis de los mismos y su consistencia. (Aguas de Manizales S.A. E.S.P).

A continuación, en la tabla (12) el tipo de información obtenida en las diferentes entidades colaboradoras en la investigación:

Tabla 12 Datos obtenidos de entidades facilitadoras.

BASE DE DATOS OBTENIDOS SEGÚN ENTIDADES COLABORADORAS		
Aguas de Manizales S.A. E.S.P. S.A. E.S.P.	CHEC Grupo EPM	IDEAM
<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación mensual. • Temperatura (estación La Fe). • Caudal promedio captado microcuencas. • Caudal promedio ofertado microcuencas. • Base de datos con Shapefiles de las cuencas administradas por Aguas de Manizales S.A. E.S.P. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación mensual pluviómetros (Gallinazo, Cedral, Topacio y Montenegro). 	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación mensual. • Temperatura (La Nubia, Tesorito, Las Brisas).

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

Con dicha información se construye una base de datos en Excel para su tabulado y posterior análisis considerando los datos faltantes y su porcentaje, errores de transcripción de datos como cantidades de tres o cuatro cifras, valores máximos, valores mínimos, valores promedio, valores totales por estación y/o pluviómetro; organizándola para las variables de temperatura y precipitación, caudal captado y caudal ofertado independientemente.

Después de generar las tablas en Excel se procedió a completar los datos faltantes utilizando el “**Método Racional Deductivo**”¹⁶ se escoge utilizar dicha metodología ya que permite estimar hasta once registros faltantes de una misma serie de datos,

¹⁶ (D.F. Campos Aranda (1983) PROCESOS DEL CICLO HIDROLÓGICO- San Luis Potosí, México, pagina 136-153)

se apoya en la información de las estaciones o pluviómetros con datos completos. El método se resume en los siguientes pasos:

1. Se efectúa la suma de precipitaciones y temperatura mensual en todos los años completos y se obtiene el promedio mensual de precipitación y/o temperatura.
2. Se calcula para todos los años completos el porcentaje mensual de precipitación y temperatura, los cuales serán iguales a la precipitación y/o temperatura mensual entre el promedio mensual calculado en el paso anterior y por cien (100). Al sumar los porcentajes calculados y obtener su promedio deberán de obtenerse 1200 y 100 respectivamente.
3. Todos los porcentajes mensuales correspondientes a cada uno de los doce meses se suman y se dividen entre el número de años completos, es decir que se calcula el porcentaje promedio que se denomina S_j , con j variando de 1 a 12, uno para enero y 12 para diciembre respectivamente.
4. El método acepta la hipótesis que considera que los meses desconocidos tendrán un porcentaje igual al porcentaje promedio (S_j). Se designan las siguientes variables:

i = cada uno de los meses desconocidos, como máximo once.

P_i = precipitación y temperatura mensual desconocida en cada año incompleto, (mm, C°).

$\sum S_i$ = suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación y/o temperatura se desconoce, (%).

$\sum P$ = suma de las precipitaciones y temperatura mensual conocida en los años incompletos, (mm, C°).

S_i = porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

Acorde a lo anterior tenemos:

$$\frac{P_i}{S_i} = \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i}$$

Por lo cual:

$$P_i = \left(\frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) S_i$$

La expresión en paréntesis es constante para cada uno de los años incompletos, finalmente:

$$P_i = k * S_i$$

Los diferentes cálculos y formulas utilizados en los siguientes numerales son descritos y/o ejecutados a medida que sean necesarios según cada numeral o tema en mención teniendo en cuenta el método UNESCO sugerido por MAVDT (2004) e IDEAM (2010).

El ciclo del agua no es fácil de cuantificar en sus diferentes etapas o procesos, aunque si es posible realizar mediciones que muestren un panorama del mismo.

5. Análisis y resultados precipitación zona de estudio

El adecuado modelamiento de los datos permite obtener un panorama acertado de la zona en estudio donde se tienen los siguientes datos después de tomar los promedios mensuales multianuales, ver tabla (13).

Tabla 13 Precipitación Media Multianual Zona de estudio

Estación/Pluviómetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	Prom.
AGUAS La Fe	106,1	100,4	158,1	193,7	199,3	118,0	77,0	73,4	145,4	236,5	230,9	132,0	1770,7	147,6
AGUAS Martinica	123,3	136,2	191,7	246,6	279,3	197,1	138,3	128,9	207,9	265,8	244,1	169,3	2328,5	194,0
AGUAS Romerales	137,3	134,3	189,4	253,0	249,4	165,7	87,3	101,2	187,3	284,7	262,9	171,8	2224,4	185,4
AGUAS San Antonio	133,8	136,0	216,3	267,2	242,4	169,6	90,6	100,5	195,2	291,8	272,9	164,4	2280,8	190,1
CHEC Cedral	155,4	129,2	206,2	261,5	214,4	149,7	114,7	102,1	182,9	277,6	280,1	188,5	2262,3	188,5
CHEC Gallinazo	124,7	141,9	154,0	205,2	202,7	148,3	93,9	91,5	177,5	247,3	263,4	174,8	2025,3	168,8
CHEC Montenegro	113,4	122,6	182,2	250,7	187,6	121,6	81,0	84,0	128,2	233,5	216,5	136,4	1857,7	154,8
CHEC Topacio	132,9	122,1	198,0	230,0	242,1	137,2	83,4	106,7	187,0	280,7	236,6	135,5	2092,1	174,3
IDEAM La Nubia	64,2	63,9	79,2	93,0	91,5	72,7	41,2	39,2	67,2	116,1	104,1	74,9	907,1	75,6
IDEAM Las Brisas	91,4	88,2	125,0	171,1	188,6	115,2	66,4	78,2	110,4	198,9	162,6	95,7	1491,9	124,3
IDEAM Papayal	118,6	139,1	179,6	250,7	241,1	169,9	106,0	102,5	137,8	262,8	271,2	149,1	2128,4	177,4
IDEAM Tesorito	130,8	107,6	158,7	186,2	172,0	135,7	65,5	78,5	148,1	218,0	230,9	148,5	1780,4	148,4
Promedio Precipitación Multianual (mm)	119,3	118,4	169,9	217,4	209,2	141,7	87,1	90,6	156,2	242,8	231,4	145,1	23149,7	1929,1

Fuente: Autor

Al graficar el resultado obtenido en cada una de las estaciones y/o pluviómetros de la zona, ver tablas (14 – 25).

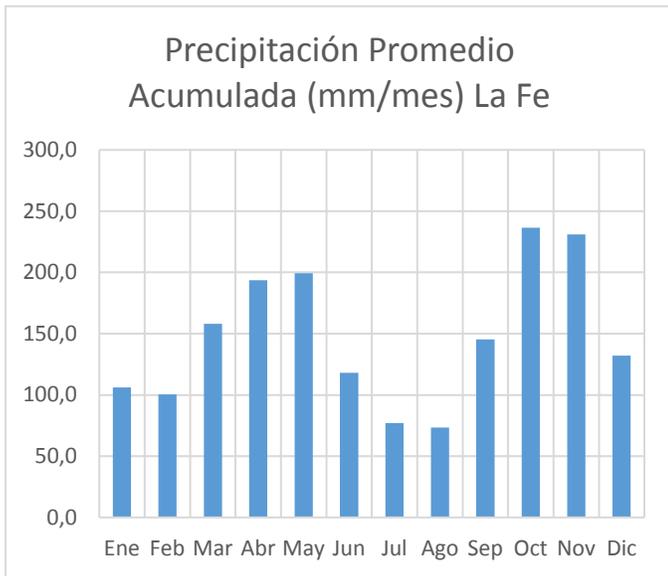


Ilustración 14 Grafica comportamiento precipitación La Fe, fuente propia.

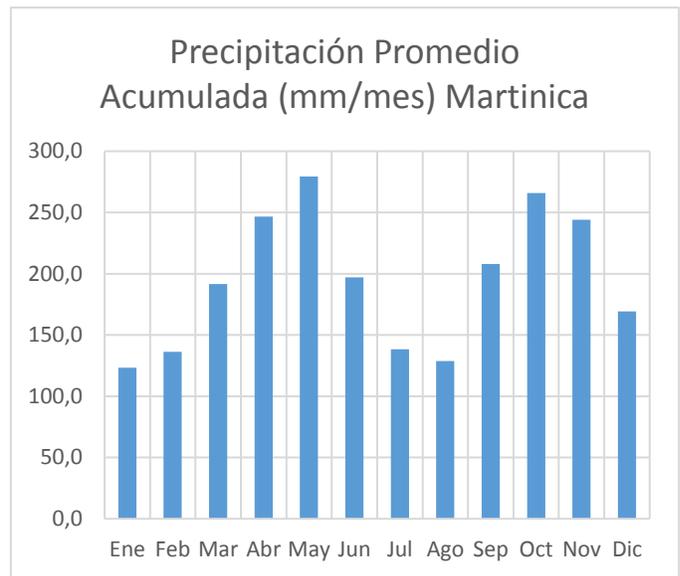


Ilustración 15 Grafica comportamiento precipitación Martinica, fuente propia.

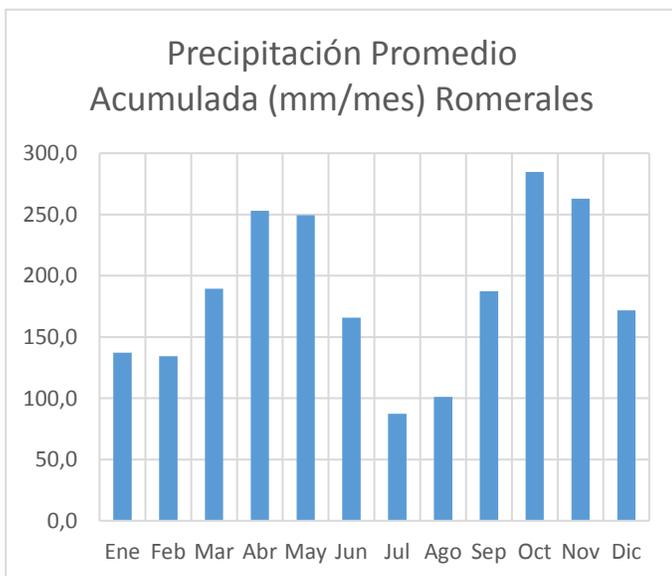


Ilustración 17 Grafica comportamiento precipitación Romerales, fuente propia.

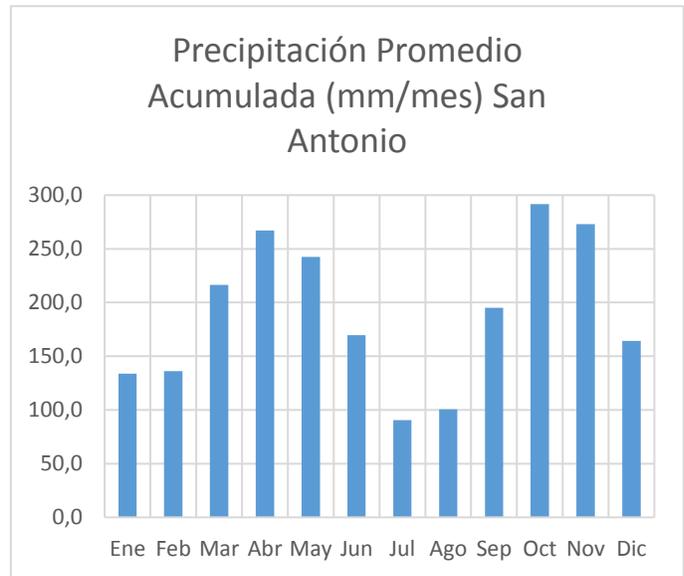


Ilustración 16 Grafica comportamiento precipitación San Antonio, fuente propia.

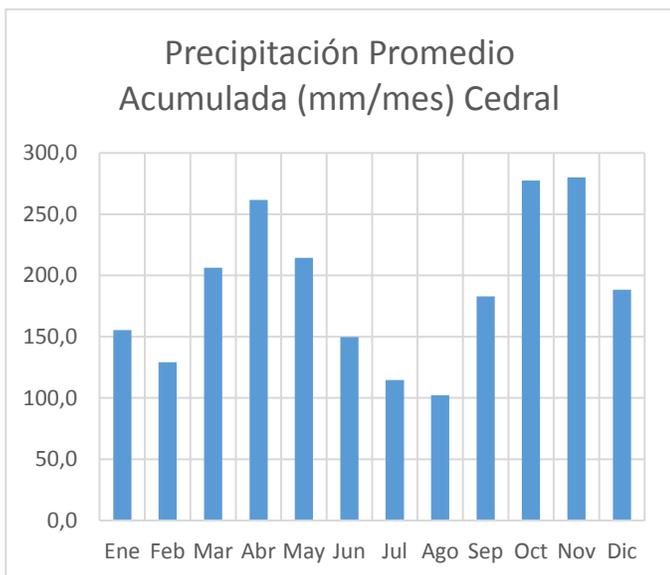


Ilustración 18 Grafica comportamiento precipitación Cedral, fuente propia.

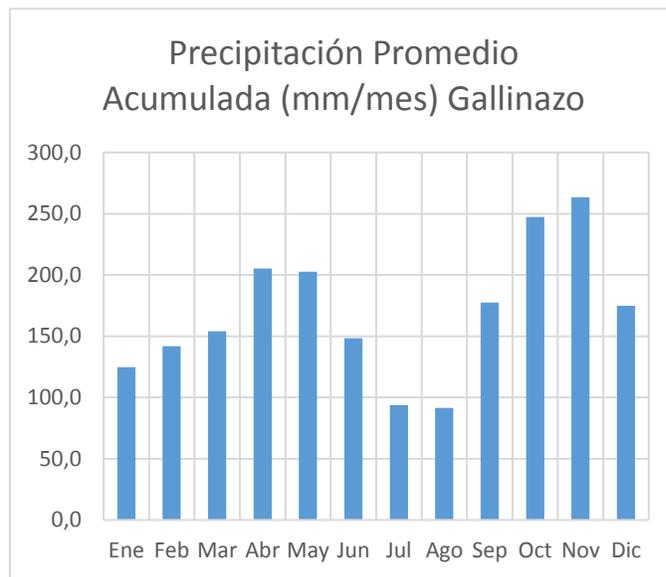


Ilustración 19 Grafica comportamiento precipitación Gallinazo, fuente propia.

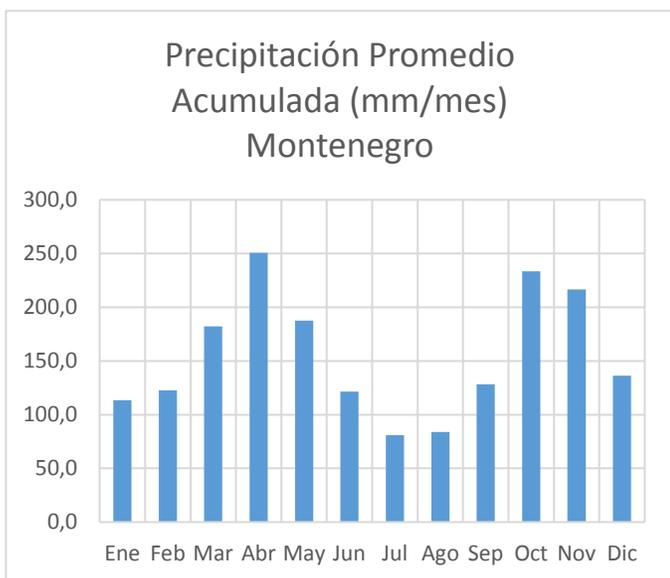


Ilustración 20 Grafica comportamiento precipitación Montenegro, fuente propia.

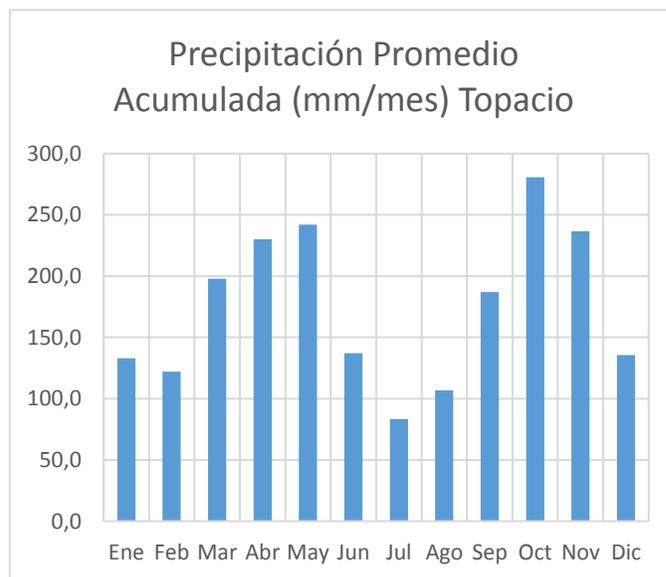


Ilustración 21 Grafica comportamiento precipitación Topacio, fuente propia.

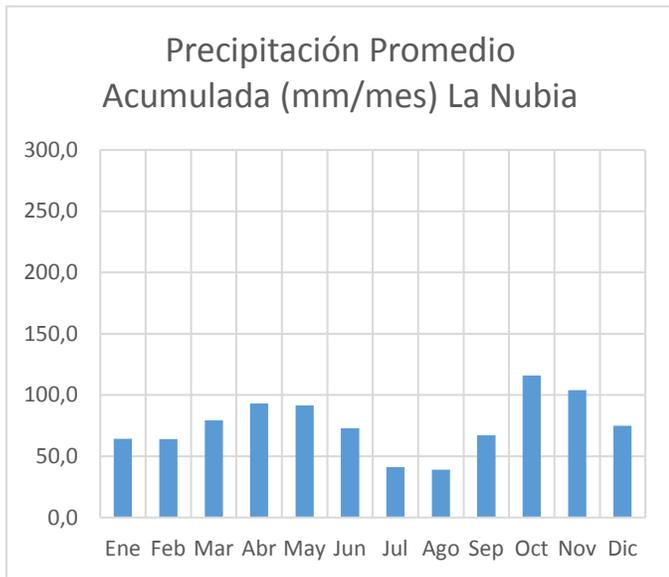


Ilustración 22 Grafica comportamiento precipitación La Nubia, fuente propia.

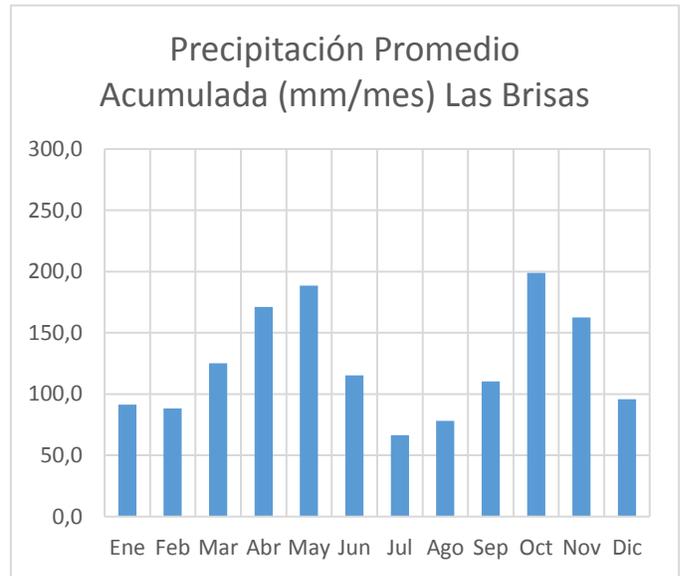


Ilustración 23 Grafica comportamiento precipitación Las Brisas, fuente propia.

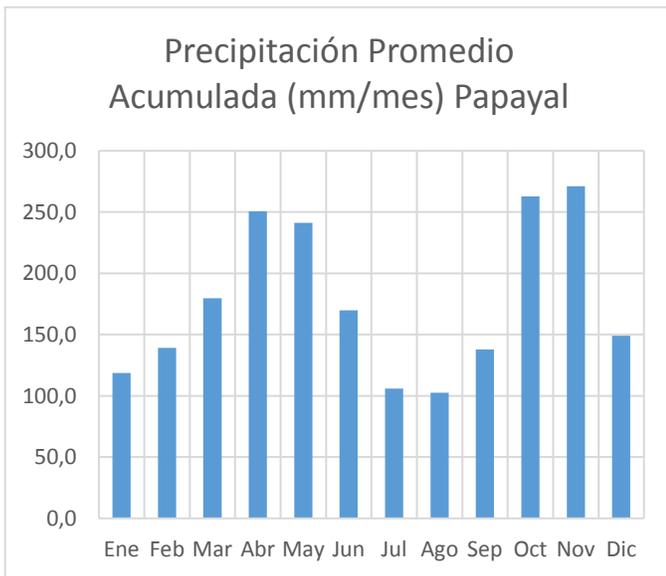


Ilustración 24 Grafica comportamiento precipitación Papayal, fuente propia.

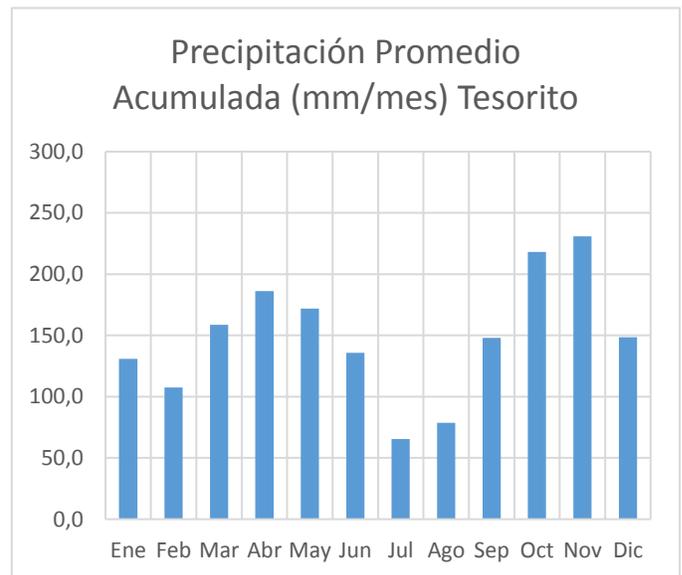


Ilustración 25 Grafica comportamiento precipitación Tesorito, fuente propia.

En la zona de estudio predomina un comportamiento bimodal, para una mejor perspectiva se resaltan los meses de mayor precipitación por estación y/o pluviómetro en la tabla (14).

Tabla 14 Meses con mayor precipitación zona de estudio.

Estación/Pluviómetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
AGUAS La Fe	106,1	100,4	158,1	193,7	199,3	118,0	77,0	73,4	145,4	236,5	230,9	132,0	1770,7
AGUAS Martinica	123,3	136,2	191,7	246,6	279,3	197,1	138,3	128,9	207,9	265,8	244,1	169,3	2328,5
AGUAS Romerales	137,3	134,3	189,4	253,0	249,4	165,7	87,3	101,2	187,3	284,7	262,9	171,8	2224,4
AGUAS San Antonio	133,8	136,0	216,3	267,2	242,4	169,6	90,6	100,5	195,2	291,8	272,9	164,4	2280,8
CHEC Cedral	155,4	129,2	206,2	261,5	214,4	149,7	114,7	102,1	182,9	277,6	280,1	188,5	2262,3
CHEC Gallinazo	124,7	141,9	154,0	205,2	202,7	148,3	93,9	91,5	177,5	247,3	263,4	174,8	2025,3
CHEC Montenegro	113,4	122,6	182,2	250,7	187,6	121,6	81,0	84,0	128,2	233,5	216,5	136,4	1857,7
CHEC Topacio	132,9	122,1	198,0	230,0	242,1	137,2	83,4	106,7	187,0	280,7	236,6	135,5	2092,1
IDEAM La Nubia	64,2	63,9	79,2	93,0	91,5	72,7	41,2	39,2	67,2	116,1	104,1	74,9	907,1
IDEAM Las Brisas	91,4	88,2	125,0	171,1	188,6	115,2	66,4	78,2	110,4	198,9	162,6	95,7	1491,9
IDEAM Papayal	118,6	139,1	179,6	250,7	241,1	169,9	106,0	102,5	137,8	262,8	271,2	149,1	2128,4
IDEAM Tesorito	130,8	107,6	158,7	186,2	172,0	135,7	65,5	78,5	148,1	218,0	230,9	148,5	1780,4

Fuente: propia

Los meses de mayor precipitación son respectivamente marzo, abril y mayo en el primer periodo y para el segundo son septiembre, octubre y noviembre respectivamente para el segundo periodo acorde a la precipitación regional.

La precipitación de la zona no depende de la altura como se observa en la tabla (15) confronta la altura sobre el nivel del mar de cada estación con la precipitación de la misma y en la ilustración (26) se observa la distribución promedio; dicha observación se realiza para una mejor claridad a la hora de tomar decisiones sobre la precipitación en cualquier estudio similar en un futuro que pudiese generarse al respecto, aunque las características de cada cuenca se presentan sin un esquema definido para la misma.

Tabla 15 Precipitación promedio según altitud de estaciones y/o pluviómetros.

Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)
La Nubia	2058	907,2
Papayal	2220	2128,4
Tesorito	2290	1780,4
Gallinazo	2311	2025,3
Montenegro	2325	1857,7
Romerales	2403,1	2224,4
Cedral	2475	2262,3
San Antonio	2562	2280,8
La Fe	2782,8	1770,7
Martinica	3568,5	2328,5
Topacio	3597	2092,1
Las Brisas	4150	1491,9

Fuente: propia

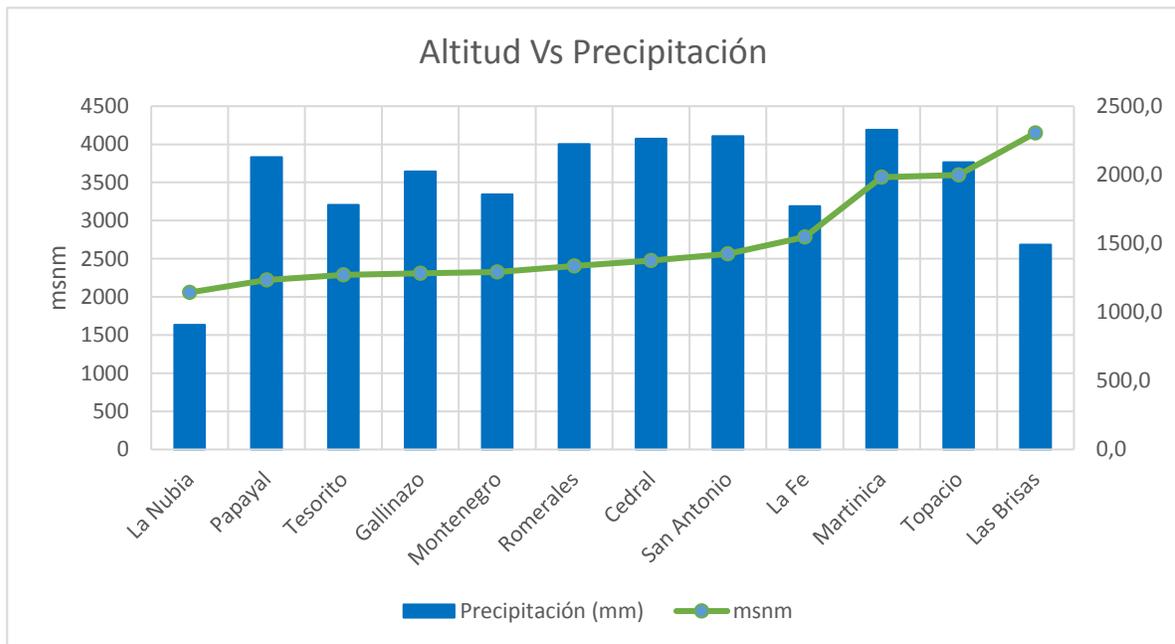


Ilustración 26 Comparativo entre altura y precipitación, fuente propia.

Al modelar los datos mediante ArcGIS, se obtiene el mapa de las Isoyetas de la zona en estudio, ver ilustración (27).

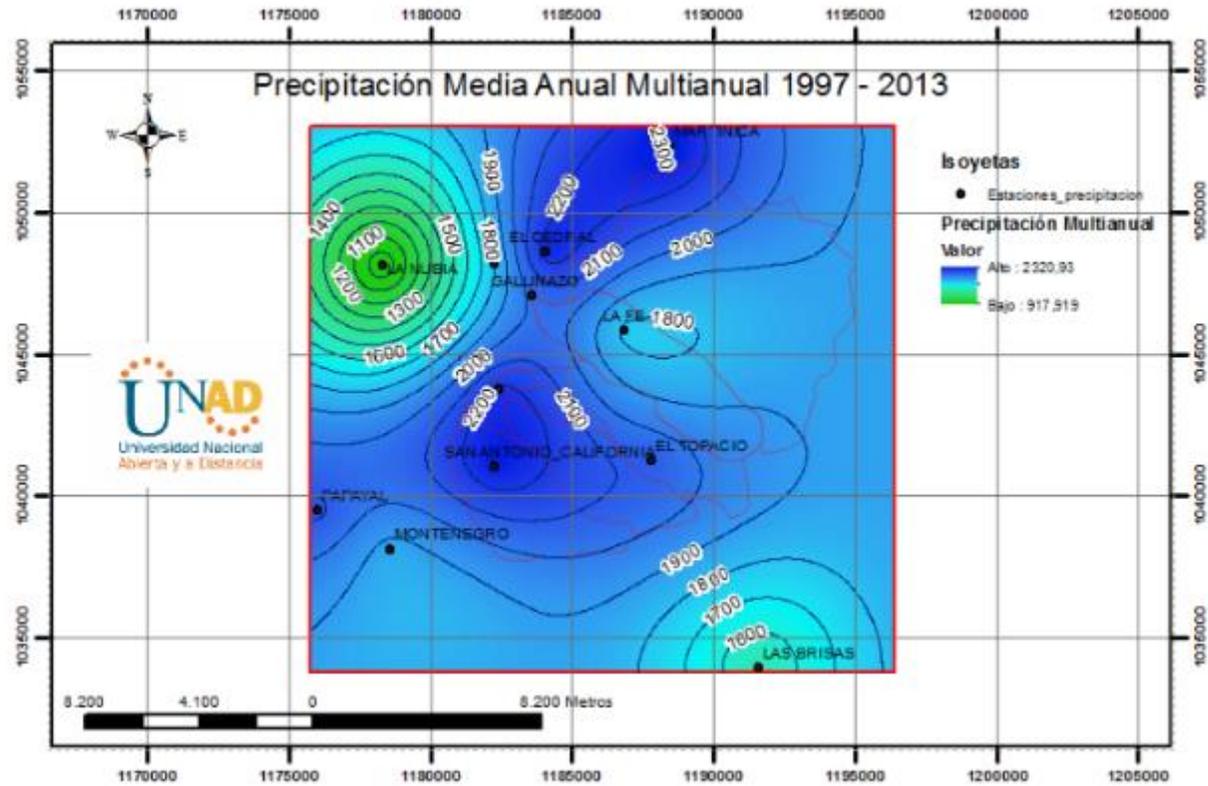


Ilustración 27. Isoyetas zona de estudio, fuente propia.

El método de las Isoyetas aplicado para obtener el total de precipitación media anual multianual arroja valores similares a los datos presentados en tablas anteriores observándose una mayor precipitación en la zona media de las microcuencas de estudio con valores entre 1900mm y 2320 mm;

El método IDW es el más preciso y cabe destacar su utilización mediante el modelado en ordenador donde las Isoyetas son líneas que pasan por puntos de igual valor de la precipitación, además promedia los valores de dos líneas consecutivas asignando un valor proporcional a la subárea entre mismas; trabaja con datos de estaciones ubicadas dentro (La Fe, Gallinazo, Romerales, Topacio y San Antonio) y fuera (Martinica, Cedral, Tesorito, La Nubia, Montenegro, Papayal y Las Brisas) de la cuenca.

Acorde a los polígonos de Thiessen se descartan los pluviómetros que no tienen inferencia en la zona siendo estos: Las Brisas, Montenegro, Papayal, La Nubia y Tesorito lo cual se aplica en el capítulo de entradas al balance hídrico.

En la zona de estudio la altitud no influye en los valores de precipitación, aunque si la orografía local, topografía o relieve que favorecen las condiciones de estancamiento y desarrollo de las circulaciones locales aumentando y prolongando las lluvias, circulación atmosférica (transporte y formación de nubes), por los vientos valle-montaña (de día sube aire caliente hacia la montaña, de noche baja aire frío de la montaña).

Se evidencia que la precipitación aumenta del valle hacia la montaña hasta cierto punto, desde el cual inicia nuevamente a disminuir. Este punto de la ladera donde ocurre la máxima condensación y por ello caen las lluvias más abundantes sobre los 2500 msnm aproximadamente.

6. Análisis y resultados temperatura zona de estudio

Al analizar la temperatura de la zona se tiene lo siguiente después de tomar los promedios mensuales multianuales, ver tabla (16) donde se indican las cuatro estaciones disponibles para la modelación con sus respectivos valores.

Tabla 16 Temperatura promedio multianual (°C) zona de estudio.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio	Max	Min
AGUAS La Fe	12,2	12,4	12,5	12,5	12,6	12,5	12,4	12,5	12,2	12,1	12,0	12,1	12,3	12,6	12,0
IDEAM La Nubia	17,1	17,3	17,4	17,1	17,6	17,3	17,4	17,4	17,3	16,7	16,6	16,7	17,2	17,6	16,6
IDEAM Las Brisas	4,5	4,7	4,8	5,0	5,2	4,9	4,8	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6	4,7	5,2	4,5
IDEAM Tesorito	15,5	15,8	15,7	15,7	15,7	15,4	15,7	15,8	15,3	15,1	15,2	15,3	15,5	15,8	15,1
Promedio Temperatura Mensual Multianual	12,3	12,5	12,6	12,6	12,8	12,5	12,6	12,6	12,4	12,1	12,1	12,2	12,4	12,8	12,0

Fuente: propia.

Se graficó la temperatura de cada una de las estaciones y se observa una tendencia muy constante sin fuertes altibajos donde en cada una de ellas no sobrepasa 1°C en ninguno de los casos.

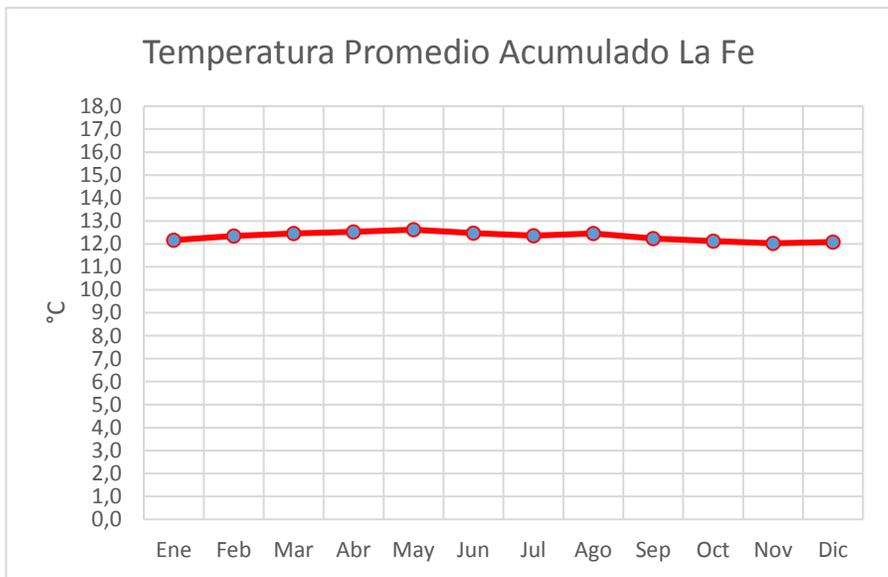


Ilustración 28 Temperatura Multianual La Fe, fuente propia.

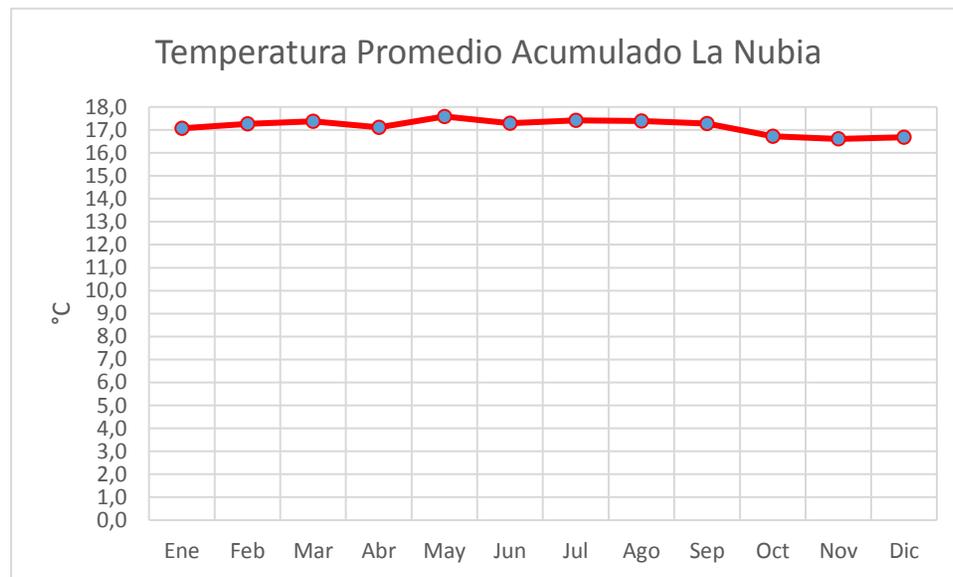


Ilustración 31 Temperatura Multianual La Nubia, fuente propia.

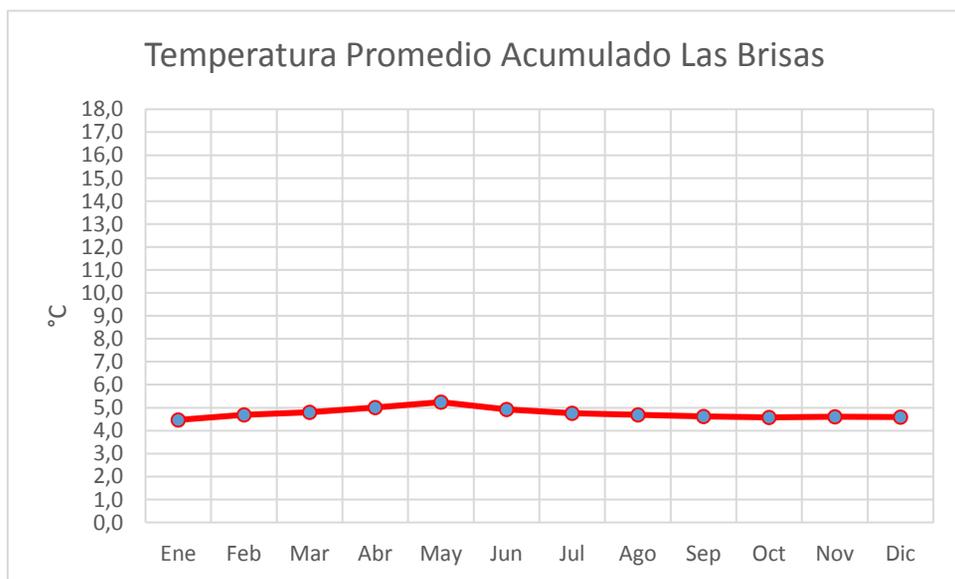


Ilustración 30 Temperatura Multianual Las Brisas, fuente propia.

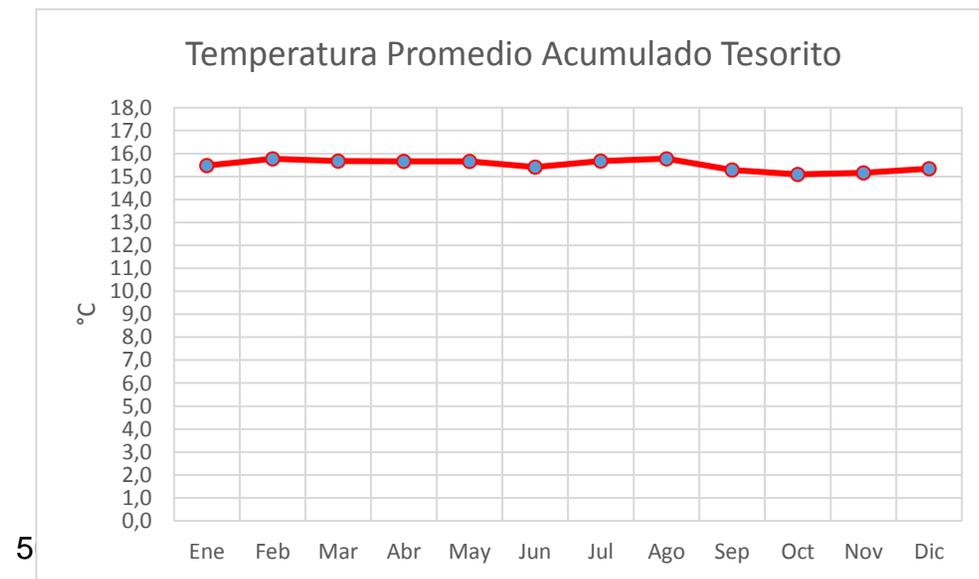


Ilustración 29 Temperatura Multianual Tesorito, fuente propia.

Al realizar la comparativa entre la altitud y su respectiva temperatura se encuentra que es inversamente proporcional, ver tabla (17) e ilustración (32).

Tabla 17 Temperatura promedio/altura/estación.

Estación	Altitud (msnm)	Temperatura Promedio
La Nubia	2058	17,2
Tesorito	2290	15,5
La Fe	2782,8	12,3
Las Brisas	4150	4,7

Fuente: Autor

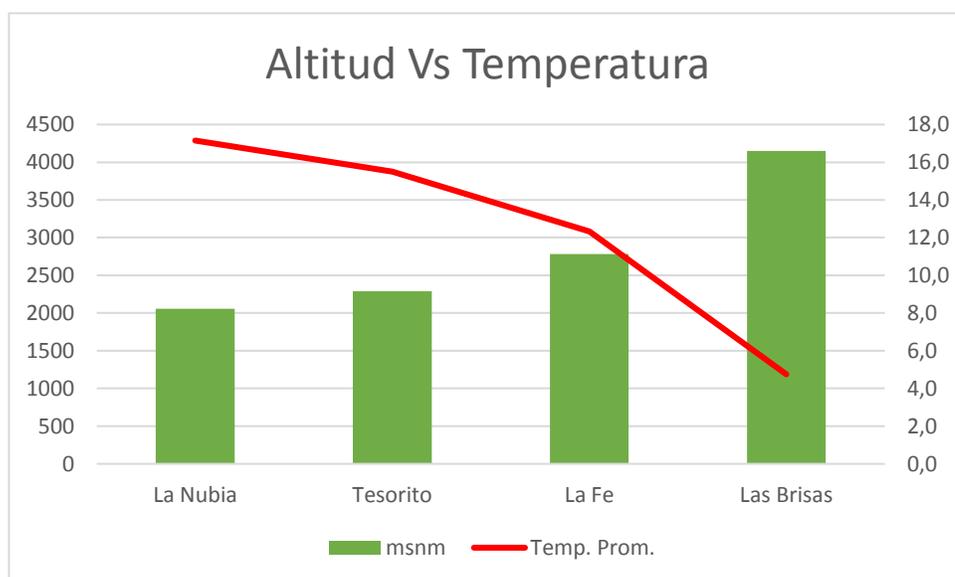


Ilustración 32. Temperatura promedio/altura/estación, fuente propia.

Como se observa en la gráfica cuando se tiene mayor altura se tiene menor temperatura y viceversa. Se modelaron los datos y se obtuvo el siguiente mapa de Isothermas, ver ilustración (33).

Las temperaturas son similares a las de la tabla anterior donde se observa una mayor temperatura en la parte baja de las microcuencas y viceversa a medida que se asciende en las mismas.

La circulación atmosférica puede ser modificada notablemente por los accidentes orográficos e hidrográficos, así las características del valle: estrecho, amplio y las características del sistema montañoso: inclinación, orientación, altura máxima, son

factores que determinan la circulación de aire y por ende sus condiciones térmicas e hídricas. Por lo anterior se debe realizar para cada sistema orográfico e hidrográfico su respectivo análisis individual como lo es la clasificación climática de la zona de estudio.

La temperatura y el brillo solar influyen directamente en la evapotranspiración, es decir que a mayor temperatura y brillo solar mayor será la evapotranspiración, la temperatura; expuesto lo anterior se afirma y evidencia en el análisis que la evapotranspiración es directamente proporcional a la altura.

Durante las épocas de alta precipitación la nubosidad aumenta haciendo que disminuya la cantidad de radiación solar sobre la superficie, lo que se ve reflejado en una disminución de la térmica del aire en la superficie. El enfriamiento del aire, debido a la precipitación y el decrecimiento de los valores de radiación solar, dan como resultado un aumento de la humedad del aire, condición que determina la disminución de los procesos de evaporación y evapotranspiración.

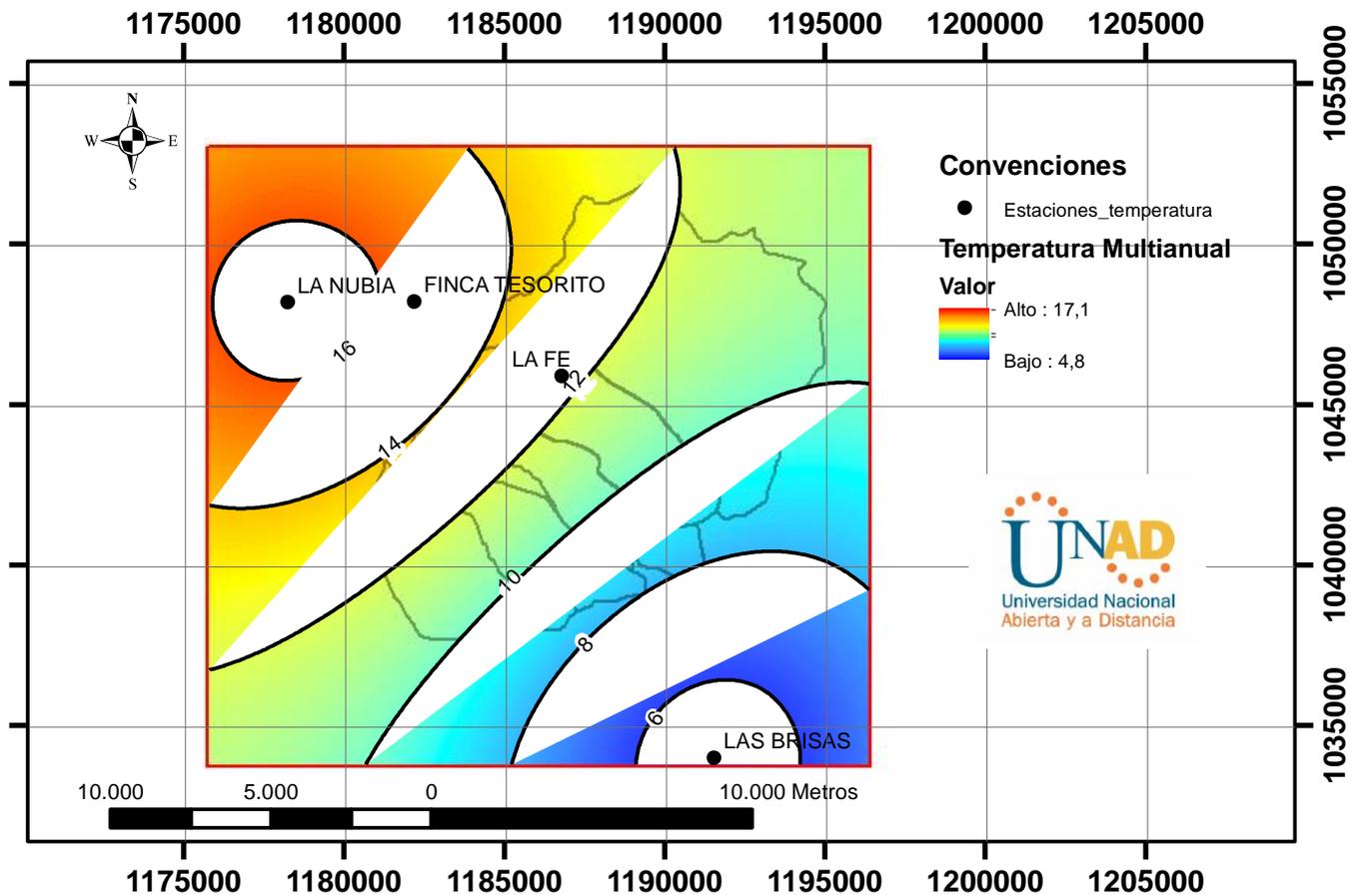


Ilustración 33 Isotermas zona de estudio, fuente propia.

Las temperaturas oscilan entre 7,6°C Min, 14,7°C Max y Prom de 11,5°C según isothermas calculadas en la modelación.

7. Modelación clasificación climática

En las microcuencas se presentan tres pisos térmicos: frío, paramo bajo y paramo alto, basados en la clasificación climática de Caldas (1802) tabla (18).

Tabla 18 Clasificación climática - Caldas.

Piso Térmico	Símbolo	Rango Altura (m)	Temperatura (°C)
Cálido	C	0 – 1000	≥ 24
Templado	T	1001 – 2000	$24 > T \geq 17,5$
Frío	F	2001 – 3000	$17,5 > T \geq 12$
Paramo bajo	Pb	3001 – 3700	$12 > T \geq 7$
Paramo alto	Pa	3700 - 4200	<7

Fuente: IDEAM 2005

Se utilizó como referencia la clasificación climática de Lang (1915) la parte alta y media alta de las microcuencas es superhúmedo, con factores de Lang -P/T mayores de 160, la parte baja de las microcuencas arroja valores entre 140 y 160 siendo húmedas, los valores entre 140 y 60 se clasifica como semihúmedo y semiárido estando fuera de las microcuencas y además en zona urbana de Manizales. Ver tabla (19).

Tabla 19 Clasificación de Lang.

Tipo de clima	Símbolo	Factor de Lang P/T
Desértico	D	0 - 20
Árido	A	20,1 – 40
Semiárido	sa	40,1 – 60
semihúmedo	sh	60,1 – 100
Húmedo	H	100,1 – 160
Superhúmedo	SH	>160

Fuente: IDEAM 2005

Al realizar las operaciones con la calculadora ráster se generó el mapa de la clasificación climática de Lang, ver ilustración (34).

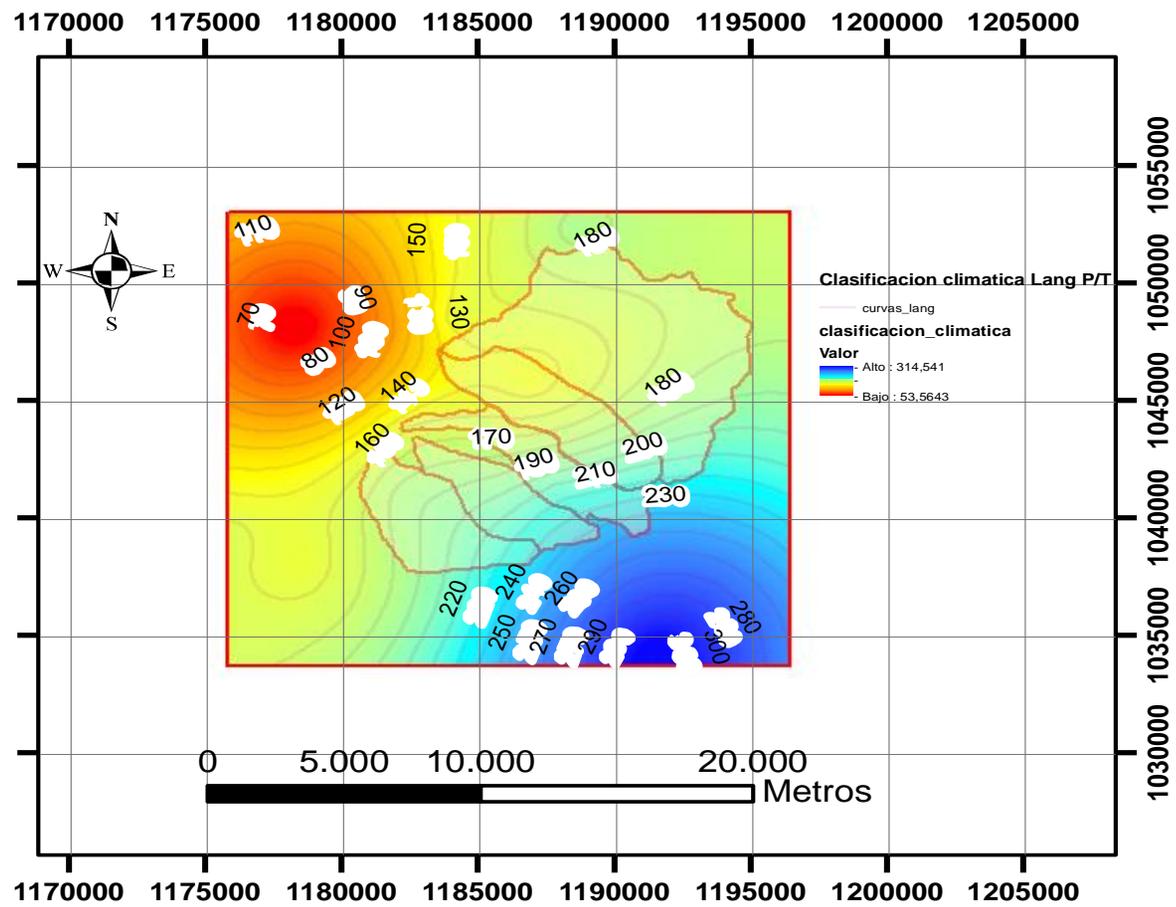


Ilustración 34 Clasificación climática de Lang zona de estudio 1997-2013.
Fuente propia.

8. Determinación de la evapotranspiración

De la superficie del suelo y de la transpiración de las plantas se evapora agua por acción de la radiación solar, para el cálculo se utiliza el método de Thornthwaite y el de Holdridge como segunda opción para comparar resultados.

Tabla 20 Métodos para calcular ETP.

Método	Ecuación	Unidades
Thornthwaite	$U_j = 1,6 k_a \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a$	<p>U_j = uso consuntivo en el mes j, en cm. T_j = temperatura media en el mes j, en C°. a, I = constantes. K_a = constante que depende de la latitud y el mes del año.</p>
	$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$ $i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1,514}$	<p>La constante I (índice de eficiencia de temperatura) se calcula</p> <p>$Y j$ = número de mes.</p>
	$a = 675 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 179 * 10^{-4} I + 0,492$	<p>La constante "a" se calcula</p>
Holdridge	$ETP = 1,161452 * \left(\frac{\text{días}}{\text{mes}} \text{ por día} \right) * T$	<p>Esto quiere decir que si analizamos cualquier mes multiplicaríamos * 0,161452 * por los días por la temperatura promedio del mes. Este valor nos entregaría la evapotranspiración en mm por mes.</p>

Fuente: Autor

A continuación, se calculó la evapotranspiración mediante tablas en Excel aplicando la fórmula respectiva de Thornthwaite:

Tabla 21 Evapotranspiración promedio anual multianual Calculada en Excel 1997 - 2013 método de Thornthwaite.

THORNTHWAITTE zona de estudio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio T	12,3	12,5	12,6	12,6	12,8	12,5	12,6	12,6	12,4	12,1	12,1	12,2
Índice Calórico	3,9	4,0	4,0	4,0	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8	3,8
$\sum IC$	47,7											
Constante a = $675 * \left[\frac{10}{I} \right]^{-9} I^{3-771 * \left[\frac{10}{I} \right]^{-7} I^{2+179 * \left[\frac{10}{I} \right]^{-4} I^{+0,492}}$	675			771			179			0,492		
	0,07			0,18			0,85			0,49		
$\sum a$	1,24											
ETP sin corregir	5,83	5,96	5,99	5,99	6,11	5,96	5,98	5,99	5,86	5,73	5,71	5,76
Factor Fotopedico	1,02	0,93	1,04	1,02	1,06	1,04	1,06	1,06	1,02	1,03	1,00	1,00
ETP corregida (cm)	5,94	5,51	6,20	6,11	6,48	6,17	6,34	6,32	5,95	5,90	5,68	5,76
$\sum ETP$ corregida (cm)	72,37											
$\sum ETP$ corregida (mm)	723,7											

Fuente: Autor

Tabla 22 Evapotranspiración promedio anual multianual La Fe, método de Thornthwaite.

THORNTHWAITTE – La Fe	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio T	12,2	12,4	12,5	12,5	12,6	12,5	12,4	12,5	12,2	12,1	12,0	12,1
Índice Calórico	3,8	3,9	4,0	4,0	4,1	4,0	3,9	4,0	3,9	3,8	3,8	3,8
$\sum IC$	47,0											
Constante a = $675 * \left[\frac{10}{I} \right]^{-9} I^{3-771 * \left[\frac{10}{I} \right]^{-7} I^{2+179 * \left[\frac{10}{I} \right]^{-4} I^{+0,492}}$	675			771			179			0,492		
	0,07			0,18			0,85			0,49		
$\sum a$	1,24											
ETP sin corregir	5,75	5,86	5,92	5,96	6,02	5,93	5,87	5,92	5,79	5,72	5,67	5,70
Factor Fotopedico	1,02	0,93	1,04	1,02	1,06	1,04	1,06	1,06	1,02	1,03	1,00	1,00
ETP corregida (cm)	5,86	5,42	6,13	6,08	6,38	6,14	6,22	6,24	5,88	5,89	5,64	5,70
$\sum ETP$ corregida (cm)	71,59											
$\sum ETP$ corregida (mm)	715,9											

Fuente: Autor

Tabla 23 Evapotranspiración promedio anual multianual La Nubia, método de Thornthwaite.

THORNTHWAITE- La Nubia	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio T	17,1	17,3	17,4	17,1	17,6	17,3	17,4	17,4	17,3	16,7	16,6	16,7
Índice Calórico	6,4	6,5	6,6	6,4	6,7	6,5	6,6	6,6	6,5	6,2	6,2	6,2
\sum IC	77,6											
Constante a = $675 * [10]^{-(9)}$ $1^3-771 * [10]^{-(7)}$ $1^2+179 * [10]^{-(4)}$ +0,492	675			771			179			0,492		
	0,07			0,18			0,85			0,49		
\sum a	1,24											
ETP sin corregir	8,76	8,88	8,96	8,79	9,09	8,90	8,98	8,96	8,89	8,54	8,46	8,51
Factor Fotopedico	1,02	0,93	1,04	1,02	1,06	1,04	1,06	1,06	1,02	1,03	1,00	1,00
ETP corregida (cm)	8,94	8,22	9,27	8,96	9,64	9,22	9,52	9,45	9,03	8,80	8,42	8,51
\sum ETP corregida (cm)	107,97											
\sum ETP corregida (mm)	1079,7											

Fuente: Autor

Tabla 24 Evapotranspiración promedio anual multianual Las Brisas, método de Thornthwaite.

THORNTHWAITE – Las Brisas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio T	4,5	4,7	4,8	5,0	5,2	4,9	4,8	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6
Índice Calórico	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
\sum IC	11,1											
Constante a = $675 * [10]^{-(9)}$ $1^3-771 * [10]^{-(7)}$ $1^2+179 * [10]^{-(4)}$ +0,492	675			771			179			0,492		
	0,07			0,18			0,85			0,49		
\sum a	1,24											
ETP sin corregir	1,65	1,76	1,81	1,91	2,02	1,87	1,79	1,76	1,73	1,71	1,72	1,71
Factor Fotopedico	1,02	0,93	1,04	1,02	1,06	1,04	1,06	1,06	1,02	1,03	1,00	1,00
ETP corregida (cm)	1,69	1,63	1,87	1,95	2,14	1,93	1,89	1,86	1,75	1,76	1,71	1,71
\sum ETP corregida (cm)	21,89											
\sum ETP corregida (mm)	218,9											

Fuente: Autor

Tabla 25 Evapotranspiración promedio anual multianual Tesorito, método de Thornthwaite.

THORNTHWAITE - Tesorito	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio T	15,5	15,8	15,7	15,7	15,7	15,4	15,7	15,8	15,3	15,1	15,2	15,3
Índice Calórico	5,5	5,7	5,6	5,6	5,6	5,5	5,6	5,7	5,4	5,3	5,4	5,5
$\sum IC$	66,6											
Constante a = $675 * \left[\frac{10}{9} \right]^{I^3-771} * \left[\frac{10}{I^2+179} \right]^{I+0,492}$	675			771			179			0,492		
	0,07			0,18			0,85			0,49		
$\sum a$	1,24											
ETP sin corregir	7,76	7,94	7,88	7,87	7,87	7,72	7,88	7,94	7,64	7,52	7,56	7,67
Factor Fotopedico	1,02	0,93	1,04	1,02	1,06	1,04	1,06	1,06	1,02	1,03	1,00	1,00
ETP corregida (cm)	7,92	7,35	8,15	8,03	8,34	7,99	8,35	8,38	7,75	7,74	7,52	7,67
\sum ETP corregida (cm)	95,20											
\sum ETP corregida (mm)	952,0											

Fuente: Autor

Se utilizó la metodología de Holdridge y se obtuvo:

Tabla 26 Evapotranspiración promedio anual multianual Calculada en Excel 1997 - 2013, método de Holdridge.

0,161452 HOLDRIDGE	ZONA DE ESTUDIO											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días/mes	31	28,25	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Promedio T	12,3	12,5	12,6	12,6	12,8	12,5	12,6	12,6	12,4	12,1	12,1	12,2
ETP	61,5	57,1	62,9	60,9	63,9	60,7	62,8	63,0	59,9	60,7	58,6	60,9
ETP TOTAL	733,0											

Fuente: Autor

Tabla 27 Evapotranspiración promedio anual multianual La Fe, método de Holdridge.

0,161452	La Fe											
HOLDRIDGE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días/mes	31	28,25	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Promedio T	12,2	12,4	12,5	12,5	12,6	12,5	12,4	12,5	12,2	12,1	12,0	12,1
ETP	60,9	56,3	62,4	60,7	63,2	60,4	61,9	62,3	59,3	60,7	58,3	60,5
ETP TOTAL	726,7											

Fuente: Autor.

Tabla 28 Evapotranspiración promedio anual multianual La Nubia, método de Holdridge.

0,161452	La Nubia											
HOLDRIDGE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días/mes	31	28,25	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Promedio T	17,1	17,3	17,4	17,1	17,6	17,3	17,4	17,4	17,3	16,7	16,6	16,7
ETP	85,4	78,7	87,0	82,9	88,0	83,8	87,2	87,0	83,7	83,7	80,4	83,5
ETP TOTAL	1011,4											

Fuente: Autor

Tabla 29 Evapotranspiración promedio anual multianual Las Brisas, método de Holdridge.

0,161452	Las Brisas											
HOLDRIDGE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días/mes	31	28,25	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Promedio T	4,5	4,7	4,8	5,0	5,2	4,9	4,8	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6
ETP	22,4	21,4	24,0	24,3	26,2	23,8	23,8	23,5	22,4	22,9	22,3	23,0
ETP TOTAL	280,0											

Fuente: Autor

Tabla 30 Evapotranspiración promedio anual multianual Tesorito, método de Holdridge.

0,161452	Tesorito											
HOLDRIDGE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días/mes	31	28,25	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Promedio T	15,5	15,8	15,7	15,7	15,7	15,4	15,7	15,8	15,3	15,1	15,2	15,3
ETP	77,5	72,0	78,4	75,9	78,4	74,7	78,5	79,0	74,0	75,5	73,4	76,8
ETP TOTAL	914,1											

Fuente: Autor

Después de calcular los datos de las cuatro estaciones con datos disponibles y sus respectivos valores de temperatura se generó la tabla (31) donde se comparó el resultado de las dos metodologías aplicadas y la modelación en ArcGIS.

Tabla 31 ETP zona de estudio Vs msnm.

Estación	Altitud (msnm)	ETP Thornthwaite (mm)	ETP Holdridge (mm)	ETP ArcGIS (mm)
La Nubia	2058	1097,7	1011,4	1009,9
Tesorito	2290	952	914,1	912,5
La Fe	2782,8	715,9	726,7	725,0
Las Brisas	4150	218,9	280	280,1
Zona de estudio	N/A	723,7	733,1	731,87

Fuente: Autor

Al modelar se generó el mapa de la ilustración (36) donde los valores arrojados cada 50 mts según parámetros de la modelación indican que los datos calculados en Excel son equivalentes y/o similares a los del mapa siendo más precisos los de la modelación seguidos por la metodología de Holdridge y Thornthwaite respectivamente.

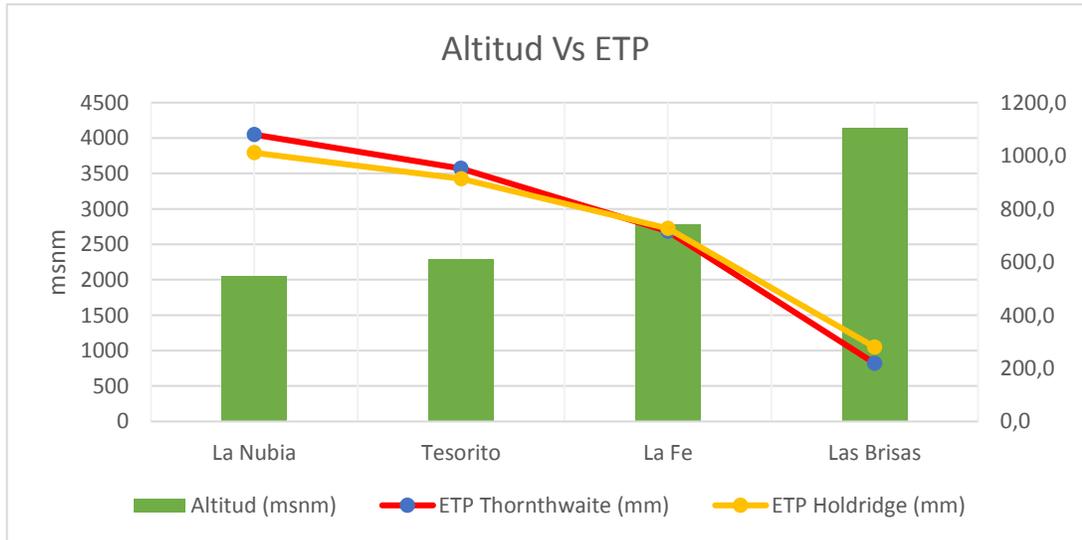


Ilustración 35 Comparación ETP Vs altitud. Fuente propia.

Es correcto afirmar que la ETP es inversamente proporcional a la altura sobre el nivel del mar.

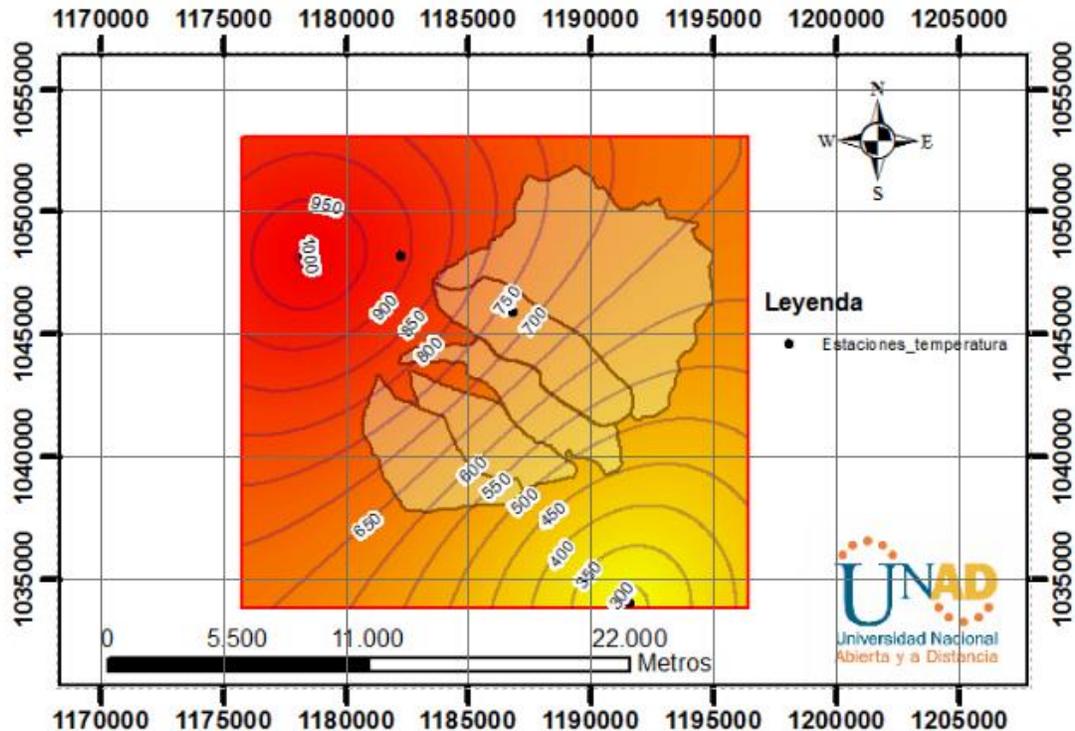


Ilustración 36 ETP zona de estudio, fuente propia

Para la zona de estudio se calculó una ETP promedio de 662,5 mm mensuales multianuales, mínima de 280,1 mm mensuales multianuales y máxima de 1009,9 mm mensuales multianuales después de la respectiva modelación; la metodología más precisa para la zona es la de Holdridge debido a sus valores más cercanos con la modelación en comparación con los resultados arrojados en Excel o manualmente. Las microcuencas se ubican con rangos entre 450 mm mínimo y 875 mm máximo respectivamente. Es decir que la ETP total multianual es:

$$ETP_{Total\ promedio} = 662,5\ mm * 12\ meses * 17\ años = 135.150\ mm$$

$$ETP_{Total\ minima} = 450\ mm * 12\ meses * 17\ años = 91.800\ mm$$

$$ETP_{Total\ maxima} = 875\ mm * 12\ meses * 17\ años = 178.500\ mm$$

Se generó el mapa con la ETP de Holdridge conociendo los valores promedio en los pluviómetros que no cuentan con el mismo, siendo un dato interesante para el análisis de factores en la zona de aferencia.

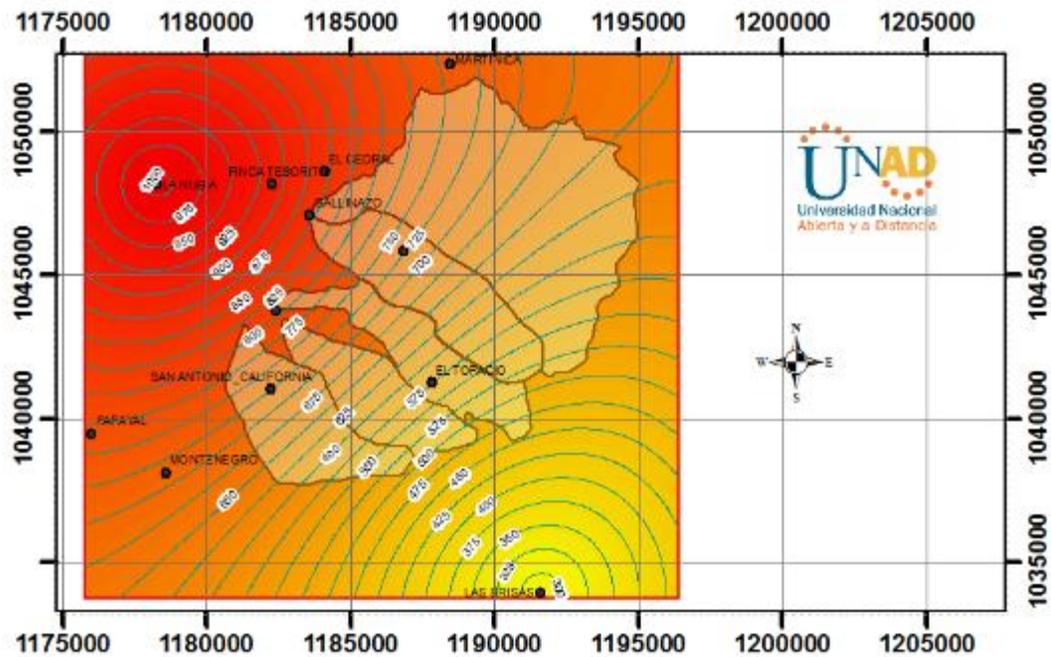


Ilustración 37 ETP Holdridge zona de estudio,

Tabla 32 ETP en los sitios de interés de la zona de estudio.

Pluviómetro	Altitud (msnm)	ETP Holdridge (mm)
Martinica	3568,51	745
Romerales	2403,12	812,5
San Antonio	2562,00	725
Papayal	2220	775
CHEC Gallinazo	2311,01	860
El Cedral	2475,01	865
El Topacio	3597,03	575
Montenegro	2325,02	712,5

Fuente: Autor

9. Análisis de caudales

9.1. Caudal Medio Puntual

Según la resolución 865 de 2004 el caudal medio disponible de utilización en un cuerpo de agua se define:

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

Donde:

Q = caudal medio (m³/s)

Q_i = caudal medio en el periodo de estudio

n = número total de datos de caudal (suficientemente grande).

Se calculó cada uno de los caudales medios en las fuentes abastecedoras de la zona, ver tabla (33).

Tabla 33 Caudales Medios Multianuales Fuentes Abastecedoras Zona de Estudio.

Fuente	Q L/s	Q m³/s
Cajones	727,1	0,7
California	584,7	0,6
Chinchiná	2063,4	2,1
Romerales	560,1	0,6
Termales	511,2	0,5

Fuente: Autor

Lo anterior solo es el promedio aritmético de la base de datos compuesta por 15420 celdas en total por los 17 años (1285 datos/mes) de análisis con sus respectivos valores.

9.2. Curva de duración de caudales

Se calculó la curva de duración de caudales de cada una de las fuentes

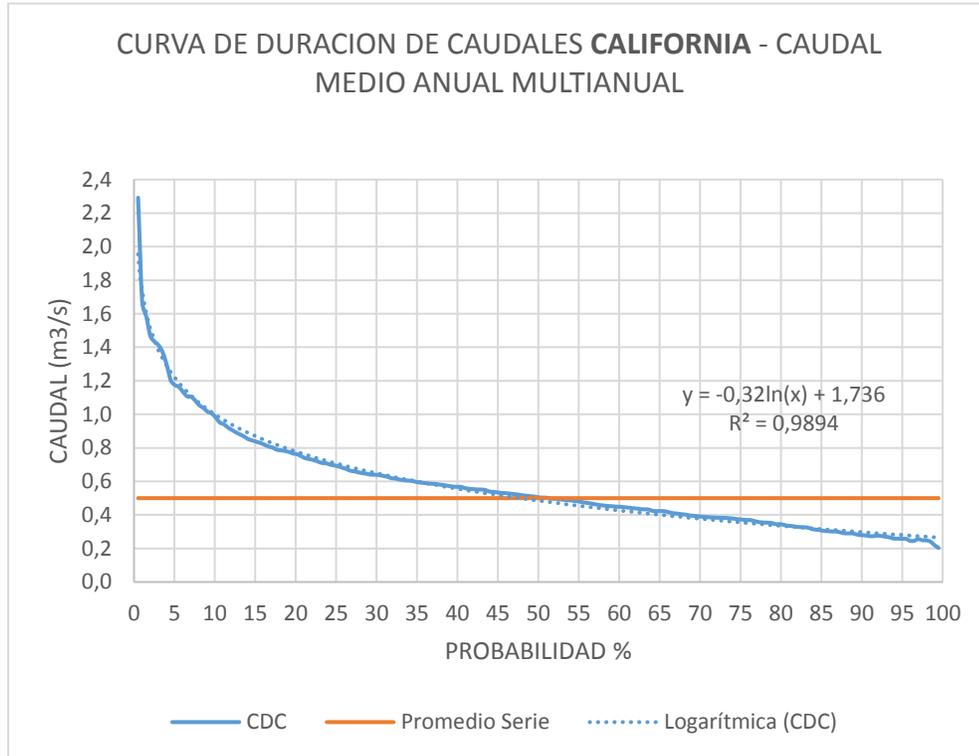


Ilustración 38 CDC California, fuente propia.

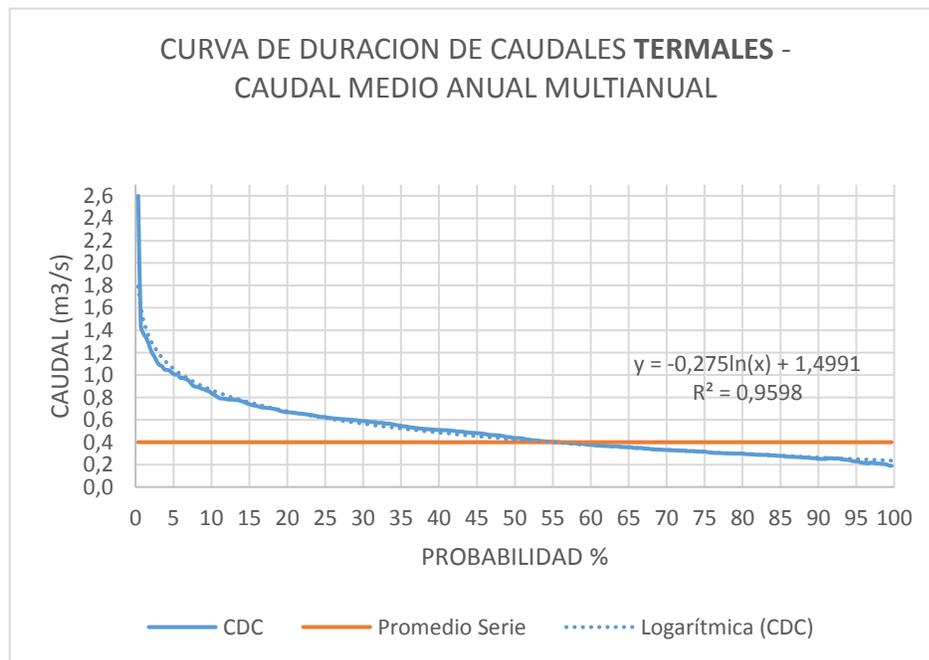


Ilustración 39 CDC Termales, fuente propia.

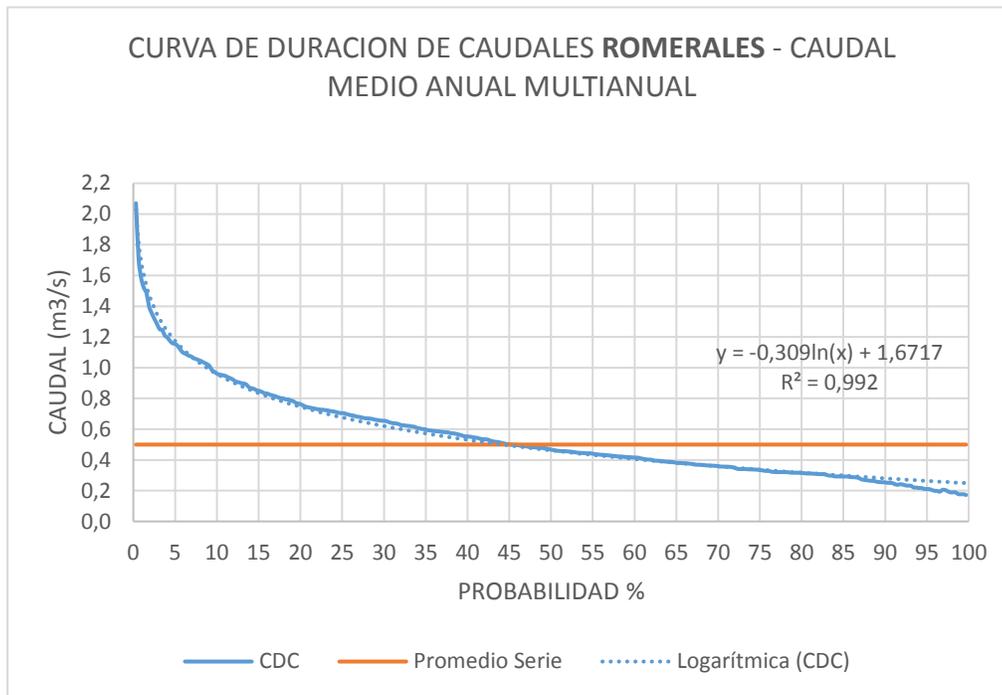


Ilustración 40 CDC Romerales, fuente propia.

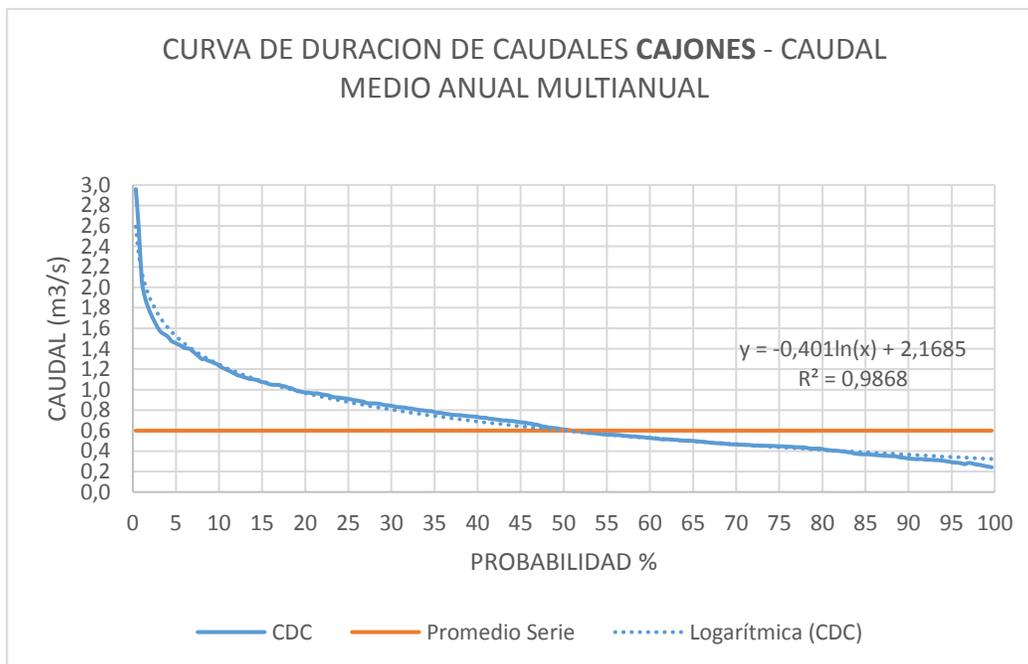


Ilustración 41 CDC Cajones, fuente propia.

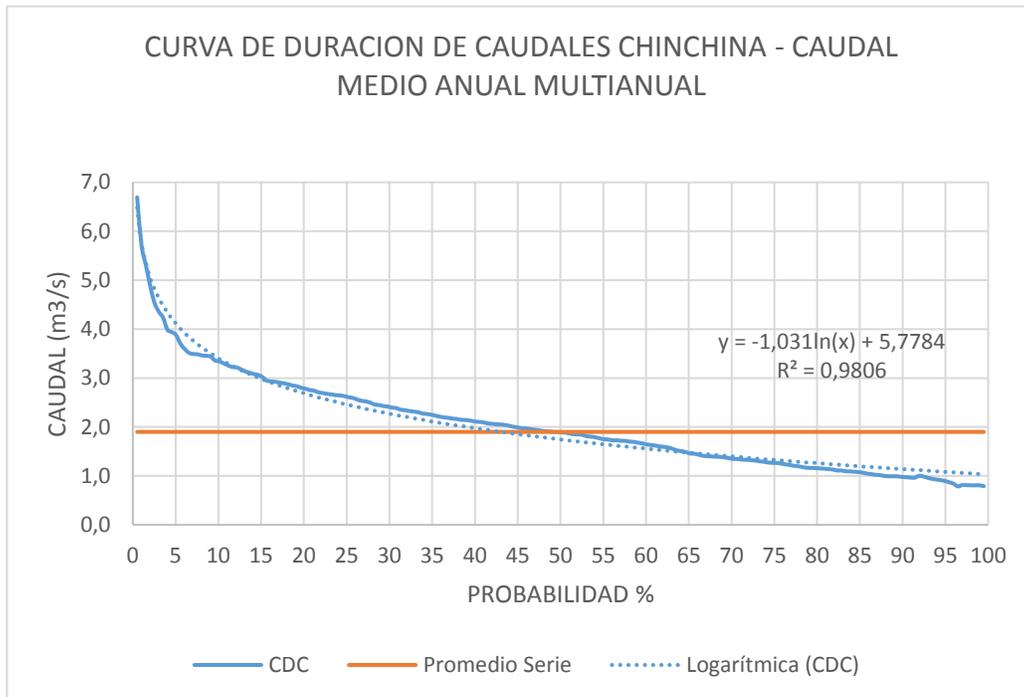


Ilustración 42 CDC Chinchiná, fuente propia.

Se consolidó la información obtenida de la CDC en la tabla (34)

Tabla 34 Consolidado CDC de fuentes abastecedoras.

Fuente	Q Medio (L/s)	Q Máximo (L/s)	Q Mínimo (L/s)	Q Medio (m³/s)	Q Máximo (m³/s)	Q Mínimo (m³/s)
Chinchiná	1891,9	6693,7	790,3	1,9	6,7	0,8
Cajones	610,3	2959,6	241,3	0,6	3,0	0,2
Termales	437,5	2599,6	188,9	0,4	2,6	0,2
Romerales	466,8	2070,2	172,1	0,5	2,1	0,2
California	505	2291,5	203,2	0,5	2,3	0,2

Fuente: Autor

10. OFERTA HIDRICA

Según la resolución 865 de 2004¹⁷, se considera que la oferta hídrica de una cuenca es el volumen disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre, para este ejercicio se determinó con el valor del 95% de la CDC para cada fuente, ver tabla (35).

Tabla 35 Ofertas Hídricas teórica de fuentes abastecedoras.

E.S.P.	Fuente	Caudal Concesionado (l/s)	Q 95% oferta hídrica (l/s)	Diferencia Concesión (l/s)
AGUAS DE MANIZALES S.A. E.S.P.	Chinchiná	1000	1,100	100
	Cajones	450	300	-150
	Termales ¹⁸	50	200	150
	Romerales	160	300	140
	California	160	300	140

Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

Donde se analizó y concluyo según la información suministrada que la fuente hídrica de Cajones presenta un valor negativo en la diferencia del caudal concesionado y la CDC; donde se recomienda estimar o analizar a fondo dicho valor conjuntamente con la autoridad respectiva si es necesario ya que llegado el caso en un futuro podría presentar problemas de abastecimiento.

¹⁷ Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.

¹⁸ Problemas de minería aguas arriba y también de tratamiento en la potabilización por sulfuros.

10.1. Reducción de oferta hídrica por calidad

Una corriente puede ser afectada por calidad y para este estudio se tiene la información de cada fuente, ver tabla (36). Donde se realizó comparación contra los valores máximos admisibles según resolución 2115 de 2007 (calidad del agua), decreto 475 del 98 (parámetros potabilización), 1594 del 84 (calidad de la fuente).

Tabla 36 Caracterización de fuentes.

Fuente	Chinchiná	Cajones	Termales	Romerales	California	Valor máximo admisible ¹⁹
Turbiedad	15,8	15,8	N/A	15,9	15,8	2
Color	12,0	11,8	N/A	11,8	11,8	15
pH	7,5	7,5	N/A	7,5	7,5	6,5 – 9,0
DBO	10,9	10,9	N/A	11,0	10,5	1
DQO	23,9	23,2	N/A	23,7	23,9	4
Alcalinidad total	101	134	N/A	128	102	0- 200
Solidos Totales	125,3	125,3	N/A	124,7	128,2	1000
Coliformes	22x101	23x101	N/A	30x101	24x101	0
E. Coli	10x101	10x101	N/A	11x101	11x101	0

Fuente, aguas de Manzales S.A E.S.P.

Basado en la tabla anterior se optó por reducir en un 10% según la CDC en cada fuente, ver tabla (37).

Tabla 37 Fuentes afectadas por calidad.

E.S.P.	Fuente	Caudal Concesionario (l/s)	Q 95% oferta hídrica (l/s)	Afectación por calidad 5% (l/s)
AGUAS DE MANIZALES S.A. E.S.P.	Chinchiná	1000	1,100	55
	Cajones	450	300	15
	Termales ²⁰	50	200	10
	Romerales	160	300	15
	California	160	300	15

Fuente: Autor

¹⁹ Resolución 2115 de 2007, Decreto 475 de 1998 – y 1594 de 1984.

²⁰ Problemas de minería aguas arriba y también de tratamiento en la potabilización por sulfuros.

La afectación se consideró del 5% debido a que la caracterización arroja la gran mayoría de valores por debajo de los máximos admisibles.

10.2. Reducción de oferta mínima por caudal ecológico

La estimación del caudal ecológico se realizó teniendo como base el 25% de caudal mínimo mensual multianual (QMM mínimo), tal como lo estipula la Resolución 865 de 2004 emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. ver tabla (38).

Tabla 38 Caudal Ecológico.

Empresa prestadora del servicio	Municipio	Fuente	QMM mínimo (l/s)	Caudal Ecológico (l/s)
AGUAS DE MANIZALES S.A. E.S.P.	Manizales	Chinchiná	513,2	128,3
		Cajones	178,0	44,5
		Termales	123,0	30,8
		Romerales	131,0	32,8
		California	144,1	36,0

Fuente: Autor

Lo anterior se realizó mediante Excel en la base de datos para su correcta trazabilidad en la generación de tablas.

11. OFERTA HIDRICA NETA DISPONIBLE

Se consolidó la información para el cálculo de la oferta neta disponible y se generó la tabla (39).

Tabla 39 Oferta Hídrica Neta Zona de Estudio.

Fuente	Concesión (l/s)	Q 95% oferta hídrica (l/s)	Afectación por calidad 5% (l/s)	Caudal Ecológico (l/s)	OH Neta disponible (l/s)
Chinchiná	1000	1,100	55	128,3	916,7
Cajones	450	300	15	44,5	240,5
Termales	50	200	10	30,8	159,2
Romerales	160	300	15	32,8	252,2
California	160	300	15	36,0	249
Total	1820	2200	110	272,4	1817,6

Fuente propia.

Las fuentes de Chinchiná y Cajones son tema de análisis (no realizado en este estudio) en cuanto a la concesión debido a que se encuentran por encima de la oferta neta disponible donde se debe distribuir ese faltante en las demás fuentes que presentan valores por encima de la concesión.

Tabla 40 Total oferta hídrica neta multianual.

Fuente	OH Neta disponible (l/s)	OH Neta disponible (m³/s)	OH Neta disponible (Mm³/año)
Chinchiná	916,7	0,9167	28'909.051,2
Cajones	240,5	0,2405	7'584.408,0
Termales	159,2	0,1592	5'020.531,2
Romerales	252,2	0,2522	7'953.379,2
California	249	0,249	7'852.464,0
Total	1817,6	1,8176	57'319.833,6

Fuente propia.

12. DEMANDA

Conforme a la resolución 865 de 2004, la demanda del recurso corresponde al volumen de agua gastada para el desarrollo de actividades socioeconómicas, y debe ser el resultado de las mediciones efectuadas por los usuarios y reportadas a las instituciones de control y autoridades ambientales regionales.

Tabla 41 Demanda según suscriptores multianual.

SUSCRIPTORES		CONSUMO (m ³ /sus- día)	Total consumo diario (m ³ /día)
Estrato 1	7349	0,48	3527,5
Estrato 2	20818	0,5	10409,0
Estrato 3	30666	0,54	16559,6
Estrato 4	13468	0,47	6330,0
Estrato 5	5156	0,43	2217,1
Estrato 6	7144	0,51	3643,4
Total, residencial	84.601		
Rural estrato 1	1037	0,37	383,7
Rural estrato 2	1546	0,45	695,7
Rural estrato 3	598	0,52	311,0
Rural estrato 4	186	0,59	109,7
Rural estrato 5	84	0,59	49,6
Rural estrato 6	101	0,7	70,7
Total, Rural	3.552		
Industrial	243	11,23	2728,9
Comercial	4882	0,79	3856,8
Oficial	404	6	2424,0
Otros	281	2	562,0
Total no residencial	5.810		
Total suscriptores	93.963		
Gran Total consumo promedio diario			53.878,7

Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P. año 2013.

Se consolidó la información del consumo que fue facturado por demanda, ver tabla (42).

Tabla 42 consumo Facturado

Año	Consumo Facturado (Mm3/año)	Consumo diario promedio (m3/día)
1997	21.765.243	59630,8
1998	21.465.821	58810,5
1999	20.886.976	57224,6
2000	20.308.131	55638,7
2001	19.674.607	53903,0
2002	19.386.824	53114,6
2003	19.467.855	53336,6
2004	19.181.540	52552,2
2005	19.331.777	52963,8
2006	19.853.742	54393,8
2007	19.575.216	53630,7
2008	19.487.647	53390,8
2009	19.088.160	52296,3
2010	18.150.201	49726,6
2011	17.386.020	47632,9
2012	17.659.604	48382,5
2013	17.760.421	48658,7
Promedio Multianual	19´437.046,2	53252,2

Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P. año 2013.

La facturación del recurso ha disminuido notoriamente cada año donde es importante resalta un ahorro y uso eficiente del agua, un mayor control en las pérdidas del sistema tanto de distribución como domiciliario cuidando más el recurso vital para el futuro.

Al realizar la diferencia del consumo promedio facturado contra el consumo según suscriptores (53878,7 - 53252,2) se obtiene una diferencia de 626,5 m³ al día que significa el 1,16% de error en la demanda calculada utilizando esta y no la facturada para el ejercicio.

Se consolidó la información de caudales captados en la planta donde, ver tabla (43).

Tabla 43 Caudal Captado Multianual.

Año	Caudal Captado Promedio (m³/día)	Caudal Captado Promedio (Mm³/año)
1997	82.275,3	30.030.471,4
1998	112.250,9	40.971.571,2
1999	110.427,8	40.306.161,6
2000	102.401,3	37.376.467,2
2001	99.800,6	36.427.233,6
2002	97.321,0	35.522.150,4
2003	83.747,5	30.567.844,8
2004	96.025,0	35.049.110,4
2005	110.427,8	40.306.161,6
2006	97.148,2	35.459.078,4
2007	83.185,9	30.362.860,8
2008	60.956,2	22.248.995,3
2009	79.719,3	29.097.550,7
2010	66.996,9	24.453.868,0
2011	76.387,6	27.881.475,9
2012	74.311,9	27.123.858,6
2013	73.186,3	26.713.011,2
Promedio	88.621,7	32.346.933,6
Total Multianual	1.506.569,5	549.897.871,1

Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P. (las cifras pueden variar por decimales omitidos)

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS 2000, numeral B 2.5 de la Sección II del Título B, establece los niveles máximos de pérdidas técnicas, para el cálculo de la dotación bruta, en los diferentes componentes del sistema de acueducto, tales como: la aducción (<5%), la planta de tratamiento (5%), la conducción (<5%) y las pérdidas de agua en la red de distribución (20 - 40%), los cuales representan en gran medida la eficiencia funcional y operacional de un sistema.

Por otra parte, la Ley 373 de 1997, mediante la cual se establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua, determina que la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA, debe fijar las metas anuales para reducir las pérdidas en cada sistema de acueducto.

Se comparó la información de las tablas 42 y 43 donde el contraste de información arroja lo siguiente, ver tabla (44).

Tabla 44 Comparación caudal captado versus facturado.

Año	Caudal Captado Promedio (Mm ³ /año)	Consumo Facturado (Mm ³ /año)	Índice de agua No Contabilizada – IANC (%)	Volumen IANC (Mm ³ /año)	Pérdidas (Mm ³ /año)
1997	30.030.471,4	21.765.243	35,14	7.648.306,4	616.922
1998	40.971.571,2	21.465.821	30,75	6.600.740	12.905.010
1999	40.306.161,6	20.886.976	23,69	4.948.124,6	14.471.061
2000	37.376.467,2	20.308.131	32,87	6.675.282,7	10.393.053,5
2001	36.427.233,6	19.674.607	33,17	6.526.067,1	10.226.559,5
2002	35.522.150,4	19.386.824	33,42	6.479.076,6	9.656.249,8
2003	30.567.844,8	19.467.855	32,83	6.391.296,8	4.708.693
2004	35.049.110,4	19.181.540	29,33	5.625.945,7	10.241.624,7
2005	40.306.161,6	19.331.777	27,23	5.264.042,9	15.710.341,7
2006	35.459.078,4	19.853.742	26,73	5.306.905,2	10.298.431,2
2007	30.362.860,8	19.575.216	26,98	5.281.393,3	5.506.251,5
2008 ²¹	22.248.995,3	19.487.647	14,01	2.730.219,3	31.129
2009	29.097.550,7	19.088.160	27,63	5.274.058,6	4.735.332,1
2010	24.453.868,0	18.150.201	27,42	4.976.785,1	1.326.881,9
2011	27.881.475,9	17.386.020	27,43	7.768.985,3	5.726.470,6
2012	27.123.858,6	17.659.604	29,54	5.216.647	4.247.607,6
2013	26.713.011,2	17.760.421	25,1	4.457.865,7	4.494.724,5
Prom.	32.346.933,6	19.437.046,2	28,4	5.539.514,3	7.370.373,2

Fuente Aguas de Manizales S.A. E.S.P.

El caudal captado en la planta de tratamiento de agua potable por demanda tiene unas pérdidas después del IANC del 22,8% en promedio multianual, de las cuales un porcentaje pertenece al retrolavado de los filtros que oscila en un 5% aproximadamente en promedio, lo cual indica que las pérdidas desconocidas después de la captación serían del 17,8%; junto al IANC sobrepasaría el 30% que tiene como límite la CRA²², en su resolución CRA 151 de 2001, artículo 2.4.3.14. lo anterior indica enfatizar en el tema para ampliar los valores de dichas pérdidas desconocidas logrando mitigarlas para un mejor panorama del negocio del agua desde el punto de vista empresarial y también ambiental por la reducción de lo captado en los cuerpos hídricos acorde a la reducción de las pérdidas logrando un mayor nivel de caudales.

²¹ En el año 2008 se presentó un desastre en la planta, lo cual redujo la producción, se tomó un menor IANC proporcional al suceso.

²² Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico.

13. INDICE DE ESCASEZ

Se calculó el índice de escasez según oferta hídrica neta y demanda mediante la siguiente fórmula:

$$I_e = \frac{Dh}{Oh} * Fr * 100$$

Donde:

Ie: índice de escasez en porcentaje.

Dh: demanda hídrica en metros cúbicos (m³).

Oh: oferta hídrica superficial neta en metros cúbicos (m³).

Fr: Factor de reducción por calidad del agua y el caudal ecológico.

100: para expresarlo en porcentaje.

Tabla 45 Categorías e interpretación del índice de escasez.

Categoría	Rango	Color	Explicación
Alto	>50%	Rojo	Demanda alta
Medio alto	21-50%	Naranja	Demanda apreciable
Medio	11-20%	Amarillo	Demanda baja
Mínimo	1-10%	Verde	Demanda muy baja
No significativo	<1%	Azul	Demanda no significativa

Fuente IDEAM.

Se calculó el índice de escasez del área de aferencia a la PTAP donde

$$I_e = \frac{Dh}{Oh} * Fr * 100$$

Se descarta el factor de reducción ya que la oferta tiene dicho valor incluido.

$$I_e = \frac{32.346.933,6 \text{ Mm}^3}{57.319.833,6 \text{ Mm}^3} * 100$$

$$I_e = 0,564323578 * 100$$

$$I_e = \mathbf{56,4\%}$$

Se clasifico en categoría **Alta** según tabla anterior, esto no quiere decir que en las fuentes abastecedoras los cuerpos de agua estén secos, significa que la demanda representa más del 50% de la oferta neta, se podría revertir esta situación mediante la disminución de la demanda con el ahorro y uso eficiente del agua, realizar un manejo integrado de las fuentes superficiales, disminuir las perdidas en el sistema de captación y distribución, en fin disminuir la vulnerabilidad de las cuencas administradas por la entidad responsable.

Se comparó el índice calculado con el de otras ciudades con una población y/o demanda similar, ver tabla (46).

Tabla 46 Índice Escasez algunas ciudades Colombia.

CIUDAD	IE
Pereira ²³	41,1%
Armenia ²⁴	78%
Ibagué ²⁵	71%
Pasto ²⁶	77,82

Fuente, Estudio Nacional del Agua- IDEAM

Cabe anotar que Manizales se abastece también de la reserva de Rio Blanco la cual oferta un promedio multianual de 745,7 L/s equivalentes a 23.494.320 Mm³ al año aumentando la oferta para la población de Manizales en 80.814.153,6 Mm³ disminuyendo el índice de escasez al 40% lo cual es una demanda apreciable del recurso. En comparación con otras ciudades con una población y/o clima similar se encuentra por debajo de las mismas lo cual es una invitación a realizar proyectos para buscar otras fuentes de abastecimiento para el futuro.

²³ APOYO TÉCNICO Y SOCIALIZACIÓN DE ACTIVIDADES PARA LA REGLAMENTACIÓN DE MICROCUENCAS PRIORIZADAS EN LA SUBCUENCA DE LA QUEBRADA COMBIA.

²⁴ Estudio Nacional del Agua, fuente IDEAM, internet año 2015 consultado desde:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/16404/ENA+cuadros.pdf/9741632b-0e3d-42c8-9ce7-197c0c593b37>

²⁵ Estudio Nacional del Agua, IDEAM 2015.

²⁶ Estudio Nacional del Agua, IDEAM 2015.

14. COMPONENTES BALANCE HIDRICO PERIODO 1997-2013

Es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado de 17 años para este caso en la zona de estudio como aferente a la PTAP.

Los componentes principales son: la precipitación, temperatura, caudal, evaporación y almacenamiento.

La ecuación de continuidad es la fundamentación básica del balance hídrico puesto que las entradas son iguales a las salidas de agua más su almacenamiento:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \frac{ds}{dt}$$

Donde

Entradas: precipitación

Salidas: evapotranspiración y demanda del recurso

ds/dt: cambio de almacenamiento

El cambio de almacenamiento es el flujo subterráneo que es generado en las microcuencas y sus variaciones.

El ciclo hidrológico no tiene fin y para poder realizar estudios de los caminos que toma el agua se debe limitar espacialmente y temporalmente que sería el objetivo del balance hídrico el cual no es cuantificable con exactitud por su complejidad, en este estudio se realiza un balance hídrico superficial de largo plazo para lograr evaluar indirectamente los componentes desconocidos por diferencia de los componentes conocidos.

Se calculó el balance hídrico para el periodo de los 17 años de análisis de una manera muy precisa mediante operaciones sencillas con los datos obtenidos anteriormente en este documento, paralelamente se generaron mapas con los datos.

Se procedió a calcular las entradas y salidas del sistema en los siguientes capítulos.

14.1. ENTRADAS

Se calcularon las entradas a la zona de estudio en los 17 años de análisis siendo para este caso la precipitación, ver tabla (47).

Tabla 47 Entrada General Balance Hídrico superficial.

Pluviómetro/estación	Precipitación total multianual (mm)	Precipitación promedio multianual (mm)	Área polígonos Thiessen (ha)
CHEC Gallinazo	34429,7	2025,3	725,5
CHEC Cedral	38459,2	2262,3	1786,2
CHEC Topacio	35566	2092,1	6916,3
CHEC Montenegro	31581,1	1857,7	3937,4
La Fe	30102,2	1770,7	4253,6
Martinica	39584,1	2328,5	5157,3
Romerales	37815,3	2224,4	1982,8
San Antonio	38774	2280,8	3018,5
IDEAM Tesorito	30267,2	1780,4	1645,6
IDEAM Papayal	35931,8	2113,6	1446,5
IDEAM La Nubia	15422	907,2	3912,7
IDEAM Las Brisas	25362,2	1491,9	4994,4
Precipitación total	393.294,6	23.134,9	39.776,7
Precipitación Total Real	254.730,5	14.984,1	23.840,1

Fuente: Autor

El área calculada de los polígonos de Thiessen (ver ilustración 43) fue de 39776,7 ha, la cual difiere de las 12003 ha que tiene la zona de aferencia en su totalidad, por consiguiente, se calculó el área real de cada polígono con respecto a cada parte de microcuenca; es decir se restó el área de cada polígono con el área respectiva y así evaluar qué área pertenece a dicha precipitación según cada pluviómetro/estación, además se corrobora cuales tienen incidencia y cuales no para su posterior eliminación totalizando una sumatoria de 254.730,5 mm totales multianuales.

Después de realizar el análisis se descartan los polígonos de: Tesorito, La Nubia, Papayal, Montenegro y Las Brisas ya que no tienen incidencia directa en las microcuencas y lo cual corresponde a la precipitación que **No** ingresa a las microcuencas con un volumen de 138.564,3 mm multianuales.

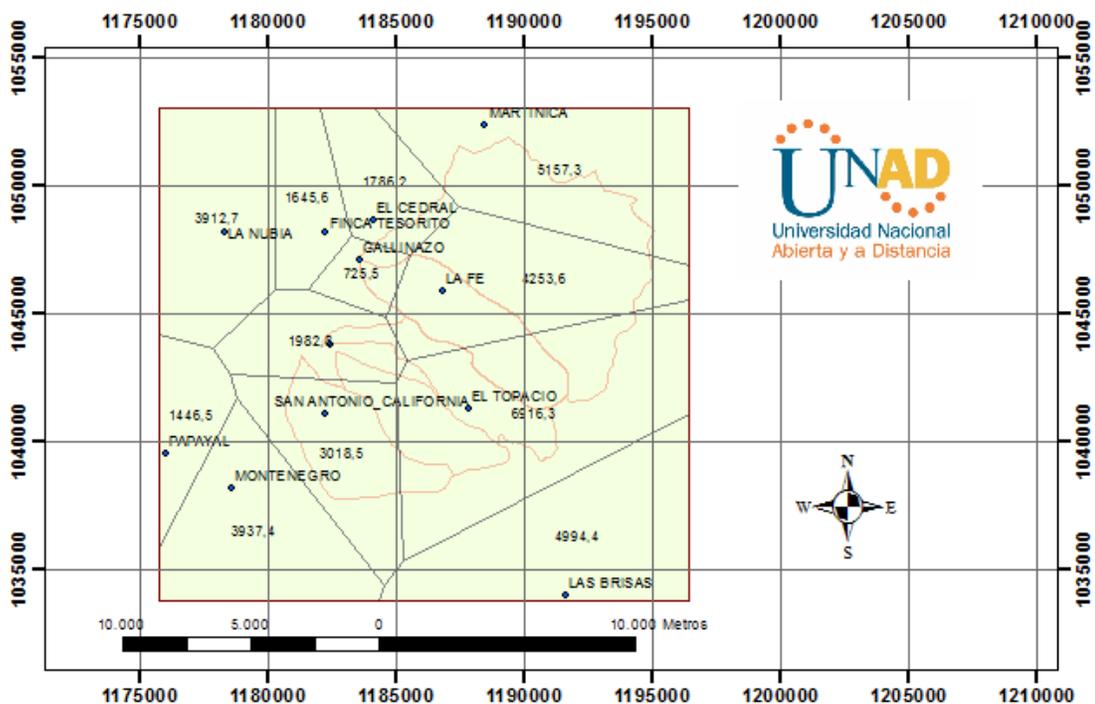


Ilustración 43 Polígonos de Thiessen, fuente propia.

Finalmente se calculó la precipitación correspondiente a cada parte de las microcuencas y sus respectivas áreas, ver tabla (48).

Tabla 48 Precipitación total según área/microcuencas.

Pluviómetro /estación	Precipitación T. Multianual (mm)	Área polígonos Thiessen (ha)	Área inferencia real (ha)	Precipitación correspondiente (mm)	Precipitación promedio anual multianual (mm)
Gallinazo	34429,7	725,5	300,0	14235,6	837,4
CHEC Cedral	38459,2	1786,2	259,7	5592,9	328,9
CHEC Topacio	35566	6916,3	3563,5	18324,9	1077,9
La Fe	30102,2	4253,6	3945,3	27920,4	1642,4
Martinica	39584,1	5157,3	1821,6	13981,6	822,5
Romerales	37815,3	1982,8	396,8	7567,5	445,2
San Antonio	38774	3018,5	1716,0	22043,1	1296,7
Total	254.730,5	23.840,1	12.003	109.666	

Fuente: Autor

Se realizaron las conversiones a unidades más frecuentemente utilizadas:

$$\mathbf{Precipitacion} = 109666 \text{ mm} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = \mathbf{109,7 \text{ m}}$$

$$\mathbf{Area} = 12003 \text{ ha} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = \mathbf{120030000 \text{ m}^2}$$

$$\mathbf{Entrada Total} = 109,7 \text{ m} * 120030000 \text{ m}^2 = \mathbf{13.163.208.860,2 \text{ Mm}^3}$$

13.163.208.860,2 Mm³ en el periodo analizado de 17 años

es decir 774.306.403,5 Mm³ por año respectivamente

Para este estudio no se tuvieron en cuenta otros aportes como escorrentías o aguas subterráneas provenientes de otras cuencas o microcuencas.

14.2. SALIDAS

Se calcularon las salidas siendo para el caso la evapotranspiración y la demanda del recurso o caudal captado en las fuentes.

$$ETP_{Promedio} = 662,5 \text{ mm} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = \mathbf{0,6625 \text{ m}}$$

$$Area = 12003 \text{ ha} * \frac{10000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = \mathbf{120.030.000 \text{ m}^2}$$

$$ETP_{Total \text{ promedio}} = 0,6625 \text{ m} * 120.030.000 \text{ m}^2$$

$$ETP_{Total \text{ promedio}} = 79.519.875 \text{ Mm}^3 * 17 \text{ años} = \mathbf{1.351.837.875 \text{ Mm}^3}$$

El caudal captado promedio sobre las microcuencas fue de **32'346.933 Mm³** por año siendo **549.897.871,1 Mm³** en total para el periodo de estudio.

La suma aritmética de la ETP y la demanda se considera como el total de las salidas del sistema que fue de **1.901.735.746 Mm³** para los 17 años de análisis.

14.3. ALMACENAMIENTO

Se realizó la diferencia aritmética entre las entradas y salidas del sistema para conocer el almacenamiento del sistema.

$$Entradas = Salidas + \frac{ds}{dt}$$

$$13.163.208.860,2 \text{ Mm}^3 - 1.901.735.746 \text{ Mm}^3 = \frac{ds}{dt}$$

$$\frac{ds}{dt} = 11.261.473.114,2 \text{ Mm}^3$$

El almacenamiento es menor que la entrada, pero mayor que la salida del sistema,

14.4. RESULTADO BALANCE HIDRICO

Se remplazaron los términos donde

$$Entradas = Salidas + \frac{ds}{dt}$$

$$13.163.208.860,2 \text{ Mm}^3 = 1.901.735.746 \text{ Mm}^3 + 11.261.473.114,2 \text{ Mm}^3$$

$$13.163.208.860,2 \text{ Mm}^3 = 13.163.208.860,2 \text{ Mm}^3$$

A nivel general se encuentra en equilibrio el sistema analizado acorde a los cálculos realizados, la precipitación de la zona tiene un volumen alto el cual garantiza un buen almacenamiento, no se tuvieron en cuenta las entradas subterráneas y aportaciones desde otras cuencas.

El componente con mayor variación es la precipitación debido a la interacción del viento y su topografía pronunciada, siendo importante denotar que en la parte baja de la cuenca se presenta menor acumulación de lluvia y mayor ETP a lo largo del año.

Se modeló el balance hídrico en ArcGIS mediante la operación de capas ráster y se generó el mapa del que se diferencian 3 zonas con su respectiva área donde el déficit se presenta en la zona inferior de las microcuencas donde la evapotranspiración y temperatura son mayores, es decir que a medida que se asciende en las mismas el déficit disminuye, ver ilustración (44).

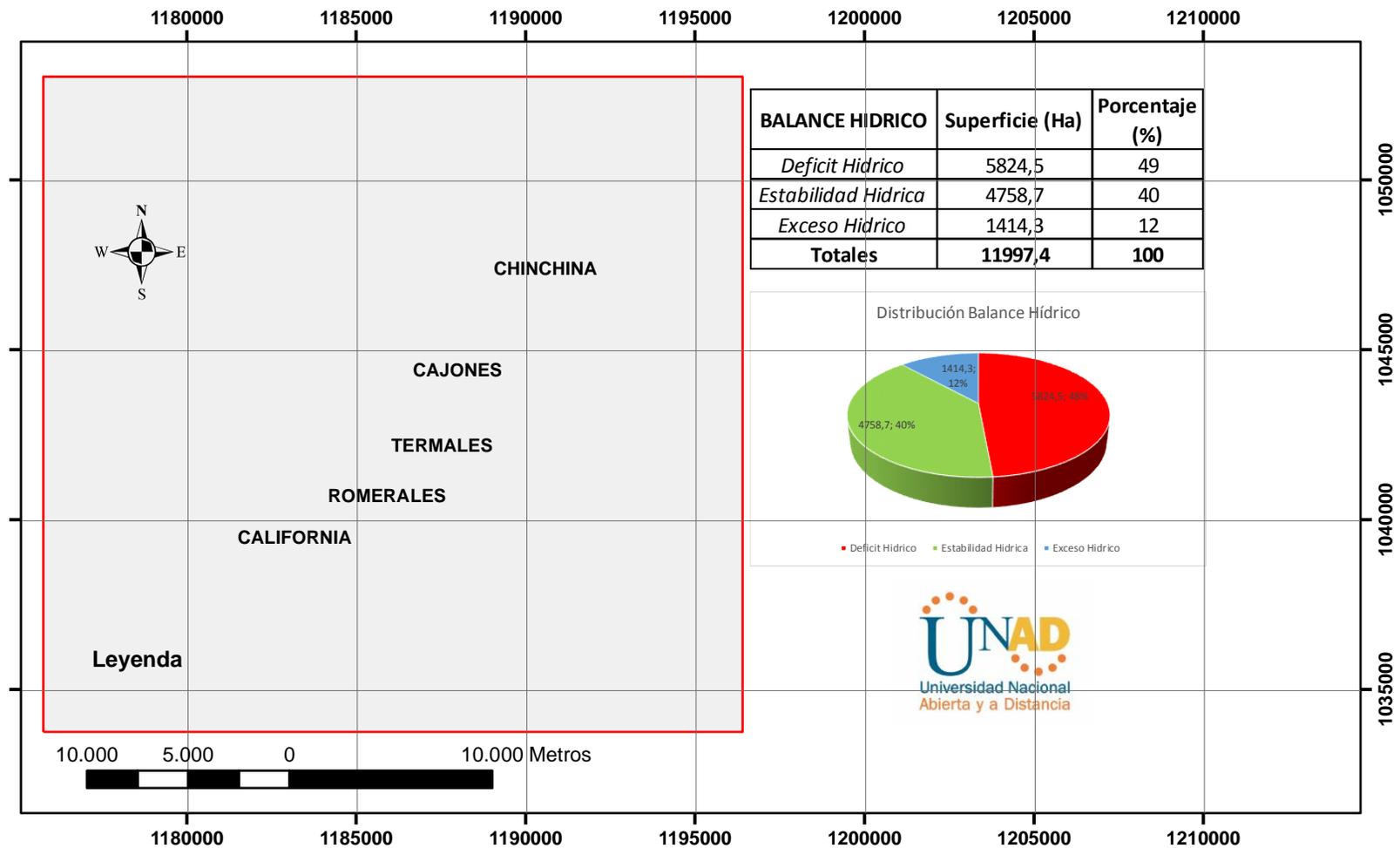


Ilustración 44 Balance Hídrico Microcuencas Abastecedoras. Fuente propia.

15. PROYECCION DEL RECURSO HIDRICO

Se consultó y calculo la población²⁷ que se beneficia del recurso hídrico captado en Aguas de Manizales S.A E.S.P., ver tabla (49), el nivel de complejidad de Manizales es alto por tener más de 60000 habitantes donde la cobertura del servicio es del 99,98% en la zona urbana y del 65% en la zona rural (datos del año 2013).

Se calculó la población por el método aritmético al año 2040 también se realizó la respectiva proyección de suscriptores según la población y un aumento anual del 2,39% que tiene estipulado la empresa al año 2014 donde en promedio cada suscriptor se compone de 4 habitantes y cada uno tiene un gasto de 123,3 L/hab/día:

Año de Censo	Población
2005	379.794
2010	388.490
2016	397.466

Tiempos:

Entre 2005 y 2010 = 5 años
Entre 2010 y 2020 = 10 años

Población
 $388.490 - 379.794 = 8696$ habitantes

Se determinó k:

$$K = 8696 / 5 = 1739,2$$

Población futura:

$$P_f = 388.490 + (1739,2 * 10 \text{ años}) = 405.882 \text{ habitantes para el año 2020,}$$

²⁷ Fuente DANE,

<http://systema59.dane.gov.co/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CG2005AMPLIA DO&MAIN=WebServerMain.inl>

Tabla 49 Población municipio de Manizales y suscriptores del servicio de acueducto.

Año	Población (habitantes)	Suscriptores (und)	Demanda del recurso sin pérdidas (Mm³)
1997	365.880	67.915	21.765.243
1998	367.619	69.578	21.465.821
1999	369.358	71.282	20.886.976
2000	371.098	73.027	20.308.131
2001	372.837	74.815	19.674.607
2002	374.576	76.647	19.386.824
2003	376.315	78.524	19.467.855
2004	378.054	80.446	19.181.540
2005	379.794	82.416	19.331.777
2006	381.666	83.733	19.853.742
2007	383.442	86.078	19.575.216
2008	385.167	88.439	19.487.647
2009	386.848	90.411	19.088.160
2010	388.490	91.133	18.150.201
2011	390.084	94.533	17.386.020
2012	391.640	96.454	17.659.604
2013	393.167	98.482	17.760.421
2014	394.627	100.788	17.782.722
2015	396.075	104.262	17.834.262
2016	397.466	106.808	19.237.183
2017	400.663	109.361	19.696.952
2018	402.402	111.974	20.167.709
2019	404.141	114.651	20.649.718
2020	405.882	117.391	21.143.246
2030	414.570	145.447	26.196.481
2040	440.666	180.209	32.457.441
2050	458058	223.279	40.214.769
2060	475450	276.643	49.826.099

Fuente: Aguas de Manizales S.A. E.S.P. año 2017, SUI: http://cie-sigalcmzl.opendata.arcgis.com/datasets?group_ids=3d7a5f0eb80c45b2b80929a88d55b19a

La oferta neta de la zona de aferencia es de **1817,6 l/s** (Chinchiná 916,7 l/s + Cajones 240,5 l/s + Termales 159,2 l/s + romerales 252,2 l/s + California 249 l/s) para una oferta anual de **57.319.833 Mm³** al año.

La cual se proyectó ante la demanda en la tabla (50).

Tabla 50 Proyección vs Oferta.

Año	Población	Suscriptores	Demanda (Mm³)	Demanda + IANC del 30% (Mm³)
2014	394.627	100.788	17.782.722	23.117.538,6
2015	396.075	104.262	17.834.262	23.184.540,6
2016	397.466	106.808	19.237.183	25.008.338,4
2017	400.663	109.361	19.696.952	25.606.037,7
2018	402.402	111.974	20.167.709	26.218.022,0
2019	404.141	114.651	20.649.718	26.844.632,8
2020	405.882	117.391	21.143.246	27.486.219,5
2030	414.570	145.447	26.196.481	34.055.425,9
2040	440.666	180.209	32.457.441	42.194.672,7
2050	458.058	223.279	40.214.769	52.279.199,5
2060	475450	276.643	49.826.099	64.773.928,2

Fuente: Autor

Lo anterior evidencia un límite para el desabastecimiento después del año 2050, en el año 2053 la demanda igualaría la oferta teniendo en cuenta el IANC del 30% por consiguiente la empresa debe pensar en la mitigación de las perdidas, aumentar la oferta acorde al crecimiento poblacional de la ciudad mediante un uso adecuado del recurso, explorar nuevas fuentes abastecedoras para cubrir la demanda.

La relación con las zonas aledañas o próximas se convierte en un comparativo de consumos para la adecuada administración del recurso de la entidad responsable partiendo de que podría llegarse a dar el caso de compartir el mismo abastecimiento.

16. CONCLUSIONES

El área de estudio presenta una precipitación media anual de **14984** mm distribuidos en las microcuencas con un promedio de **2140,6** mm por año en cada punto de interés que para este caso son los pluviómetros representativos de la zona, Colombia tiene un promedio total anual de 3000²⁸ mm/año, la zona de estudio presenta el 71,4 % de la precipitación nacional si se compara con la misma.

Se calculó la oferta del área de aferencia que fue de **57.319.833,6 Mm³**, se consideró como una buena fuente de agua por su buen comportamiento en la zona.

La demanda obtenida fue de **32.346.933,6 Mm³**, no obstante, se debe tener en cuenta que la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P. tiene dos plantas de tratamiento de agua potable para satisfacer la demanda de la ciudad que oscila entre 1100 l/s y 1220 l/s, de los cuales se captan de la zona de estudio 1065,4 l/s en promedio diario multianual. Cabe aclarar que solo se capta en su totalidad agua superficial para satisfacer dicha necesidad, el agua subterránea puede presentar un potencial para el aprovechamiento previos estudios de calidad.

La oferta hídrica de **1817 l/s** supera la demanda de **1025,7 l/s** siendo esta del 56,4% (IE), en este sentido, la planta se encuentra en condiciones de abastecer la demanda de la ciudad, aunque no es amigable ambientalmente debido a que a la fecha son captados 800 l/s y el excedente de 300 l/s lo suministra la otra PTAP.

Es importante estudiar nuevas fuentes de abastecimiento con el fin de prever la viabilidad técnica y económica del suministro del agua a las zonas de expansión de la ciudad y/o en caso fortuito que se vean afectadas las fuentes actuales.

El cálculo del índice de escasez es muy acertado en función de la información disponible que fue medida directamente por la entidad responsable, de igual manera, el área de estudio presenta una alta demanda lo cual significa que para aminorarla se deben fortalecer los programas de reforestación y compra de predios que tiene la empresa prestadora del servicio, lo anterior en pro de mejorar la producción del recurso en la zona.

La planta de tratamiento de agua potable puede tratar hasta 1400 l/s actualmente, lo cual que representan 44.150.400 Mm³ al año por demanda sin realizar ningún tipo de modificación, ampliación o cambio de tecnología a dicha planta, limitando el abastecimiento a una población de 463.276 habitantes que serían equivalentes a 319.713 suscriptores del servicio.

²⁸ http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/237324/Nelson+Vargas_IDEAM.pdf

En cuanto a la proyección del recurso se utilizaron parámetros reales aplicados a la población de la ciudad con un gasto de 123,3 l/hab/día, un crecimiento en el número de suscriptores del 2,39% anual (por suscriptor se estipulo un total de 4 habitantes), para el año 2053 manteniendo los porcentajes de crecimiento, consumo y asumiendo pérdidas del 30% en el sistema.

Este proyecto de investigación es un punto de partida para tomar decisiones a tiempo evitando un desabastecimiento futuro inmediato en 36 años concibiendo las condiciones actuales de crecimiento por suscriptores, el mismo consumo y un máximo de pérdidas del 30% en el sistema.

Después de evaluar la disponibilidad del recurso en la zona de estudio se encontró que la oferta se encuentra por encima de la demanda por 791,3 l/s en el periodo analizado, lo cual es poco para el crecimiento poblacional que demanda la ciudad en este momento, por consiguiente, es necesario mejorar la red meteorológica de la zona bien sea por la empresa prestadora del servicio y/o entidades responsables garantizando un flujo de datos para mayor autonomía sobre el recurso hídrico sin descompensar el medio ambiente por sobreuso, a la vez con nuevas estaciones se generarían herramientas técnico-científicas optimizando la gestión del recurso.

El potencial SIG se podría aprovechar generando nuevos mapas de la zona, actualizando y contrastando información de modelaciones pasadas realizadas por entidades diferentes a Aguas de Manizales S.A. E.S.P. y por la misma.

Un diagnóstico acertado sobre las variables que no se utilizaron para el cálculo del balance hídrico como humedad relativa, brillo solar, radiación solar, agua subterránea, recargas de otras fuentes sería implementar la toma o cálculo de sus valores de campo por herramientas o equipos especializados; al contar con datos de diferentes variables para las ecuaciones del ciclo hidrológico y del balance hídrico se obtendría un resultado más acertado sin quitarle peso a los calculo y metodologías empíricas.

BIBLIOGRAFIA

Alcaldía de Villamaría – Caldas, Actualización de 18 de junio del 2008, Recuperado de: <http://www.villamaria-caldas.gov.co/territorios,shtml?apc=bbxx-2-&x=1445537>

Aparicio, F (1982), Fundamentos de hidrología de superficie, Editorial Limusa, México.

Chow, V, T, Maidment, D, R; Mays, L, W, Hidrología aplicada, McGraw-Hill, Bogotá (1994), Tomado de:
<http://repository,eia,edu.co/revistas/index.php/reveia/article/view/415/408>

Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, 1997, Resolución 567 de 1997, Aprovechamiento de las aguas en el territorio de jurisdicción de la CARDER.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, 2007, Resolución 061 de 2007, Lineamientos para demarcar las áreas forestales protectoras de los nacimientos y corrientes de agua ubicados en suelos rurales y suburbanos destinados a usos agrícolas, pecuarios, forestales y de acuicultura.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, 2003, Sectorización Hidrográfica del Departamento de Risaralda.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, 2007, Resolución 061 de 2007, Lineamientos para demarcar las áreas forestales protectoras de los nacimientos y corrientes de agua ubicados en suelos rurales y suburbanos destinados a usos agrícolas, pecuarios, forestales y de acuicultura.

Corporación Autónoma Regional De Risaralda CARDER, 2012, Informe de monitoreo del recurso hídrico del departamento de Risaralda.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, 2009b, Apoyo en el establecimiento de los objetivos de calidad del Río Totuí, Pereira.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda, CARDER y Universidad Tecnológica de Pereira – UTP, 2010, Apoyo Técnico al Proceso de Reglamentación de las Aguas del Río Totuí y la Quebrada Combia.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda, CARDER, 2009c, Plan de Gestión Ambiental Regional, PEGAR 2008 – 2019, Risaralda Bosque Modelo para el Mundo, Pereira Risaralda.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda, CARDER, 2008, Caracterización de la estructura, tenencia de la tierra y de los sistemas productivos de la Subcuenca Totuí, Pereira.

Corporación Autónoma Regional Del Quindío CRQ, 2011, Oferta, demanda e índice de escasez de las unidades de manejo de cuenca del departamento del Quindío, Colombia.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, 2008, Plan de ordenamiento y manejo ambiental de la subcuenca Río Negro, Subdirección de planeación y sistemas, Colombia.

Huizingh, E, Elko K, Vrolijk, H, 1999, "Decision Support for Information Systems Management: Applying Analytic Hierarchy Process (AHP)".

International Water Management Institute (IWMI), 2002, Water accounting for integrated water management in river basins, Tools and Concepts for Improved Water Management, International Water Management Institute (IWMI), Battaramulla, Sri Lanka.

Instituto Colombiano De Hidrología, Meteorología y Medio Ambiente – IDEAM -, 2012, Mapas de disponibilidad hídrica para las principales ciudades de Colombia.

Instituto Colombiano De Hidrología, Meteorología Y Medio Ambiente – IDEAM -, 2007, Cálculo índice de escasez.

Instituto Colombiano De Hidrología, Meteorología Y Medio Ambiente – IDEAM -, 2000, Estudio nacional del agua (ENA).

Instituto Colombiano De Hidrología, Meteorología Y Medio Ambiente – IDEAM -, 2011, Estudio nacional del agua (ENA).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, Estudio Nacional del Agua, Bogotá, 2000.

Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, Primera Generación de Indicadores de la Línea Base de la Información Ambiental de Colombia, Trade Link Ltda, Bogotá, 2000.

Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, Perfil ambiental de Colombia, Trade Link Ltda, Bogotá, 2000.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, RESOLUCION 865 DE 2004, (julio 22). Diario Oficial 45630 del 04 de agosto de 2004. Por la cual

se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT - Grupo de Análisis Económico, Metodología para el cálculo del índice de escasez, Documento preliminar, Bogotá, D.C., 2004.

Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, Bogotá D,C, 2010.

Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Decreto 155 del 2004 por el cual se reglamenta el artículo 43 de la ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones, Bogotá D,C, 2010.

Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Decreto 3930 de 2010, Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI-Parte III- Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones, Bogotá D,C, 2010.

Jiménez, H,1992,Hidrología Básica I, Ed, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
Clérico C, G, P, (2001), Aplicaciones del modelo usle/rusle para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de la plata, Buenos Aires: en prensa.

Republica de Colombia, Ministerio de Agricultura, Decreto - Ley 2811 de 1974, Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, Bogotá D,C, 1974.

Republica de Colombia, Ministerio de Agricultura, Decreto 1541 de 1978, Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973, Bogotá D,C, 1978.

Republica de Colombia, Ministerio de Agricultura, Decreto 1594 de 1984, Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto.

Republica de Colombia, Decreto 1729 de 2002, Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones, Bogotá D,C, 2002.

Republica de Colombia, Constitución Política de Colombia 1991, Bogotá D,C, 1991.

Sánchez, F, D (2010), "AGUA SUPERFICIAL, Caracterización y análisis de la oferta," Capítulo 3: paginas 4 – 5.

Republica de Colombia, Congreso de Colombia, Ley 99 de 1993, Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones, Bogotá D,C, 1993.

Food and Agricultural Organization of the United Nations –FAO, 2006, Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Guía técnica Numero 56 riego y drenaje Roma.
<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/sept2001/ciudades.htm>