

**APORTE DE AGUAS TERMALES PROYECTO VALLE DE
NEREIDAS - ZONA BOTERO LONDOÑO
MUNICIPIO DE VILLAMARÍA, CALDAS**

Luisa Fernanda Román González

**UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS
PROGRAMA DE GEOLOGÍA**



Junio de 2021

APORTE DE AGUAS TERMALES PROYECTO VALLE DE NEREIDAS

ZONA BOTERO LONDOÑO

MUNICIPIO DE VILLAMARÍA, CALDAS

Luisa Fernanda Román González

**Trabajo presentado como requisito para optar al título de Geóloga bajo la modalidad de
práctica empresarial**

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

Manizales, Caldas

2021



APORTE DE AGUAS TERMALES PROYECTO VALLE DE NEREIDAS

ZONA BOTERO LONDOÑO

MUNICIPIO DE VILLAMARÍA, CALDAS

Luisa Fernanda Román González

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

Director Empresarial

Esp. Julián López Palacio

Geólogo CHEC – Grupo EPM

Directora Universidad de Caldas

Esp. Hilda Patricia Cano Sánchez

Profesora del Departamento de Geología de la Universidad de Caldas

Manizales, Caldas

2021



NOTA DE ACEPTACIÓN

Aprobado



HILDA PATRICIA CANO SÁNCHEZ

DIRECTORA

DEDICATORIA

A mi familia que es mi gran motor para cumplir mis metas, gracias por estar a mi lado en el proceso de este nuevo logro en mi vida.



AGRADECIMIENTOS

A mi director empresarial Julián López por su constante acompañamiento, sus enseñanzas, aportes y guianza en la realización de este trabajo; a mi directora institucional Hilda Patricia Cano por sus valiosos aportes y contribuciones; a Natalia Susana de Chec por su amable colaboración, a Edgar Mauricio y Eduard, de Chec, por su acompañamiento y enseñanzas en campo, al equipo de geotermia Julián, Juan, Ricardo y Laura por compartir sus conocimientos. Agradezco a mis compañeros y amigos de la universidad, por hacer mi paso por ella una experiencia única y llena de aprendizaje, a la Universidad de Caldas por brindarme todas las oportunidades para crecer como profesional y persona, a mis amigos y familiares por estar a mi lado y apoyarme en el transcurso de mi carrera.



Contenido

1. Introducción	19
2. Objetivos	20
2.1 Objetivo general	20
2.2 Objetivos específicos	20
3. Metodología	21
4. Localización	23
5. Justificación	25
6. Antecedentes	27
7. Marco Geológico	29
7.1 Geología Regional	29
7.2 Geología Local	32
7.2.1 Complejo Cajamarca (Pev Pes)	32
7.2.2 Complejo Quebradagrande (Ksc Kvc)	35
7.2.3 Depósitos de flujo de lodo volcánico (Qfl)	37
7.2.4 Ignimbritas de Río Claro	39
7.2.5 Lavas Andesíticas (NgQa Qa)	41
7.2.6 Depósitos aluviales y coluviales (Qar)	43
7.3 Geología Estructural	44
8. Hidrogeología	47
8.2 Quebrada Nereidas	52
8.1.1 Climograma de la microcuenca de la Quebrada Nereidas	56
8.2 Río Molinos	58
8.3 Río Claro	60
8.4 Quebrada El Billar	62
9. Clima	64
9.1 Análisis de los datos existentes de las estaciones en la zona de estudio	66
9.1.1 Metodología	67
9.2 Precipitación	69
9.2.1 Datos faltantes	71
9.2.3 Identificación de outliers o datos anómalos	76
9.2.4 Coeficiente pluviométrico	77

9.2.5 Precipitación media.....	85
9.3 Temperatura.....	99
9.4 Evapotranspiración.....	104
9.5 Balance Hídrico.....	109
9.5.1 Estación Río Claro- La Batea	112
9.5.2 Estación Pirineos- Chec	114
9.5.3 Estación Q. Molinos PNNN	115
9.5.4 Estación Q. Nereidas- Chec.....	117
9.5.5 Estación Las Brisas	119
10. Fuentes termales.....	122
10.1 Manantial del sector Laguna Alta (T1).....	134
10.2 Manantial del sector La Azufrera (T2).....	138
10.3 Manantial del sector La Quinta (T3).....	141
11. Conclusiones	148
12. Recomendaciones	150
13. Referencias.....	151



Lista de figuras

Fig. 1: Diagrama de metodología.....	21
Fig. 2: Localización regional.....	23
Fig. 3: Localización con los afluentes que pasan por la zona de estudio.....	24
Fig. 4: Localización de manantiales por los grupos en la zona del Complejo Volcánico Cerro Bravo-Machín.....	28
Fig. 5: Mapa de geología regional.....	31
Fig. 6: Afloramiento sobre carretera de esquisto grafitoso.....	32
Fig. 7: Esquisto grafitoso sobre carretera.....	33
Fig. 8: Esquisto negro grafitoso sobre Río Claro.....	34
Fig. 9: Gneis del Complejo Cajamarca.....	35
Fig. 10: Afloramiento de lodolitas negras en el sector de Barro Azul.....	37
Fig. 11: Lavas altamente compactas con baja meteorización.....	38
Fig. 12: Depósitos volcanoclásticos.....	39
Fig. 13: Ignimbritas de Río Claro.....	40
Fig. 14: Depósitos volcánicos con diaclasamiento columnar.....	41
Fig. 15: Morfología típica de ambientes volcánicos.....	42
Fig. 16: Depósitos aluviales.....	43
Fig. 17: Mapa de geología estructural.....	46
Fig. 18: Cuenca, subcuencas y microcuencas del Río Chinchiná.....	49
Fig. 19: Distribución espacial de las UGS según Strycon S.A.S.....	50
Fig. 20: Estaciones hidrológicas Montenegro y La Bodega.....	52
Fig. 21: Régimen hidrológico de la Quebrada Nereidas.....	52
Fig. 22: Hidrograma anual de caudales medios de la Quebrada Nereidas.....	54
Fig. 23: Quebrada Nereidas en el sector de Playa Alta y La Azufrera.....	55
Fig. 24: Climograma de precipitación y temperatura de la cuenca de la Quebrada Nereidas.....	57

Fig. 25: Relación entre precipitación y caudal de la cuenca de la Quebrada Nereidas.....	57
Fig. 26: Régimen hidrológico del Río Molinos.....	58
Fig. 27: Hidrograma anual de caudales medios del Río Molinos.....	60
Fig. 28: Río Claro después de la unión con la Quebrada Nereidas.....	61
Fig. 29: Quebrada El Billar en el sector de la finca La Quinta.....	63
Fig. 30: Clasificación climática de Colombia de Caldas-Lang.....	65
Fig. 31: Clasificación climática Caldas-Lang del departamento de Caldas.....	66
Fig. 32: Zona de estudio con las estaciones climáticas de interés.....	68
Fig. 33: Curva de doble masa de la estación Río Claro- La Batea.....	73
Fig. 34: Curva de doble masa de la estación Pirineos- Chec.....	73
Fig. 35: Curva de doble masa de la estación Q. Molinos PNNN.....	74
Fig. 36: Curva de doble masa de la estación Q. Nereidas- Chec.....	74
Fig. 37: Curva de doble masa de la estación Río Claro- La Guayana.....	75
Fig. 38: Curva de doble masa de la estación Papayal.....	75
Fig. 39: Curva de doble masa de la estación Las Brisas.....	76
Fig. 40: Coeficiente pluviométrico estación Río Claro- La Batea.....	79
Fig. 41: Coeficiente pluviométrico estación Pirineos- Chec.....	80
Fig. 42: Coeficiente pluviométrico estación Q. Molinos PNNN.....	81
Fig. 43: Coeficiente pluviométrico estación Q. Nereidas-Chec.....	82
Fig. 44: Coeficiente pluviométrico estación Río Claro- La Guayana.....	83
Fig. 45: Coeficiente pluviométrico estación Papayal.....	84
Fig. 46: Coeficiente pluviométrico estación Las Brisas.....	85
Fig. 47: Variación de la precipitación media anual en la subcuenca Río Claro.....	89
Fig. 48: Zona de influencia de las estaciones de trabajo a partir de los polígonos de Thiessen.....	91
Fig. 49: Variación de la precipitación media anual en la zona de interés.....	94
Fig. 50: Comportamiento de la precipitación media mensual multianual en el área de estudio sobre la subcuenca Río Claro.....	96



Fig. 51: Precipitación anual de la subcuenca Río Claro.....	97
Fig. 52: Comportamiento de la precipitación media mensual multianual.....	98
Fig. 53: Histograma de temperatura media mensual multianual de las estaciones de trabajo.....	101
Fig. 54: Histograma de temperatura mínima mensual multianual de las estaciones de trabajo.....	102
Fig. 55: Histograma de temperatura máxima mensual multianual de las estaciones de trabajo.....	103
Fig. 56: Comportamiento de la temperatura media multianual en el área de estudio sobre la subcuenca Río Claro.....	104
Fig. 57: Histograma de la evapotranspiración corregida de las estaciones de trabajo.....	108
Fig. 58: Transcurso mensual de la evapotranspiración en algunas localidades de Colombia....	109
Fig. 59: Balance de agua en el suelo.....	111
Fig. 60: Balance hídrico estación Río Claro- La Batea.....	114
Fig. 61: Balance hídrico estación Pirineos- Chec.....	115
Fig. 62: Balance hídrico estación Q. Molinos PNNN.....	117
Fig. 63: Balance hídrico estación Q. Nereidas-Chec.....	118
Fig. 64: Balance hídrico estación Las Brisas.....	120
Fig. 65: Origen de las aguas termales.....	122
Fig. 66: Fuentes termales al oeste del Volcán Nevado del Ruíz.....	126
Fig. 67: Diagrama de Piper-Lengelier.....	128
Fig. 68: Diagrama CSH.....	128
Fig. 69: Diagrama ternario Cl-Li-B.....	129
Fig. 70: Diagrama K-Na-Mg.....	129
Fig. 71: Diagrama δD y δO^{18}	130
Fig. 72: Sección transversal de un cauce con método área-velocidad.....	132
Fig. 73: Puntos termales y cauces visitados en campo.....	133
Fig. 74: Vista del cañón de Río Claro y afloramiento de manantial.....	135
Fig. 75: Aguas termales del sector Botero Londoño.....	138

Fig. 76: Depósitos aluviales de la quebrada El Billar con alteración termal.....142

Fig. 77: Vista 3D de los elementos de la zona de estudio.....145

Fig. 78: Esquema representativo de migración de aguas en la zona de estudio.....146



Lista de tablas

Tabla. 1: Cuenca, subcuencas y microcuencas del Río Chinchiná.....	48
Tabla. 2: Caudal medio mensual de la estación La Bodega.....	54
Tabla. 3: Parámetros físicos de la Q. Nereidas en el sector Playa Alta y La Azufrera.....	56
Tabla. 4: Caudal medio mensual de la estación Montenegro.....	59
Tabla. 5: Parámetros físicos de la Q. Nereidas en el sector Playa Alta	62
Tabla. 6: Parámetros físicos de la Q. El Billar en el sector La Quinta.....	63
Tabla. 7: Estaciones hidrológicas y pluviométricas utilizadas.....	68
Tabla. 8: Porcentaje de datos faltantes entre los años 2016-2020.....	70
Tabla. 9: Datos método de regresión múltiple para identificación de datos faltantes.....	72
Tabla. 10: Registro precipitación estación Río Claro- La Batea.....	78
Tabla. 11: Registro precipitación estación Pirineos- Chec.....	79
Tabla. 12: Registro precipitación estación Q. Molinos PNNN.....	80
Tabla. 13: Registro precipitación estación Q. Nereidas- Chec.....	81
Tabla. 14: Registro precipitación estación Río Claro- La Guayana.....	82
Tabla. 15: Registro precipitación estación Papayal.....	83
Tabla. 16: Registro precipitación estación Las Bris.....	84
Tabla. 17: Datos precipitación media media anual del año 2016 de la subcuenca Río Claro con método de polígonos de Thiessen.....	87
Tabla. 18: Datos precipitación media media anual del año 2017 de la subcuenca Río Claro con método de polígonos de Thiessen.....	87
Tabla. 19: Datos precipitación media media anual del año 2018 de la subcuenca Río Claro con método de polígonos de Thiessen.....	88
Tabla. 20: Datos precipitación media media anual del año 2019 de la subcuenca Río Claro con método de polígonos de Thiessen.....	88
Tabla. 21: Datos precipitación media media anual del año 2020 de la subcuenca Río Claro con método de polígonos de Thiessen.....	89

Tabla. 22: Datos precipitación media multianual polígonos de Thiessen de la subcuenca Río Claro.....	90
Tabla. 23: Datos precipitación media media anual del año 2016 de la zona de interés con método de polígonos de Thiessen.....	92
Tabla. 24: Datos precipitación media media anual del año 2017 de la zona de interés con método de polígonos de Thiessen.....	92
Tabla. 25: Datos precipitación media media anual del año 2018 de la zona de interés con método de polígonos de Thiessen.....	93
Tabla. 26: Datos precipitación media media anual del año 2019 de la zona de interés con método de polígonos de Thiessen.....	93
Tabla. 27: Datos precipitación media media anual del año 2020 de la zona de interés con método de polígonos de Thiessen.....	94
Tabla. 28: Valores de la precipitación media mensual multianual de las estaciones de trabajo.....	98
Tabla. 29: Valores totales multianuales de precipitación (mm) en las estaciones de trabajo.....	99
Tabla. 30: Temperatura media mensual multianual de las estaciones de trabajo desde el año 2016 al 2020.....	100
Tabla. 31: Temperatura mínima mensual multianual de las estaciones de trabajo desde el año 2016 al 2020.....	101
Tabla. 32: Temperatura máxima mensual multianual de las estaciones de trabajo desde el año 2016 al 2020.....	102
Tabla. 33: Evapotranspiración potencial estación Río Claro- La Batea.....	106
Tabla. 34: Evapotranspiración potencial estación Pirineos- Chec.....	106
Tabla. 35: Evapotranspiración potencial estación Q. Molinos PNNN.....	106
Tabla. 36: Evapotranspiración potencial estación Q. Nereidas- Chec.....	107
Tabla. 37: Evapotranspiración potencial estación Río Claro- La Guayana.....	107
Tabla. 38: Evapotranspiración potencial estación Las Brisas.....	107
Tabla. 39: Evapotranspiración potencial corregida de las estaciones de trabajo.....	108
Tabla. 40: Balance hídrico estación Río Claro- La Batea.....	113
Tabla. 41: Balance hídrico estación Pirineos- Chec.....	114

Tabla. 42: Balance hídrico estación Q. Molinos PNNN.....	116
Tabla. 43: Balance hídrico estación Q. Nereidas-Chec.....	117
Tabla. 44: Balance hídrico estación Las Brisas.....	119
Tabla. 45: Resumen balance hídrico de la subcuenca Río Claro.....	121
Tabla. 46: Recopilación de fuentes termales de la zona 4 del Complejo Cerro Bravo- Cerro Machín.....	123
Tabla. 47: Fuentes termales del proyecto Geotérmico del Ruiz que tomó Ingeniería Strycon S.A.S del SGC.....	124
Tabla. 48: Fuentes termales del Valle Nereidas recolección de Aricapa (2020).....	125
Tabla. 49: Descripción geológica de las unidades geológicas aflorantes cerca de las aguas termales.....	133
Tabla. 50: Datos de los cauces de interés y del termal T1.....	134
Tabla. 51: Cálculo ponderado de los valores teóricos de Río Claro.....	136
Tabla. 52: Relación porcentual de Río Claro y T1.....	136
Tabla. 53: Cálculo de Río Claro después de T1.....	137
Tabla. 54: Caudal de T1.....	137
Tabla. 55: Datos de la Q. Nereidas antes y después de T2.....	138
Tabla. 56: Relación porcentual de la Q. Nereidas y T2.....	139
Tabla. 57: Cálculo de la Q. Nereidas después de T2.....	140
Tabla. 58: Caudal de T2.....	140
Tabla. 59: Datos de la Q. El Billar antes y después de T3.....	141
Tabla. 60: Relación porcentual de la Q. El Billar y T3.....	143
Tabla. 61: Cálculo de la Q. El Billar después de T3.....	143
Tabla. 62: Caudal de T3.....	144

Lista de anexos

ANEXO 1: Registro de la precipitación original obtenida de las plataformas SIMA y DHIME.....	166
ANEXO 2: Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes.....	168



Resumen

La zona de interés se ubica en el flanco occidental de la Cordillera Central Colombiana al occidente del Volcán Nevado del Ruíz, en el municipio de Villamaría, Caldas. La empresa CHEC- Grupo EPM se ha encargado de estudiar el potencial geotérmico del sector investigando aspectos geológicos, tectónicos, sociales, ambientales, etc. Para este trabajo se tomó el área de la subcuenca Río Claro para realizar un análisis del aspecto hídrico y climatológico con ayuda de los registros de datos de siete estaciones hidrometeorológicas en un periodo de cuatro años, desde el 2016 hasta el 2020. Se realizó, además, una etapa de campo en la que se recolectó información físico-química de los cauces principales que interactúan con las aguas termales aflorantes con ayuda de una sonda multiparámetros HANNA, con el fin de calcular un caudal de aporte de las aguas termales al sistema a partir de un modelo matemático básico. De esta manera, se pudo reconocer un comportamiento climático bimodal de la subcuenca con dos periodos secos y lluviosos, dando un aporte de caudal de entrada por encima de los 3800 msnm de 359.10 L/s y un aporte de caudal de los manantiales de un promedio mínimo de 242.7 L/s al sistema hídrico en cuestión.

Palabras clave: Aguas termales, cauces, balance hídrico, caudal.



Abstract

The area of interest is located on the western flank of the Colombian Central Cordillera to the west of the Nevado del Ruiz Volcano, in the municipality of Villamaría, Caldas. The company CHEC- Grupo EPM has been in charge of study the geothermal potential of the sector by investigating geological, tectonic, social, environmental aspects, etc. For this work, the area of the Rio Claro sub-basin was taken to realize an analysis of the hydric and climatological aspect with the help of the data records of seven hydrometeorological stations in an period for four years, from 2016 to 2020. In addition, a field stage was carried out in which physical-chemical information was collected on the main channels that interact with the hot springs with the help of a HANNA multiparameter probe, in order to calculate a supply flow of the hot springs to the system from a basic mathematical model. In this way, it was possible to recognize a bimodal climatic behavior of the sub-basin with two dry and rainy periods, giving a input flow contribution above 3800 meters above sea of 359.10 L/s and a flow contribution from the springs of a minimum average of 242.7 L/s to the water system in question.

Keywords: Hot springs, streams, water balance, flow.



1. Introducción

La energía geotérmica ha sido una de las alternativas que desarrolla tecnologías aprovechando las fuentes renovables y que, por su claro valor industrial y su competitividad frente a otras fuentes energéticas, ha marcado la industria en zonas en donde está al alcance de ser explorado y explotado de manera local. En cuanto a los usos no eléctricos de la geotermia, se han empleado diversas formas de utilizar esta fuente de calor directamente; desde bombas de calor, baños termales, calefacción, invernaderos, acuicultura hasta procesos industriales.

Sobre la cordillera central colombiana se han encontrado manifestaciones termales que han permitido identificar un posible recurso geotérmico en el territorio. Desde los años 50's se han reportado fuentes termales en el país, en los 60's se realizaron estudios geoquímicos a los manantiales de algunos de los departamentos como Antioquía, Risaralda y Caldas, que tenían este atractivo calórico en superficie. Fue a comienzos de los 70 que el estudio de las aguas del proyecto geotérmico del Volcán Nevado del Ruíz, en el departamento de Caldas, sobre el municipio de Villamaría, encabezado por la CHEC, empezó a generar gran interés de investigación como un atractivo para posible desarrollo de explotación de energía geotermoeléctrica.

Uno de los aspectos relevantes en un sistema geotérmico es conocer la dinámica de recarga y descarga, es decir las entradas que se manifiestan a través de las lluvias y las salidas, a través de aguas calientes y emisiones de vapor. En este trabajo se pretende realizar un estudio y análisis de las condiciones climáticas en el área, que influencia directamente el aporte de precipitación que puede llegar a tener el sistema, proponiendo un balance hídrico para la subcuenca de Río Claro y, estimar un valor que represente la zona de descarga, a través del caudal de los manantiales visitados.



2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Estimar el caudal de salida de las aguas geotérmicas en la fuente termal Botero

Londoño y proponer un modelo básico de balance hídrico.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar características fisicoquímicas de las fuentes termales y los diferentes afluentes de la zona de estudio.
- Realizar el balance hídrico a partir de datos recolectados de estaciones meteorológicas y/o hidrometeorológicas del sector de interés.
- Estimar caudales tanto de los manantiales de la zona Botero Londoño como de los cauces que interactúan con los mismos a partir de datos recolectados en campo.

3. Metodología

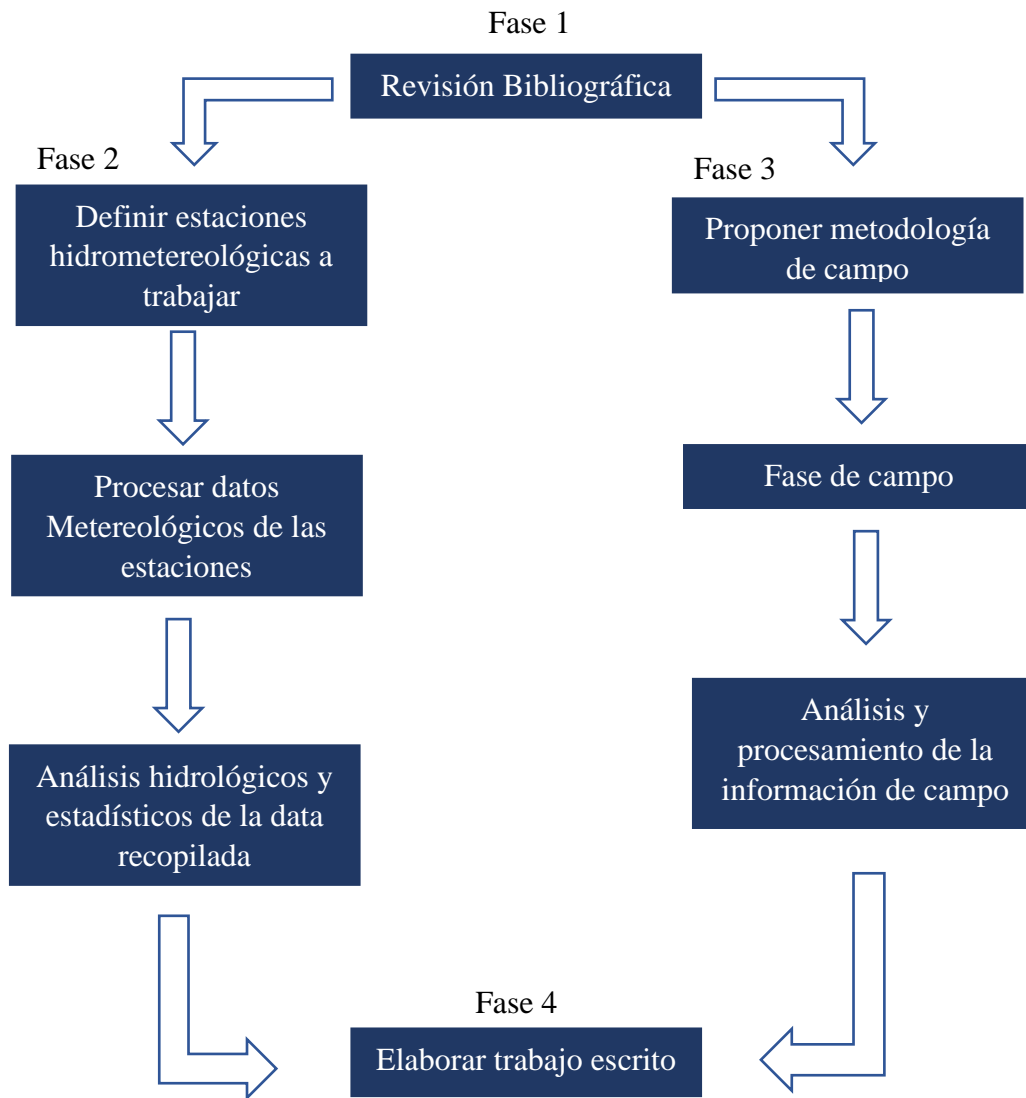


Fig. 1 Diagrama de metodología para el presente estudio.

Para la realización de este trabajo se llevaron a cabo actividades de manera simultanea como se puede ver en la Fig. 1.

La primera fase consistió en una revisión bibliográfica de los datos disponibles; de aspectos geológicos, hidrológicos, de las fuentes termales, clima, etc. A partir

de esta información estudiada, las actividades se segmentaron en dos fases, una de ellas, la segunda, consistió en determinar las estaciones hidrometeorológicas que permitieran trabajar la información disponible, dando prioridad a las que tenían menor porcentaje de datos faltantes, luego de esto, se procesaron los datos recolectados con el fin de identificar anomalías en los registros y se homogenizaron para su posterior procesamiento en el que se elaboraron observaciones hidrológicas y estadísticas facilitando la interpretación de la data recolectada.

La tercera fase comenzó proponiendo una metodología que pudiera ejecutarse en la fase de campo para procesar la información recopilada, ya definido esto, se realizó un reconocimiento de la zona y las posteriores salidas de campo que permitieron recoger datos de la geología del sector, el cálculo de descarga de los ríos y quebradas, y las características físicas de las aguas termales y cauces de interés con la sonda multiparámetros HANNA. Luego de que esta información estuvo disponible y previamente ordenada, se procesaron a partir de la metodología anteriormente planteada con el fin de calcular el caudal de las aguas termales aflorantes.

Para finalizar, en la cuarta fase se realizó la recolección de la información de las fases anteriores para construir el informe que plasma el análisis de cada ítem propuesto en él.



4. Localización

La zona de interés encierra un polígono ubicado en el flanco occidental de la cordillera central colombiana en el municipio de Villamaría, Caldas, al occidente del VNR, accediendo por el barrio Turín, sobre la Ruta El Condor, zona que comprende las microcuencas Río Molinos, Hojas Anchas, Las Nereidas y parte de Aferentes Río Claro; pertenecientes a la subcuenca Río Claro, de la cuenca de Chinchiná (Fig. 2,3).

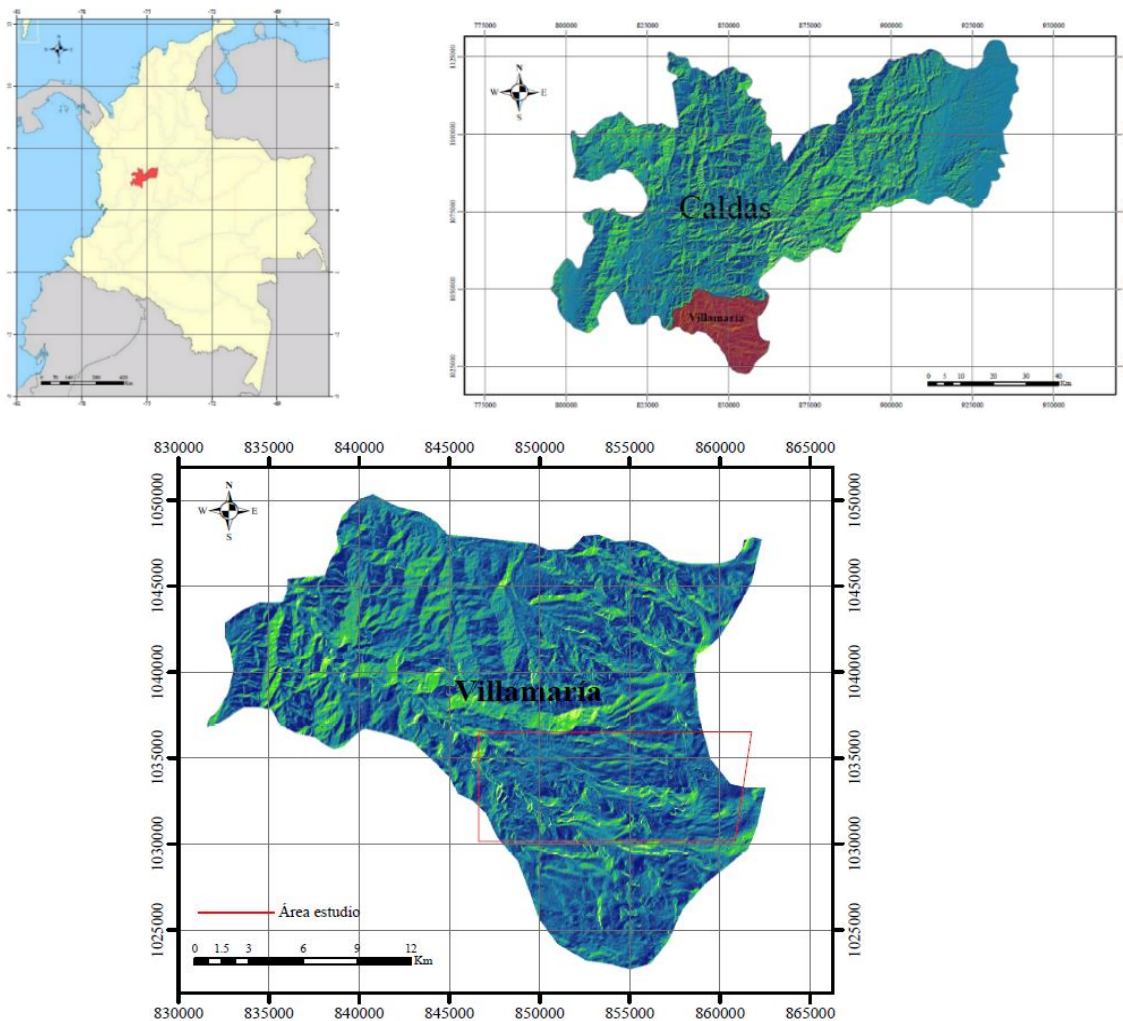


Fig. 2 Localización regional. Base cartográfica tomada del IGAC plancha 225.

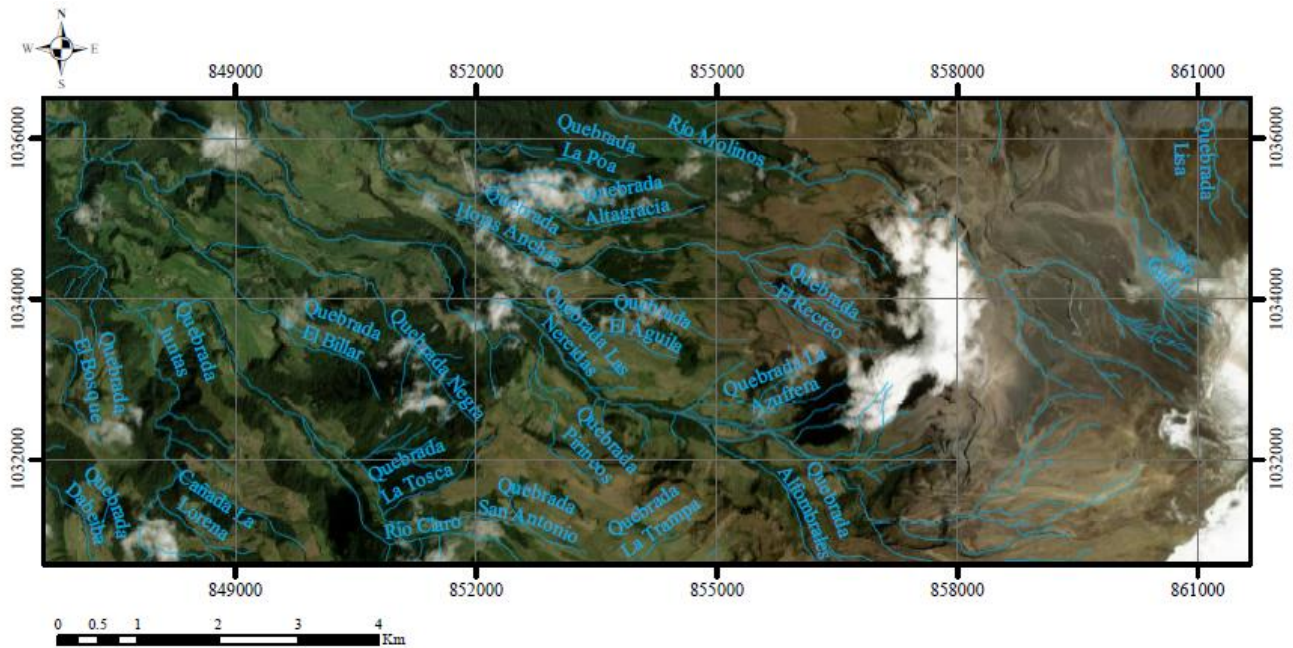


Fig. 3 Localización con los afluentes que pasan por la zona de estudio. Base cartográfica tomada del IGAC plancha 225. Imagen satelital tomada de Google Earth.

5. Justificación

Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas es “Energía asequible y no contaminante” (ODS N° 7) que busca diversificar la matriz energética mundial, mejorar la eficiencia energética, ampliar y mejorar la infraestructura que presta los servicios de electricidad, entre otros. Por lo que proyectos como el que se está adelantando por parte de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), cumple con este objetivo de manera directa y de forma indirecta cumple con varios de los 17 ODS; como “Ciudades y comunidades sostenibles” (ODS N° 11) y “Acción por el clima” (ODS N° 13).

CHEC se ha encargado de estudiar las diferentes características que definen el campo geotérmico del Valle de Nereidas en diferentes fases de investigación, permitiendo conocer cómo es la dinámica del aporte calorífico que entrega el reservorio a la superficie, sin embargo, aún es relevante estudiar los factores hidroclimáticos que controlan la carga y descarga de las fuentes termales.

El clima de la región se ve afectado por factores como el frente intertropical en la convergencia de los vientos alisios del hemisferio norte y sur (ZCIT), los vientos del oeste del Chocó, los fenómenos del niño y de la niña (ENSO) y las características orográficas locales; lo que genera en la región un aporte relevante de precipitaciones con temperaturas variables ofreciendo al sector diferentes rutas de entrada y salida al agua que se incorpora en el sustrato.

Con este trabajo se pretende estimar el aporte que las aguas hacen al reservorio a través del balance hídrico de la subcuenca Río Claro y de esta misma manera, el aporte que las aguas termales hacen a los afluentes con los que interactúan elaborando un modelamiento matemático con sus características físicas.

Para resolver estos interrogantes se debe efectuar un estudio de las aguas termales, es decir de los manantiales y de los principales cauces que se ven afectados por la interacción con estas aguas, por otro lado, se requiere información climática para la evaluación de los componentes que influyen en la disponibilidad del recurso hídrico y su distribución a través de diferentes fenómenos como la evapotranspiración e infiltración.



6. Antecedentes

En 1958 Forero presentó a través del Servicio Geológico Colombiano (SGC) un compendio de varias fuentes termales del país en un estudio llamado “Fuentes Termales de Colombia” en las que se incluyen fuentes de las aguas del municipio de Villamaría, sugiriendo uso terapéutico para éstas debido a sus características físico-químicas.

En 1968 CHEC y ENEL realizaron estudios geoquímicos de algunos manantiales de los departamentos de Antioquia, Risaralda y Caldas, entre estos últimos incluyen a los manantiales Botero Londoño y Termales del Ruiz donde plantea el origen de las aguas y flujos de circulación de las mismas. A partir de este estudio Arango, et al. en 1970 realizaron la primera publicación sobre el proyecto geotérmico del Ruiz y en 1979 CHEC presenta un nuevo informe de las características geoquímicas con base en esta última investigación.

CHEC junto con el Instituto de Energía Eléctrica (ICEL), la Consultoría Técnica Colombiana Ltda. (CONTECOL) y Geotérmica Italiana, en 1983, dan a conocer su investigación geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz con información detallada de las principales fuentes termales.

Para el año 1997 CHEC y Geoenergía Andina S.A E.S.P (GESA) realizaron la primera perforación geotérmica del país llamado Pozo Nereidas 1 (N1) en la finca Pirineos de 1469 metros de profundidad donde se encontraron temperaturas de 200°C además de que definieron las unidades litológicas de la zona.

Alfaro C. en 1998 presentó para INGEOMINAS el Programa de Vigilancia de la Actividad Volcánica del Complejo Volcánico Cerro Bravo-Machín en donde aportó información relevante con respecto a varios manantiales, entre ellos se incluyen seis relacionados al Nevado del Ruíz.



En el año 2002 Alfaro, et al. realizaron para INGEOMINAS el Inventario de Fuente Termiales en el parque Nacional Natural Los Nevados basada en información compilada de 100 Manantiales que fueron distribuidos por nueve grupos, el presente informe hace parte del grupo número cuatro que comprende algunos de los diez manantiales localizados al occidente del Nevado del Ruiz (Fig. 4).

Desde el punto de vista del medio biótico, Ingeniería Strycon S.A.S inicia para la CHEC – Grupo EPM el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en el 2016 para el polígono licenciado en su etapa exploratoria realizando su presentación a Corpocaldas en el año 2017.

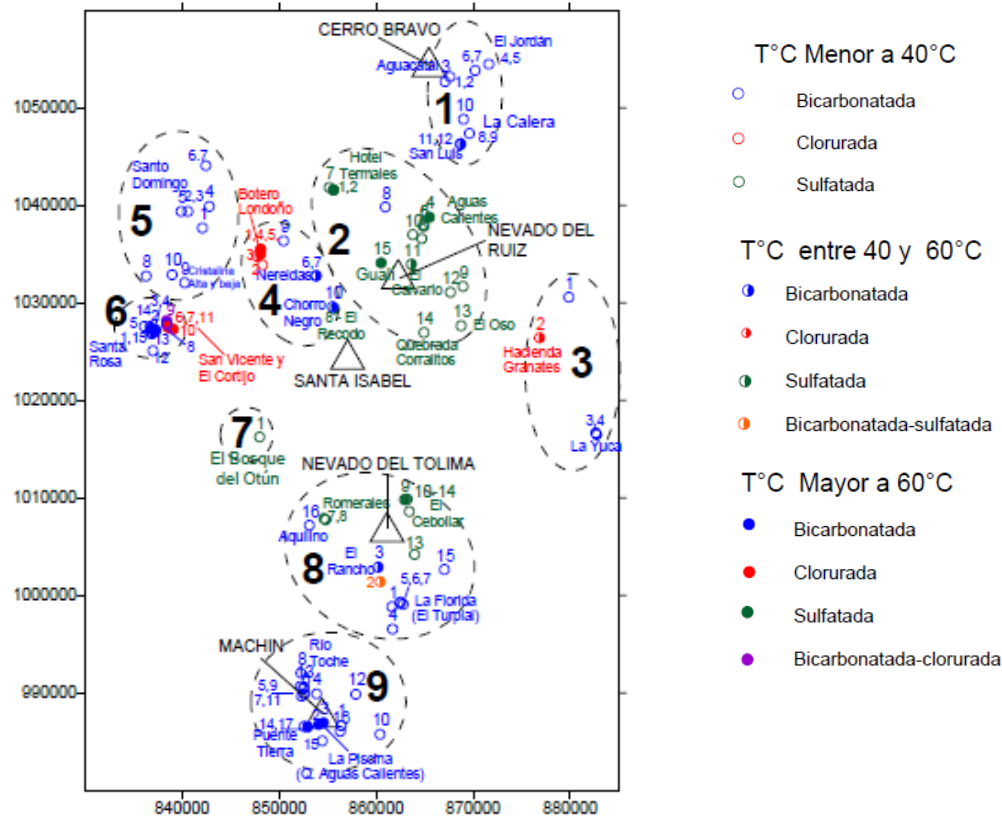


Fig. 4 Localización de manantiales por grupos en la zona del Complejo Volcánico Cerro Bravo- Machín. Tomado de Alfaro et al., 2002.

7. Marco Geológico

7.1 Geología Regional

La margen continental de la placa Suramericana en Colombia experimenta una deformación debido a la colisión con las placas Nazca y Caribe de origen oceánico lo que genera el sistema orogénico de los Andes (Taboada et al., 1998) y a su vez la interacción entre las placas Nazca y suramericana dan paso al vulcanismo producto de la subducción entre éstas lo que ocasiona una sismicidad intermedia (Taboada et al., 2000). El país se encuentra ubicado dentro del cinturón de fuego del pacífico lo que permite que recursos geotérmicos se encuentren dentro de las cadenas montañosas de la cordillera central con manifestaciones termales que hacen parte de las evidencias que indican anomalías geotérmicas en el subsuelo.

La zona de interés se localiza dentro del flanco occidental de la Cordillera Central Colombiana conformada por un basamento de rocas paleozoicas correspondientes al Complejo Cajamarca, lo que Toussaint y Restrepo (1976) definen como Terreno Tahami conformado principalmente de pizarra, filita, esquisto cuarzo-moscovítico, esquisto verde, cuarcita, gneis, granulita, anfibolita y fajas de mármol (Moreno-Sánchez et al., 2008) y por el Complejo Quebradagrande conformado por sedimentitas y vulcanitas de afinidad oceánica, areniscas, lodolitas carbonosas, shales, cherts negros y calizas, asociadas con un segmento volcánico conformado por basaltos y diabasas. (Maya y González, 1995), ambos parcialmente fundidos (Villagómez et al., 2013) por el magmatismo que tuvo lugar en el cretácico-paleógeno (Ordoñez et al., 2001) dando paso a los diferentes intrusivos que se extienden a lo largo de una franja que sigue la orientación de la cordillera representado en este sector por el Batolito del Bosque (Barrero y Vesga, 1976) y el Stock de Manizales (Mosquera, 1978) también denominado

Granodiorita de Manizales (González y Londoño, 2002), Tonalita-



Granodiorita de Manizales (López y Aguirre, 2005) o Stock Tonalítico-Granodiorítico de Manizales (Plazas, 2010).

Estas unidades se encuentran diferencialmente cubiertas por depósitos volcánicos cenozoicos atribuido a los diferentes eventos eruptivos del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (CVNR) que hace parte de la Provincia Volcano Tectónica San Diego – Cerro Machín (PVTSC) (Botero-Gómez et al., 2018) representados por las ignimbritas de Río Claro, y los flujos y depósitos de lava (Aricapa, 2020).

La unidad regional estructural que predomina en el sector hace parte del sistema de Fallas Romeral que corresponde a un conjunto de fallas paralelas a sub-paralelas localmente trezadas (París & Romero, 1994) sutura indicativa de un contacto entre rocas de afinidad continental al este y rocas afinidad oceánica al oeste (Barrero, 1979; Duque- Caro, 1980; Pérez, 1980; Murcia & Cepeda, 1991) localmente reconocida a través de la Falla San Jerónimo en dirección NNE/SSW poniendo en contacto al Complejo Quebradagrande al oeste y al este al Complejo Cajamarca. Para García-Beltrán (2021) el trazo que propone González (2001) para esta falla es cuestionable debido a que “rocas pertenecientes al Complejo Quebradagrande siguen evidenciándose al este del trazo propuesto” (García-Beltrán, 2021).

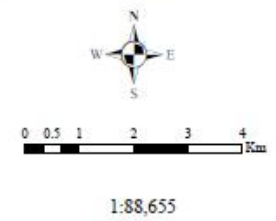
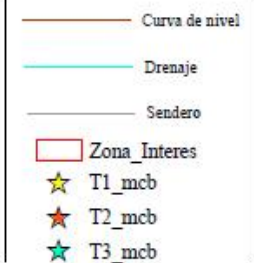
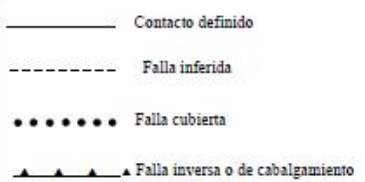
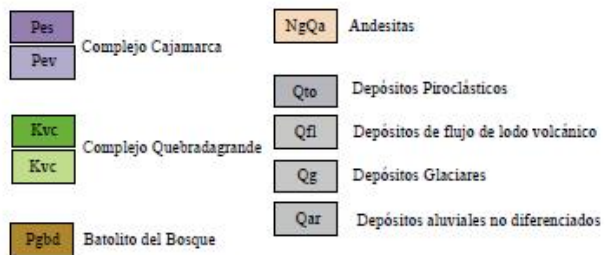
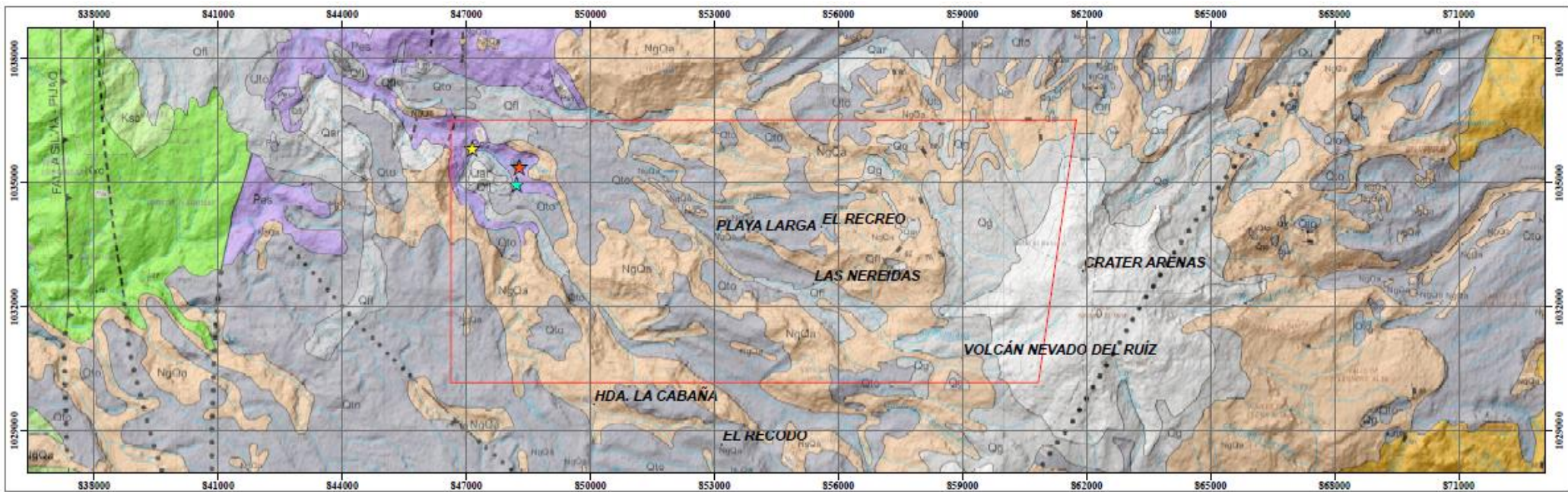


Fig. 5 Mapa de la geología regional. T1,2,3: Termales de estudio. Tomado y modificado de INGEOMINAS 2010, plancha 225 Nevado del Ruiz.

7.2 Geología Local

7.2.1 Complejo Cajamarca (Pev | Pes)

El Complejo Cajamarca definido por Nelson (1957) como la formación más antigua de la Cordillera Central, aflora al este de la falla San Jerónimo y al oeste de la falla Otú-Pericos (Maya & González, 1995) varía ampliamente en su composición ya que son rocas del resultado de varios episodios metamórficos regionales con efectos térmicos y dinámicos sobreimpuestos (González, 2001), muestra una dispersión de edades que varían entre los 345 y 55 Ma indicando eventos metamórficos que ocurrieron en el paleozoico y mesozoico (Maya, 1992).

Esta unidad se puede encontrar sobre la vía de la Ruta El Condor que conduce al Nevado del Ruiz, sobre Río Claro y la Quebrada Nereidas.

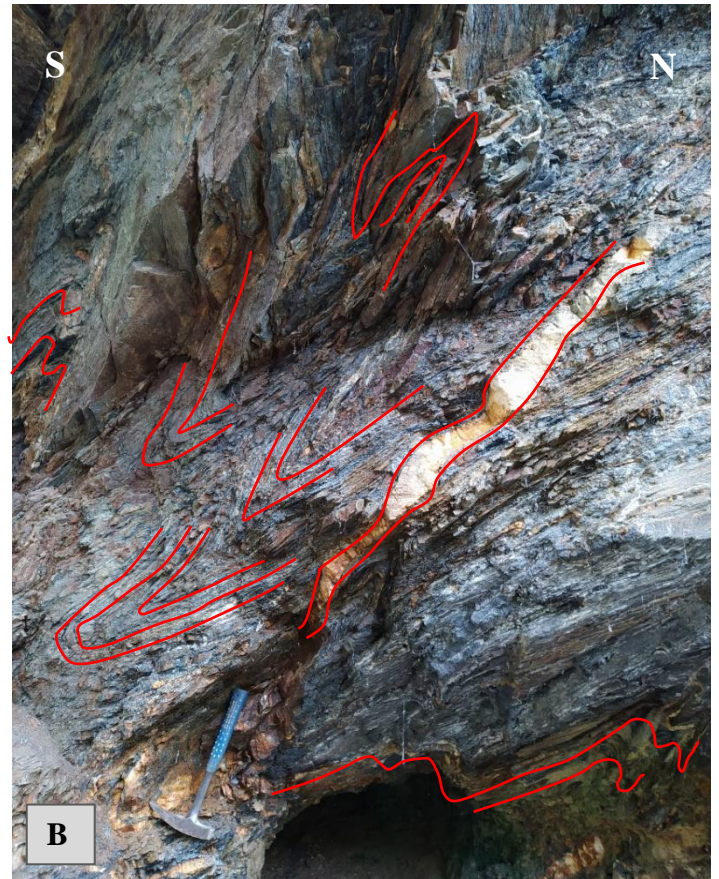
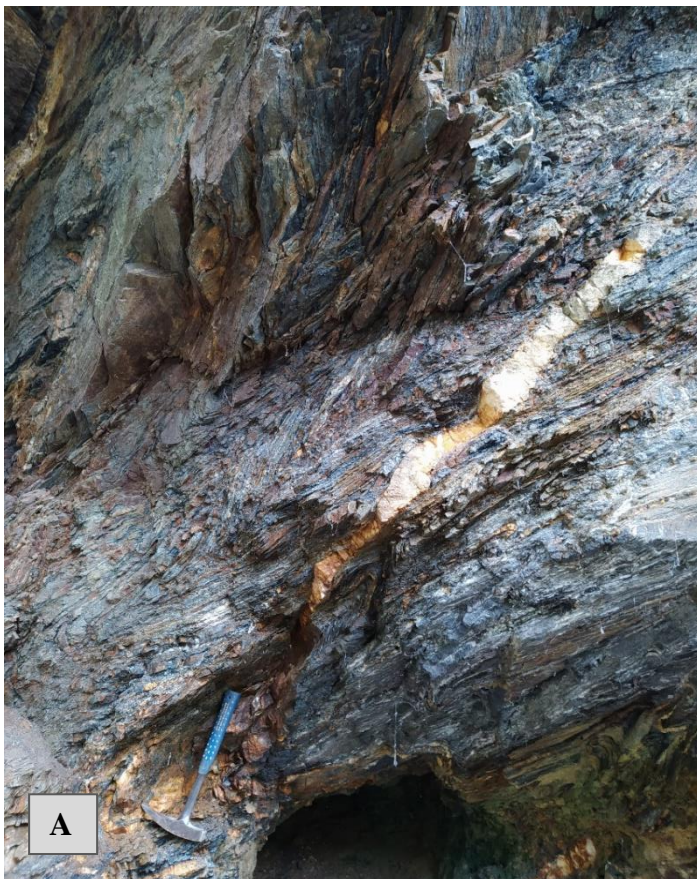


Fig. 6 (A) Afloramiento sobre carretera con baja meteorización altamente deformado, esquisto grafitoso (B) Interpretación de algunas de las estructuras de la Fig. 6A, se puede observar microplegamiento asimétrico en la roca, mientras que hay sectores más caóticos con la roca finamente molida, a eso se le reconoce como partición de la deformación ya que unos sectores afectan más la roca haciendo que ésta se comporte de manera frágil.



Fig. 7 (A) Esquisto grafitoso sobre carretera medianamente meteorizado y altamente fracturado (B) Interpretación de las estructuras de la Fig. 7A, estructura SC en donde se reconoce la estructura S (superficie de foliación) y la superficie C de cizalla principal, este indicador cinemático permite interpretar un movimiento de cizalla normal.

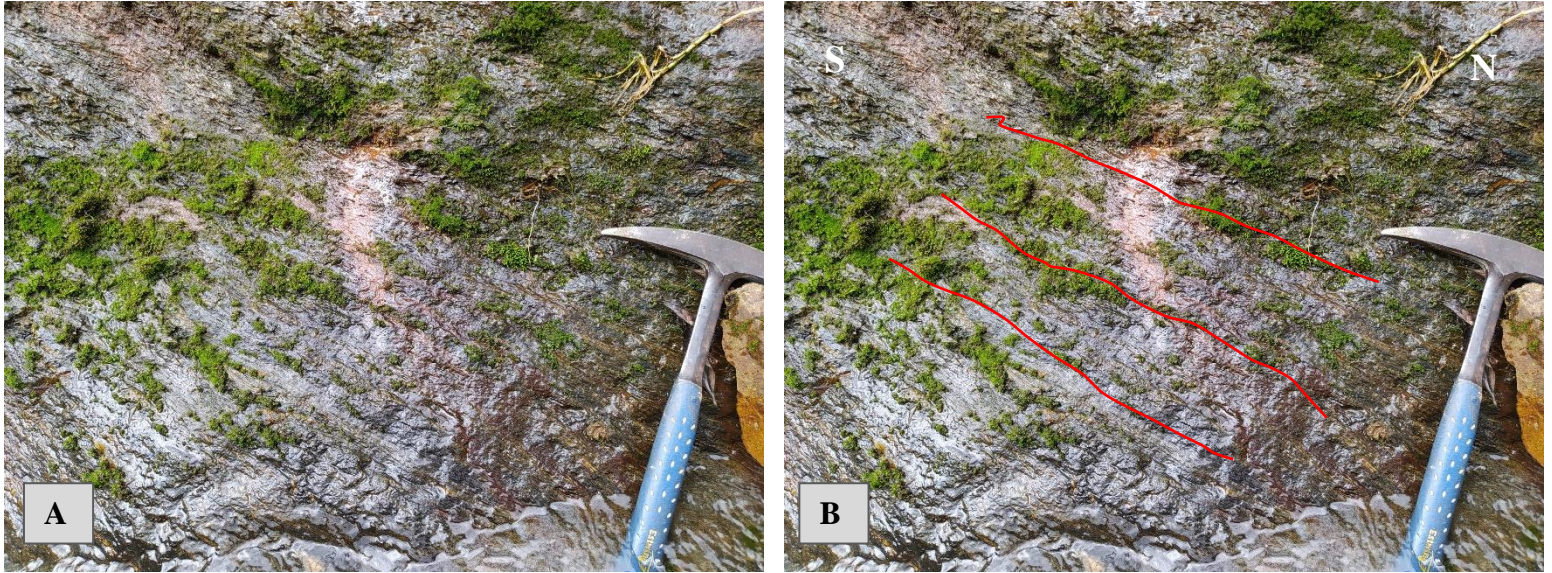


Fig. 8 (A) Afloramiento de esquistos negro grafitoso sobre Río Claro con bajo grado de meteorización (B) representación y dirección de algunas de las venas de cuarzo que se pueden reconocer, en disposición N60E/15SW.

Bajando por la finca La Azufrera, hacia la Quebrada Nereidas, se halla afloramiento medianamente meteorizado y deformado de rocas metamórficas correspondientes al Complejo Cajamarca, en este sector hay presencia de esquistos negro grafitoso, sin embargo, en algunas zonas se manifiestan estructuras propias de gneis en donde se reconocen las bandas claras y oscuras de la roca, con presencia de microplegamiento (Fig.9).

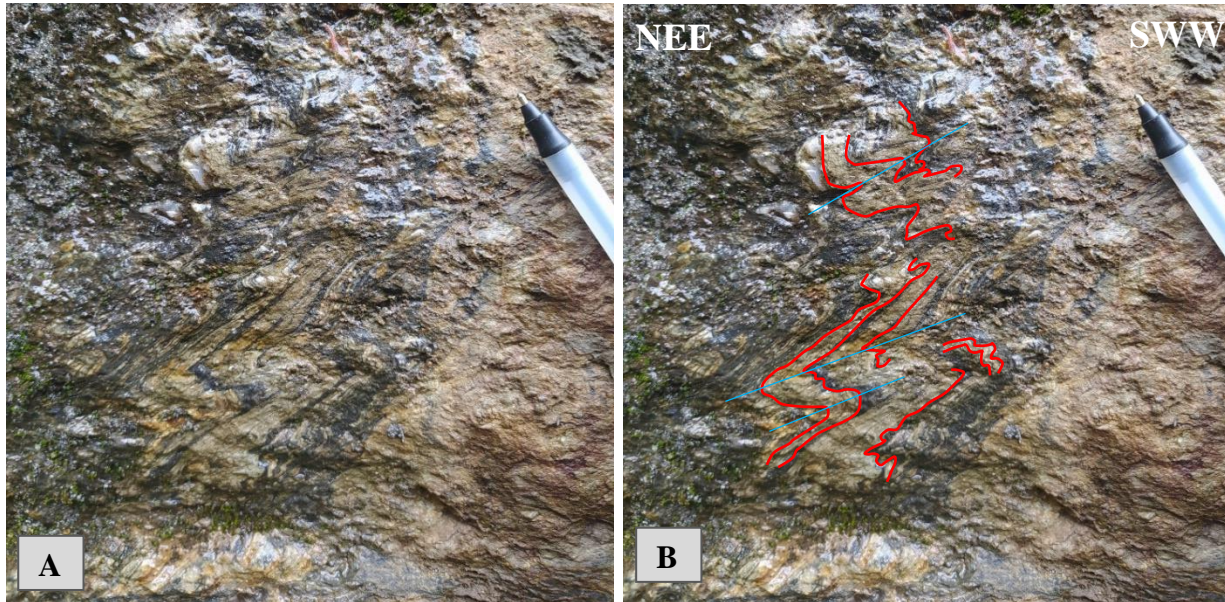


Fig. 9 (A) Gneis del Complejo Cajamarca (B) representación de algunas de las estructuras que se reconocen de la Fig2 (A). Las líneas rojas representan el microplegamiento asimétrico que se generó en la roca, las líneas azules simbolizan el eje principal de los pliegues, las flechas muestran el sentido del movimiento local que dio paso a las estructuras.

7.2.2 Complejo Quebradagrande (Ksc | Kvc)

El Complejo Quebradagrande tuvo distintas nomenclaturas estratigráficas en sitios diferentes; Botero (1963) es el primero que define a esta unidad como Formación Quebradagrande en la zona central de Antioquia sobre el curso de la quebrada Grande (afluente del río Medellín) al sur de la Estrella, González et al. (1977) denomina Formación Valle Alto a las sedimentitas que afloran entre San Félix (Caldas) y la hacienda Valle Alto, Mosquera (1978) lo llama Complejo Metasedimentario Volcánico de Aránzazu-Manizales ubicado al oeste de Manizales, entre otros. En el trabajo de Moreno-Sánchez et al. (2008) se encuentra el compendio de estas nomenclaturas desde la más antigua hasta lo que se conoce hoy como Complejo Quebradagrande.

Nivia et al. (2006) sugieren que este complejo consta de un ensamblaje de rocas metavolcánicas y metasedimentarias, donde las primeras presentan un metamorfismo de facies zeolita, prhenita, pumpellyta y esquistos verdes con protolitos de lavas basálticas a andesíticas y materiales piroclásticos; mientras que las segundas presentan una gran variedad respecto al tamaño de grano desde conglomerados y brechas, con guijos de rocas volcánicas y chert.

Moreno-Sánchez et al. (2008) mencionan que este complejo presenta un carácter bimodal con una afinidad continental en su parte oriental y una volcánica en su parte occidental, aflora entre las franjas metamórficas del Complejo Cajamarca y el Complejo Arquía limitado al oriente por la Falla de San Jerónimo y al occidente por Falla de Silvia-Pijao (Maya & González, 1995).

Basados en la edad del contenido fosilífero y dataciones de U-Pb en zircón anteriormente se consideraba una edad de Cretácico tardío (entre 120 Ma y 97 Ma) (Cochrane et al., 2014b; Villagómez et al., 2011), sin embargo, Zapata et al. (2018) mencionan una edad de 83.2 ± 0.7 Ma determinado en zircones de lavas andesíticas de Quebradagrande.

Estas rocas se encuentran en el sector de Barro Azul como lodolitas negras altamente deformadas debido al paso de la Falla San Jerónimo en ese punto.

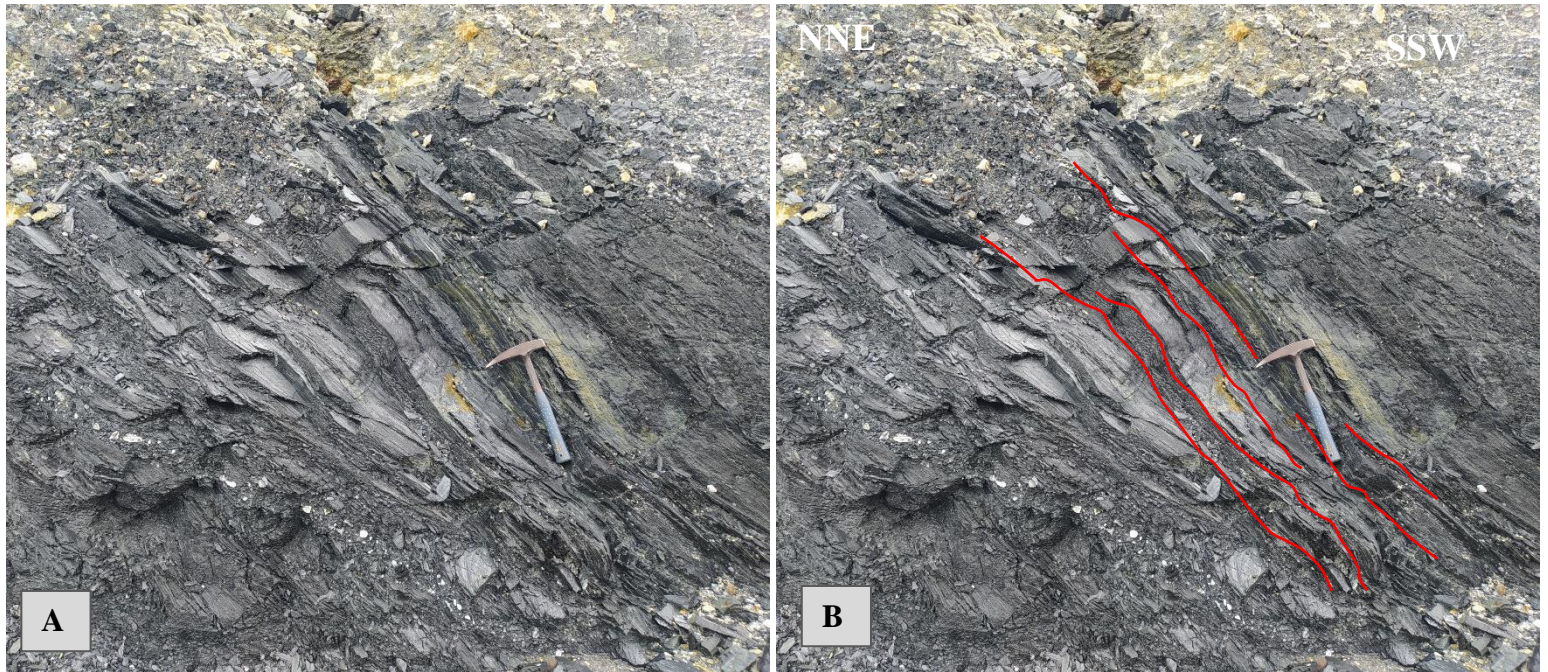


Fig. 10 (A) Afloramiento de lodolitas negras en el sector de Barro Azul (B) representación del plano de fracturamiento de la roca en dirección N16E/50NW.

7.2.3 Depósitos de flujo de lodo volcánico (Qfl)

Los flujos volcánicos de lodo o lahares enmascaran las relaciones entre las rocas dejados por arrastre y retrabajamiento de material volcánico (González, 2001) debido a la actividad volcánica de Cerro Bravo, Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel, El Cisne y Paramillo de Santa Rosa. “Los flujos presentan características litológicas, composicionales, mineralógicas y texturales similares y se diferencian con base en sus características morfológicas, interpretación de las direcciones de flujo y foco de emisión” (Mejía, 2012). Esta unidad hace parte del Ruiz ancestral según Thouret et al. (1990) ó del periodo eruptivo PRE-Ruiz según Martínez et al. (2014).

La edad de este ciclo explosivo va desde el Pleistoceno al Holoceno (Herd, 1974; Thouret, 1984) pero se considera a la mayoría con edades del Holoceno hasta casi actuales (González, 2001).

Estos depósitos de lava se pueden encontrar al borde de carretera en la vía destapada que conduce al pozo N1.

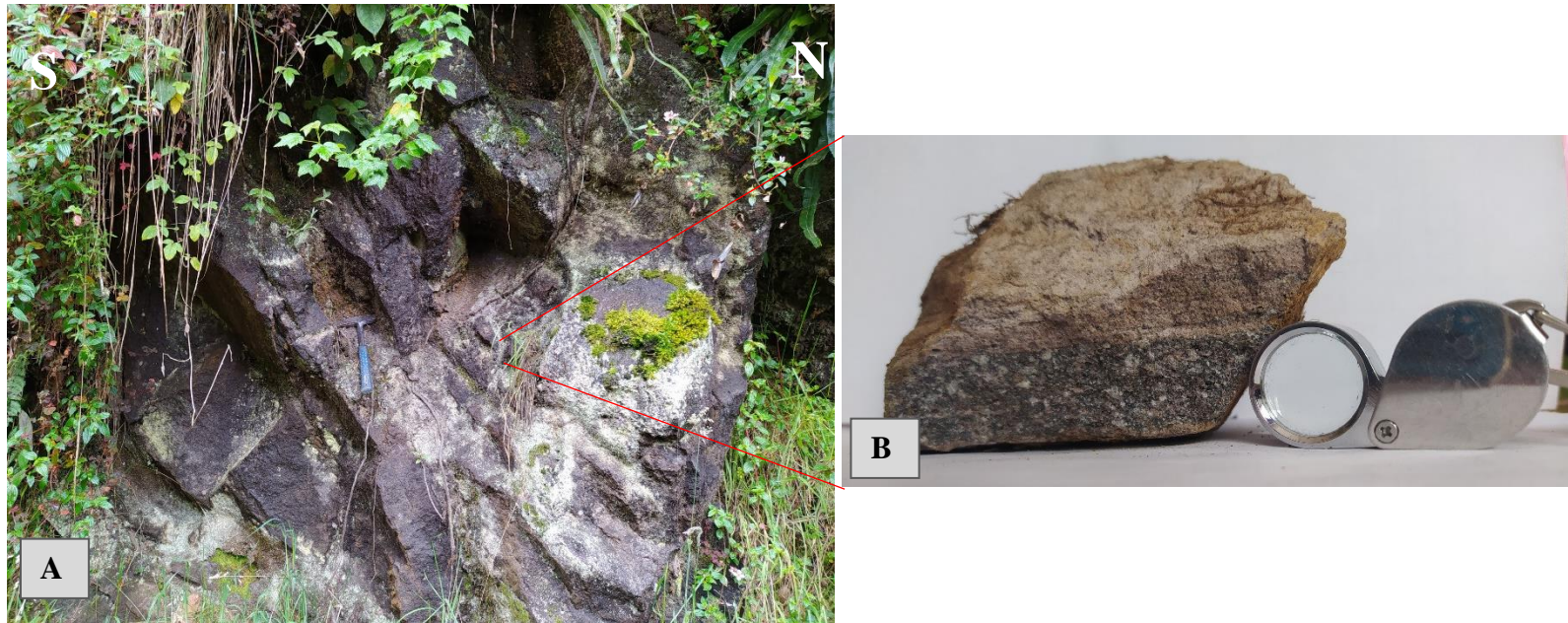


Fig. 11 (A) Lavas altamente compactas con baja meteorización (B) MI: Clasificación de la roca en muestra de mano; textura porfírica hipohialina de grano medio– masa fundamental gris oscuro y rojo (moteado) afanítica con fenocristales de Plag, Qz, Px, con estructura masiva; en la parte superior de la muestra se observa una estructura bandeada vesicular con tamaño de grano fino y una matriz afanítica de color rojo. La muestra se clasifica como Riolita.

Por la vía que conduce hacia la finca Los Alpes, afloramiento a borde de carretera con baja meteorización altamente fracturado, depósito volcanoclástico con fragmentos de roca tamaño bloque, anguloso, mal seleccionado. El afloramiento presenta una tonalidad rojiza en general, pero en la parte superior del mismo el depósito cambia a un color grisáceo oscuro, posiblemente ligado a diferentes eventos eruptivos.



Fig. 12 (A) Depósito volcanoclástico (B) en la parte superior de la figura se realiza el cambio de tonalidad del depósito pues cambia de color rojizo a gris oscuro.

7.2.4 Ignimbritas de Río Claro

Definida por Grand & Handszer (1989) como Ignimbrita de Río Claro – Molinos es una unidad datada por el método de Ar39/Ar340 en plagioclasa por Schaefer (1995) lanzando una edad de 89 ± 7 Ka y que según Borrero et al. (2006) tiene su origen a partir de una erupción freatomagmática, con formas de terrazas que están disectada por el Río Molinos y Río Claro en su mayoría y su presencia llega hasta el cruce entre Río Claro y el Río Chinchiná.

Según INGEOMINAS (1997) es un depósito con variación de facies tanto vertical como horizontalmente que se presenta como una sola unidad de flujo volcánico con disyunción columnar y que en algunos sectores, se asemeja a una lava.



Fig. 13 (A) *Ignimbritas de Río Claro*, vista desde la carretera que conduce a la vereda Papayal (B) se observa la morfología en forma de terraza de esta unidad que está siendo disectada por Río Claro.

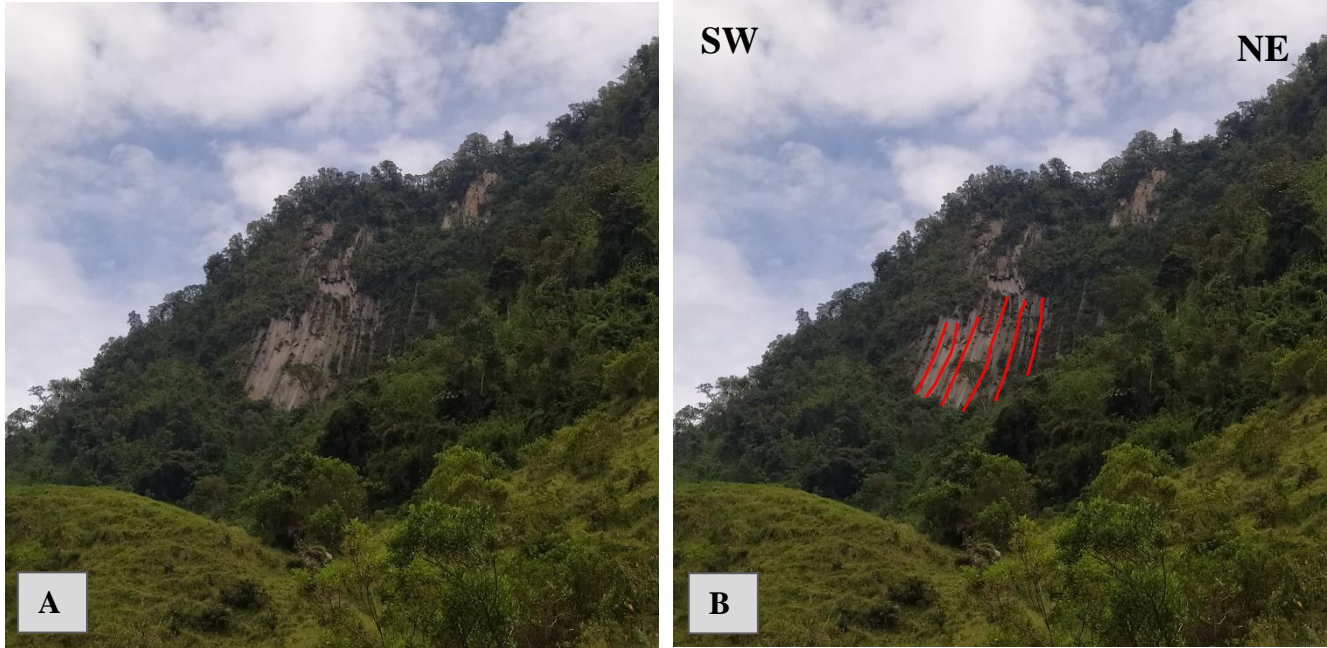


Fig. 14 (A) Depósitos volcánicos con diaclasamiento columnar, vista desde la finca Laguna Alta- Corrales sobre el potrero que lleva a Río Claro (B) representación de las columnas de los depósitos volcánicos del Ruiz.

7.2.5 Lavas Andesíticas (NgQa | Qa)

Estos flujos andesíticos hacen parte de la actividad volcánica que se originan en los centros volcánicos del volcán Cerro Bravo, Santa Isabel, Quindío, Tolima y Ruiz. Los dos periodos de emisión que se destacan son los que ocurrieron en el Mioceno tardío- Plioceno que originan la unidad denominada NgQa caracterizada por presentar una geoforma de prismas hexagonales ligeramente inclinados, el segundo periodo más reciente ocurrió en el Holoceno lo que da paso a la unidad Qa (González, 2001), se caracteriza por la formación de un grupo de domos aislados que, según Martínez et al., (2014) pertenece a la etapa uno de formación del volcán La Olleta.

Sobre la vía que conduce hacia Playa Larga se pueden observar diferentes geoformas características de un ambiente volcánico en la que se reconocen algunas de las estructuras mencionadas.

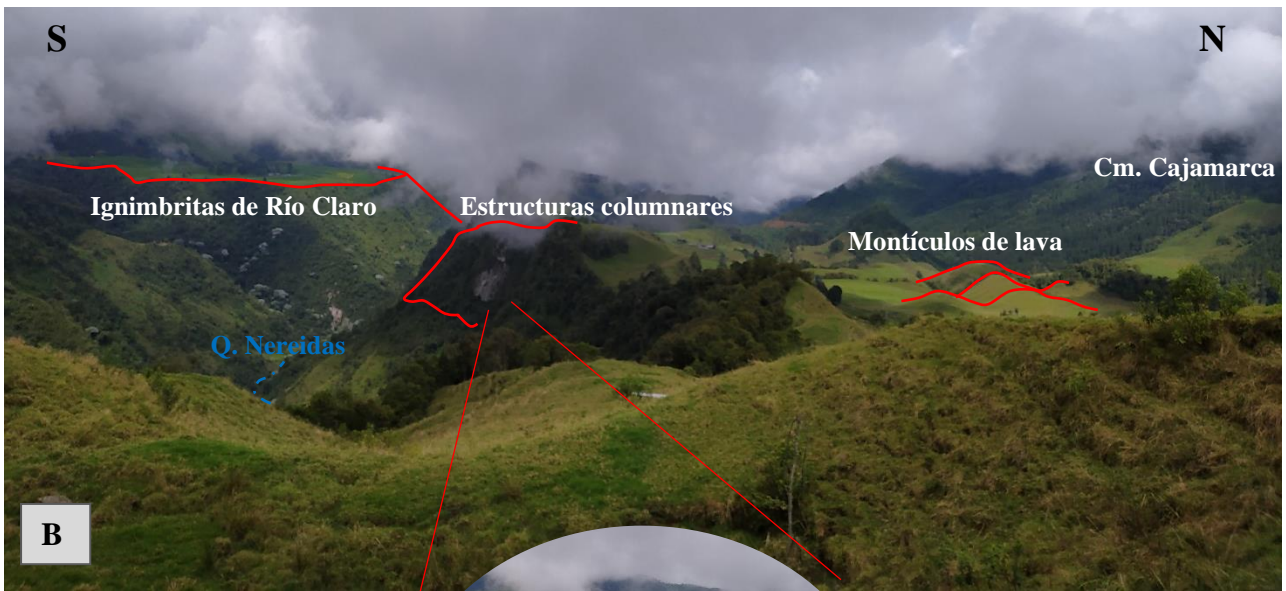


Fig. 15 (A) Paisaje que se puede apreciar desde la carretera que conduce a la finca Playa Larga (B) Algunas de las unidades que pueden reconocerse: Ignimbritas de Río Claro características por presentar depósitos en forma de “mesetas” altas, depósitos volcánicos con diaclasamiento columnar correspondientes a uno de los eventos eruptivos del VNR, los montículos cónicos (humocks) de lava forman otro tipo de depósito volcánico formado a partir de avalanchas por uno de los eventos eruptivos del VNR, hacia el N se presentan montañas con mayor pendiente propio de las rocas metamórficas que hacen parte del Complejo Cajamarca.

7.2.6 Depósitos aluviales y coluviales (Qar)

Según González (2001) son depósitos no consolidados que tienen poco espesor cerca a los cañones de los ríos y quebradas compuestos por bloques y gravas de diferente tamaño y composición que están en una matriz arcillo-arenosa además de que la mayoría de éstos son del Holoceno.

Estos depósitos están distribuidos en el lecho de los cauces visitados como Río Claro, Quebrada Nereidas y El Billar.



Fig. 16 (A) Depósito aluvial de Río Claro no consolidado, matriz soportado, con rocas tamaño grava subredondeadas mal seleccionadas (B) Depósitos aluviales de la quebrada El Billar (La Negra), en contacto con los esquistos del Complejo Cajamarca, en línea roja se ve el contacto entre estas dos unidades; los depósitos aluviales no consolidados, matriz-soportado, mal seleccionados con fragmentos de roca que varían en tamaño

de arena a grava de subredondeados a redondeados; y esquistos negros medianamente meteorizado, aun así la roca conserva su estructura esquistosa.

7.3 Geología Estructural

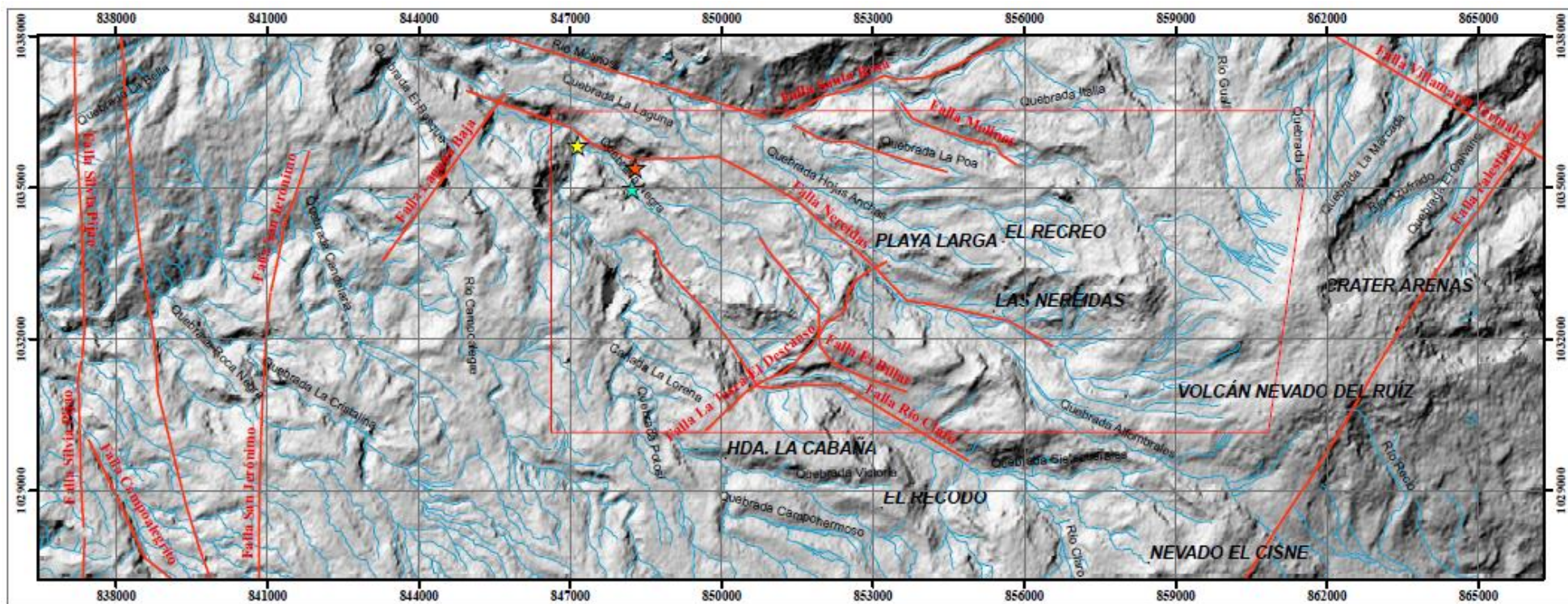
La geología estructural local se caracteriza por presentar un sistema diverso de grupos de fallas que controlan algunas características del relieve y el flujo de las aguas termales hacia superficie. Desde los años 60's hasta los 80's CHEC realiza estudios en los que sugiere que el curso de los ríos y quebradas está controlado por estructuras tectónicas. Por otra parte, Geocónsul (1992) menciona una dirección preferencial NNE-SSW que enmarca al Macizo Volcánico del Nevado del Ruiz (MVNR) representado por el sistema de fallas Romeral, Palestina y Mulato y otras fallas que siguen un patrón NW-SE que son posteriores a las de esta dirección principal. Calvache & Monsalve (1982) mencionan fallas locales con dirección NW como las fallas normales de Río Claro, Río Molinos y Quebrada Negra.

Bohórquez et al. (2005) realizan una cartografía de las fallas de la zona más septentrional de la Cordillera Central y muestran cuál es la relación que existen con el vulcanismo y los sismos mencionando las tres direcciones de estructuras más reconocidas del sector; las primeras asociadas a las fallas de San Jerónimo, Silvia-Pijao, Cauca-Almaguer y Cauca-Patía, el segundo grupo con fallas en dirección NE-SW y el tercer grupo con dirección NW-SE.

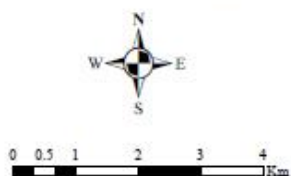
Según Mejía et al. (2012) existen tres sistemas de fallas que se destacan, el primer grupo en dirección N-S a NNE en el que se encuentran las fallas San Jerónimo y Palestina; el segundo grupo en dirección WNW a ENE representado por las fallas Villamaría-Termal, Río Claro, San Eugenio, Campoalegrito, Campoalegre, Nereidas y San Ramón y el tercer grupo en dirección E-W a ENE asociado a la Falla Santa Rosa.

Hincapie-Jaramillo (2013, 2014) expone también tres sistemas de fallas con dirección NW-SE que comprende las fallas Nereidas, Río Claro y Molinos; sistema transcurrente sinistral con algún componente vertical, mencionando que la curvatura que se presenta en la falla Nereidas controla los flujos hidrotermales en el sector de las fincas El Termal y La Quinta; el segundo sistema de fallas en dirección NE-SW que encierran a las fallas La Telaraña y Santa Rosa y pasa por la finca La Quinta y por último el sistema de fallas con dirección N-S hace referencia a las fallas Laguna Baja, La Tosca-El Descanso.

Ceballos (2017) habla de las formas estructurales que se forman a partir de la intersección entre las fallas Río Claro y el Billar generando un graben, y un horts con la intersección entre la falla El Billar y La Negra.



- Fallas
- Drenaje
- ★ T1_mcb
- ★ T2_mcb
- ★ T3_mcb
- Zona Interés



1:88,730

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

Projection: Transverse_Mercator
 False_Easting: 1000000.0
 False_Northing: 1000000.0
 Central_Meridian: -74.07750791666666
 Scale_Factor: 1.0
 Latitude_Of_Origin: 4.596200416666666
 Linear_Unit: Meter (1.0)



Fig. 17 Mapa de geología estructural. T1,2,3: Termales de estudio. Base cartográfica tomada del IGAC plancha 225.

8. Hidrogeología

“La hidrología es la ciencia que se enfoca en el análisis, propiedades, distribución, circulación e influencia sobre el ambiente de los cuerpos de agua que fluyen en la superficie del terreno” (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017).

“La hidrogeología o hidrología subterránea es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, sus formas de yacimiento, difusión, movimiento, régimen y reservas, interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación” (Mijailov, 1989).

Uno de los pasos para realizar un modelo hidrogeológico de una cuenca es conocer cómo es la dinámica del ciclo hidrológico dentro de ella, con el objetivo de estudiar el componente de recarga y vincularlo con el fenómeno de la circulación. De modo que este trabajo representa una de las primeras fases que se deben realizar para acercarse a la construcción del modelo hidrológico de la subcuenca de Río Claro.

Se tomó así, un área que involucra cuerpos de agua que encierran las microcuencas Río Molinos, Hojas Anchas, Las Nereidas y parte de Aferentes Río Claro; pertenecientes a la subcuenca Río Claro de la cuenca de Chinchiná (Tabla. 1). Según el POMCA del Río Chinchiná (2013), la cuenca tiene jurisdicción en los municipios de Manizales, Chinchiná, Villamaría, Neira y Palestina (Fig. 18) con una extensión de 1052.25 Km^2 que fluye en dirección Este- Oeste en donde la mayoría de los drenajes de la cuenca corren en dirección Norte-Sur, controlados principalmente por fallas geológicas que se encuentran en esta dirección.

CUENCA	SUBCUENCA	MICROCUENCAS
R í o C h i n c h i n á	Río Guacaica	Río Blanco y las quebradas Olivares, Moravia, El Crucero, Negra, Las Ánimas, Cajones, San Narciso, El Gus, Mina rica, San Juan, San Andrés, San Pedro, San Pablo, El Cofre, Farallones, Los Alpes, La Matilda, Dantas y los aferentes directos al río Guacaica.
	Río Chinchiná	Aferentes directos y las quebradas Carminales, los Lobos, Cartagena, El Purgatorio, Manzanares, El Rosario, Cameguadua, Los Cuervos, San Juan o San Julián, San Miguel, El Arroyo, La Floresta, La Diana, El Chiflón, Marmato, Versalles, Palogrande, Camelia, 2515-002-091, La Monina, El Molino, El Perro, Manizales, Chupaderos, Palmichal, La María o Tolda Fría, La Oliva, La Rochela, La Zulia, El Diamante, La Siberia, La Negra.
	Río Claro	Molinos y las quebradas Santo Domingo, La Bella, Las Nereidas, Juntas y los aferentes directos al Rioclaro.

Tabla. 1 Cuenca, subcuencas y microcuencas del Río Chinchiná. Información tomada de POMCA Río Chinchiná (2013).

Según el IGAC (2008) existen levantamientos de suelo divididos en consociación, asociación y complejos; el primero hace referencia a un solo suelo, el segundo se forma por dos o más suelos en diferentes proporciones y los complejos son suelos que tienen mayor distribución de diferentes suelos.

En la Fig. 19 se pueden observar las diferentes unidades geológicas superficiales (UGS) que hay en polígono licenciado por CHEC - Grupo EPM. Las unidades CA corresponden a morrenas con relieve que van de ondulado a quebrado y escarpado, y que ha sido suavizado por la acumulación de ceniza volcánica, estos se representan por suelos del conjunto consociación Cabañas. Los suelos Sld y Sle corresponden a flujos piroclásticos, Slf1 son domos volcánicos y SRg son laderas y domos volcánicos; estas unidades presentan un relieve suavizado con capas espesas de ceniza que van de ligeramente ondulado a fuertemente quebrado y escarpado, todos estos hacen parte del conjunto consociación Santa Isabel (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017).

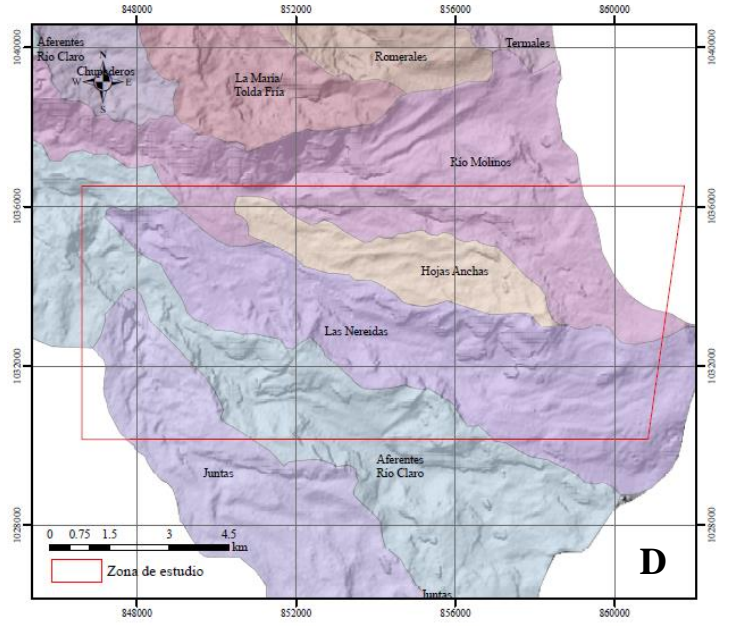
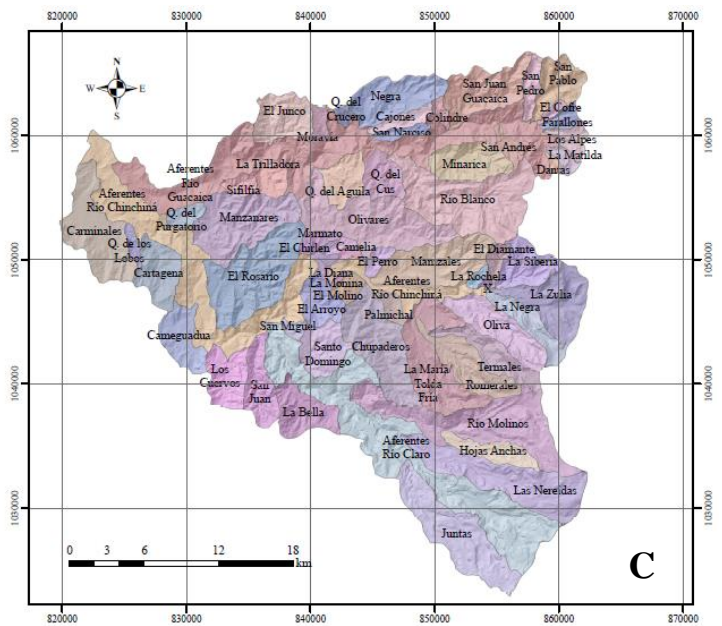
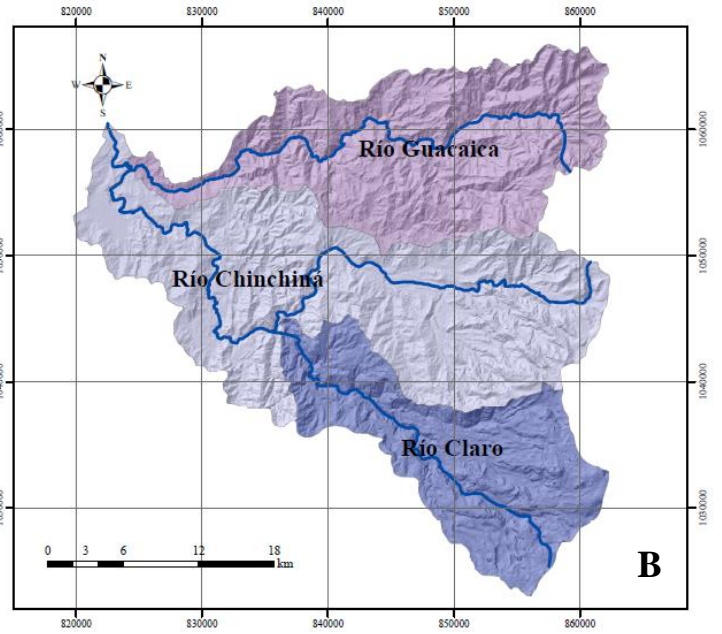
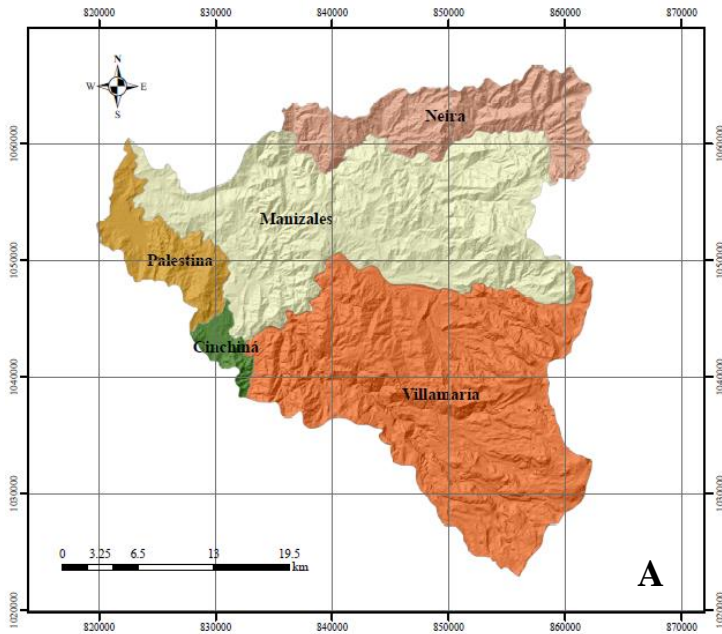


Fig. 18 (A) Municipios que tienen jurisdicción en la cuenca del Río Chinchiná, (B) subcuencas del Río Chinchiná, (C) microcuencas del Río Chinchiná, (D) microcuencas que comprende la zona de estudio. Tomado y modificado del POMCA Río Chinchiná, 2013.

Según la distribución de las UGS realizada por Ingeniería Strycon S.A.S (2017), el muestreo de las aguas de este trabajo se realizó en las áreas de influencia de

las unidades Sle y SRg en una época de transición que va de temporada húmeda a seca en los meses de mayo y junio. Sle es un tipo de suelo superficial que se caracteriza en la zona, por presentar un relieve fuertemente quebrado con material parental de ceniza volcánica, limitado por la presencia de roca en el perfil, su textura varía de limosa, franco arcillosa, franco arenosa, limo arenosa con poca presencia de poros finos. La unidad SRg por su parte, corresponde a suelos de fuertes pendientes y muchos afloramientos rocosos cubiertos por vegetación arbustiva y arbórea, su textura va de limo arenosa a arenosa con rocas sin estructura (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017).

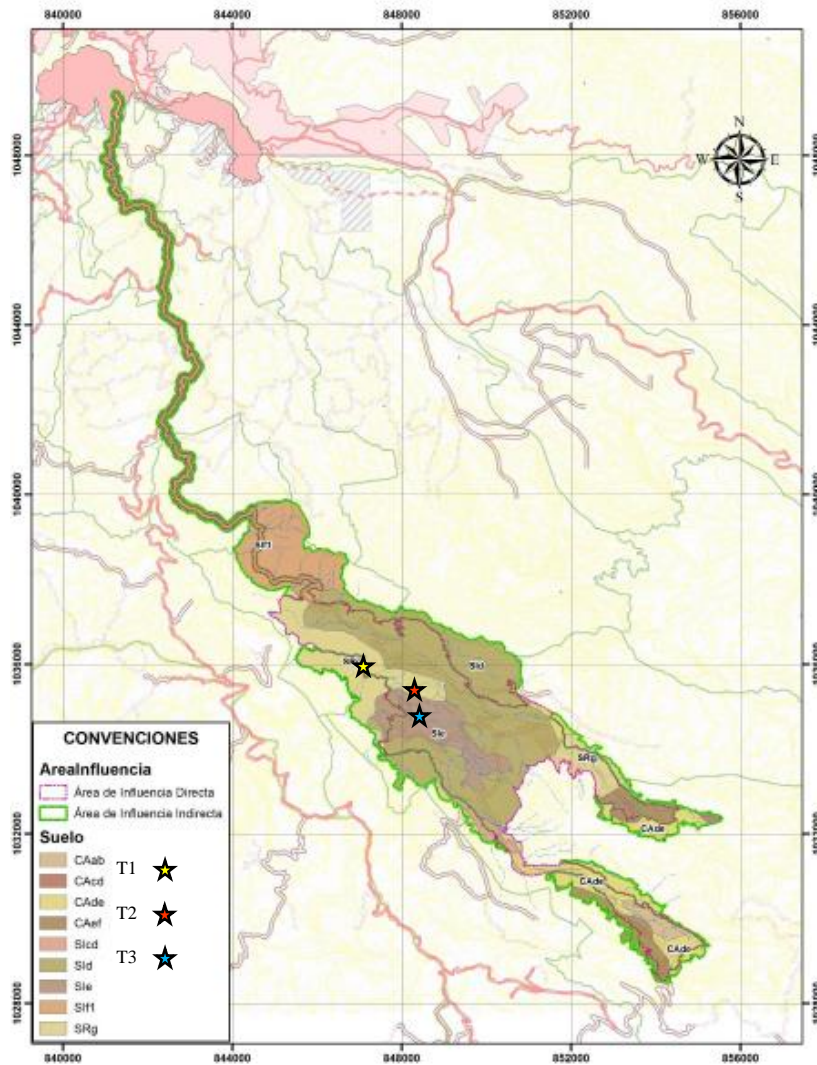


Fig. 19 Distribución espacial de las Unidades geológicas superficiales en el área de influencia del EIA del proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz, las estrellas representan los puntos termales de interés de este estudio. Tomado y modificado de Ingeniería Strycon S.A.S, 2017.

La roca basamento que predomina en el área muestreada, corresponde a esquistos grafiticos del Complejo Cajamarca en intercalación con gneises de esta misma unidad específicamente en el sector Botero Londoño. Según estudios elaborados por Contecol (1983), los esquistos grafitosos presentan una permeabilidad primaria que va de muy baja a nula, pero que por factores de meteorización y fracturación, se genera permeabilidad secundaria; la generada a partir de fracturamiento es en conjunto, una permeabilidad anisotrópica debido a las diferencias composicionales de la roca, en cuanto a la permeabilidad que surge a partir de la meteorización, se genera en rocas parcialmente descompuestas por debajo de los horizontes arcillosos. Es de destacar que esta descripción que realiza Contecol (1983) es desde de un punto de vista cualitativo pues no presenta estudios detallados de laboratorio que especifiquen esta descripción. Según diferentes autores, el Complejo Cajamarca presenta una porosidad secundaria generado por el diaclasamiento en la zona (POMCA Chinchiná,2013; Rodríguez, 2013; Vélez et al., 2018), García- Beltrán (2021) por su parte, realiza un estudio estructural en el que analiza familias de diaclasas conjugadas en esta unidad, donde sugiere que las diaclasas se generaron en un sistema extensional, realizando la aclaración de que se precisa de información más detallada que corrobore esta hipótesis.

El régimen hidrológico de un afluente permite identificar el comportamiento de los caudales en un periodo de tiempo determinado, para este estudio se tomó dos estaciones hidrológicas para evaluar el régimen hidrológico de la Quebrada Nereidas y el Río Molinos con

las estaciones La Bodega (4°54'N 75°25'W) y Montenegro (4°56'00.7''N 75°25'02.1''W) respectivamente (Fig. 20).

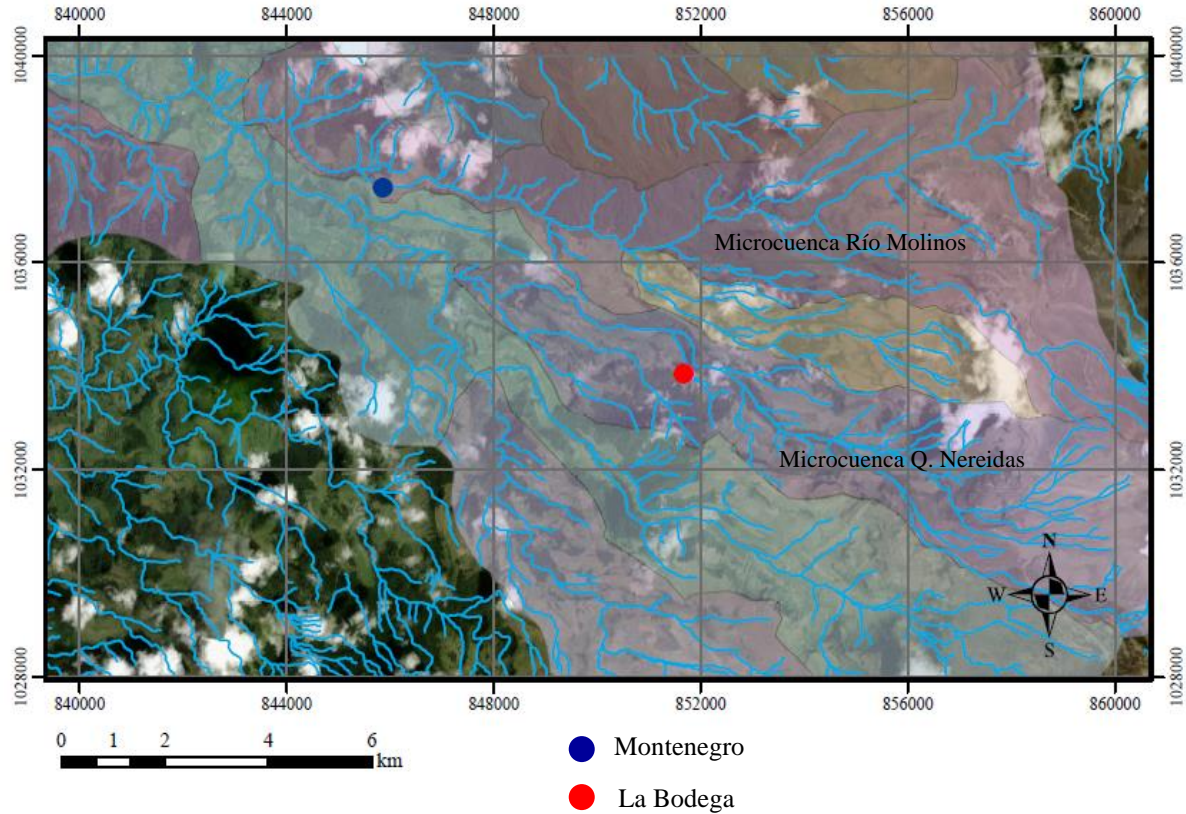


Fig. 20 Estaciones hidrológicas de las microcuencas de la Quebrada Nereidas y el Río Molinos.

8.2 Quebrada Nereidas

La Q. Nereidas nace en los arenales del Nevado del Ruiz sobre la vereda El Páramo a una altura de 4800 msnm desembocando directamente hacia Río Claro. A lo largo de su recorrido cuenta con una cobertura vegetal que cambia debido a los pisos térmicos que hay en el sector.

Cuenta con un lecho rocoso (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017), en la zona que se conecta con Río

Claro hay transporte de sedimentos debido al color del agua, en el sector de

la finca La Azufrera, el lecho rocoso se caracteriza por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca.

La estación La Bodega de la Chec, presenta registros de descarga de la Quebrada Nereidas. Para este estudio, se tomó el análisis de corriente desde el año 2011 al 2020, exceptuando el año 2018 en el que no se encuentran registros de caudal, complementando con los valores de descarga del Río Molinos de la estación Montenegro, realizando una interpolación con el porcentaje de ocurrencia de su caudal. De esta manera, el comportamiento de caudal medio de la Q. Nereidas se presenta en la Fig. 21, en la que se observa un comportamiento bimodal, es decir que existen dos periodos en el año donde el caudal aumenta y está directamente relacionado con el fenómeno de las precipitaciones.

De esta manera, se presentan dos periodos de caudal alto, uno entre los meses de abril y mayo, con caudales medios de 0.734 m³/s y 0.746 m³/s respectivamente, y en el mes de noviembre con un caudal medio de 0.794 m³/s. Por su parte, el mes de agosto presenta uno de los caudales medios más bajos con 0.569 m³/s (Tabla. 2).

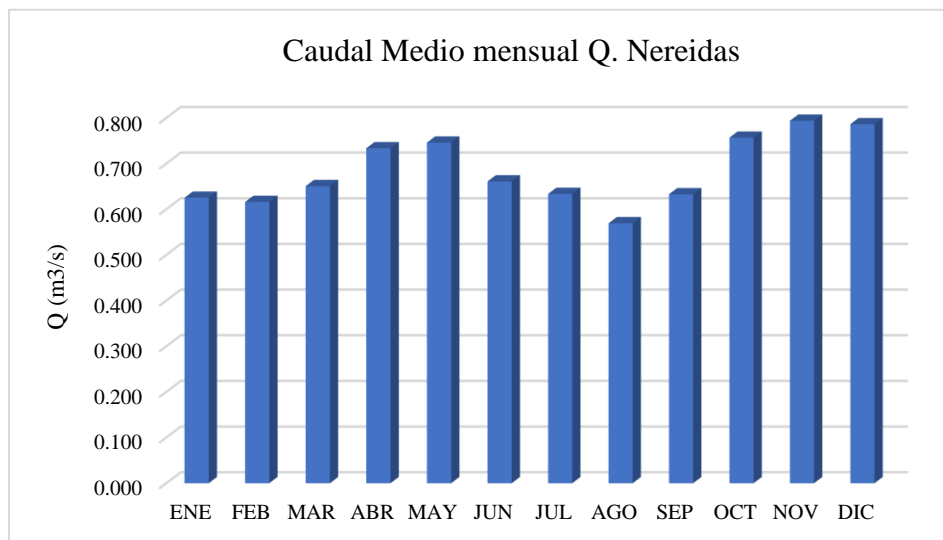


Fig. 21 Régimen hidrológico de la Quebrada Nereidas.

Con los datos obtenidos se elaboró un hidrograma de caudal para un periodo de ocho años (Fig. 22), donde se observan picos de caudal que se originan en los periodos de mayor precipitación, y donde se presenta escorrentía directa o flujo rápido. El área bajo el hidrograma representa la capacidad que tiene la cuenca para transportar agua.

	Caudal medio mensual estación La Bodega									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2020	
ENE	0.904	0.700	0.596	0.572	0.624	0.404	0.560	0.682	0.584	
FEB	0.980	0.640	0.852	0.596	0.436	0.364	0.432	0.723	0.520	
MAR	0.920	0.684	0.704	0.720	0.464	0.412	0.528	0.727	0.696	
ABR	0.995	0.788	0.728	0.680	0.680	0.448	0.648	0.819	0.816	
MAY	1.112	0.597	0.872	0.708	0.640	0.536	0.668	0.769	0.810	
JUN	0.737	0.664	0.640	0.688	0.684	0.588	0.535	0.717	0.694	
JUL	0.760	0.668	0.760	0.588	0.348	0.660	0.576	0.682	0.660	
AGO	0.800	0.680	0.844	0.404	0.356	0.488	0.427	0.588	0.536	
SEP	0.852	0.792	0.960	0.428	0.420	0.484	0.508	0.642	0.608	
OCT	0.943	0.836	1.056	0.732	0.524	0.644	0.596	0.792	0.688	
NOV	0.998	0.824	1.104	0.816	0.768	0.524	0.499	0.827	0.784	
DIC	1.096	0.848	1.008	0.808	0.528	0.508	0.716	0.807	0.756	

Tabla. 2 Caudal medio mensual de la estación La Bodega.

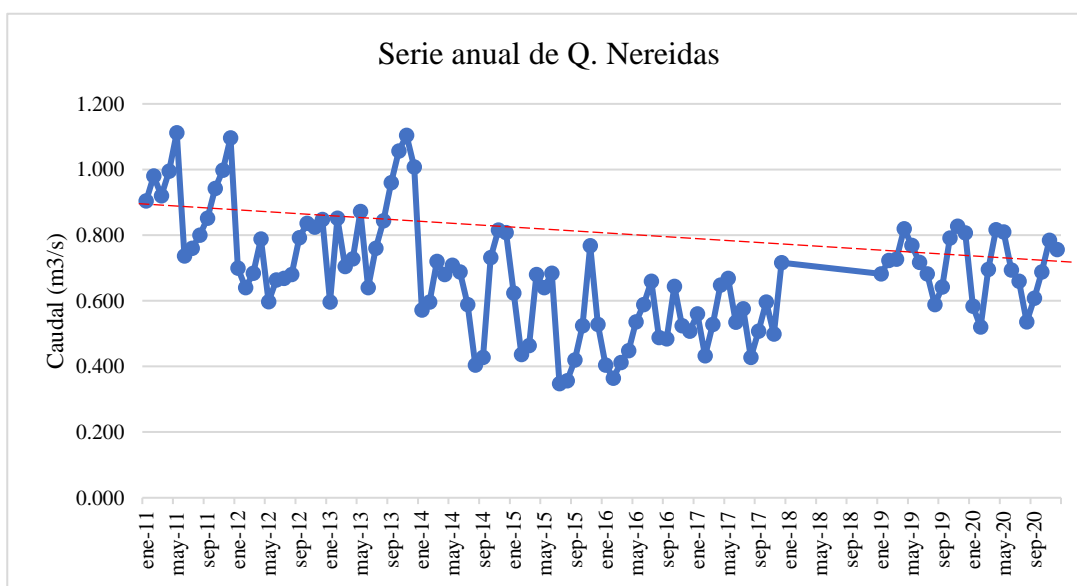


Fig. 22 *Hidrograma anual de caudales medios de la Quebrada Nereidas.*

En el hidrograma se identifica una tendencia de disminución del caudal, asociado posiblemente a captaciones de agua que se estén realizando agua arriba de la estación, al uso de suelo que se esté implementando en el área y que puede ocasionar una disminución de caudal de la cuenca con el tiempo.



Fig. 23 (A) *Quebrada Nereidas antes de la intersección con Río Claro en el sector de Playa Alta*
(B) *Quebrada Nereidas antes de su interacción con manantiales del sector La Azufrera.*

Se realizaron dos puntos de aforo para la Q. Nereidas, uno de ellos accediendo por la finca Playa Alta- Corrales antes de su intersección Río Claro, el segundo, antes de llegar la finca de La Azufrera, antes y después de su interacción con las aguas termales del sector Botero Londoño (T2). En la Tabla. 3 se muestran los parámetros físicos que se tomaron con la sonda HANNA y el dato de caudal registrado en cada uno de los puntos.

	Q. Nereidas PA	Q. Nereidas LA antes T2	Q. Nereidas LA + T2
Caudal M3/seg	1.289	1.675	0.4
Temp °C	18.1	12.23	16.8
Conduc	458	308.00	398
TDS ppm	229	154.00	186

Tabla. 3 Parámetros físicos de la Quebrada Nereidas en el sector de Playa Alta y La Azufrera.

8.1.1 Climograma de la microcuenca de la Quebrada Nereidas.

Este climograma fue evaluado únicamente para la cuenca de la Q. Nereidas en un periodo de cuatro años (2016-2020), con la estación Q. Nereidas-Chec y La Bodega, con el objetivo de observar las relaciones que existen entre estos parámetros climatológicos. En la Fig. 24 se puede observar la tendencia de la temperatura con respecto a la precipitación, principalmente en los meses de mayor precipitación hay menor temperatura, es decir en octubre y noviembre, mientras que las mayores temperaturas se presentan en el primer periodo semestral.

El comportamiento del caudal con respecto a la precipitación está muy relacionado, puesto que el sistema de recarga de una cuenca son las lluvias. En la Fig. 25 se puede ver que en el mes de agosto las precipitaciones y el caudal en la cuenca son mínimos, mientras que los periodos de máxima precipitación coinciden con los de máximo caudal.

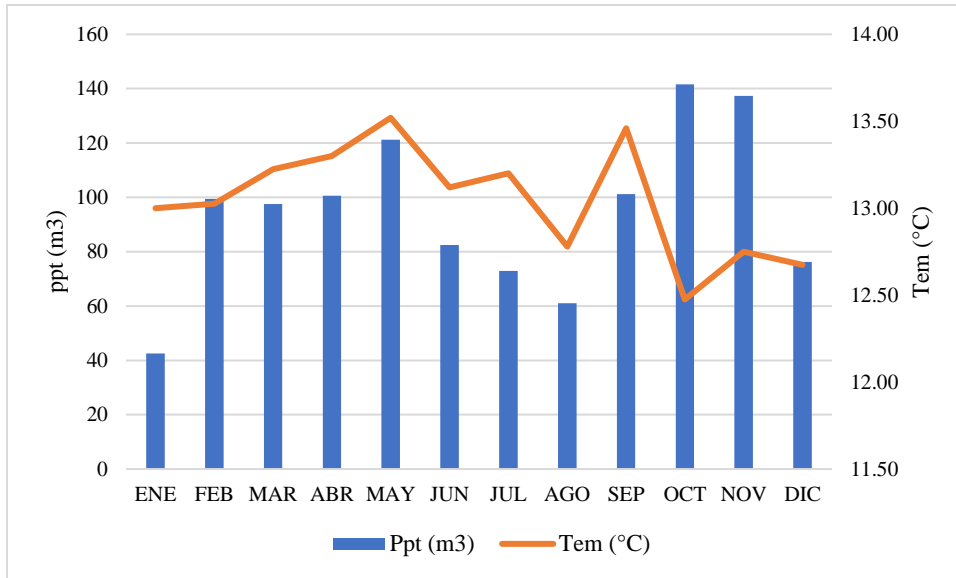


Fig. 24 *Climograma de precipitación y temperatura de la cuenca de la Quebrada Nereidas.*

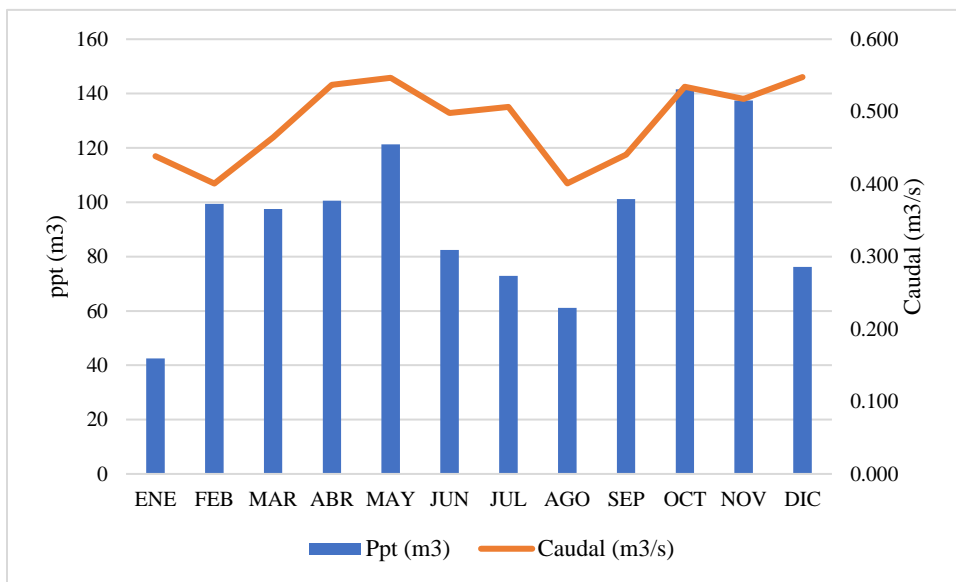


Fig. 25 *Relación entre precipitación y caudal de la cuenca de la Quebrada Nereidas.*

8.2 Río Molinos

El Río Molinos nace en el glaciar del VNR desembocando en Río Claro, cerca de la vereda Laguna Alta (Chamorro et al., 2015). Cuenta con una baja cobertura vegetal y en algunos sectores se desarrollan actividades pecuarias, y un lecho rocoso que arrastra rocas de hasta 15 cm de diámetro (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017).

La estación Montenegro de Chec proporciona datos de caudal del Río Molinos, de igual manera que con la Q. Nereidas. Se tomaron registros de los años 2011-2020, excluyendo el año 2018 que no cuenta con registros. En la Fig. 26 se identifica un comportamiento bimodal con periodos de caudal medio alto en los meses de mayo y noviembre de 2.214 m³/s y 2.420 m³/s respectivamente, el caudal medio mínimo se presenta en el mes de agosto de 1.688 m³/s (Tabla. 4).

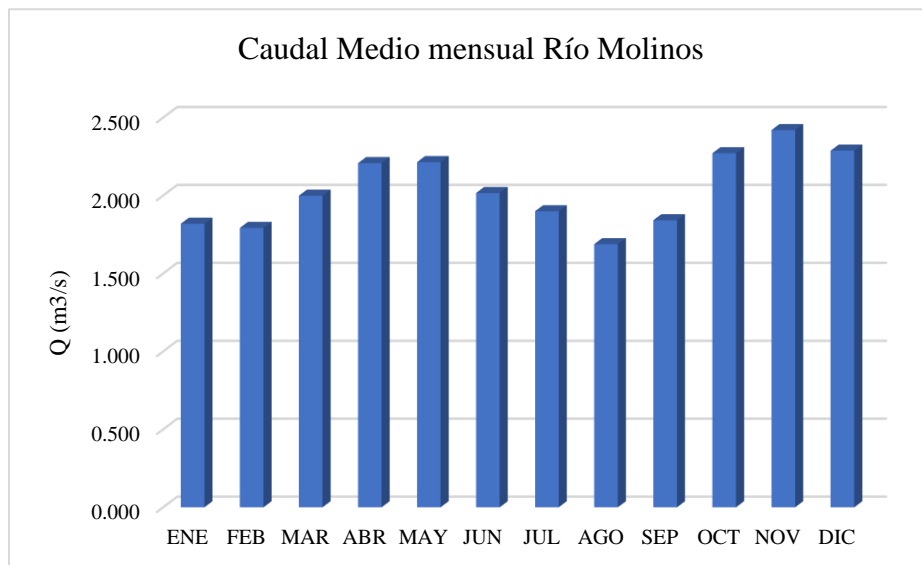


Fig. 26 Régimen hidrológico del Río Molinos.

	Caudal medio mensual estación Montenegro								
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2020
ENE	2.6312	2.0374	1.7347	1.6649	1.8162	1.1759	1.63	1.9859	1.6998
FEB	2.8524	1.8628	2.4799	1.7347	1.269	1.0595	1.2574	2.1051	1.5135
MAR	3.2832	1.9909	2.0491	2.0957	1.3505	1.1992	1.8861	2.1149	2.0258
ABR	3.551	2.2936	2.1189	1.9792	1.9792	1.304	1.8861	2.3841	2.3761
MAY	3.2366	2.1306	2.5381	2.0607	1.8628	1.5601	1.9443	2.2381	2.3573
JUN	2.6312	1.9327	1.8628	2.0025	1.9909	1.7114	1.9094	2.0876	2.0197
JUL	2.7127	1.9443	2.2121	1.7114	1.0129	1.921	1.6765	1.9848	1.9203
AGO	2.3285	1.9792	2.4566	1.1759	1.0362	1.4204	1.5252	1.7114	1.5601
SEP	2.4799	2.3052	2.7942	1.2457	1.2225	1.4087	1.4786	1.8686	1.7697
OCT	3.3647	2.4333	3.0736	2.1306	1.5252	1.8744	1.7347	2.3038	2.0025
NOV	3.5626	2.3984	3.2133	2.3751	2.2354	1.5252	1.7813	2.4071	2.2819
DIC	3.19	2.4682	2.9339	2.3518	1.5368	1.4786	2.084	2.3489	2.2004

Tabla. 4 Caudal medio mensual de la estación Montenegro.

El hidrograma de caudal del Río Molinos recoge datos de ocho años (2011-2020), en la Fig. 27 se identifican picos de caudal máximo en meses en los que la precipitación fue alta y donde se presenta escorrentía directa o flujo rápido. El área bajo el hidrograma representa la capacidad que tiene la cuenca para transportar agua.

De igual manera que con la Q. Nereidas, en el hidrograma del Río Molinos, se identifica una tendencia de disminución del caudal, asociado posiblemente a la disminución de la capa de hielo del nevado del Ruiz y a captaciones de agua que se estén realizando agua arriba de la estación, que ocasionan una disminución de caudal de la cuenca con el tiempo.

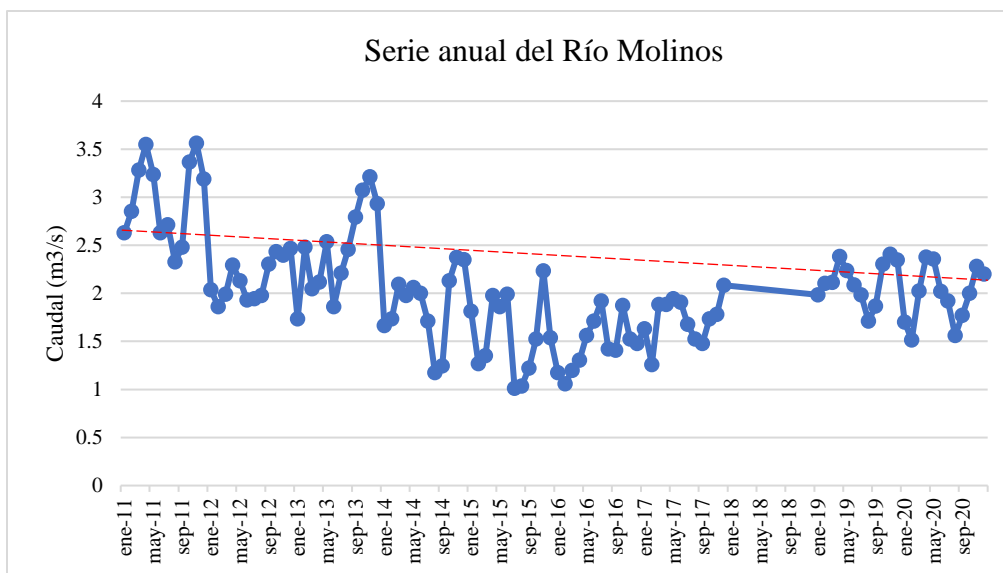


Fig. 27 Hidrograma anual de caudales medios del Río Molinos.

El Río Molinos no fue aforado ya que no hay presencia de aguas termales que interactúen con este cauce, pero se incluye en este estudio ya que hace parte de la subcuenca de Río Claro.

En general, el régimen hidrológico para estos dos afluentes muestra una tendencia a disminución de caudal a lo largo de estos ocho años, sin embargo, es relevante anotar que se precisa de una data más representativa en términos de periodo de tiempo para analizar si este comportamiento ha perdurado desde años anteriores.

8.3 Río Claro

Este río principal nace entre el VNR y el Nevado del Cisne, drena directamente sobre el Río Chinchiná en el sector de Montevideo (Chamorro et al., 2015). La cobertura vegetal es de tipo Andino y permanece sobre la parte alta y media de la cuenca ya que no está tan intervenida

por actividad antrópica, su lecho es de tipo rocoso (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017) y en la zona visitada corresponde a rocas metamórficas del Complejo Cajamarca.

El régimen hídrico de Río Claro no fue evaluado ya que la falta de información genera saltos en el tiempo de registros. Sin embargo, es uno de los cauces que interactúa con las fuentes termales, por lo que fue visitado en campo para toma de datos físicos y aforo para cálculo de caudal.



Fig. 28 Río Claro después de la unión con la Quebrada Nereidas.

Para toma de datos físicos de Río Claro, se accedió por la finca Playa Alta- Corrales, uno de los puntos de aforo es después de su intersección con la Q. Nereidas y el otro después de su interacción con la fuente termal encontrada en la zona (T1). En la Tabla. 5 se muestran los

parámetros físicos que se tomaron con la sonda HANNA y el dato de caudal registrado en cada uno de los puntos.

	Río Claro + Q.N	Río Claro+ QN+T1
Caudal M3/seg	5.118	6.407
Temp °C	13.81	15.52
Conduc	157	249
TDS ppm	79	131

Tabla. 5 Parámetros físicos de la Quebrada Nereidas en el sector de Playa Alta.

8.4 Quebrada El Billar

Esta quebrada nace a los 3500 msnm sobre la vereda Páramo y cae directamente sobre la Q. Nereidas, cuenta con una buena cobertura vegetal de bosque alto Andino, con un lecho rocoso (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017) y que en el sector visitado corresponde a esquistos y gneises del Complejo Cajamarca.

El régimen hídrico de la quebrada El Billar no fue evaluado pues no cuenta con registro de caudal. Sin embargo, es uno de los cauces que interactúa con las fuentes termales en el sector de la finca La Quinta, por lo que fue visitado en campo para toma de datos físicos y aforo para cálculo de caudal



Fig. 29 Quebrada El Billar en el sector de la finca La Quinta.

Para llegar al punto de aforo de la quebrada el Billar se accedió por la finca La Quinta y se tomaron datos del cauce antes y después de su interacción con las aguas termales del sector (T3). En la Tabla. 6 se muestran los parámetros físicos que se tomaron con la sonda HANNA y el dato de caudal registrado en cada uno de los puntos.

	El Billar antes T3	El Billar + T3
Caudal M3/seg	0.417	0.417
Temp °C	14.04	17.17
Conduc	85.00	201
TDS ppm	42.00	100

Tabla. 6 Parámetros físicos de la Quebrada El Billar en el sector de La Quinta.

9. Clima

La variabilidad climática en Colombia se ve afectada a diferentes escalas temporales (Interestacional, estacional, interanual, interdecadal) por criterios como el desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) en donde ocurre una convergencia entre los vientos alisios del hemisferio norte y sur; los fenómenos del niño y de la niña (ENSO), la acción de factores físico geográficos como la orografía, la longitud y latitud; la influencia de los vientos alisios que ingresan por el Atlántico; las masas de aire que vienen del Pacífico; los aportes de humedad procedentes del Amazonas (Poveda, 2004; Jaramillo, 2005) y los vientos del oeste que entran por la costa Pacífica proveniente de una corriente superficial en el trópico llamada Chorro del Chocó que introduce gran humedad al territorio (Poveda & Mesa, 1999, 2000; Poveda, 2004).

Según la clasificación de Caldas-Lang de 1962, Colombia presenta la mayor parte de los climas que comprenden su clasificación en el que predomina un clima cálido con diferentes grados de humedad (Fig.30). En el departamento de Caldas predomina de mayor a menor proporción los climas cálido semihúmedo, templado húmedo, frío húmedo, muy frío húmedo y superhúmedo, y extremadamente frío superhúmedo (IDEAM, 2014) (Fig.31).

La precipitación en el área está influenciada por el fenómeno ENSO y la ZCIT lo que genera un comportamiento bimodal en el que ocurren dos periodos de muy alta precipitación entre los meses abril-mayo y octubre-noviembre siendo este último el de mayor precipitación y los meses de menor precipitación se presentan durante los meses de enero-febrero y julio-agosto (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017; Aricapa, 2020).

La temperatura está dominada por la altitud, latitud, proximidad al mar y la radiación solar. Según Ingeniería Strycon S.A.S (2017) el área de influencia del proyecto geotérmico está entre los 18,78°C y 4,71°C en la parte más alta, con una diferencia de 14, 07°C debido a la ubicación de las estaciones climáticas con respecto al nivel del mar, quienes toman de referencia nueve estaciones ubicadas entre los departamentos de Caldas y Risaralda con registros comprendido entre los años 1993 a 2015.

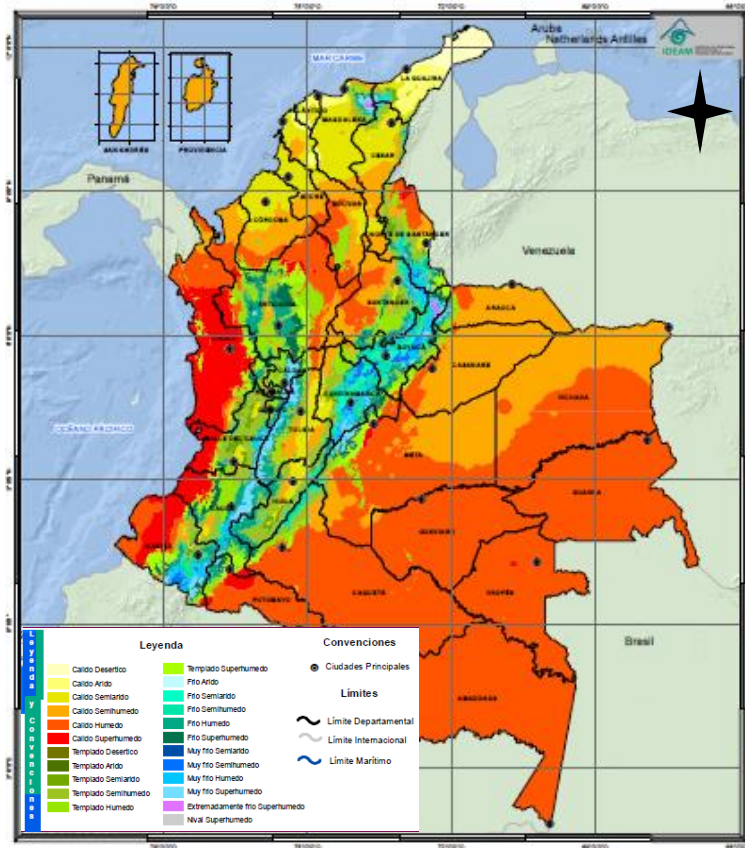


Fig. 30 Clasificación climática de Colombia de Caldas-Lang, 2014. IDEAM.

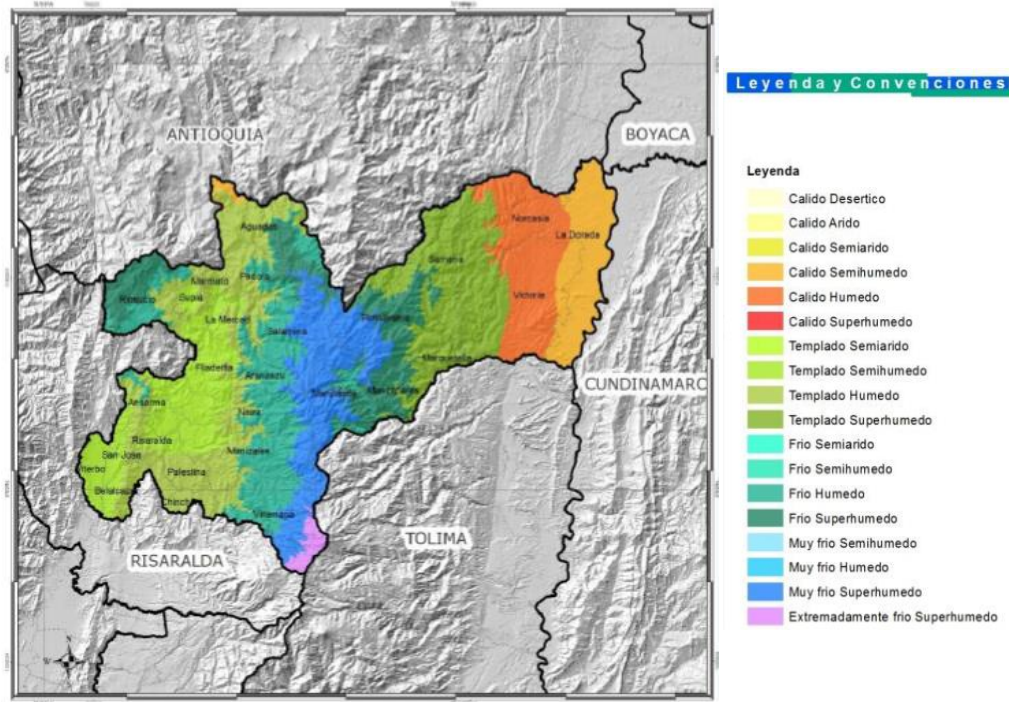


Fig. 31 Clasificación climática Caldas-Lang del departamento de Caldas. 2014. IDEAM.

9.1 Análisis de los datos existentes de las estaciones en la zona de estudio

Para este estudio se realizaron mapas esquemáticos que representan las variables climáticas de precipitación y temperatura. Pero antes de ello, se dispuso a adquirir la información a partir de la plataforma SIMAC (Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas) y la base de datos del IDEAM, DHIME (Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos), con el fin de visualizar las estaciones meteorológicas que queden más cercanas a la zona de interés y que puedan brindar información que permita proponer un modelo de distribución de precipitación y temperatura sobre la subcuenca Río Claro.

9.1.1 Metodología

Con el fin de obtener información de calidad se seleccionaron siete estaciones meteorológicas que quedan relativamente cerca de la zona de estudio, teniendo presente que el área carece de un buen abastecimiento de este tipo de equipos de monitoreo, que proporcionen información suficiente para dicho análisis (Fig.32).

Se hizo una evaluación del registro de datos disponibles en la plataforma y se seleccionó un rango de tiempo que fuera representativo con el fin de que represente el mismo periodo climático en el tiempo, escogiendo así los registros que comprenden los años 2016-2020.

Siguiendo el protocolo de la Guía de Prácticas Climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMN – N° 100), se realizó un control de gestión de calidad de datos que comprende un conjunto de actividades que busca mejorar la calidad de la información disponible.

Finalmente se realizó una representación esquemática de los datos tratados a partir de gráficos y mapas que permitieran visualizar la distribución de las variables estudiadas en este apartado.

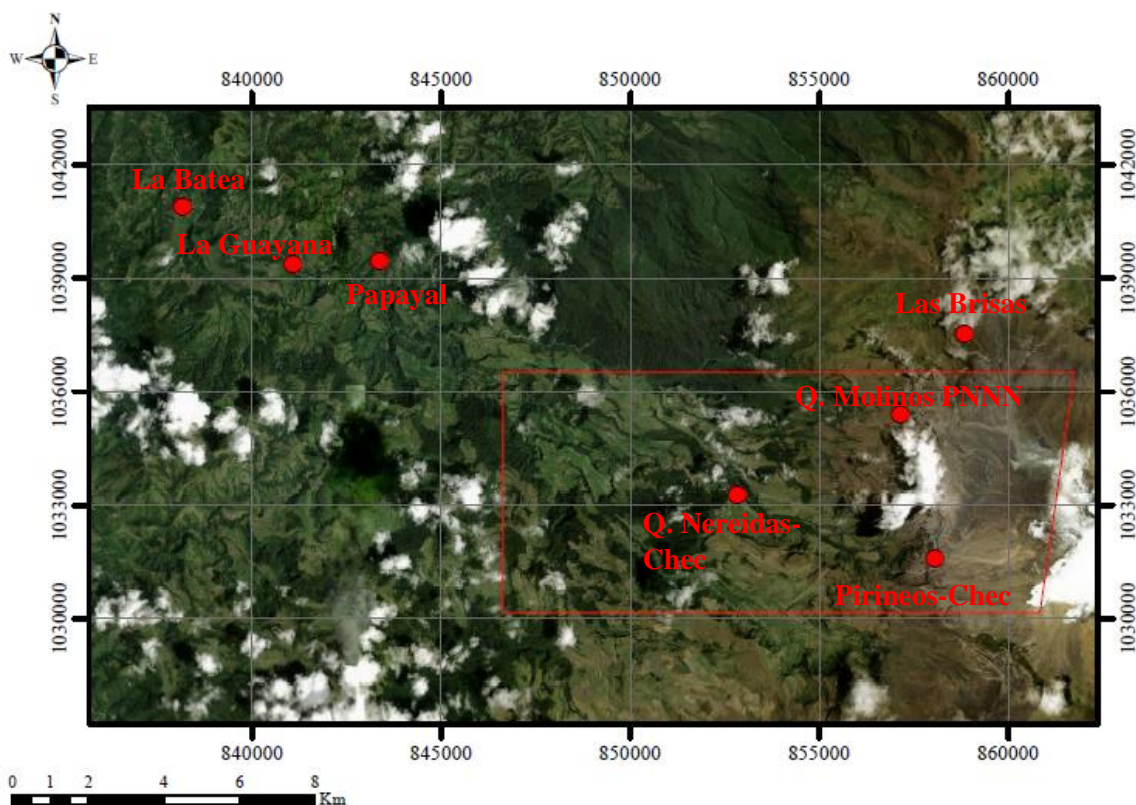


Fig. 32 Zona de estudio con las estaciones climáticas de interés. Imagen satelital tomada de SAS Planet Release 200606.

CÓDIGO	ESTACIÓN	TIPO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	ENTIDAD	AÑO DE REGISTRO	
							Inicial	Final
178730402010	RÍO RIOCLARO - LA BATEA	Hidrometer eológica	1040896.801	838138.181	1898.353	Gobernación de Caldas - Udeger	2016	2020
178730501015	PIRINEOS - CHEC	Meteorológica	1031610.107	858059.69	4347.362	CHEC S.A. E.S.P. - Grupo EPM	2016	2020
178730302003	Q. MOLINOS P.N.N.N.	Hidrometer eológica	1035384.915	857136.218	4046.17	CORPOCALDAS	2012	2020
178730502014	Q. NEREIDAS - CHEC	Hidrometer eológica	1033264.062	852823.771	3365.74	CHEC S.A. E.S.P. - Grupo EPM	2016	2020
178730302006	RÍO RIOCLARO - LA GUAYANA	Hidrometer eológica	1039363.88	841068.004	1807	CORPOCALDAS	2011	2020
26150150	PAPAYAL	Hidrometer eológica	1039474.8	843360.1	2304	IDEAM	1970	2020
26155150	LAS BRISAS	Hidrometer eológica	1037538.573	858826.009	4812	IDEAM	1982	2020

Tabla 7. Estaciones hidrológicas y pluviométricas utilizadas Coordenadas planas MAGNA Sirgas origen Bogotá.

9.2 Precipitación.

En el Anexo 1 se puede observar el conjunto de datos que fue adquirido a partir del SIMAC y el DHIME sin ninguna modificación o tratamiento de éstos.

En la Tabla. 7 se puede observar las estaciones que fueron tomadas con sus respectivas coordenadas, nombres y código que las representa.

Teniendo presente la cantidad de datos con los que se dispone y con el fin de que se estudien dentro de un mismo rango espacial y climático se tomaron los registros que comprenden el año 2016 a 2020.

Para comenzar con el análisis de consistencia de datos y según lo recomendado por la Guía de Prácticas Climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMN – N° 100), se hizo un cálculo del número de registros faltantes ya que no se debe trabajar con valores que tengan más del 80% de datos ausentes. Para ello se tomaron los registros mensuales que se obtuvieron a través de la plataforma SIMAC y DHIME (ver Anexo 1).

En la Tabla. 8 se muestra el porcentaje de datos faltantes y se concluyó descartar los datos del año 2016 de la estación Río Claro- La Batea y 2020 de la estación Papayal. De esta manera, la cantidad de datos se reduce a los registros de las siete estaciones restantes desde el 2016 con la excepción mencionada, haciendo que el análisis del componente climatológico se ajuste a los estándares de cantidad de información requerida.

CÓDIGO	ESTACIÓN	AÑO DE REGISTRO	% DATOS FALTANTES
178730402010	RÍO RIO CLARO - LA BATEA	2016	92
		2017	17
		2018	0
		2019	0
		2020	0
178730501015	PIRINEOS - CHEC	2016	33
		2017	0
		2018	0
		2019	0
		2020	0
178730302003	Q. MOLINOS P.N.N.N.	2016	8
		2017	0
		2018	50
		2019	25
		2020	0
178730502014	Q. NEREIDAS - CHEC	2016	25
		2017	0
		2018	0
		2019	25
		2020	0
178730302006	RÍO RIO CLARO - LA GUAYANA	2016	8
		2017	0
		2018	0
		2019	0
		2020	0
26150150	PAPAYAL	2016	0
		2017	25
		2018	8.3
		2019	8.3
		2020	33.3
26155150	LAS BRISAS	2016	0
		2017	0
		2018	0
		2019	0
		2020	91.7

Tabla 8. Porcentaje de datos faltantes entre los años 2016-2020.

9.2.1 Datos faltantes

Dentro de la verificación de la calidad de la información se encuentra el porcentaje de datos disponibles (Tabla. 8) y a pesar de que se descartaron los datos que sobrepasen el 80% de datos faltantes, fue relevante identificar tendencias que permitieran conocer los posibles valores de una serie de datos basados en métodos estadísticos que tuvieran en cuenta las estaciones cercanas a la que se estaba analizando y que carecen de información.

Para complementar los valores faltantes de la serie de precipitación se realizaron diferentes métodos, ya que el coeficiente de correlación o de Pearson entre estaciones debe ser mayor de 0.7 y este caso solo ocurrió entre las estaciones Río Claro-La Batea y Q. Molinos PNNN, y Q. Nereidas- Chec y La Argentina; del departamento de Risaralda de modo que se realizó el método de regresión múltiple de los años 2017,2018 y 2019 (Tabla. 9). Para completar los datos de los años 2016, 2017 y 2018 de las estaciones Q. Molinos PNNN, Las Brisas y Papayal se utilizó el método de razones promedio teniendo presente que la zona estudiada se encuentra sobre una misma región hidrológica tomando el registro de las estaciones Q. Nereidas- Chec y Río Claro- La Guayana. Finalmente, el registro del año 2016 faltante de la estación Río Claro- La Guayana fue completado a partir de un promedio de sus propios datos, método que puede implementarse pues la información que hace falta corresponde a menos del 10% de los datos. De esta manera las estaciones Q. Nereidas- Chec y Pirineos- Chec son las únicas que quedan sin data en el año 2016.

Estación X	Estación Y	Ecuación de Regresión	Coef. Pearson
Río Claro- La Batea	Q. Molinos PNNN	$Y= 0.0014x^2 - 0.2141x + 76.395$	0.77
Q. Molinos PNNN	Río Claro- La Batea	$Y= 1.2493x + 38.627$	0.77
La Argentina	Q. Nereidas- Chec	$Y=-0.0008x^2 + 0.8413x + 5.4255$	0.74

Tabla. 9 Datos método de regresión múltiple para identificación de datos faltantes. Estación X: Estación que se utilizó para rellenar datos faltantes. Estación Y: Estación con datos faltantes.

$$PX = \frac{\overline{PX}}{N} * \left[\frac{PA}{\overline{PA}} + \frac{PB}{\overline{PB}} + \dots + \frac{PN}{\overline{PN}} \right]$$

PX: precipitación de la estación incompleta

PA, B: precipitación de las estaciones completas

N: Número de estaciones vecinas

\overline{PN} : promedio de precipitación

9.2.2 Análisis consistencia de datos

La curva de doble masa permite analizar la calidad de los datos, su homogeneidad y determinar el error que existe o existió en la toma de ellos. Este método acumula la precipitación de la estación patrón y de la estación a evaluar, buscando que las series de lluvia tengan la misma proporción desde el inicio hasta el final de la toma de datos. En el caso de estudio no existe una estación patrón como tal, por ello se tomaron los promedios acumulados de las estaciones vecinas considerándola una nueva estación.

Pc: precipitación corregida

Pr: precipitación del punto a corregir

a_c : pendiente de la estación patrón

a_r : pendiente de la estación estudio

a_c/a_r : factor de corrección

$$Pc = \frac{a_c}{a_r} * Pr$$

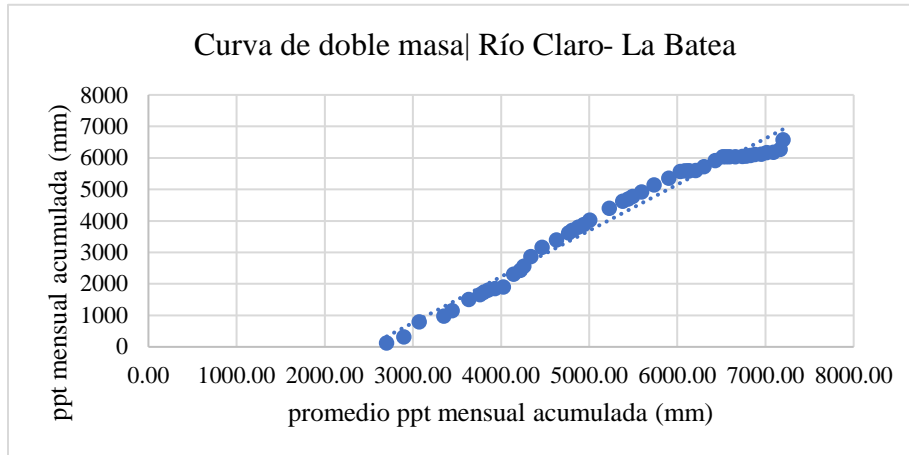


Fig. 33 Curva de doble masa de la estación Río Claro- La Batea.

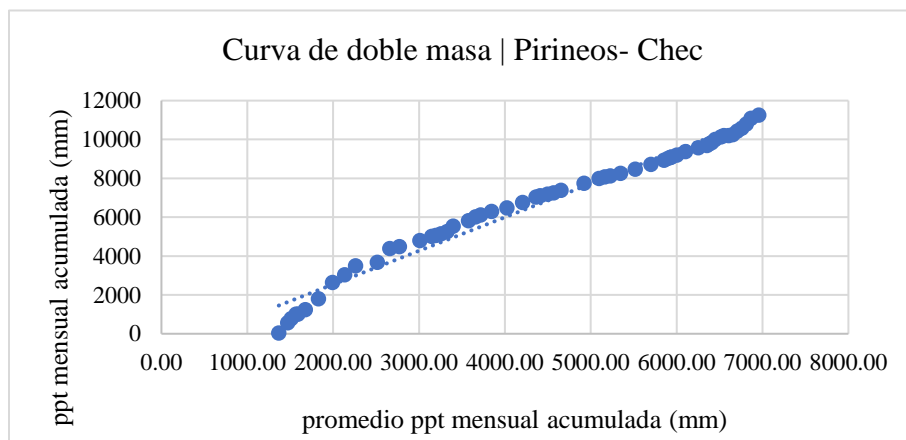


Fig. 34 Curva de doble masa de la estación Pirineos- Chec.

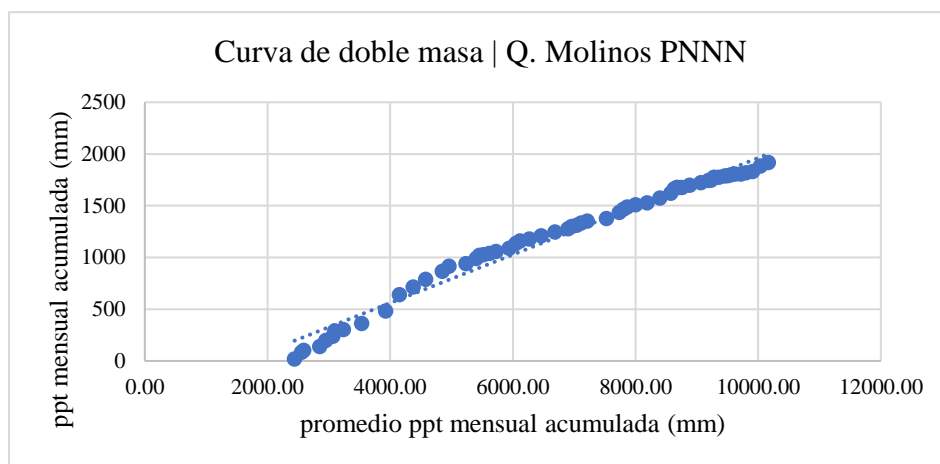


Fig. 35 Curva de doble masa de la estación Q. Molinos PNNN.

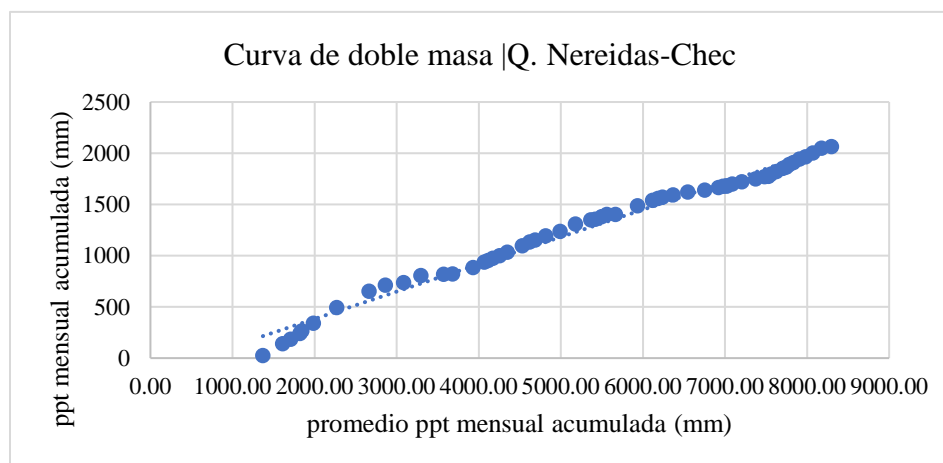


Fig. 36 Curva de doble masa de la estación Q. Nereidas- Chec.

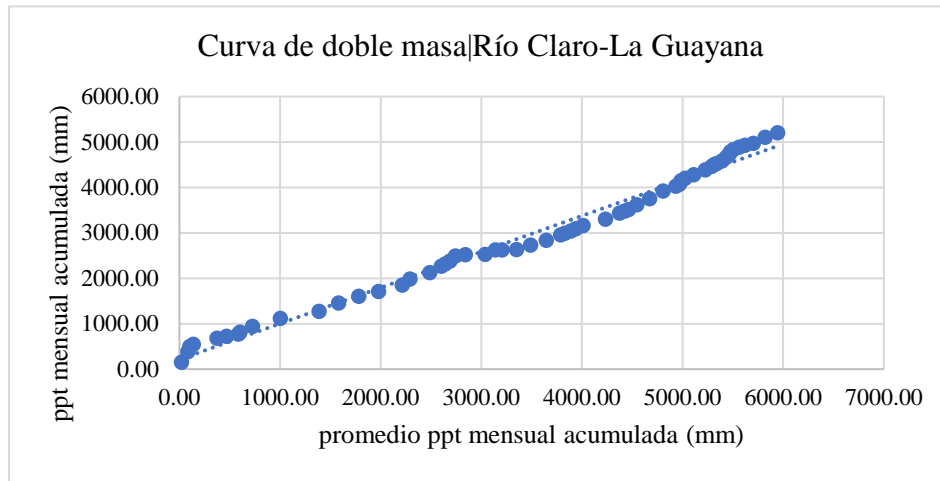


Fig. 37 Curva de doble masa de la estación Río Claro- La Guayana.

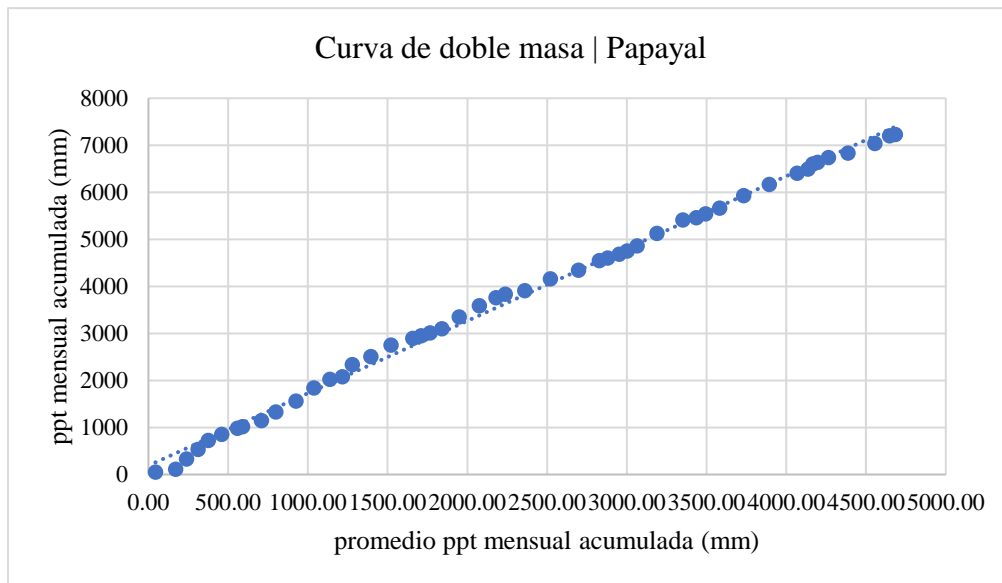


Fig. 38 Curva de doble masa de la estación Papayal.

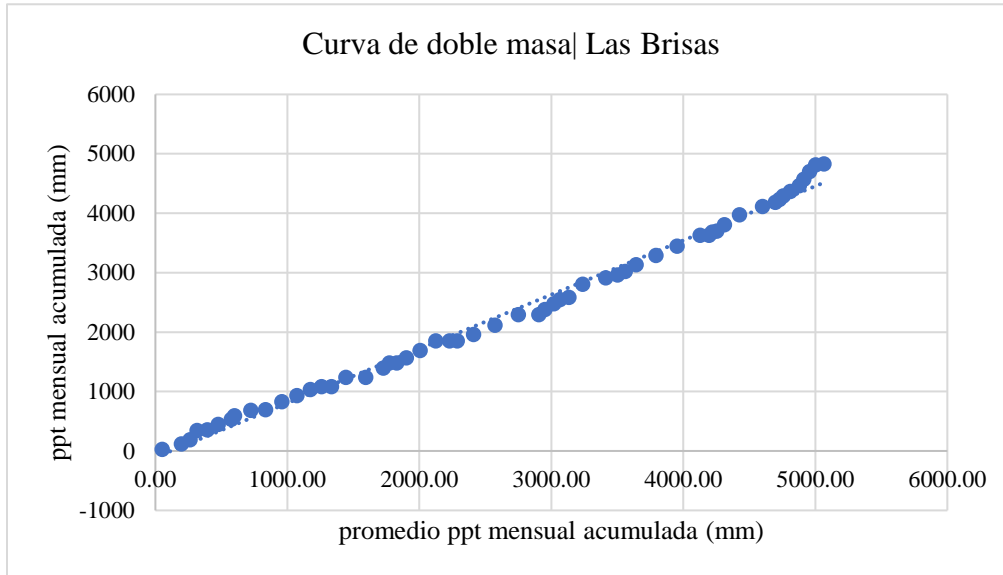


Fig. 39 *Curva de doble masa de la estación Las Brisas.*

La curva de cada estación indica una buena relación entre los datos acumulados con una tendencia lineal, considerándose datos consistentes, lo que permite garantizar la calidad y confianza de la información utilizada, teniendo en cuenta el comportamiento de la variabilidad climática, lo que permite inferir que no existen problemas relevantes en el registro de los datos.

9.2.3 Identificación de outliers o datos anómalos

Los outliers son datos atípicos que se apartan de la tendencia de los datos restantes. La modificación, retención o eliminación de estos valores, puede afectar significativamente los parámetros estadísticos especialmente en el caso de muestras pequeñas (U.S. Water Resources Council, 1982).

Según el Consejo de Recursos Hídricos de U.S, WRC por sus siglas en inglés, existe un método que detecta los valores atípicos que trabaja con unidades logarítmicas los valores de precipitación.

$$X_H = \bar{X} + K_N * S$$

X_H : Alto umbral atípico en unidades de registro

\bar{X} : logaritmo medio de las precipitaciones

K_N : Valor K para el tamaño de muestra N

S: desviación estándar en unidades logarítmicas del registro de ppt

De esta manera se pueden identificar outliers y eliminar dichos registros que afectan valores estadísticos como la media y la desviación estándar.

9.2.4 Coeficiente pluviométrico

La representatividad de los valores medios mensuales con respecto a la distribución real de las precipitaciones presenta ciertas deficiencias que según Albentosa (1975) son:

(1) La desigual duración del número de días de cada mes, (2) los promedios de los valores se hacen con datos muy contrastados, es decir máximos y mínimos que crean cierto sesgo, (3) cuando valores totales de precipitación resultan muy altos, no es porque la distribución de la lluvia fue uniforme en ese periodo de tiempo, (4) los promedios mensuales resultan de valores muy irregulares y no hay ritmos muy “ordenados” entre un año y otro, solo se pueden distinguir tendencias, (5) a escala regional, las series de precipitación son tan diferentes que no se pueden comparar entre ellas.

De esta manera se puede pensar que los datos de precipitación se están tratando desde un punto de vista solo matemático y estadístico sin tener en cuenta las variables físicas del clima.

Por ello, Angot (1897) propone una ecuación que facilita conocer las relaciones entre los regímenes de dos estaciones, lo que denomina como “coeficiente pluviométrico”.

$$Coef. Pluv = \frac{p \cdot 365}{P \cdot d}$$

p: precipitación media mensual

P: precipitación media anual

d: días del mes considerado

Según Martonne (1963), este coeficiente es más meteorológico que geográfico ya que no indica de un modo seguro los periodos secos, pues el valor que se obtiene resulta ser relativo por estar ligado al total de las lluvias en el año. Sin embargo, es un índice útil que resuelve el problema de las diferencias de duración de los periodos, expresando un carácter más o menos lluvioso del mes que se esté analizando y permite establecer curvas que muestren un régimen con mayor claridad.

Para las estaciones trabajadas se hizo el cálculo del coeficiente pluviométrico con el rango de años 2016-2020.

Estación	Año	ppt mensual (mm)											ppt anual (mm)	
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		DIC
Río Claro - La Batea	2016												125.6	125.6
	2017	187.8		178.2	174.4	148.58	151.2	71.86	70.4	46.4	54.2	167.75	130.6	1755
	2018	128	307.6	290	230.6	230.4	77.4	105.2	79.8	138.6	0	218.6	73.4	2258.4
	2019	82	139.2	230.4	211.2	210.4	26.4	0	0	8.2	125.61	193.27	116.37	908
	2020	0	0	2.47	12.9	4.94	20.58	35.13	10.15	43.91	17.29	91.38	220.8	394.8

Tabla. 10 Registro precipitación estación Río Claro- La Batea.

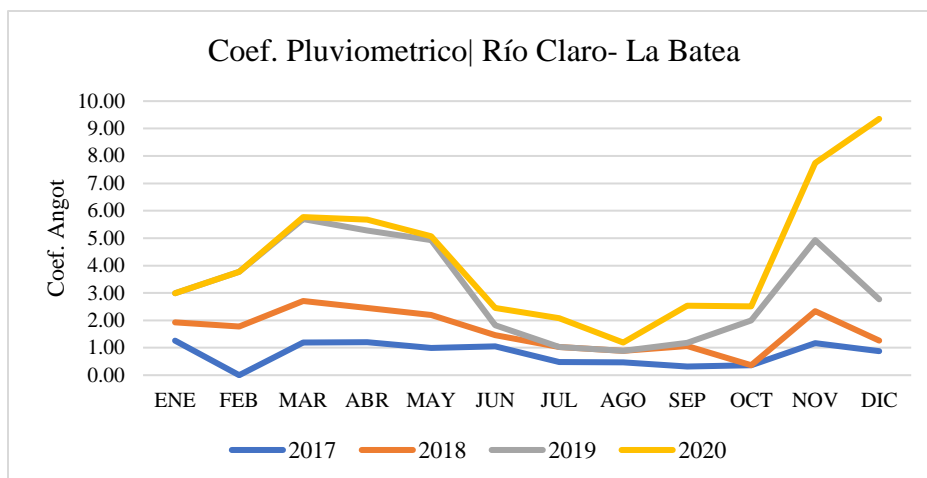


Fig. 40 Coeficiente pluviométrico estación Río Claro- La Batea.

En la estación Río Claro- La Batea, se descartó este análisis para el año 2016 por la falta de información, sin embargo, se puede distinguir tendencias a partir del gráfico (Fig. 40). En los meses julio-septiembre el coeficiente de Angot tiene valores mínimos que empiezan a elevarse a partir del mes de octubre con un máximo en el mes de noviembre. La otra tendencia que destaca, es en principio de año; hay mínimos en el mes de febrero y un máximo sostenido que va desde marzo a junio.

Estación	Año	ppt mensual (mm)												ppt anual (mm)
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Pirineos- Chec	2016				26.8	115.2	43	57.8	23.6	73.4	154	160	166.4	820.2
	2017	85.6	47.8	29.4	8.4	164.8	139	43.4	56.8	61.2	93.6	161.6	99	990.6
	2018	50.6	110.8	112.4	189.6	102.2	21.8	59.8	57.4	0.6	96.85	141.2	47.6	1115.6
	2019	37.4	59.4	67.4	53.4	76	33.8	11.2	57.1	49.2	88.8	148.8	89.6	339.6
	2020	2.8	66.2	70.4	86.6	34	73	59.2	90.6	61.6	107.6	136.4	45.4	833.8

Tabla. 11 Registro precipitación estación Pirineos- Chec.

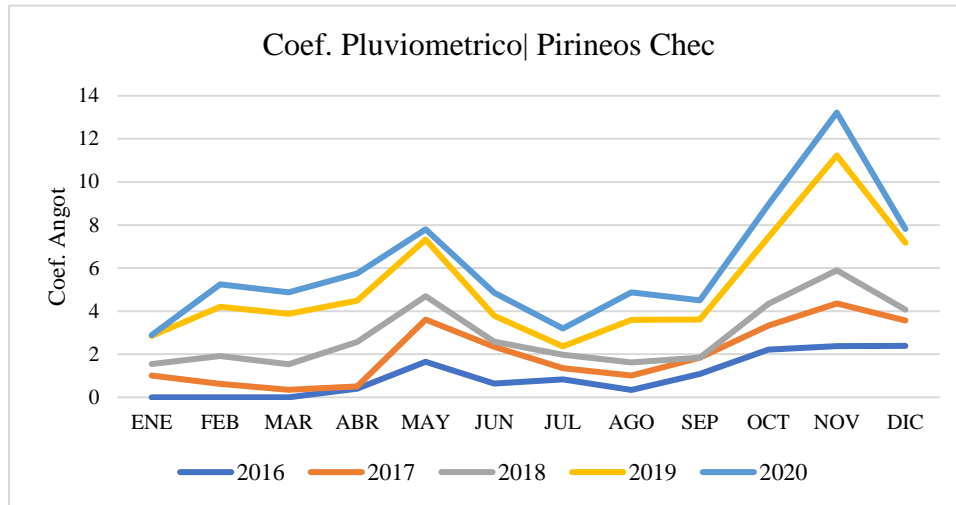


Fig. 41 Coeficiente pluviométrico estación Pirineos- Chec.

En la estación Pirineos- Chec (Fig. 41), existe un máximo marcado en el mes de noviembre seguido de un máximo en el mes de mayo, los mínimos se encuentran en los meses enero-abril y junio-agosto.

Estación	Año	ppt mensual (mm)												ppt anual (mm)
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Q. Molinos PNNN	2016	20.8	63.2	20.4	92.87	60	41.8	52.4	11.4	59.8	118.6	157.8	75	681.2
	2017	74.4	57.32	74.14	114.2	152.2	98.4	26.6	40.4	60	96.6	145.2	88.4	1478.2
	2018	54	97.4	119.2	108.8	67.8	33.6	21.5	21.15	44.71	89.11	111.88	45.61	480.8
	2019	43.57	66	146.2	145.8	139.4	40.2	0	0				3	540
	2020	25.06	2.69	10.78	2.69	8.56	6.04	0	12.83	14.34	52.13	32.62	16.05	72.6

Tabla. 12 Registro precipitación estación Q. Molinos PNNN.

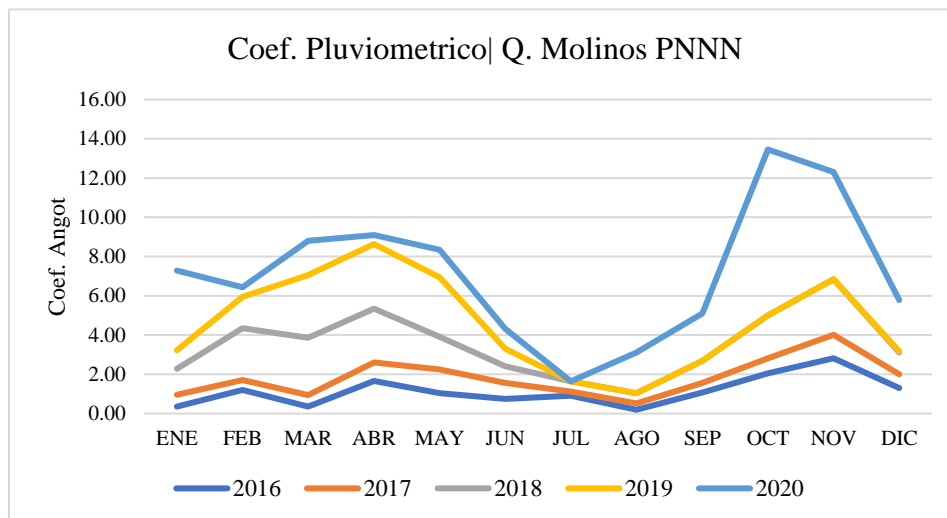


Fig. 42 Coeficiente pluviométrico estación Q. Molinos PNNN.

El coeficiente pluviométrico de Angot para la estación Q. Molinos PNNN (Fig. 42), permite reconocer una tendencia mínima marcada en el mes de agosto, sin embargo, en el 2020 esta tendencia está presente en el mes de julio. La otra tendencia marcada, es un máximo en el mes de noviembre.

Estación	Año	ppt mensual (mm)												ppt anual (mm)
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Q. Nereidas - Chec	2016				37	121.25	204	236	61.07	233	141.6	137.4	76	3047
	2017	42	174	97.53	103.2	169.6	118	27	46	67.8	148.8	152	108	2275.6
	2018	57.4	100.4	100.4	150.8	157.6	36	45	38.4	67.8	199.6	131	45	1129.4
	2019	27.4	79.8	108.8	139.2	121	54.2	24.4	61.06	60.2	94.8	109.8	60	886.2
	2020	43.4	43.6	83.4	72.8	36.8	0	32	98.8	77.2	123.2	156.8	92	860

Tabla. 13 Registro precipitación estación Q. Nereidas- Chec.

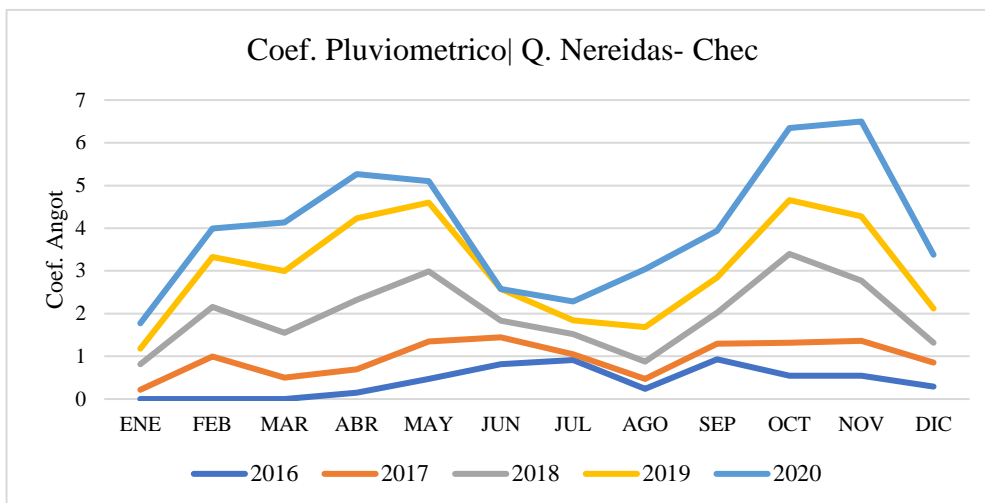


Fig. 43 Coeficiente pluviométrico estación Q. Nereidas-Chec.

Existe ausencia de datos en los meses enero-marzo del 2016 en la estación Q. Nereidas-Chec, algo que puede evidenciarse en la gráfica (Fig. 43). En el mes de agosto existe la mayoría de los datos mínimos a excepción del año 2020 que presenta este mínimo en el mes de julio, esto seguido de enero que es donde se puede observar la segunda tendencia mínima. Los máximos valores se presentan en los meses de octubre- noviembre y abril-mayo.

Estación	Año	ppt mensual (mm)												ppt anual (mm)
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Río Claro - La Guayana	2016	83.6	228.54	111.4	53.8	130	44.4	52.2	39.2	125.4	175.6	174.2	202.4	3394
	2017	164.2	117.8	161.6	146.8	271.2	158.4	55.2	67.4	127.4	132.8	131.44	98.78	1316.2
	2018	4.4	2.6	187	203.4	223	62	104	37	81.6	135	270	244.4	1597.8
	2019	80.4	73.8	199.2	249.6	321.2	190.4	79.6	110.4	113.4	143.6	246	217.4	1981.6
	2020	85.4	42.6	95.8	163.4	89.8	117.8	103.6	98.6	87.6	77.2	131.4	98.78	963.8

Tabla. 14 Registro precipitación estación Río Claro- La Guayana.

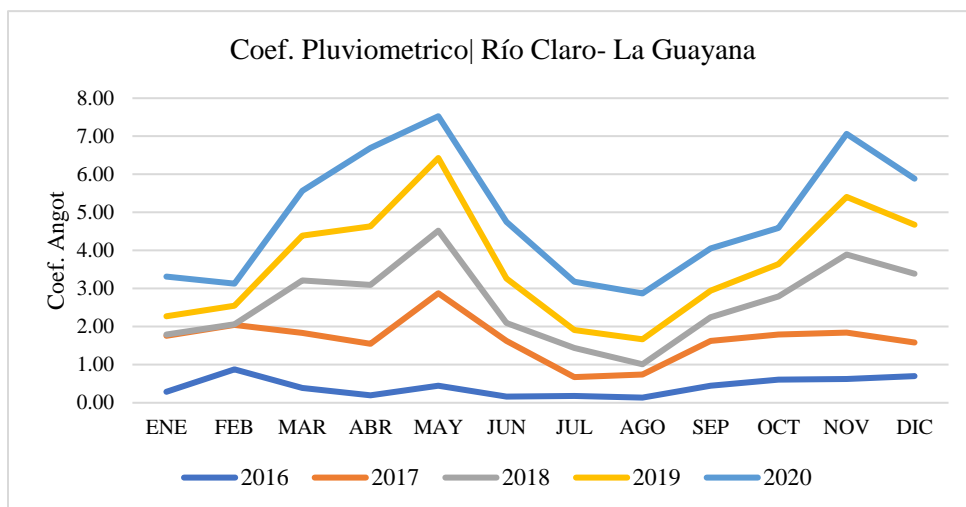


Fig. 44 Coeficiente pluviométrico estación Río Claro- La Guayana.

El coeficiente de la estación Río Claro- La Guayana (Fig. 44) presenta dos máximos en el mes de mayo y noviembre, con un mínimo marcado en julio-agosto.

Estación	Año	ppt mensual (mm)												ppt anual (mm)
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Papayal	2016	55	62	218	198	195	129	129	35	127	183	231	281	1843
	2017	185	54.3	259.8	168.9	242.9	142.1	53.3	60.7	91.1	251	240.13	166.5	1915.73
	2018	75.9	79.33	248	183.1	207.1	55.3	81.9	62.9	111.8	266.6	285.5	42.9	1700.33
	2019	83.4	121.7	266.2	240.6	235.7	90.9	108.9	30	103.4	94.5	203.9	166.3	1745.5
	2020	25.8												25.8

Tabla. 15 Registro precipitación estación Papayal.

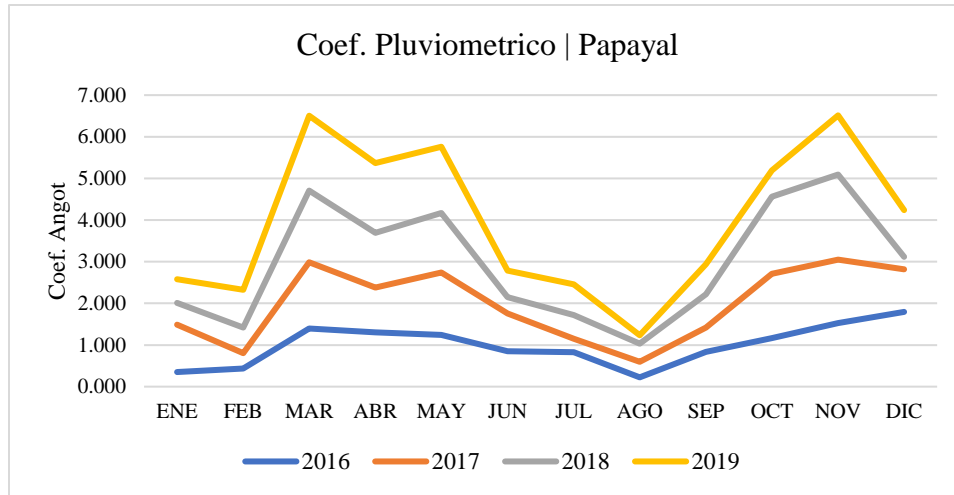


Fig. 45 Coeficiente pluviométrico estación Papayal.

Para la estación Papayal, se puede observar una tendencia bimodal (Fig. 45), con los valores más bajos en el mes de agosto seguido del mes de febrero. La máxima tendencia se presenta en los meses de marzo y octubre-noviembre.

Estación	Año	ppt mensual (mm)												ppt anual (mm)
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Las Brisas	2016	27.1	92	72.1	152.3	14	88	88	56.9	96.1	157.2	137.57	104.1	1085.37
	2017	97.7	48.6	114.51	157.4	101.93	156.9	86.62		85.1	123.6	161		1133.36
	2018	56.8	108.2	155.5	178.4	0	87.4	96.6	68.9	41	217.4	110.8	44.7	1165.7
	2019	61	111.7	157.4	156.3	181.1		57.8	16.7	107.3	162.2	140.9	73.57	1225.97
	2020	48.59	57.59	73.04	97.17	110.68	130.42	111.65	15.34	82.38	127.3			854.16

Tabla. 16 Registro precipitación estación Las Brisas.

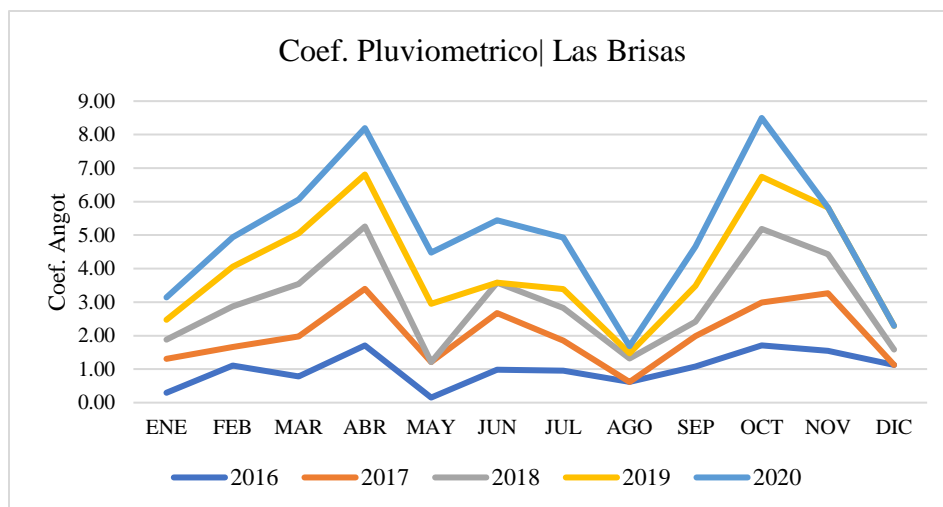


Fig. 46 Coeficiente pluviométrico estación Las Brisas.

En la estación Las Brisas, el coeficiente de Angot (Fig. 46) presenta mínimos en los meses de mayo y agosto, mientras que los máximos se presentan en los meses de marzo-abril y en el mes de octubre.

El valor mínimo de coeficiente de Angot se presenta para la mayoría de las estaciones, en el mes de agosto y en el primer trimestre de los años estudiados. Por otro lado, los valores máximos de este coeficiente varían entre los meses de octubre-noviembre y marzo-mayo. Se entiende de esta manera que los valores menores representan periodos de sequía mientras que los valores extremos superiores, equivalen a un régimen húmedo, que a su vez permiten reconocer el inicio de un año hidrológico para las estaciones observadas.

9.2.5 Precipitación media

La precipitación media de una cuenca se puede obtener a partir de registros puntuales de varias estaciones por diferentes métodos, para este estudio se utilizó el método de polígonos de

Thiessen con ayuda del software ArcGis 10.5.

9.2.5.1 Polígonos de Thiessen

Para este método, es necesario conocer la localización de las estaciones en la zona bajo estudio, ya que, para su aplicación, se requiere delimitar la zona de influencia de cada estación que pondera el valor de precipitación en el área para que no surjan errores estadísticos que solo tengan en cuenta el promedio por estación.

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i P_i$$

A_T : Área total de la cuenca

A_i : Área de influencia del polígono de Thiessen

P_i : Precipitación de la estación i

n : Número de estaciones tomadas en cuenta

La precipitación media anual en la subcuenca Río Claro, se realiza por medio de este método (Tablas. 17, 18, 19, 20, 21). Para el año 2016, se excluye la estación Río Claro-La Batea que no cuenta con data suficiente para ese año, la precipitación media anual es de 1162.65 mm con valores máximos en la parte baja de la cuenca, específicamente en la estación Papayal que está a una altitud de 2304 msnm. En el año 2017 la precipitación media anual fue de 1291.13 mm y de igual manera que como ocurrió en el año 2016, la estación con mayor precipitación corresponde a Papayal. En el año 2018 la precipitación media anual es de 1257.16 con su máximo valor de precipitación en una de las partes más bajas de la cuenca representado por la estación Río Claro -La Batea que se ubica a una altura de 1898.35. En el año 2019 la precipitación media mensual es de 1119.86 mm con la máxima precipitación en el área más baja de la cuenca representado por la estación Río Claro - La Guayana a una altura de 1807 msnm. En

el año 2020 no se tuvo en cuenta la estación Papayal por falta de

información, la precipitación media fue de 741.78 mm con un valor máximo en la parte más baja de la cuenca al igual que en el año 2019, con los valores más bajos de precipitación a lo largo de los cuatro años (Fig. 51).

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2016						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	1247.32	56.3695	70310.80474
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	774.07	20.1864	15625.68665
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	820.2	78.1075	64063.7715
Río Claro- La Guayana	841068.0041	1039363.88	1807	1420.74	20.688	29392.26912
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1843	36.8812	67972.0516
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1085.37	7.92744	8604.205553
TOTAL					220.16004	255968.7892
Precipitación promedio						1162.65

Tabla. 17 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2016 de la subcuenca Río Claro.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2017						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Río Claro- La Batea	838138.1812	1040896.801	1898.353	1381.39	24.3626	33654.21255
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	1253.93	56.3695	70683.40714
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	1027.86	20.1864	20748.7931
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	990.6	78.1075	77373.2895
Río Claro- La Guayana	841068.0041	1039363.88	1807	1633.02	20.688	33783.91776
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1915.73	36.8812	70654.42128
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1133.36	7.92744	8984.643398
TOTAL					244.52264	315882.6847
Precipitación promedio						1291.83

Tabla. 18 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2017 de la subcuenca Río Claro.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2018						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Río Claro- La Batea	838138.1812	1040896.801	1898.353	1879.6	24.3626	45791.94296
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	1129.4	56.3695	63663.7133
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	814.76	20.1864	16447.07126
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	990.85	78.1075	77392.81638
Río Claro- La Guayana	841068.0041	1039363.88	1807	1554.4	20.688	32157.4272
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1700.33	36.8812	62710.2108
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1165.7	7.92744	9241.016808
TOTAL					244.52264	307404.1987
Precipitación promedio						1257.16

Tabla. 19 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2018 de la subcuenca Río Claro.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2019						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Río Claro- La Batea	838138.1812	1040896.801	1898.353	1343.05	24.3626	32720.18993
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	940.66	56.3695	53024.53387
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	584.17	20.1864	11792.28929
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	772.1	78.1075	60306.80075
Río Claro- La Guayana	841068.0041	1039363.88	1807	2025	20.688	41893.2
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1745.5	36.8812	64376.1346
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1225.97	7.92744	9718.803617
TOTAL					244.52264	273831.9521
Precipitación promedio						1119.86

Tabla. 20 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2019 de la subcuenca Río Claro.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2020						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Río Claro- La Batea	838138.1812	1040896.801	1898.353	459.55	24.3626	11195.83283
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	860	56.3695	48477.77
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	183.79	20.1864	3710.058456
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	833.8	78.1075	65126.0335
Río Claro- La Guayana	841068.0041	1039363.88	1807	1191.98	20.688	24659.68224
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	854.16	7.92744	854.16
TOTAL					207.64144	154023.537
Precipitación promedio						741.78

Tabla. 21 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2020 de la subcuenca Río Claro.

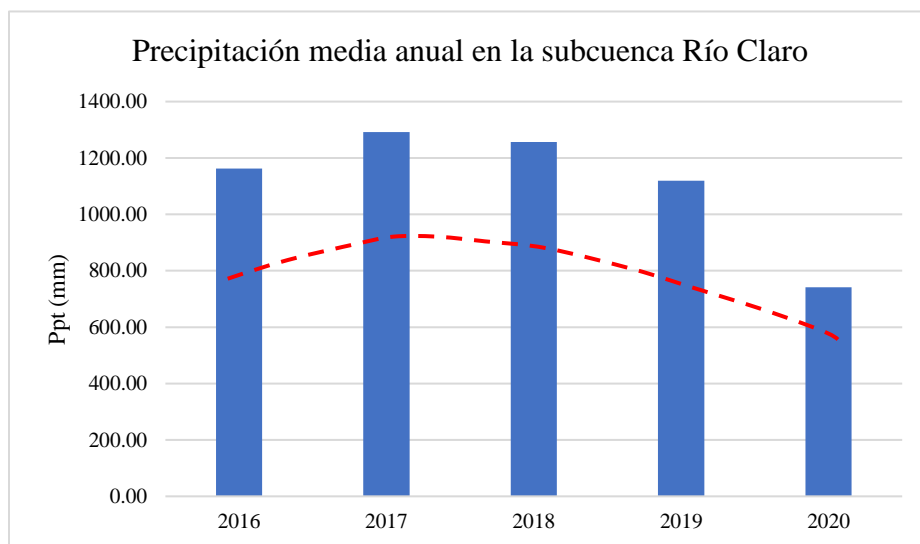


Fig. 47 Variación de la precipitación media anual durante lo años 2016-2020 sobre la subcuenca Río Claro.

El comportamiento de este fenómeno en el periodo de estos cuatro años fue parabólico descendente (Fig. 47), lo que significa que, si bien hubo una disminución de las precipitaciones, esta no fue de manera directa lineal, sino gradual durante este tiempo. Pero es de anotar que en

los años 2016 y 2020 no se tuvo en cuenta a las estaciones Río Claro-La Batea y Papayal respectivamente por su falta de información.

A partir de este método se pudo obtener una precipitación media multianual para la zona de 1206.17 mm (Tabla. 22), lo que la define como una región climática abundante según la OMM (2008). En cuanto a la zona de influencia que tiene cada estación en la zona, se puede observar en la Fig. 48 qué tanta área abarca la data de cada punto

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Río Claro- La Batea	838138.1812	1040896.801	1898.353	1303.130428	24.3626	31747.64537
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	918.52	56.3695	51776.51314
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	726.0695	20.1864	14656.72935
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	1134.1685	78.1075	88587.06611
Río Claro- La Guayana	841068.0041	1039363.88	1807	1565.028	20.688	32377.29926
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1801.14	36.8812	66428.20457
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1181.102833	7.92744	9363.121842
TOTAL					244.52264	294936.5796
Precipitación promedio						1206.17

Tabla. 22 Datos precipitación media multianual polígonos de Thiessen para la subcuenca Río Claro.

Teniendo en cuenta esto, se destaca la precipitación media anual solo para la zona de interés de este estudio en la que se obtuvo un promedio mensual multianual de 912.54 mm. En las Tablas. 23, 24, 25, 26, 27 se detallan las estaciones que influyen el sector de interés con su respectiva área de influencia.

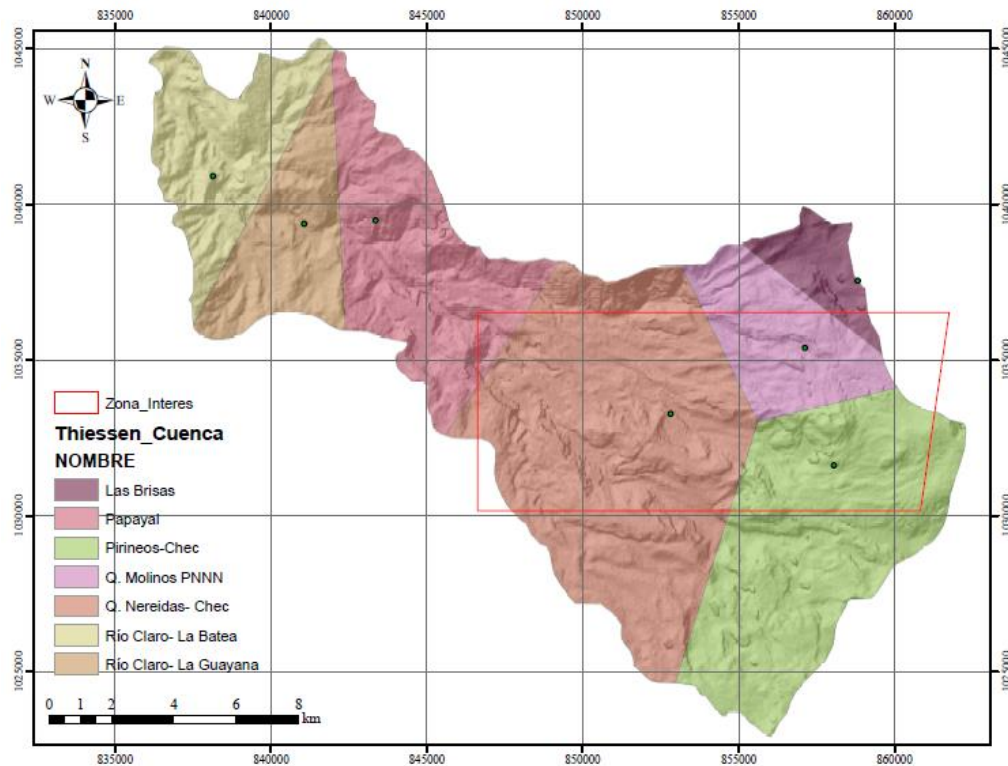


Fig. 48 Zona de influencia de las estaciones de trabajo a partir de los polígonos de Thiessen.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2016						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	1247.32	19.8821	24799.34097
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	774.07	14.1509	10953.78716
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	820.2	49.5722	40659.11844
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1843	1.8682	3443.0926
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1085.37	0.877	951.86949
TOTAL					86.3504	80807.20867
Precipitación promedio						935.81

Tabla. 23 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2016 de la zona de interés.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2017						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	1253.93	19.8821	24930.76165
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	1027.86	14.1509	14545.14407
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	990.6	49.5722	49106.22132
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1915.73	1.8682	3578.966786
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1133.36	0.877	993.95672
TOTAL					86.3504	93155.05055
Precipitación promedio						1078.80

Tabla. 24 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2017 de la zona de interés.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2018						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	1129.4	19.8821	22454.84374
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	814.76	14.1509	11529.58728
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	990.85	49.5722	49118.61437
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1700.33	1.8682	3176.556506
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1165.7	0.877	1022.3189
TOTAL					86.3504	87301.9208
Precipitación promedio						1011.02

Tabla. 25 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2018 de la zona de interés.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2019						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	940.66	19.8821	18702.29619
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	584.17	14.1509	8266.531253
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	772.1	49.5722	38274.69562
Papayal	843360.1	1039474.8	2304	1745.5	1.8682	3260.9431
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	1225.97	0.877	1075.17569
TOTAL					86.3504	69579.64185
Precipitación promedio						805.78

Tabla. 26 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2019 de la zona de interés.

PPT PROMEDIO POR EL POLIGONO DE THIESSEN 2020						
Estación	Este(x)	Norte (y)	Altura (z)	ppt anual (mm)	Área (km2)	Ppt* área
Pirineos-Chec	858059.6902	1031610.107	4347.362	860	19.8821	17098.606
Q. Molinos PNNN	857136.2181	1035384.915	4046.17	183.79	14.1509	2600.793911
Q. Nereidas-Chec	852823.7711	1033264.062	3365.74	833.8	49.5722	41333.30036
Las Brisas	858826.0092	1037538.573	4812	854.16	0.877	749.09832
TOTAL					84.4822	61781.79859
Precipitación promedio						731.30

Tabla. 27 Datos precipitación media anual polígonos de Thiessen para el año 2020 de la zona de interés.

Sobre la zona de interés el comportamiento de la precipitación al pasar del tiempo en el mismo rango de los cuatro años, es similar, con valores menores de precipitación ya que es en la parte alta de la cuenca, dando un promedio anual de 935.81 mm, 1078.80 mm, 1011.02mm, 805.78 mm y 731 mm en los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020 respectivamente, con un promedio multianual de 912.48 mm. (Fig. 49).

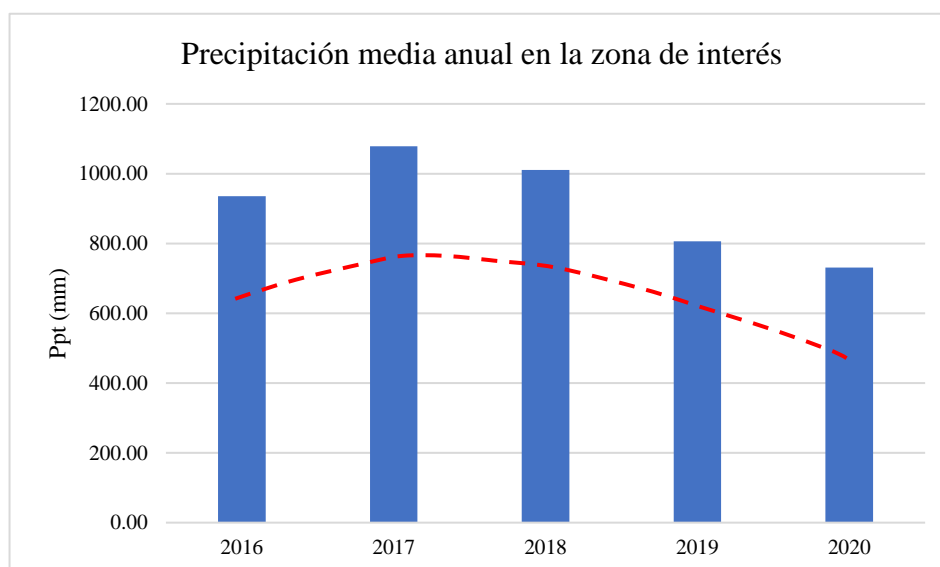


Fig. 49 Variación de la precipitación media anual durante lo años 2016-2020 sobre la zona de interés.

Por otro lado, para la distribución espacio temporal de la precipitación, se utilizó el método de Interpolación, distancia inversa ponderada (IDW). Este método utiliza los promedios ponderados de los datos de las estaciones, asignándole un peso a cada estación en relación a su localización.

$$P_e = \sum_{i=1}^N W_i P_i$$

P_e : Dato estimado en el sitio e

P_i : Dato medido en la estación i

W_i : Peso de la estación

i: Punto estimado en el sitio e

N: Número total de estaciones

El comportamiento de la distribución de la precipitación se puede observar en la Fig. 50, en la que se logra reconocer una mayor precipitación hacia el NW, mientras que la menor precipitación se localiza hacia el SE.

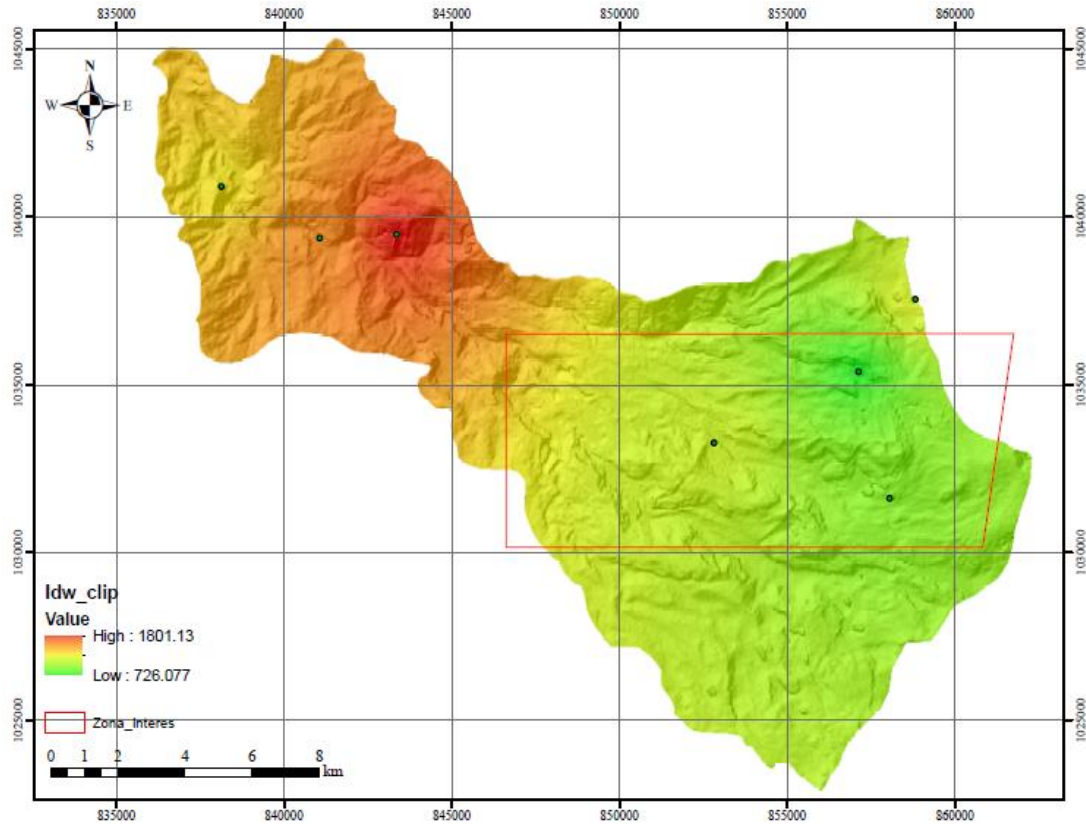


Fig. 50 Comportamiento de la precipitación media mensual multianual en el área de estudio sobre la subcuenca Río Claro.

El comportamiento de la distribución de este fenómeno está asociado a la altitud de las estaciones, pues las estaciones de menor altitud presentan mayor precipitación, por el contrario de las estaciones de gran elevación, que presentan menor precipitación, comportamiento que se comporta de manera constante durante los años 2016-2020 (Fig. 51).

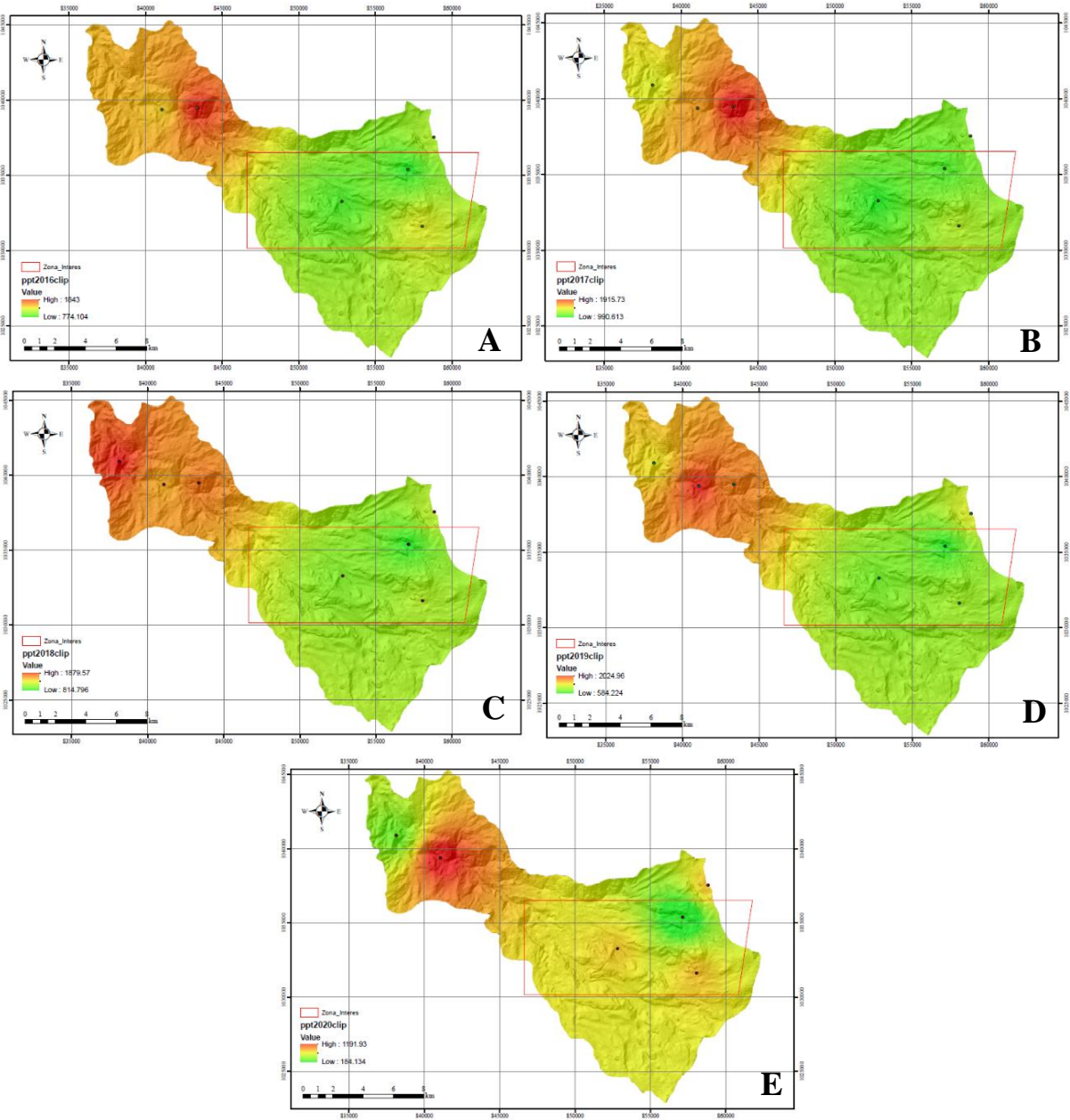


Fig. 51 Precipitación anual de la subcuenca Río Claro, (A) año 2016, (B) año 2017, (C) año 2018, (D) año 2019, (E) año 2020.

Por su parte, de acuerdo con la información de la Tabla. 28, la precipitación media mensual multianual del área se encuentra entre 17.16 mm y 248 mm. Y según lo que se muestra en la Fig. 52, se puede reconocer un comportamiento bimodal, con dos periodos marcados de alta precipitación durante los meses de marzo-abril y octubre-noviembre. Los periodos de bajas precipitaciones están presentes en los meses de enero-febrero y junio-agosto. El comportamiento de este fenómeno está ligado al paso de ZCIT dos veces al año.

ppt media mensual multianual (mm)													ppt anual (mm)
Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Río Claro- La Batea	99.45	148.93	175.27	157.28	148.58	68.90	53.05	40.09	59.28	49.28	167.75	135.29	1303.13
Pirineos- Chec	44.1	71.05	69.9	72.96	98.44	62.12	46.28	57.1	49.2	108.17	149.6	89.6	918.52
Q. Molinos PNNN	43.57	57.32	74.14	92.87	85.59	44.01	20.10	17.16	44.71	89.11	111.88	45.61	726.07
Q. Nereidas- Chec	42.55	99.45	97.5325	100.6	121.25	82.44	72.88	61.066	101.2	141.6	137.4	76.2	1134.17
Río Claro- La Guayana	83.6	93.07	151	163.4	207.04	114.6	78.92	70.52	107.08	132.84	190.61	172.35	1565.03
Papayal	99.83	79.33	248.00	197.65	220.18	104.33	93.28	47.15	108.33	198.78	240.13	164.18	1801.14
Las Brisas	58.24	83.62	114.51	148.31	81.54	115.68	88.13	39.46	82.38	157.54	137.57	74.12	1181.10

Tabla. 28 Valores de la precipitación media mensual multianual de las estaciones de trabajo.

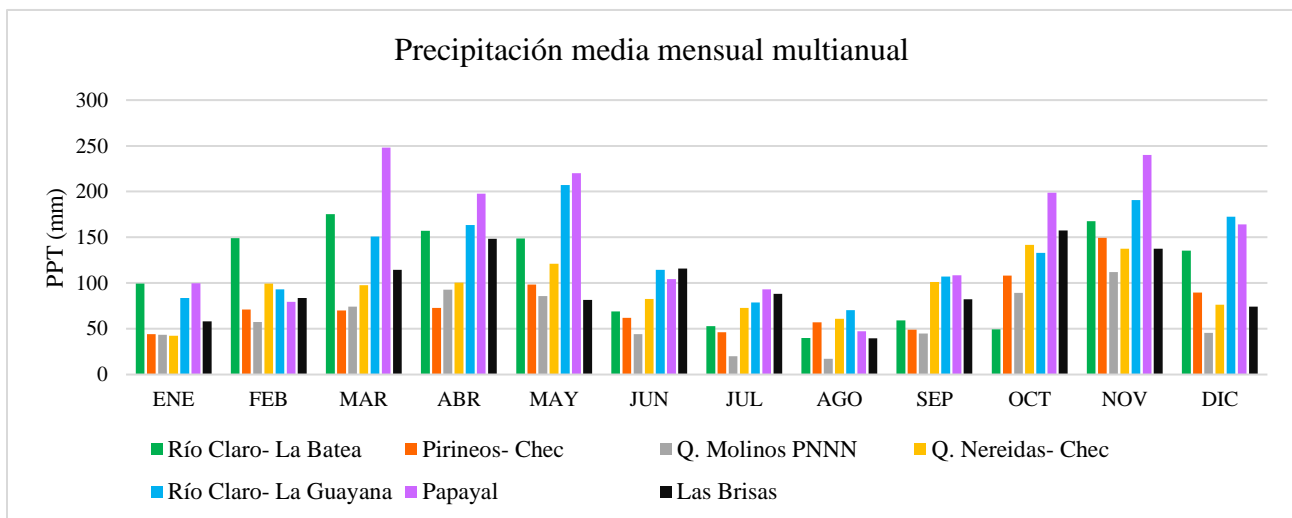


Fig. 52 Comportamiento de la precipitación media mensual multianual.

Las estaciones que presentan mayor precipitación corresponden a Papayal, Río Claro- La Batea y Río Claro- La Guayana, estaciones con elevaciones entre los 1800 y 2300 msnm, en contraste con esto, las estaciones de menor precipitación se ubican en altitudes de 3300 a 4800 msnm, equivalente a las estaciones Q. Molinos PNNN, Pirineos- Chec, Q. Nereidas- Chec y Las Brisas (Fig. 52). Según los valores que pueden encontrarse significa que el área del proyecto presenta una característica climática que va de escasa a abundante según la OMM (2008).

precipitación total anual multianual (mm)							
Estación	Río Claro- La Batea	Pirineos- Chec	Q. Molinos PNNN	Q.Nereidas- Chec	Río Claro- La Guayana	Papayal	Las Brisas
Valores de precipitación	1303.13	918.52	726.07	1134.17	1565.03	1801.14	1181.10

Tabla. 29 Valores totales multianuales de precipitación (mm) en las estaciones de trabajo.

En cuanto a la precipitación total anual multianual de cada una de las estaciones evaluadas para el estudio (Tabla. 29), estos se encuentran entre 726.07 mm a 1801.14 mm, lo que significa que el área del proyecto presenta altas precipitaciones durante el año, de acuerdo a los demás registros realizados por el IDEAM en el país.

9.3 Temperatura

Según el POMCA del Río Chinchiná (2013), la cuenca presenta tres pisos térmicos; cálido en la parte más baja de la cuenca, templado en la subcuenca media, es decir, en la zona cafetera y frío en la parte alta de la cuenca cerca al Nevado del Ruíz.

Las condiciones de temperatura en el área de estudio se tomaron de las mismas estaciones de precipitación, descartando a la estación Papayal que se encuentra a una elevación de 2304 msnm, debido a que presenta una data muy incompleta de este fenómeno para ser estudiada. De

las seis estaciones restantes se tomó información de temperaturas promedio,

mínima y máxima entre los años 2016 al 2020 para finalmente presentar su distribución en la cuenca a partir del método de interpolación IDW en el software ArcGis 10.5.

Según la data recolectada se observaron temperaturas que oscilan entre 5.20°C y 18.87°C (Tabla. 30) indicando una zonificación climática que va de fría a templado, según la clasificación de Caldas_Lang.

De acuerdo a lo que se presenta en la Fig. 53 de la temperatura anual promedio, la estación Las Brisas es la que presenta temperaturas más bajas con respecto a las demás, seguido de Q. Molinos PNNN que son de las estaciones con mayor altitud, y la estación Río Claro- La Batea es la que presenta mayor temperatura a una elevación de 1898.3 msnm.

La temperatura mínima registrada en cada una de las estaciones se presenta en la Tabla. 31, en donde la estación Las Brisas (estación con elevación de 4812 msnm) alcanza temperaturas de -3.78°C en el mes de enero. Las estaciones Q. Molinos PNNN y Pirineos-Chec registran temperaturas mínimas de 1.03°C y 2.88°C respectivamente, mientras que las estaciones Río Claro- La Batea y Río Claro- La Guayana presentan las mayores temperaturas de las estaciones evaluadas de 12.45 °C y 9.90°C respectivamente, en el mes de enero.

T promedio mensual multianual entre los años 2016-2020													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	T° Anual
RíoClaro La Batea	18.55	19.33	19.08	18.95	19.08	19.08	19.00	19.15	18.88	18.33	18.58	18.50	18.87
Pirineos	9.13	9.43	9.63	9.86	10.02	9.78	9.48	9.48	9.30	9.20	9.26	9.04	9.47
Q. Molinos PNNN	5.40	5.64	5.48	5.25	5.56	5.24	4.85	4.90	4.85	4.93	5.17	5.18	5.20
Q.Nereidas Chec	13.00	13.03	13.23	13.30	13.52	13.12	13.20	12.78	13.46	12.48	12.75	12.68	13.04
RíoClaro La Guayana	17.03	17.44	17.60	17.56	17.74	17.42	17.48	17.60	17.20	16.92	16.92	16.90	17.32
Las Brisas	3.753	4.16	4.586	4.738	4.78	4.783	4.21	4.32	4.117	4.04	4.493	4.173	4.35

Tabla. 30 Temperatura media mensual multianual de las estaciones de trabajo desde el año 2016 al 2020.

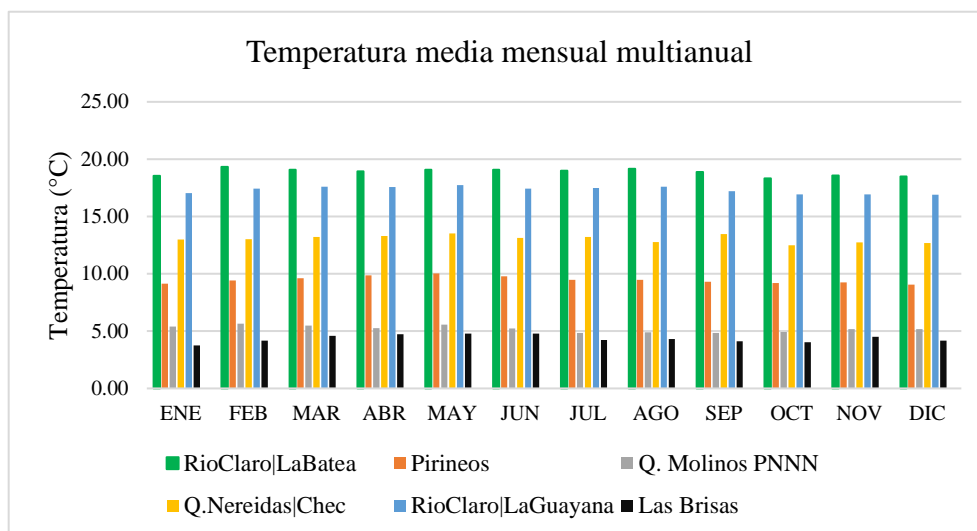


Fig. 53 Histograma de temperatura media mensual multianual de las estaciones de trabajo.

	T promedio mínima mensual multianual entre los años 2016-2020												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	T Anual
RioClaro La Batea	12.45	13.33	13.40	13.75	14.03	13.95	13.93	13.38	13.55	13.45	13.80	13.14	13.51
Pirineos	3.73	2.88	4.50	4.84	6.42	4.80	4.58	4.13	4.38	3.30	4.80	4.86	4.43
Q. Molinos PNNN	1.33	1.14	1.90	1.58	2.54	2.42	1.80	1.45	1.08	1.13	1.03	1.80	1.60
Q.Nereidas Chec	5.40	4.83	7.65	8.74	8.94	8.38	7.10	8.46	7.84	6.08	7.73	7.83	7.41
RioClaro La Guayana	9.90	10.40	10.80	11.64	11.64	11.62	11.62	11.20	10.94	11.12	10.54	10.96	11.03
Las Brisas	-3.78	-3.28	-2.68	-0.74	-1.05	-3	-1.65	-1.88	-1.67	-0.4	0.4	-2.767	-1.87

Tabla. 31 Temperatura mínima mensual multianual de las estaciones de trabajo desde el año 2016 al 2020.

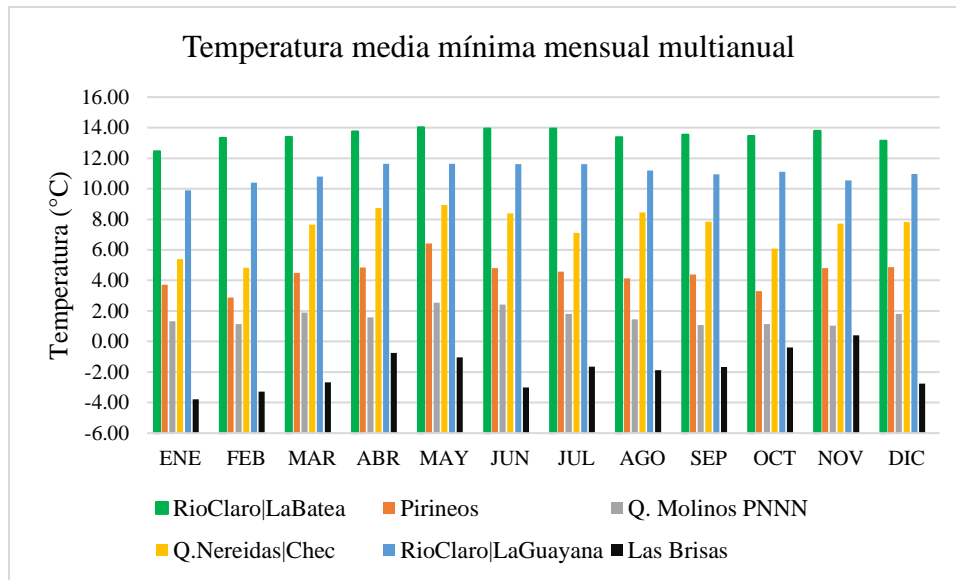


Fig. 54 Histograma de temperatura mínima mensual multianual de las estaciones de trabajo.

En la Fig. 54 se puede observar el contraste de temperaturas mínimas presentes en la zona de estudio, en negro se reconoce a la estación Las Brisas con temperaturas por debajo de 0°C, mientras que la estación Río Claro-La Batea, registra temperaturas por encima de 12°C.

	T promedio máxima mensual multianual entre los años 2016-2020												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	T Anual
RíoClaro La Batea	27.50	28.47	27.70	26.90	27.30	26.98	27.03	27.63	27.73	25.83	25.55	26.10	27.06
Pirineos	15.88	16.48	15.85	15.20	16.42	15.80	15.56	15.90	15.04	14.64	15.08	14.38	15.52
Q. Molinos PNNN	10.75	11.64	10.42	9.78	10.32	10.36	9.30	10.13	9.40	9.50	11.33	11.60	10.38
Q.Nereidas Chec	17.33	18.55	18.43	18.08	19.14	18.24	19.06	18.74	18.90	18.03	17.00	16.80	18.19
RíoClaro La Guayana	27.78	27.12	27.06	26.24	26.50	26.18	26.22	26.86	26.58	26.28	26.16	25.36	26.53
Las Brisas	13.17	12.68	13.18	13.56	12.9	13.4	13	13.53	11.333	12	13.1	14.3	13.01

Tabla. 32 Temperatura máxima mensual multianual de las estaciones de trabajo desde el año 2016 al 2020.

La temperatura media máxima del área (Tabla. 32), está entre 10.38°C y 27.06°C con el registro máximo de temperatura en la estación Río Claro- La Batea en el mes de febrero de 28.47°C, mientras que la temperatura más baja se encuentra en la estación Q. Molinos PNNN de 9.40°C en el mes de septiembre, recordando que es uno de los periodos en los que empieza a elevarse las precipitaciones y con ello menores temperaturas.

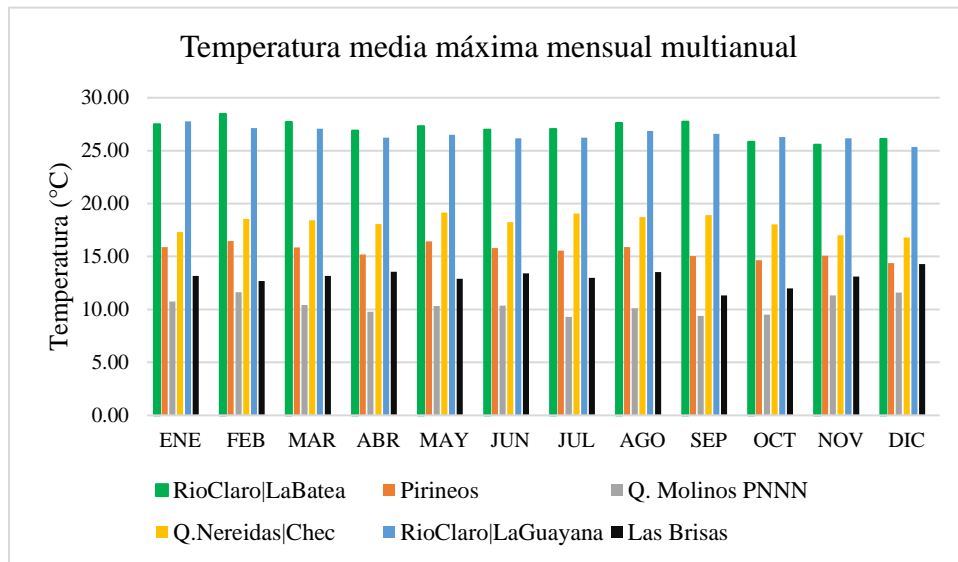


Fig. 55 Histograma de temperatura máxima mensual multianual de las estaciones de trabajo.

En cuanto a la distribución espacial de la temperatura (Fig. 56), hacia el NW es el área que presenta mayor temperatura, contrastando con menores temperaturas hacia el SE de la subcuenca. Este comportamiento se rige bajo las condiciones altitudinales de la subcuenca, pues las temperaturas más altas están presentes en las zonas más bajas de esta.

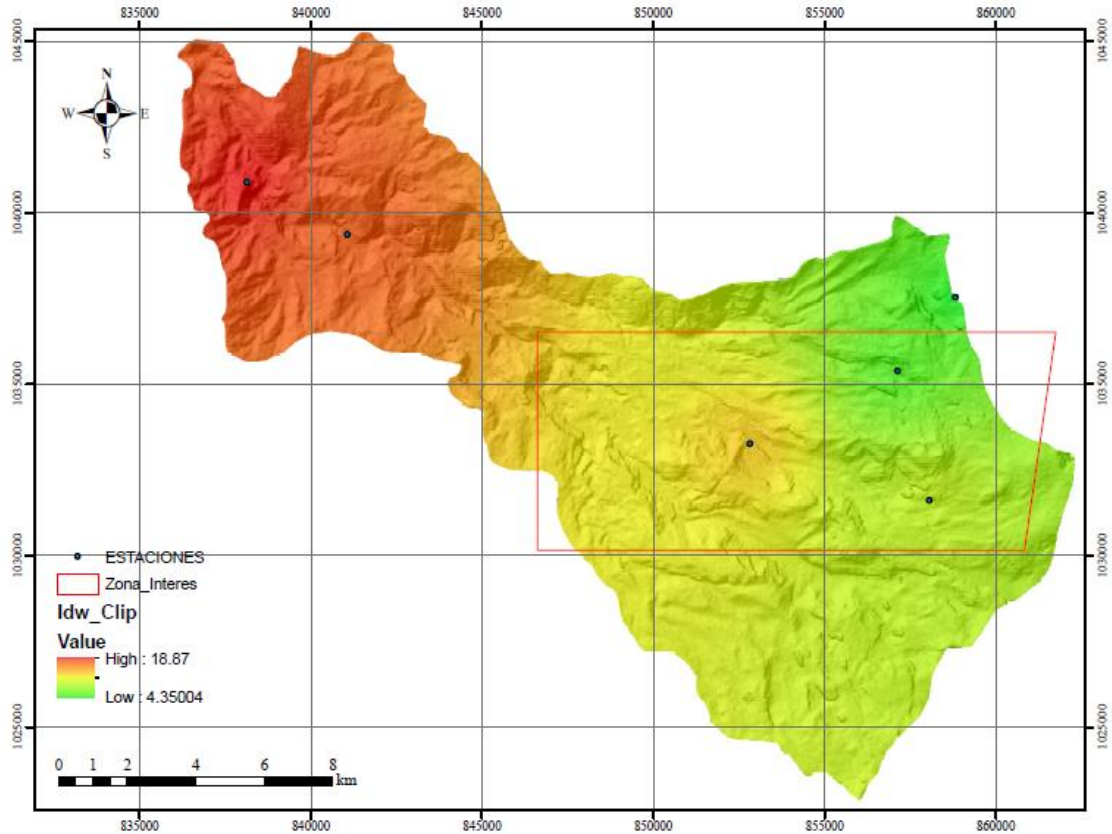


Fig. 56 Comportamiento de la temperatura media multianual en el área de estudio sobre la subcuenca Río Claro.

9.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración incorpora los fenómenos de evaporación e infiltración; el primero ocurre con el agua pasando de estado líquido a gaseoso a través y desde la superficie del suelo incorporándose al aire, influenciado por la radiación solar directa, la temperatura ambiental del aire, la humedad, la presión atmosférica y el viento; el segundo fenómeno también consiste en la evaporación del agua en estado líquido, pero éste ocurre a través de las estomas de las plantas, depende de la energía radiante, gradiente de presión del vapor y viento, radiación, temperatura del aire, humedad del aire y el tipo de planta (SENAMHI, 2013).

De esta manera, los mismos factores que dominan la evaporación desde una superficie de agua abierta, también dominan a la evapotranspiración (Castillo e Inoñán, 2016). Thornthwaite (1957) introdujo el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) para definir la cantidad de agua que perderá una superficie cubierta de vegetación por completo, en crecimiento activo, si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas. La evapotranspiración real (ETR) por su parte es la que efectivamente se produce teniendo en cuenta las condiciones de cobertura vegetal y la humedad. Esta es inferior a la ETP cuando falta agua en algunos periodos, ocurre variación en la evapotranspiración según el desarrollo de las plantas y cuando existen variaciones de las condiciones atmosféricas como la humedad, temperatura, etc.

Utilizando el método de Thornthwaite, se debe calcular la ETP sin y con corrección, es decir, aplicando un factor de corrección que tiene en cuenta la insolación máxima diaria en función de la latitud.

$$ETP_{sincorreger} = 16 * \left(\frac{10t}{I} \right) * a$$

t: Temperatura media mensual en °C

I: Índice térmico anual

a: Exponente que varía con I según la localidad

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j = i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0.0000771 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$

$$ETP_{corregida} = ETP_{sincorr} * \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

N: Insolación máxima diaria (Tabulado)

d: Número de días del mes

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó el cálculo para seis estaciones, Papayal es la estación excluida debido a que no tiene información sobre temperatura. Con respecto a el valor N, se puede consultar en el Anexo 2 siguiendo los valores de latitud.

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T °C	18.55	19.33	19.08	18.95	19.08	19.08	19.00	19.15	18.88	18.33	18.58	18.50
I	7.28	7.75	7.59	7.52	7.59	7.59	7.55	7.64	7.47	7.15	7.29	7.25
ETP sin corr	66.80	72.46	70.57	69.66	70.57	70.57	70.03	71.12	69.12	65.22	66.98	66.45
ETP con corr	67.60	66.80	72.92	70.25	74.43	72.03	73.86	74.40	69.12	66.83	65.60	67.80
I (índice anual)	a											
	89.67	1.97										

Tabla. 33 Evapotranspiración potencial estación Río Claro- La Batea.

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T °C	9.13	9.43	9.63	9.86	10.02	9.78	9.48	9.48	9.30	9.20	9.26	9.04
I	2.49	2.61	2.70	2.80	2.86	2.76	2.63	2.63	2.56	2.52	2.54	2.45
ETP sin corr	46.38	47.91	48.93	50.13	50.94	49.72	48.19	48.17	47.28	46.77	47.07	45.95
ETP con corr	46.94	44.17	50.56	50.55	53.73	50.75	50.83	50.39	47.28	47.92	46.10	46.88
I (índice anual)	a											
	31.55	1.00										

Tabla. 34 Evapotranspiración potencial estación Pirineos- Chec.

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T °C	5.40	5.64	5.48	5.25	5.56	5.24	4.85	4.90	4.85	4.93	5.17	5.18
I	1.12	1.20	1.15	1.08	1.17	1.07	0.95	0.97	0.95	0.98	1.05	1.05
ETP sin corr	44.55	45.95	45.02	43.67	45.49	43.61	41.28	41.58	41.28	41.78	43.18	43.23
ETP con corr	45.09	42.36	46.52	44.04	47.98	44.51	43.54	43.50	41.28	42.82	42.29	44.10
I (índice anual)	a											
	12.76	0.71										

Tabla. 35 Evapotranspiración potencial estación Q. Molinos PNNN.



Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T °C	13.00	13.03	13.23	13.30	13.52	13.12	13.20	12.78	13.46	12.48	12.75	12.68
I	4.25	4.26	4.36	4.40	4.51	4.31	4.35	4.14	4.48	3.99	4.13	4.09
ETP sin corr	53.61	53.74	54.82	55.22	56.41	54.25	54.68	52.43	56.09	50.81	52.28	51.88
ETP con corr	54.25	49.54	56.65	55.68	59.50	55.38	57.68	54.85	56.09	52.07	51.19	52.93
I (índice anual)	a											
	51.26	1.30										

Tabla. 36 Evapotranspiración potencial estación Q. Nereidas- Chec.

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T °C	17.03	17.44	17.60	17.56	17.74	17.42	17.48	17.60	17.20	16.92	16.92	16.90
I	6.39	6.63	6.72	6.70	6.80	6.62	6.65	6.72	6.49	6.33	6.33	6.32
ETP sin corr	61.93	64.61	65.65	65.39	66.57	64.48	64.87	65.65	63.05	61.27	61.27	61.14
ETP con corr	62.67	59.55	67.84	65.93	70.21	65.81	68.42	68.68	63.05	62.78	60.00	62.38
I (índice anual)	a											
	78.71	1.75										

Tabla. 37 Evapotranspiración potencial estación Río Claro- La Guayana.

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T °C	3.75	4.16	4.59	4.74	4.78	4.78	4.21	4.32	4.12	4.04	4.49	4.17
I	0.65	0.76	0.88	0.92	0.93	0.93	0.77	0.80	0.75	0.72	0.85	0.76
ETP sin corr	38.99	41.76	44.56	45.51	45.77	45.77	42.09	42.81	41.49	40.96	43.91	41.82
ETP con corr	39.46	38.49	46.04	45.89	48.27	46.71	44.39	44.78	41.49	41.97	43.00	42.67
I (índice anual)	a											
	9.72	0.66										

Tabla. 38 Evapotranspiración potencial estación Las Brisas.

De acuerdo a los resultados de la ETP corregida de las diferentes estaciones (Tabla. 39), este parámetro se considera relativamente bajo con respecto a otras zonas del país (Fig. 58), debido a que las temperaturas en la subcuenca Río Claro se encuentran entre los 4.35°C y los 18.87°C, dificultando la evapotranspiración potencial, aun así, el balance hídrico que se expone en el siguiente apartado, permite evaluar a mayor detalle este parámetro en relación a la

precipitación.

La estación Río Claro- La Batea es la que presenta mayor ETP seguido de Río Claro- La Guayana, debido a que son las estaciones que presentan mayor temperatura en todo el año, con respecto a las demás estaciones (Fig. 57), la más baja ETP se registra en la estación Las Brisas, al ubicarse en una altitud de 4212 msnm donde la temperatura promedio es de 4.35°C.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RíoClaro LaBatea	67.60	66.80	72.92	70.25	74.43	72.03	73.86	74.40	69.12	66.83	65.60	67.80
Pirineos	46.94	44.17	50.56	50.55	53.73	50.75	50.83	50.39	47.28	47.92	46.10	46.88
Q. Molinos PNNN	45.09	42.36	46.52	44.04	47.98	44.51	43.54	43.50	41.28	42.82	42.29	44.10
Q.Nereidas Chec	54.25	49.54	56.65	55.68	59.50	55.38	57.68	54.85	56.09	52.07	51.19	52.93
RíoClaro LaGuayana	62.67	59.55	67.84	65.93	70.21	65.81	68.42	68.68	63.05	62.78	60.00	62.38
Las Brisas	39.46	38.49	46.04	45.89	48.27	46.71	44.39	44.78	41.49	41.97	43.00	42.67

Tabla. 39 Evapotranspiración potencial corregida de las estaciones de trabajo.

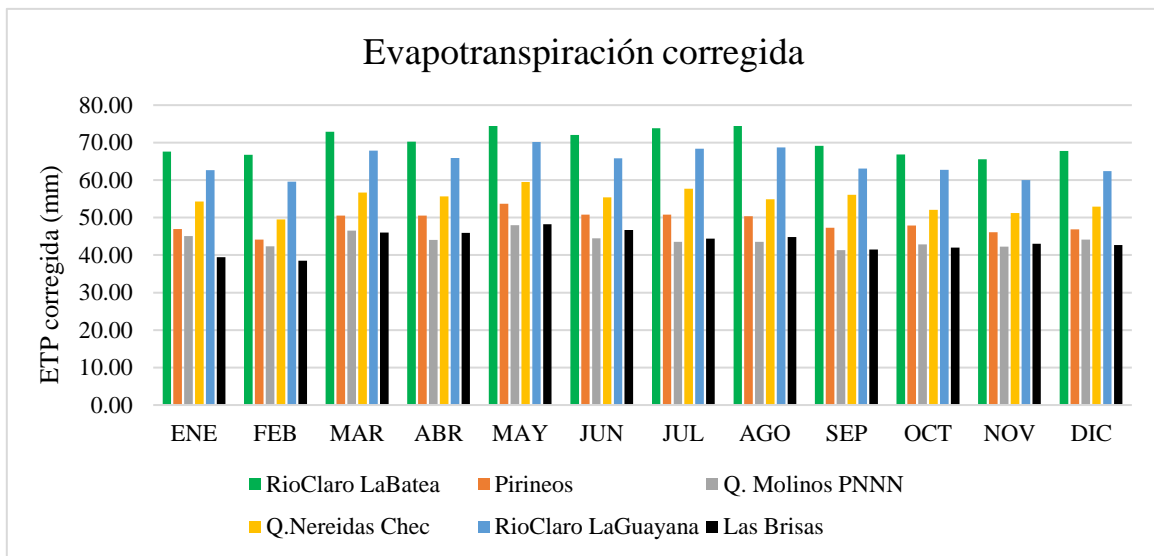


Fig. 57 Histograma de la evapotranspiración corregida de las estaciones de trabajo.

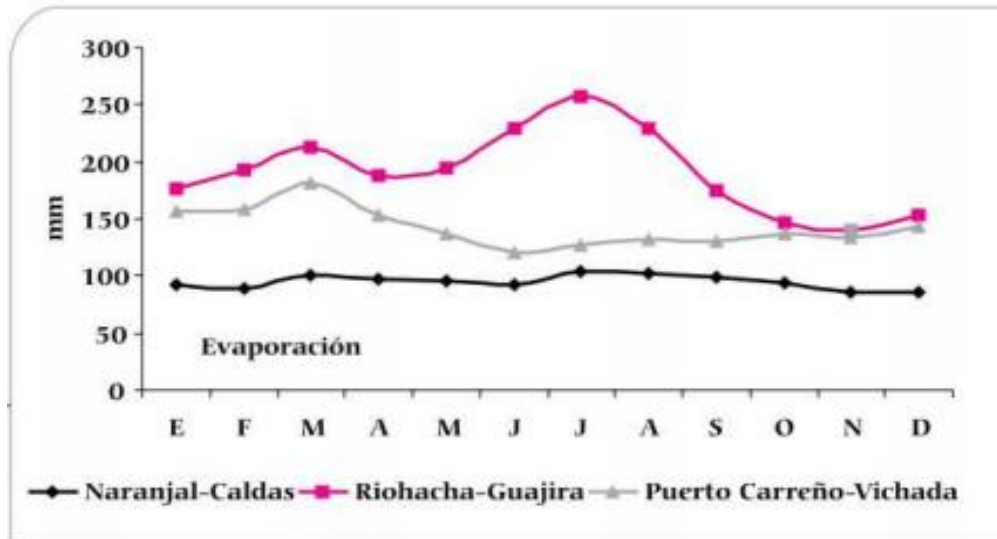


Fig. 58 Transcurso mensual de la evapotranspiración en algunas localidades de Colombia. Clima Andino y café en Colombia. Jaramillo, R.A. 2005.

Debido a que la ETP está relacionada directamente con la temperatura, su comportamiento durante el año es similar por lo que hay un decrecimiento de la ETP en épocas en las que hay una disminución de la temperatura, y de la misma forma se comporta cuando la temperatura aumenta.

9.5 Balance Hídrico

El balance hídrico es un balance de las entradas y salidas de agua en una zona hidrológica (SENAMHI, 2013), como la precipitación (recurso que ingresa al sistema), evapotranspiración potencial (recurso que sale) y almacenamiento. A partir de esta información se obtiene la magnitud de excesos, deficiencias de la cuenca y su evaporación real (Ingeniería Strycon, 2017).

La lluvia útil o utilizable, es parte de la precipitación total que satisface directamente las necesidades de agua de los cultivos (Dastane, 1978). La intensidad o la cantidad que se recibe de

lluvia no es necesariamente útil o necesaria en el momento, ya que una parte

puede ser usada por las plantas y el suelo (infiltración superficial) y otra puede causar efectos ambientales negativos (Cleves et al., 2016). La reserva por su parte, hace parte de la capacidad que tiene el suelo (capacidad de campo) para almacenar el agua y esta varía en función del tipo de suelo y cultivo que tenga un sector.

El balance hídrico por lo tanto, proporciona una medida del excedente o el déficit hídrico, el primero se debe a la recarga de agua en el suelo con la recuperación de la humedad, esta situación se presenta cuando las precipitaciones son elevadas y llenan la capacidad de campo máxima que se puede tener un suelo, también conocido como superávit; parte del agua que sobra, descarga directamente sobre los ríos ya sea porque fluye por escorrentía durante un periodo de tiempo, de manera superficial directa o subsuperficial (lo que se le conoce como circulación), y otra parte sobrepasa el alcance de las raíces infiltrándose totalmente en el suelo para recargar acuíferos, a lo que se le conoce como recarga efectiva (R) . Según la teoría de Thornthwaite, una mitad del agua que queda como excedente circula sobre los suelos y la otra mitad se infiltra en ellos. En contraste, el déficit ocurre en épocas de sequía, pues el suelo comienza a utilizar el agua acumulada generando pérdida de la humedad (Fig. 59).

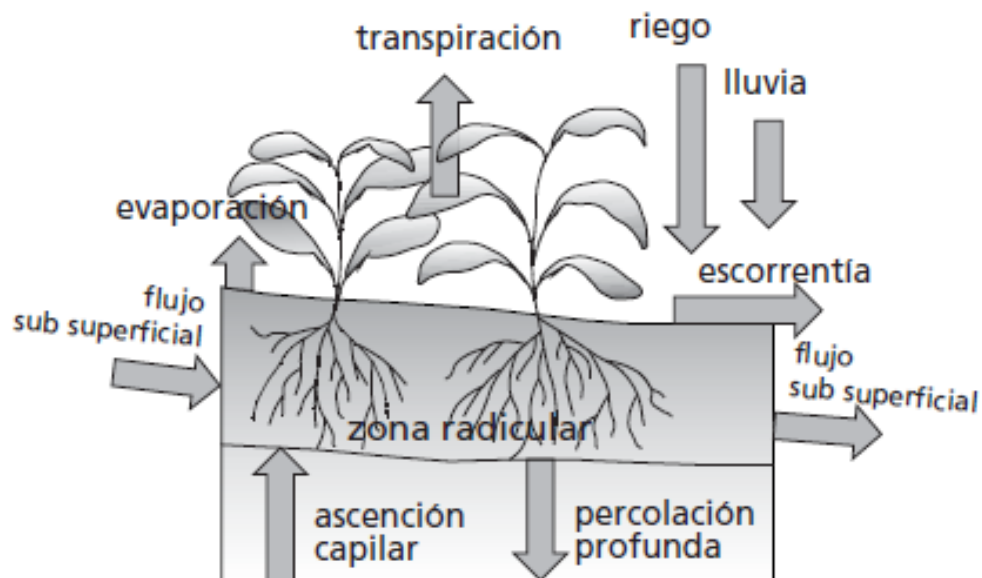


Fig. 59 Balance de agua en el suelo. Tomado de FAO, 2006.

Para calcular el balance hídrico en este estudio se utilizó el método de Thornthwaite que tiene en cuenta la ETP corregida, la precipitación media registrada por la estación y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo tomando un almacenamiento teórico máximo de 100 mm, este valor podría variar dependiendo el tipo de suelo que exista, este se puede conocer mediante ensayos de laboratorio que ayudan a determinar diferentes aspectos físicos; como su humedad, plasticidad, relación de vacíos, porosidad, saturación, etc. Existen también valores tabulados de la capacidad de retención que tiene el suelo, pero para utilizarlos es necesario también realizar ensayos de granulometría y llegar a una clasificación general de las tierras en estudio. El alcance de este estudio no cuenta con este tipo de estudio de suelos detallados, por ello se utiliza el valor que propone la teoría de Thornthwaite de 100 mm, sin embargo, a continuación, se presenta una

leve descripción de las unidades tanto geológicas como de suelo realizados en estudios anteriores para cada área de la estación.

Como con los parámetros anteriores, la estación Papayal se descarta debido a su ausencia en la data de temperatura. Por otro lado, la estación Río Claro- La Guayana no se pudo balancear por no cumplir con los parámetros para elegir el mes de inicio en el que se hace el balance hídrico, pues en todos los meses la precipitación es mayor a la evapotranspiración y en ningún mes se cumple lo contrario, es decir, que la evapotranspiración sea mayor a la precipitación; condición que es necesaria para conocer el mes de inicio del año hidrológico en cuestión.

9.5.1 Estación Río Claro- La Batea

La geología que rodea esta estación hace parte del Complejo Cajamarca representado por arenitas, shales negros, arenitas feldespáticas, lentes de chert y calizas afectadas por metamorfismo dinámico y conservando rasgos sedimentarios originales (González, 2001). Según el Plan de Gestión Ambiental de Caldas (2020), la UGS de área corresponde a cultivos permanentes y según el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Villamaría, los cultivos que predominan en el sector son de café, plátano, yuca, mora, granadilla, fresa, flores, maíz y fríjol.

	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
T °C	18.58	18.50	18.55	19.33	19.08	18.95	19.08	19.08	19.00	19.15	18.88	18.33
PPT (mm)	167.75	135.29	99.45	148.93	175.27	157.27	148.58	68.90	53.05	40.09	59.28	49.28
ETP (mm)	65.60	67.80	67.60	66.80	72.92	70.25	74.43	72.03	73.86	74.40	69.12	66.83
PPT útil (mm)	102.15	67.49	31.85	82.13	102.34	87.03	74.15	-3.14	-20.81	-34.31	-9.84	-17.56
Reserva (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	96.86	76.05	41.74	31.90	14.34
Excedente (mm)	2.15	69.65	31.85	82.13	102.34	87.03	74.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit (mm)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETR real (mm)	65.60	67.80	67.60	66.80	72.92	70.25	74.43	72.03	73.86	74.40	69.12	66.83
Humedad disponible (mm)	31.90	14.34	102.15	167.49	131.85	182.13	202.34	187.03	174.15	96.86	76.05	41.74
Infiltración (R) (mm)	0.00	0.00	1.08	33.75	15.92	41.07	51.17	43.51	37.07	0.00	0.00	0.00
Circulación (mm)	0.00	0.00	1.08	33.75	15.92	41.07	51.17	43.51	37.07	0.00	0.00	0.00

Tabla. 40 Balance hídrico estación Río Claro- La Batea.

Los resultados del balance hídrico para la estación Río Claro-La Batea se presentan en la Tabla. 40, donde se observa que el área que cubre la estación no presenta un déficit de agua en ninguna época del año. La PPT útil presenta valores negativos en los meses en que la precipitación disminuye (junio-octubre) por lo que la reserva de campo también lo hace, de modo que no se presentan excedentes. En los meses de mayor precipitación (enero-mayo y noviembre-diciembre) ocurre lo opuesto; la reserva de campo está llena por lo que se presentan excedentes. En ninguno de los casos existe un déficit hídrico, lo que ocurre realmente es que los meses en los que hubo excedente, el suelo y las plantas utilizan esa agua y disminuye la humedad. Por otra parte, con el balance hídrico se puede evidenciar que la ETP es igual a la ETR dado a que durante todo el año no se presenta déficit que pueda ocasionar un cambio entre la ETP y ETR. En los meses de inicio del año hidrológico se presenta excedente y según la teoría de Thornthwaite, $\frac{1}{2}$ de esta cantidad estaría en circulación mientras que la otra $\frac{1}{2}$ se incorpora a la zona saturada del suelo como recarga efectiva.

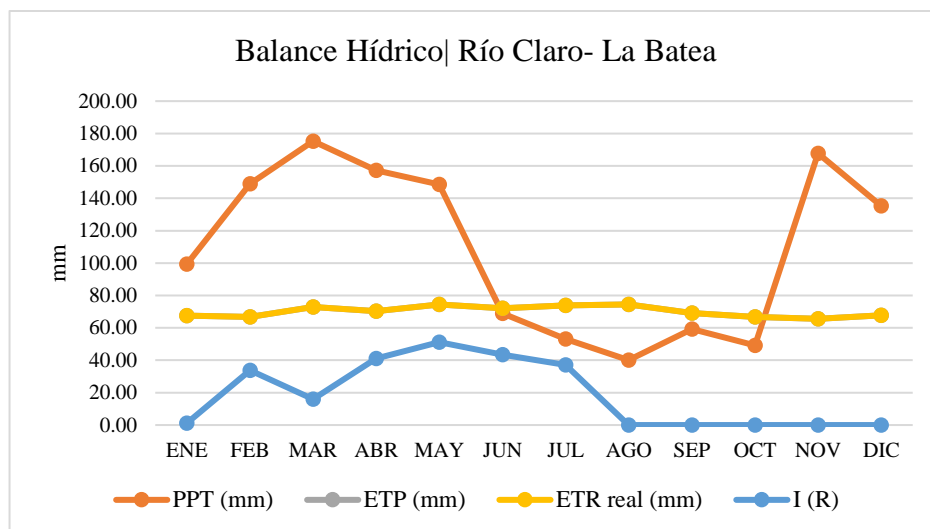


Fig. 60 Balance hídrico estación Río Claro- La Batea.

9.5.2 Estación Pirineos- Chec

Esta estación está rodeada de rocas andesíticas del Nevado del Ruíz; son un conjunto de rocas del cuello volcánico (González, 2001). De acuerdo al Plan de Gestión Ambiental de Caldas (2020), el sector hace parte de las áreas abiertas sin o con poca vegetación, Delgado (2020) por su parte, describe esta cobertura de suelo, como un desierto periglacial representado por arenas finas que no cuenta con nieves perpetuas ni superficie glaciar, es de hecho un área en donde anteriormente existía glaciar.

	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
T °C	18.58	18.50	18.55	19.33	19.08	18.95	19.08	19.08	19.00	19.15	18.88	18.33
PPT (mm)	167.75	135.29	99.45	148.93	175.27	157.27	148.58	68.90	53.05	40.09	59.28	49.28
ETP (mm)	65.60	67.80	67.60	66.80	72.92	70.25	74.43	72.03	73.86	74.40	69.12	66.83
PPT útil (mm)	102.15	67.49	31.85	82.13	102.34	87.03	74.15	-3.14	-20.81	-34.31	-9.84	-17.56
Reserva (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	96.86	76.05	41.74	31.90	14.34
Excedente (mm)	2.15	69.65	31.85	82.13	102.34	87.03	74.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit (mm)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETR real (mm)	65.60	67.80	67.60	66.80	72.92	70.25	74.43	72.03	73.86	74.40	69.12	66.83
Humedad disponible (mm)	31.90	14.34	102.15	167.49	131.85	182.13	202.34	187.03	174.15	96.86	76.05	41.74
Infiltración (R) (mm)	1.08	33.75	15.92	41.07	51.17	43.51	37.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Circulación (mm)	1.08	33.75	15.92	41.07	51.17	43.51	37.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla. 41 Balance hídrico estación Pirineos- Chec.

El balance hídrico en la estación Pirineos-Chec (Tabla. 41) presenta déficit en el mes de enero y julio, meses con la menor precipitación, por lo tanto, la ETP y la ETR en estos meses varían entre ellos. Los periodos que presentan excedente van de febrero-junio y noviembre-diciembre, pues la reserva está llena debido a la recarga de agua y debido a esto, el suelo recupera su humedad y con ello la mitad de esta agua se va por circulación en el suelo y la otra mitad se infiltra. El mes con mayor exceso es el mes de noviembre con 72.38mm y el de menor valor en el mes de junio con 11.37mm.

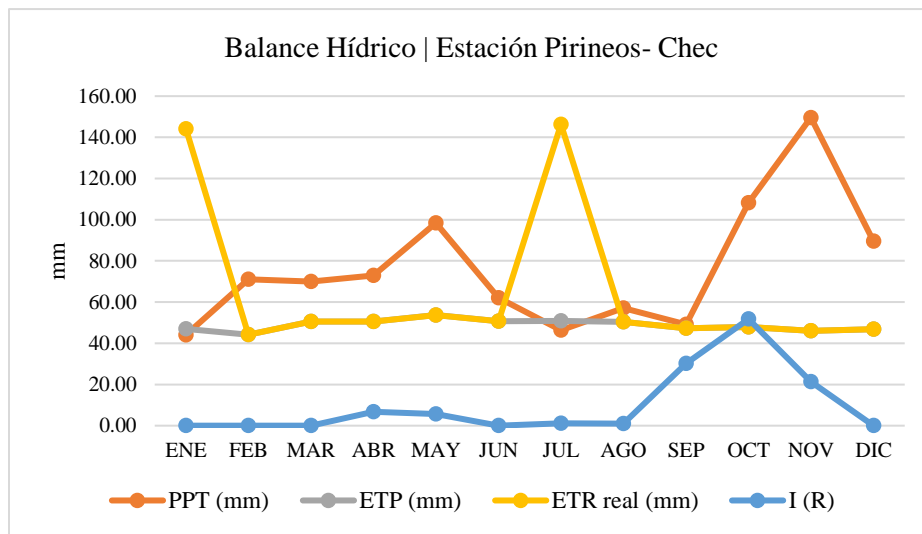


Fig. 61 Balance hídrico estación Pirineos- Chec.

9.5.3 Estación Q. Molinos PNNN

Esta estación se sitúa geológicamente sobre depósitos glaciares detríticos con fragmentos de bloques de lavas dentro de una matriz arcillosa formados por uno de los eventos eruptivos recientes del VNR (González, 2001). De acuerdo al Plan de Gestión Ambiental de Caldas

(2020), el sector hace parte de las áreas abiertas sin o con poca vegetación, Delgado (2020) por su parte, describe esta cobertura de suelo, como un desierto periglacial representado por arenas finas que no cuenta con nieves perpetuas ni superficie glacial, es de hecho un área en donde anteriormente existía glacial.

	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE
T °C	5.64	5.48	5.25	5.56	5.24	4.85	4.90	4.85	4.93	5.17	5.18	5.40
PPT (mm)	57.32	74.14	92.87	85.59	44.01	20.10	17.16	44.71	89.11	111.88	45.61	43.57
ETP (mm)	42.36	46.52	44.04	47.98	44.51	43.54	43.50	41.28	42.82	42.29	44.10	45.09
PPT útil (mm)	14.96	27.62	48.83	37.61	-0.50	-23.44	-26.34	3.43	46.29	69.59	1.51	-1.52
Reserva (mm)	14.96	42.58	91.41	100.00	99.50	76.05	49.71	53.14	99.43	100.00	100.00	98.48
Excedente (mm)	0.00	0.00	0.00	29.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	69.03	1.51	0.00
Déficit (mm)		0.00	0.00	0.00	-99.50	-76.05	-49.71	0.00	0.00	0.00	0.00	-98.48
ETR real (mm)	42.36	46.52	44.04	47.98	144.01	119.60	93.21	41.28	42.82	42.29	44.10	143.57
Humedad disponible (mm)	42.58	91.41	129.03	99.50	76.05	49.71	53.14	99.43	169.03	101.51	98.48	14.96
Infiltración (R) (mm)	0.00	0.00	0.00	14.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.51	0.75	0.00
Circulación (mm)	0.00	0.00	0.00	14.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.51	0.75	0.00

Tabla. 42 Balance hídrico estación Q. Molinos PNNN.

En la estación Q. Molinos PNNN hay cambios particulares entre la ETP y la ETR (Tabla. 42) debido a la presencia de déficit en los meses con menor precipitación (enero y junio-agosto), en esta época del año hubo un gasto de la reserva que se había acumulado durante los otros meses, lo que genera una pérdida de humedad en el suelo y por lo tanto el déficit hídrico. Los meses en los que no hay déficit, la ETP es igual a la ETR y los excesos están presentes en los meses de mayo y noviembre, periodos de alta precipitación que generan infiltración superficial (circulación) y profunda que se va como recarga efectiva.

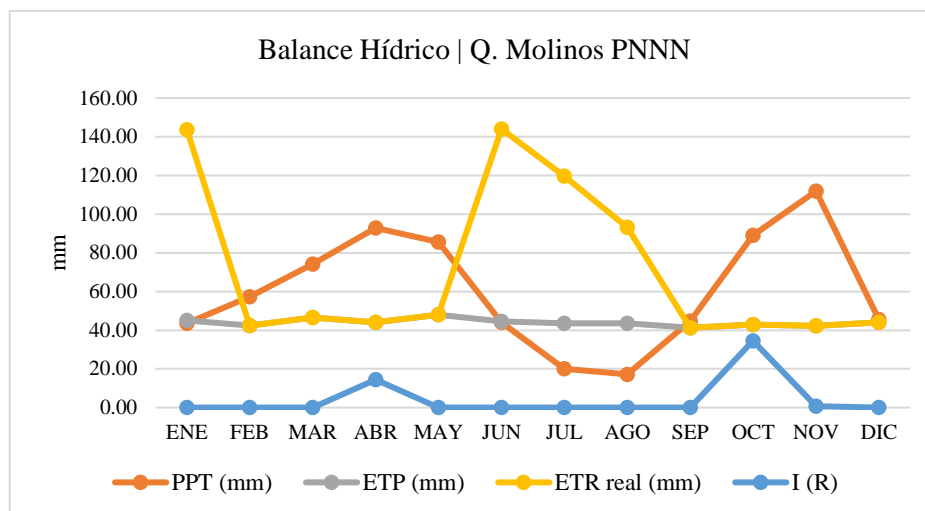


Fig. 62 Balance hídrico estación Q. Molinos PNNN.

9.5.4 Estación Q. Nereidas- Chec

La geología que rodea el sector de esta estación hace parte de las andesitas del Nevado del Ruíz que son un conjunto de rocas del cuello volcánico (González, 2001). Según el Plan de Gestión Ambiental de Caldas (2020), el sector hace parte de las áreas agrícolas heterogéneas y según el EIA de Ingeniería Strycon S.A.S (2017) para CHEC – Grupo EPM, hace parte de la unidad SRg que son suelos con muchos afloramientos rocosos cubiertos por vegetación arbustiva y arbórea, su textura va de limo arenosa a arenosa con rocas sin estructura.

	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE
T °C	13.00	13.03	13.23	13.30	13.52	13.12	13.20	12.78	13.46	12.48	12.75	12.68
PPT (mm)	99.45	97.53	100.60	121.25	82.44	72.88	61.07	101.20	141.60	137.40	76.20	42.55
ETP (mm)	49.54	56.65	55.68	59.50	55.38	57.68	54.85	56.09	52.07	51.19	52.93	54.25
PPT útil (mm)	49.91	40.88	44.92	61.75	27.06	15.20	6.22	45.11	89.53	86.21	23.27	-11.70
Reserva (mm)	49.91	90.79	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	88.30
Excedente (mm)	0.00	0.00	35.71	61.75	27.06	15.20	6.22	45.11	89.53	86.21	23.27	0.00
Déficit (mm)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETR real (mm)	49.54	56.65	55.68	59.50	55.38	57.68	54.85	56.09	52.07	51.19	52.93	54.25
Humedad disponible (mm)	90.79	135.71	161.75	127.06	115.20	106.22	145.11	189.53	186.21	123.27	88.30	49.91
Infiltración (R) (mm)	0.00	0.00	17.86	30.88	13.53	7.60	3.11	22.56	44.77	43.11	11.64	0.00
Circulación (mm)	0.00	0.00	17.86	30.88	13.53	7.60	3.11	22.56	44.77	43.11	11.64	0.00

Tabla. 43 Balance hídrico estación Q. Nereidas-Chec.

En el balance hídrico de la estación Q. Nereidas-Chec (Tabla. 43), no se registra déficit debido a que la reserva se encuentra llena para la mayoría de los meses exceptuando el mes de enero que presenta una reserva menor a 90 mm, así mismo, en este mes la precipitación útil presenta un valor negativo interpretándose como un periodo en el que la precipitación disminuye pues el suelo y las plantas están utilizando el excedente del mes anterior, con una reserva que en los meses siguientes, comienza a llenarse de nuevo hasta quedar completamente llena en el mes de abril, de esta manera, se encuentran excedentes debido a que la capacidad de campo está completa lo que genera a su vez una cantidad de agua en circulación superficial y subsuperficial, y agua infiltrada. Asociado a la ausencia de déficit en esta estación, la ETP es igual a la ETR.

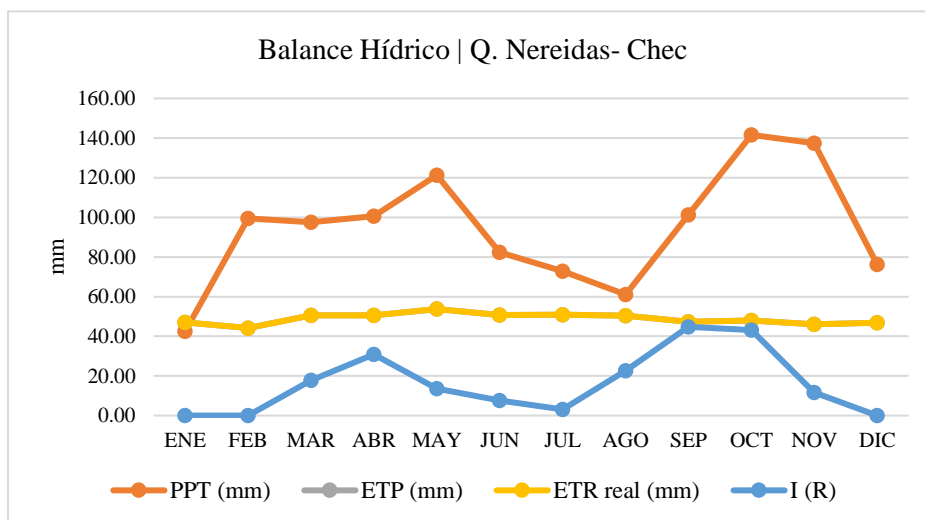


Fig. 63 Balance hídrico estación Q. Nereidas-Chec.

9.5.5 Estación Las Brisas

La geología que rodea esta estación son depósitos piroclásticos no consolidados de ceniza, lapilli y cantos de pumita que suavizan las geoformas del sector, localmente con lentes arenosos de origen glaciario (González, 2001). Según el Plan de Gestión Ambiental de Caldas (2020), el sector hace parte de las áreas abiertas sin o con poca vegetación, Delgado (2020) por otro lado, define estas UGS como afloramientos rocosos de origen volcánico con ausencia o poca vegetación primaria.

	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
T °C	4.12	4.04	4.49	4.17	3.75	4.16	4.59	4.74	4.78	4.78	4.21	4.32
PPT (mm)	82.38	157.54	137.57	74.12	58.24	83.62	114.51	148.31	81.54	115.68	88.13	39.46
ETP (mm)	41.49	41.97	43.00	42.67	39.46	38.49	46.04	45.89	48.27	46.71	44.39	44.78
PPT útil (mm)	40.89	115.57	94.57	31.45	18.78	45.13	68.47	102.42	33.27	68.97	43.74	-5.32
Reserva (mm)	40.89	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	94.68
Excedente (mm)	0.00	56.46	94.57	31.45	18.78	45.13	68.47	102.42	33.27	68.97	43.74	0.00
Déficit (mm)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-94.68
ETR real (mm)	41.49	41.97	43.00	42.67	39.46	38.49	46.04	45.89	48.27	46.71	44.39	139.46
Humedad disponible (mm)	133.27	168.97	143.74	94.68	40.89	156.46	194.57	131.45	118.78	145.13	168.47	202.42
Infiltración (R) (mm)	0.00	28.23	47.29	15.73	9.39	22.57	34.24	51.21	16.64	34.49	21.87	0.00
Circulación (mm)	0.00	28.23	47.29	15.73	9.39	22.57	34.24	51.21	16.64	34.49	21.87	0.00

Tabla. 44 Balance hídrico estación Las Brisas.

Los resultados del balance hídrico de la estación Las Brisas (Tabla. 44) solo presenta déficit hídrico en el mes de agosto, mes con la precipitación más baja, por lo tanto, en este mes la ETP es diferente a la ETR. Exceptuando agosto-septiembre, todos los meses presentan un excedente, debido a que la capacidad de campo se encuentra llena por las altas precipitaciones dándole paso al agua a que parte de este excedente se vaya por escorrentía y tenga una infiltración subsuperficial, y otra porción de este excedente tenga una recarga efectiva; el mes con mayor excedente es abril con 102.42mm y el de menor valor es en enero con 18.78mm.

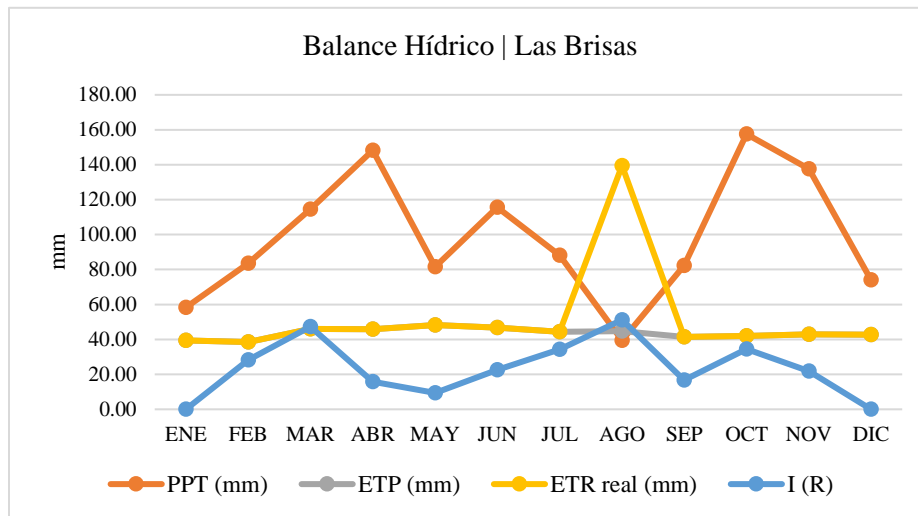


Fig. 64 Balance hídrico estación Las Brisas.

En conclusión, durante los años 2016-2020, en la subcuenca Río Claro (Tabla. 45), hubo un excedente promedio de 347.058 mm en toda la cuenca y un déficit de 122.03 mm en las partes más altas de ella. Del total de lluvia que cayó sobre la cuenca, un promedio de 172.528 mm se infiltró en forma de recarga efectiva (R), mientras que esta misma cantidad estuvo en circulación, cabe destacar que, de esta agua en circulación, una parte se va como escorrentía superficial directa y otra como escorrentía subsuperficial, ambas llegan directamente al río principal y su cantidad varía en función del tipo de suelo que hay en el área. Es imperativo recordar que estos datos nacen del cálculo del balance hídrico suponiendo una capacidad de almacenamiento en el suelo de 100 mm según el método utilizado, por lo que se propone hacer estudios detallados de suelo en la subcuenca para conocer sus características físicas y agrológicas para conocer la permeabilidad de los suelos y que den a este tipo de estudios, mayor alcance para determinar la dinámica de precipitación que ocurre dentro de la subcuenca. Además, estos valores son datos mínimos de infiltración, déficit, exceso y precipitación, pues se basan en datos de cinco

estaciones para toda la cuenca.

Estación	Excedente (mm)	Déficit (mm)	Infiltración(R) (mm)	Circulación (mm)
Río Claro - La Batea	447.15	0	223.57	223.57
Q. Nereidas - Chec	390.06	0	195.03	195.03
Pirineos - Chec	235.26	192.61	117.63	117.63
Q. Molinos PNNN	99.56	323.74	44.78	44.78
Las Brisas	563.26	94.68	281.63	281.63
TOTAL	1735.29	611.03	862.64	862.64
Prom	347.058	122.206	172.528	172.528

Tabla.45 Resumen del balance hídrico de la subcuenca Río Claro.

Con respecto a las aguas infiltradas según el balance hídrico, un promedio multianual de 172.53 mm son de recarga efectiva para la subcuenca de Río Claro. Con las aguas que se van directamente al reservorio, se tomó la altitud de 3800 msnm, que corresponde a la zona de recarga más activa ya que es zona de páramo y los suelos tienden a ser más arenosos, por ende, se genera mayor infiltración, mientras que altitudes más bajas de esta cota son suelos más compactos que posiblemente tienen una tasa de infiltración menor. De modo que se toma un promedio ponderado que tiene en cuenta el área de influencia de las estaciones Q. Nereidas – Chec, Pirineos – Chec, Q. Molinos PNNN y Las Brisas que son las de mayor altitud, dando un promedio de infiltración de 130.03 mm en un área de 87.046 Km², es decir, un caudal de entrada de 359.10 L/s que se pensaría son las aguas que van directamente a recargar el reservorio del sistema geotérmico.

10. Fuentes termales

Las aguas termales se generan cerca de focos volcánicos activos. Se puede entender como un ciclo que comienza con la infiltración del agua lluvia; ésta se percola hasta profundidades significativas, en su proceso de circulación a profundidad, se encuentra con fuentes de calor que la calientan mientras transita por diferentes espacios mezclándose a su vez con componentes que mineralizan y cargan el agua de iones, finalmente se topa con alguna discontinuidad o fractura que hace que el agua previamente calentada se transporte hasta la superficie (Fig. 65).

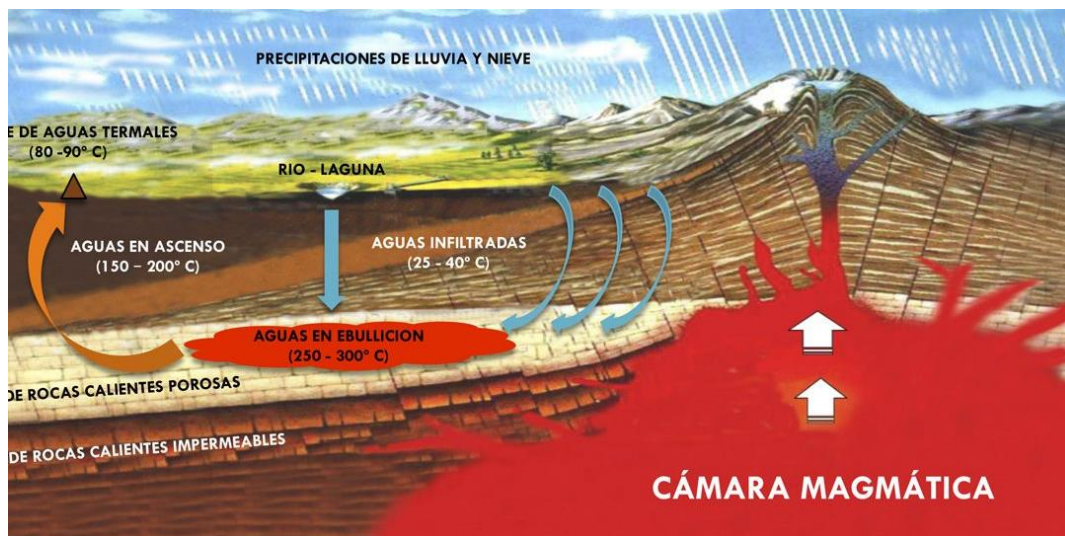


Fig. 65 Origen de las aguas termales. Tomado de : [Termasgeometricas.cl](http://www.termasgeometricas.cl)
<https://www.termasgeometricas.cl/2019/09/05/como-se-originan-las-aguas-termales/>

Alfaro, et al. (2002) describe 10 fuentes termales en este sector, haciendo referencia a la zona 4 del Complejo Cerro Bravo- Cerro Machín (Fig. 4), en las que se encuentran temperaturas desde los 12°C hasta los 92°C (Tabla.46), de los manantiales La Poa y Botero Londoño respectivamente, esta ultimo comprende uno de los sistemas de alta temperatura de aguas cloruradas, las fuentes termales de Las Nereidas oscilan entre los 28°C y 46°C de aguas

bicarbonatadas, por otro lado, El Recodo y Chorro Negro son aguas sulfatadas a temperaturas de 54°C y 51°C respectivamente (Fig. 66).

El Servicio Geológico Colombiano por su parte, reúne 20 manifestaciones termales en las que adiciona algunas del sector Botero Londoño, los manantiales de Laguna Alta y de Termales del Otoño y del Ruiz (Tabla. 47), estas fuentes fueron las que tuvo en cuenta Ingeniería Strycon S.A.S en el estudio de impacto ambiental que realizó para CHEC en el año 2016.

Aricapa (2020), reúne información fisicoquímica desde los 80's hasta el 2014 de distintas fuentes según el manantial estudiado, en algunos de ellos solo se dispone de un solo muestreo (Tabla. 48), en su estudio expone un posible recorrido de las aguas en profundidad, mezcla con agua somera, años de recorrido de las mimas, todo esto según los resultados químicos analizados a partir de los elementos mayores, menores, traza y en algunos casos de muestras de vapor.

No.	Fuente termal	T °C	pH	Conductividad μS/cm	Clasificación Climática
1	Hacienda Termales Botero Londoño I	92	7.04	3400	Clorurada
2	Hacienda Termales Botero Londoño II	93	7.22	3800	Clorurada
3	El Billar	92	7.42	3600	Clorurada
4	La Piscina	57	6.27	2700	
5	El Recodo	54	6.42	1300	Sulfatada
6	Chorro Negro	51	6.31		Sulfatada
7	Las Nereidas I	46	5.81	810	Bicarbonatada
8	Las Nereidas II	28	6.21	540	Bicarbonatada
9	El Bosque	34	6.16	2800	
10	La Poa	12	6.42	60	

Tabla. 46 Recopilación de fuentes termales de la zona 4 del Complejo Cerro Bravo- Cerro Machín. Tomado y modificado de Alfaro, et al.(2002).

No.	Fuente termal	T °C	pH	Conductivida d μ S/cm	Clasificaicón Climática
1	Botero Londoño	95	7.6	3610	Clorurada
2	Botero Londoño Q. Nereidas	84	6.7	3880	Clorurada
3	Botero Londoño Hacienda El Plan	46	6.11	3230	Clorurada
4	Botero Londoño La Piscina	5	6.26	2468	Clorurada
5	Botero Londoño La Quinta	88	7.78	3430	Clorurada
6	Chorro Negro	53	6.5	1178	Sulfatada
7	Hacienda Termales	30	6.73	139.2	Bicarbonatada
8	La Gruta	29.5	1.97	5850	Sulfatada
9	La Poa	27	6.1	1328	Bicarbonatada
10	Laguna Alta I	51	6.97	2825	Clorurada
11	Laguna Alta II	62.5	6.58	4900	Clorurada
12	Laguna Alta III	67.5	6.19	2670	Clorurada
13	Mina de Hierro I	44.5	1.74	8570	Sulfatada
14	Mina de Hierro II	53	1.73	8410	Sulfatada
15	Nereidas I	53	6.24	709	Bicarbonatada
16	Nereidas II	46	5.94	1193	Bicarbonatada
17	Termales del Otoño	48	1.71	9070	Sulfatada
18	Termales del Ruiz I	63	1.62	10650	Sulfatada
19	Termales del Ruiz II	62.5	1.61	10540	Sulfatada
20	Termales del Ruiz III	58	1.61	1023	Sulfatada

Tabla. 47 Fuentes termales del proyecto Geotérmico del Ruiz que tomó Ingeniería Strycon S.A.S del SGC. Tomado y modificado de EIA de Ingeniería Strycon S.A.S (2016).

No.	Fuente termal	T °C	pH	Conductividad d μ S/cm	Clasificación Piper Lengelier
1	Botero Londoño	91.92	7.59	3175	Clorurada y/o sulfatada sodica
2	Hacienda El Plan	46	6.11	3230	Clorurada y/o sulfatada sodica
3	La Piscina	58.67	6.62	2468	Clorurada y/o sulfatada sodica
4	La Quinta	91.75	7.65	2300-3610	Clorurada y/o sulfatada sodica
5	Hacienda Termales	30.6	6.73	139.29	Clorurada y/o sulfatada sodica
6	Botero Londoño Q. Nereidas	84	6.7		Clorurada y/o sulfatada sodica
7	Laguna Alta I	51	6.71		Clorurada y/o sulfatada sodica
8	Laguna Alta II	62.5	6.58		Clorurada y/o sulfatada sodica
9	Laguna Alta III	67.5	6.19		Clorurada y/o sulfatada sodica
10	El Recodo (Chorro Negro)	53.7	6.4	1239	Sulfato-sódica
11	Nereidas I	48.5	6.05	810	Bocarbonatada cálcica y/o magnésica
12	Nereidas II	46	5.94	1196	Bocarbonatada cálcica y/o magnésica

Tabla. 48 Fuentes termales del Valle Nereidas. Aricapa (2020).

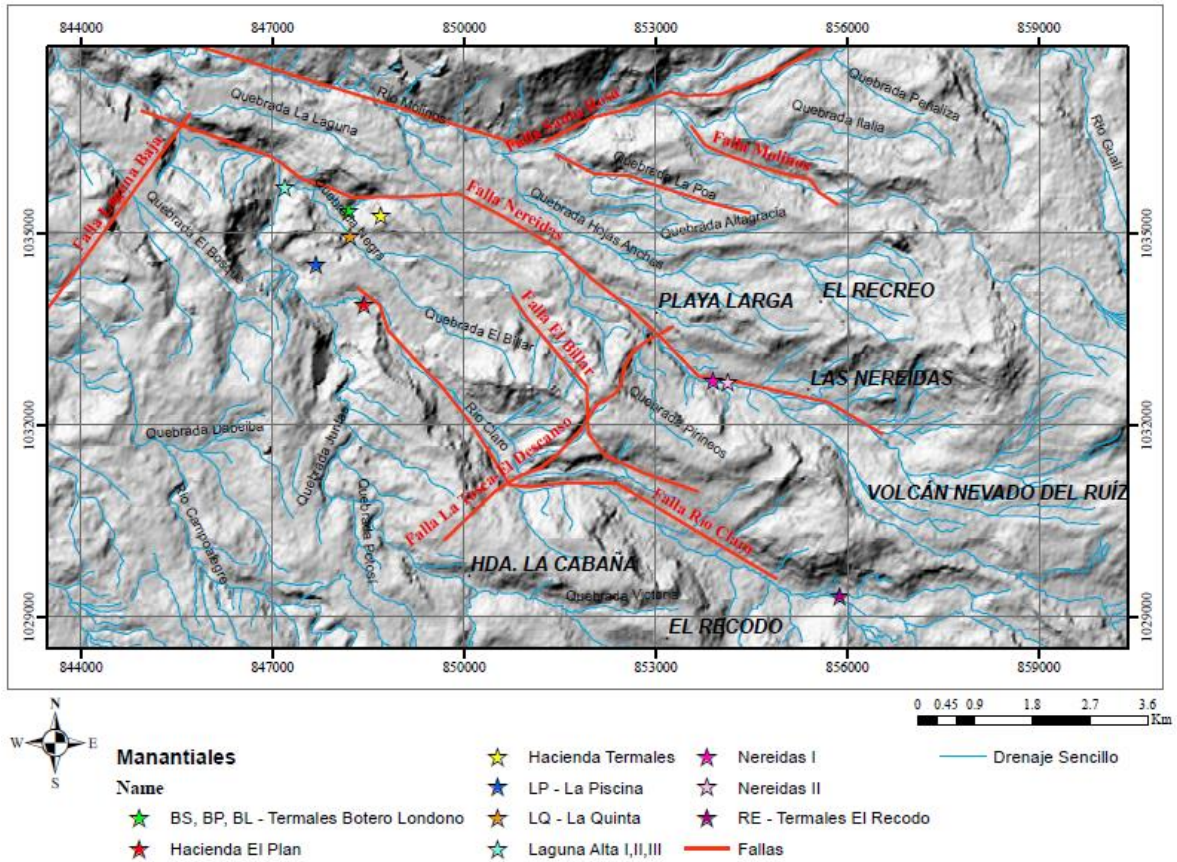


Fig. 66 Fuentes termales al oeste del Volcán Nevado del Ruíz. Cartografía base tomada del IGAC plancha 225.

El área de interés geotérmico está dividida en tres sectores al oeste del Volcán Nevado del Ruíz correspondiente a las aguas termales de la zona Botero Londoño que incluye siete manantiales (Termales Botero Londoño; Hacienda El Plan; Hacienda Termales; La Piscina; La Quinta; Laguna Alta I, II, III), Las Nereidas y El Recodo.

Aricapa (2020) realiza un estudio en el que hace una comparación entre datos históricos, en los que incluye información de GESA (1980), CONTECOL (1982), Giggenbach et al. (1990), Servicio Geológico Colombiano (2012), Grupo Dewhurst SAS (2013), Sánchez (2014), Universidad de Caldas (2014). En su investigación, diferencia los tres sectores mencionados a

partir de la química de estas aguas y de los gases de los que se tienen registros, información que se resume a continuación.

Las aguas de Botero Londoño se caracterizan por ser aguas altamente salinas clasificadas como cloruradas y/o sulfato sódicas, se consideran aguas maduras con un grado de madurez parcial, su origen se relaciona principalmente con aguas mezcladas con procesos de desgasificación por su alto contenido de CO₂. La temperatura de su reservorio oscila entre 177.60 y 302.62°C según el geotermómetro utilizado.

El sector Las Nereidas tiene aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas con un único flujo ascendente, en ella se generan procesos de poca profundidad por lo que se les considera aguas inmaduras de mezcla entre aguas meteóricas calentadas por gases volcánicos. El reservorio presenta temperatura de alrededor de 300°C.

En El Recodo las aguas presentan cierto grado de salinidad con menor proporción de cloro por lo que se clasifica como aguas sulfato sódicas, al igual que Las Nereidas; presenta un único flujo ascendente de aguas calentadas por vapor y agua meteórica superficial que está mezclada, de esta manera se generan procesos de poca profundidad lo que las convierte en aguas inmaduras.

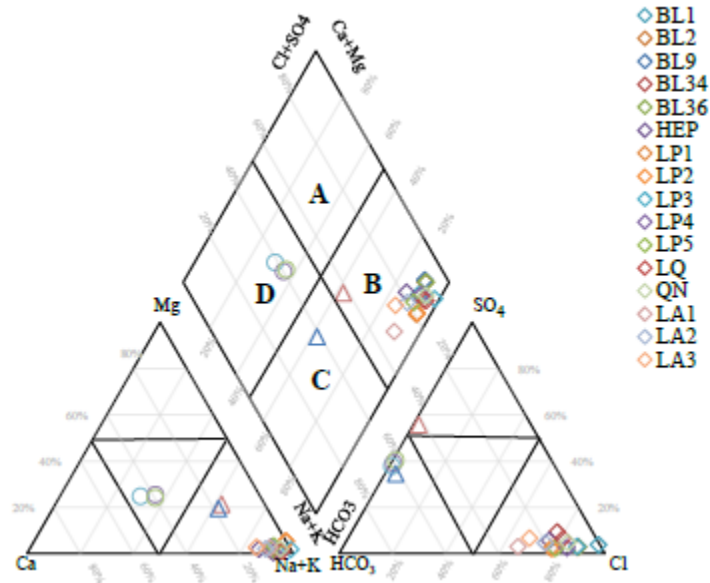


Fig. 67 Diagrama de Piper-Lengelier; las letras indican: **A)** Aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas, **B)** Cloruradas y/o sulfatadas sódicas, **C)** Bicarbonatadas sódicas, **D)** Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas. Tomado de Aricapa (2020).

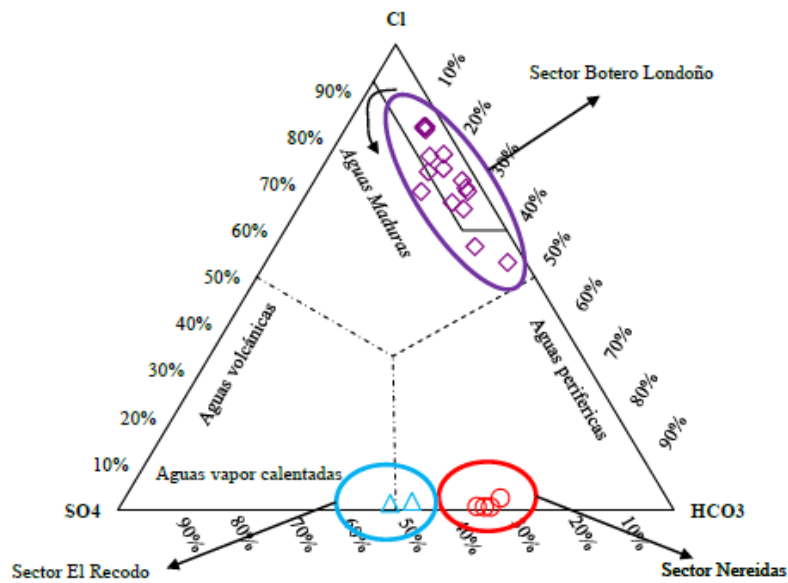


Fig. 68 Diagrama CSH. Tomado de Aricapa (2020).

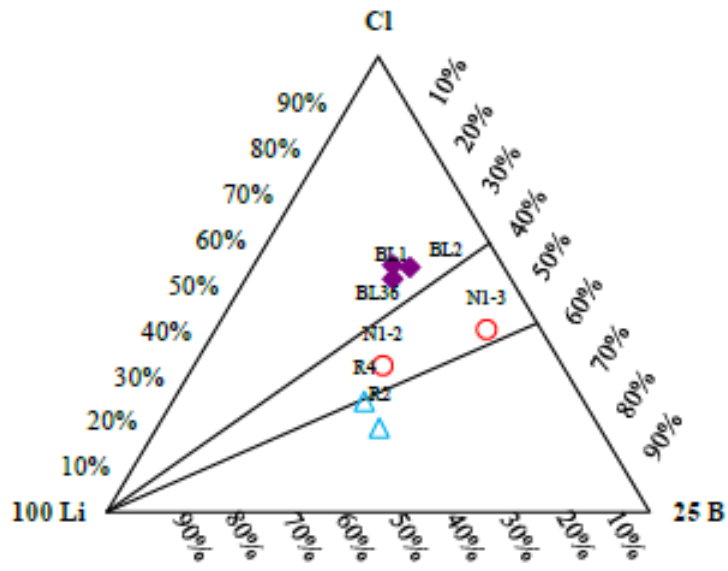


Fig. 69 Diagrama ternario Cl-Li-B. Tomado de Aricapa (2020).

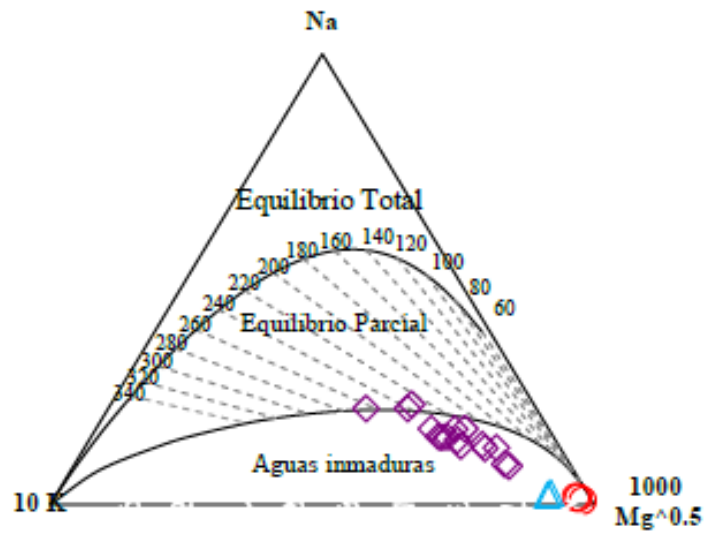


Fig. 70 Diagrama K-Na-Mg. Tomado de Aricapa (2020).

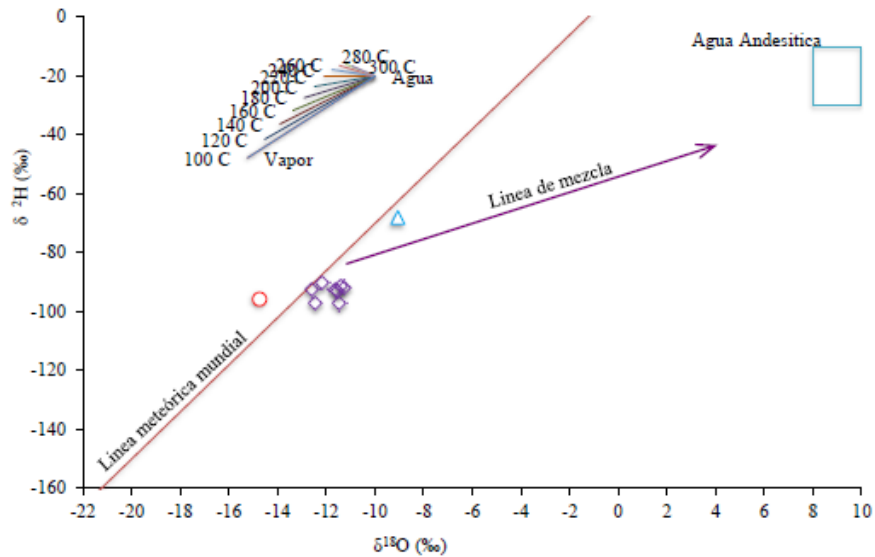


Fig. 71 Diagrama δD y $\delta O18$. Tomado de Aricapa (2020).

Finalmente, Aricapa (2020) explica que el sector del oeste (Botero Londoño) son aguas con alto contenido de Cl, K, Na, Li y F disueltos y como son aguas que no han tenido un gran recorrido tienen mucho contenido de sólidos disueltos, por ende, mayor conductividad. Las aguas del este por su lado (Las Nereidas y El Recodo), tienen alta concentración de sulfatos, Mg, HCO₃ y Ca en las que se encuentran zonas de ascenso de vapor con depósitos de carbonatos por la pérdida de CO₂ y presencia de fumarolas, de origen principalmente meteórico con recarga mayor a los 4000 msnm. En cuanto a la temperatura, se evidencia un aumento de la zona este a la oeste.

Según Díaz et al. (2014) hay una posible curvatura dilatacional asociada a la falla Nereidas que interactúa con otras fallas ubicadas en el Valle de Nereidas, sobre las quebradas Nereidas y El Billar, en las que justamente se encuentran fuentes termales. Al sistema de fallas

transversales en dirección NW-SE (Falla Nereidas) se le atribuye una de las

zonas de ascenso junto con la falla de Río Claro haciendo parte de las estructuras deformativas responsables del control del paso de los fluidos (Mejía et al., 2012).

Las aguas termales de este estudio tienen interacción con los afluentes Río Claro, Quebrada Nereidas y quebrada El Billar; lo que genera un aporte de algunas de las condiciones físico-químicas al caudal de estos cauces (Fig. 73). Se tomaron entonces, los datos físico-químicos de los manantiales y de las aguas de los afluentes antes y después de su interacción con los termales con sonda multiparamétrica HANNA, el parámetro de pH no había sido calibrado recientemente por lo que sus datos podrían estar desplazados de la realidad, pero son importantes desde la medición relativa. Todo esto, con el fin de encontrar un caudal de aporte de los manantiales a estos ríos y quebradas.

Con respecto a la obtención de cálculo de recarga de los caudales aforados, se realizó con el equipo Chec- Grupo EPM en las salidas de campo, utilizando el método área-velocidad. Se trata de uno de los métodos directos que consiste en medir el área de una sección transversal del cauce aforado, en el que se hace un levantamiento topográfico con ayuda de una cinta métrica y un equipo topográfico que permite determinar la profundidad en la sección. Luego de esto, la sección se divide en tramos iguales en los que posteriormente se mide la velocidad en cada vertical con un molinete hidrométrico a 0.2 m, 0.6 m y 0.8 m de la profundidad total (Fig. 72). Si la profundidad del cauce en ese punto de aforo es menor a 0.6 m, se mide la velocidad solo a 0.6 m considerándose una medida representativa de la velocidad media de la vertical (IDEAM, 2018).

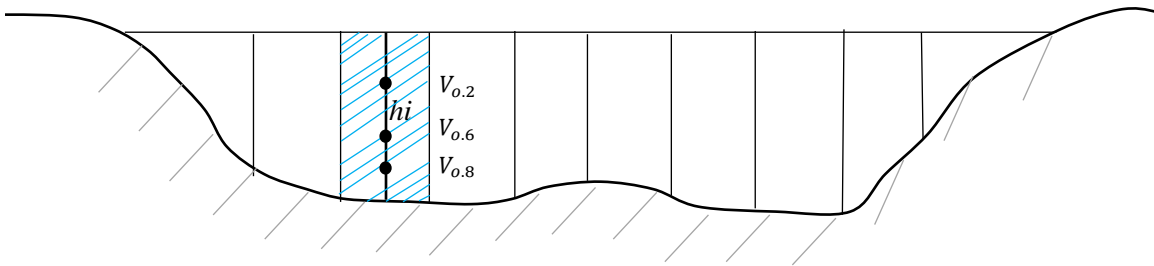


Fig. 72 Sección transversal de un cauce con método área-velocidad.

De modo que la velocidad media en la vertical de cada sección, está dada por:

$$\bar{V}_i = \frac{V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8}}{3}$$

El caudal de cada una de las áreas de influencia de las secciones, se determina así:

$$Q_i = \bar{V}_i * A_i$$

Finalmente, el caudal total del área transversal en el punto aforado es:

$$Q_T = \sum_{i:1}^n Q_i$$

En la Tabla. 49 se presenta las coordenadas de las fuentes termales que se estudiaron con su respectiva unidad geológica aflorante.

Agua Termal	Coordenadas		Unidad geológica
	NORTE	ESTE	
T1	1035841.152	847143.0306	Esquistos del Complejo Cajamarca y depósitos aluviales de Río Claro
T2	1035377.918	848282.3435	Esquistos del Complejo Cajamarca
T3	1034978.606	848219.8908	Esquistos del Complejo Cajamarca y depósitos aluviales de la quebrada El Billar

Tabla. 49 Descripción geológica de las unidades geológicas aflorantes cerca de las aguas termales. Coordenadas planas MAGNA Sirgas origen Bogotá.

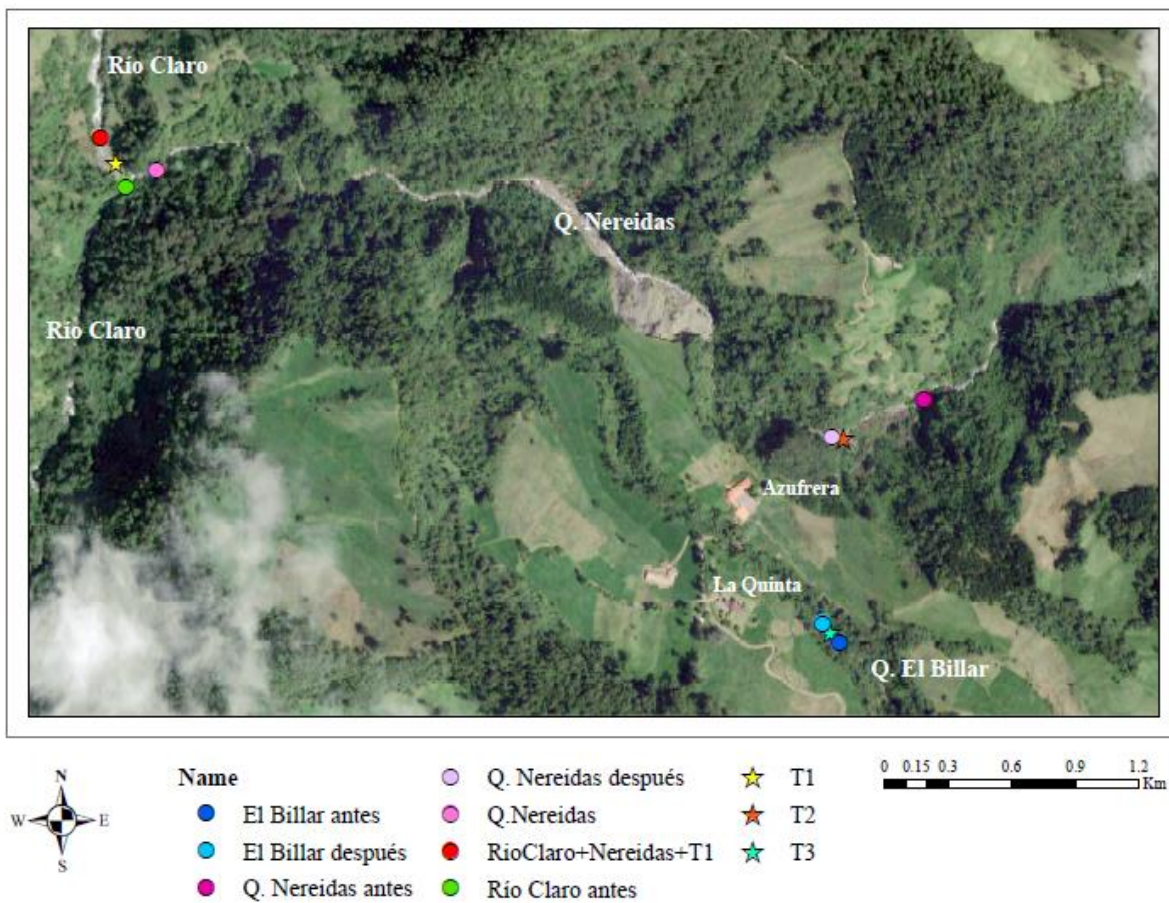


Fig. 73 Puntos termales y cauces visitados en campo. Imagen satelital tomada de SAS Planet Release 200606.

10.1 Manantial del sector Laguna Alta (T1)

Para acceder a este manantial se ingresó por la finca Laguna Alta- Corrales para llegar al punto donde se une Río Claro con la Quebrara Nereidas. En la Fig. 73 la estrella amarilla representa el manantial de este sector que emana a través de los depósitos aluviales de Río Claro que infrayacen los esquistos del Complejo Cajamarca.

Con respecto a la toma de datos, se tomaron datos físico-químicos de Río Claro antes de su unión con la Q. Nereidas, de la Q. Nereidas antes de su unión con Río Claro, datos del agua termal y de Río Claro después de su unión con la Q. Nereidas y con el agua termal T1 (Tabla.50).

	T °C	C μ S/cm	TDS ppm	pH	Q m ³ /s
★ T1	79.5	2333	1177	8.56	
● RíoClaro+Nereidas+ T1	15.52	249	131	9.11	5.118
● Río Claro antes	13.81	157	79	8.22	
● Qda Nereidas	18.1	458	229	7.63	1.289

Tabla. 50 Datos de los cauces de interés y del agua termal que cae sobre Río Claro.

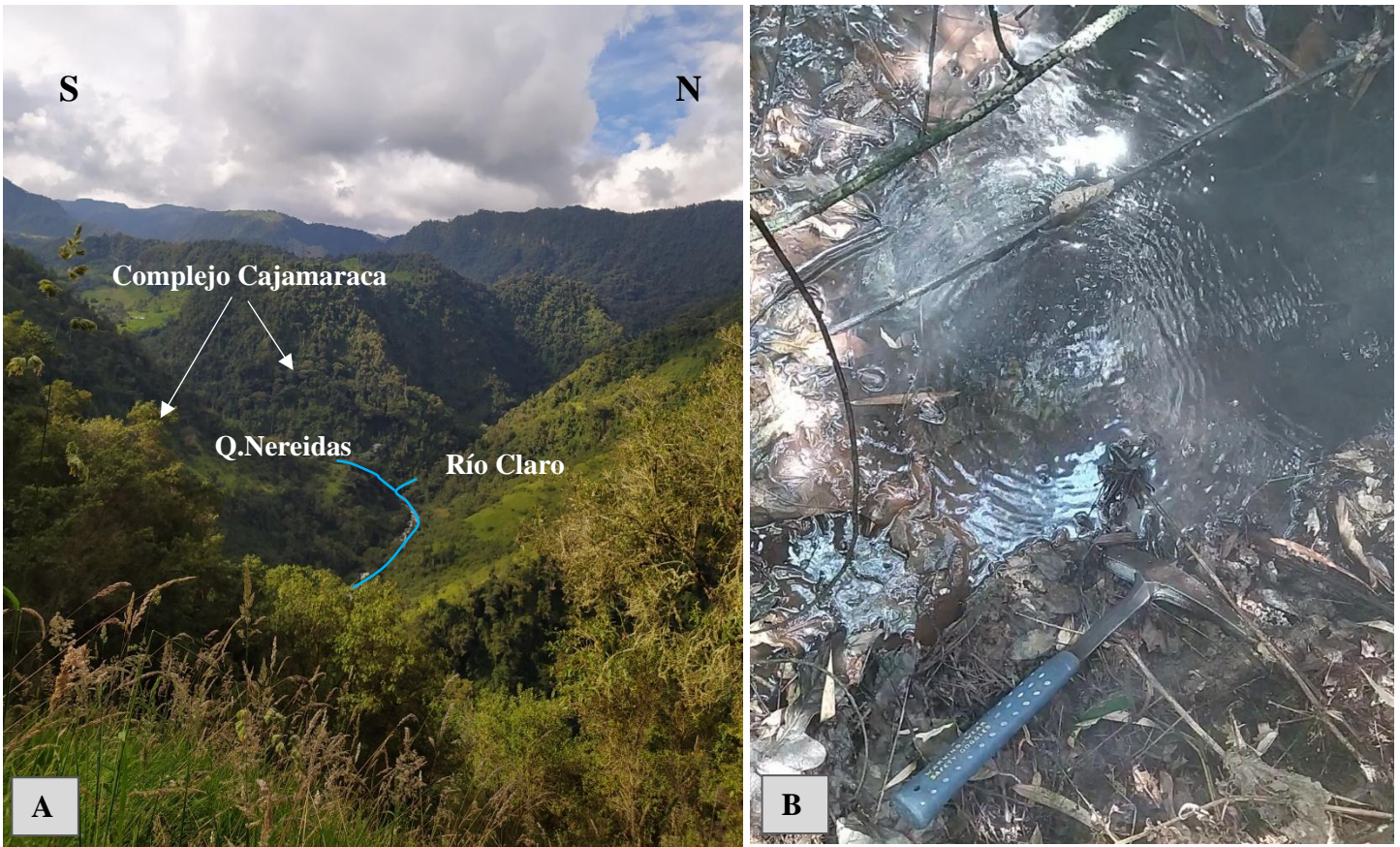


Fig. 74 (A) Vista del cañón de Río Claro desde la finca Laguna Alta-Corrales (B) Afloramiento de termal después de la unión entre Río Claro y la Q. Nereidas (T1).

Para conocer el caudal de aporte de T1 se llevaron a cabo los siguientes pasos:

(1) Calcular el valor teórico del caudal de Río Claro más la Quebrada Nereidas, que resulta de la sumatoria de los caudales individuales aforados en campo.

$$Q_{RC} + N \text{ (m}^3/\text{s)} = \sum Q_{\text{Río Claro antes}} + Q_{\text{Nereidas}}$$

(2) Calcular los valores ponderados teóricos de la unión entre Río Claro y la Quebrada Nereidas, tomando como valor de peso el caudal de estos cauces.

$$T^{\circ}C = \frac{(^{\circ}T_{\text{Río Claro antes}} * Q_{\text{Río Claro antes}}) + (^{\circ}T_{\text{Nereidas}} * Q_{\text{Nereidas}})}{Q_{RC} + N}$$

Éste sería el cálculo para la temperatura, el procedimiento en función de la conductividad y el TDS es de igual manera, cambiando por su puesto los valores del parámetro a obtener.

Parámetro	Río Claro Antes	Nereidas	Río Claro después	RC+N Teor
Caudal m3/seg	5.118	1.289	6.407	6.407
Temp °C	13.81	18.1	15.52	14.67
Conduc	157	458	249	217.56
TDS ppm	79	229	131	109.18

Tabla. 51 Cálculo ponderado de los valores teóricos de Río Claro más la Quebrada Nereidas. RC: Río Claro, N: Quebrada Nereidas.

(3) Estimar la relación porcentual de aporte tanto de Río Claro como del agua termal, para obtener de esta manera el valor de Río Claro después (RC+N+T1Teor).

La relación porcentual parte de; %aporte del río y 1-%aporte del río, éste último equivale al % de aporte del agua termal T1.

f (°T, C, TDS)	% aporte Río	% aporte T1
Temp °C	98.7%	1.3%
Conduc	98.5%	1.5%
TDS ppm	98.0%	2.1%

Tabla. 52 Relación porcentual del aporte que hace Río Claro y el agua termal T1.

(4) Calcular el valor teórico de RC+N+T1 de los parámetros temperatura, conductividad y TDS.

$$T^{\circ}C_{\text{teórico}} = (^{\circ}T_{RC+N\text{teórico}} * \% \text{aporte río}) + (^{\circ}T_{\text{termal}} * \% \text{aporte agua termal})$$

Esta misma operación se hace para los demás parámetros, cambiando los datos según la variable a calcular, el porcentaje de aporte se mantiene.

Parámetro	RC + Nereidas Teor	T1	Río Claro después	RC+N+T1Teor	% Aporte	
Caudal	6.407	X	6.407	6.407	Río	T1
Temp °C	14.673	79.5	15.52	15.52	98.7%	1.3%
Conduc	217.557	2333	249	249.29	98.5%	1.5%
TDS ppm	109.178	1177	131	131.07	98.0%	2.1%

Tabla. 53 Cálculo de Río Claro después (RC+N+T1 Teórico).

La idea, es buscar el porcentaje de aporte del río y así el porcentaje de aporte del agua termal va a variar también, y de la misma manera lo hará el valor de RC+N+T1 Teórico. Todo esto con el fin de que ese porcentaje de aporte haga que los parámetros de temperatura, conductividad y TDS se acerquen al valor real de Río Claro después, que fue tomado en campo.

(5) Finalmente con el porcentaje de aporte del agua termal obtenido, se puede calcular el caudal de T1.

$$Q_{T1} (m^3/s) = \% \text{aporte agua termal} * Q_{RC+N \text{ teórico}}$$

f (°T, C, TDS)	% aporte T1	Q T1 (m3/s)
Temp °C	1.3%	0.0833
Conduc	1.5%	0.0961
TDS ppm	2.1%	0.1313
Q (m3/s) RC + Nereidas Teor		6.407

Tabla. 54 Caudal de T1 en función de la temperatura, conductividad y el TDS.

En conclusión, el caudal de aporte de termal T1 que interactúa directamente con Río Claro, es de 0.1036 m3/s en promedio.

10.2 Manantial del sector La Azufrera (T2)

Para llegar a los manantiales Botero Londoño, se ingresó por en camino que conduce a las fincas La Azufrera y La Quinta. Estos manantiales se ubican a un costado de la Quebrada Nereidas, antes de llegar a la finca La Azufrera. En la Fig. 73 la estrella naranja representa el manantial de este sector que emana a través del conjunto de rocas intercaladas entre gneis y esquistos del Complejo Cajamarca, y los depósitos aluviales de la quebrada.

La toma de datos físicos se hizo aguas arriba sobre la Q. Nereidas antes de su interacción con los termales Botero Londoño, se tomaron datos del manantial T2 y de la Q. Nereidas aguas abajo, después de su interacción con T2 (Tabla. 55).

	T °C	C μ S/cm	TDS ppm	pH	Q m ³ /s
● Quebrada Nereidas antes	12.23	308	154	9.61	1.675
★ T2	62.4	1469	1047	9.43	
● Quebrada Nereidas después	16.8	398	186	10.11	1.675

Tabla. 55 Datos de la Quebrada Nereidas antes y después de su interacción con el termal T2.



Fig. 75 (A) Aguas termales de 83.9°C que caen directamente sobre la Q. Nereidas **(B)** alteración del material circundante, tanto de las plantas como de las rocas, por el contacto directo con aguas termales.

Para conocer el caudal de aporte de T2 se realizó el siguiente procedimiento:

(1) Calcular directamente el porcentaje de aporte del agua de la quebrada después de su interacción con T2 ($N_{desps+T2Teor}$) y del termal T2. Aquí los pasos son diferentes ya que la Q. Nereidas no está interactuando con otro afluente en el sector.

La relación porcentual parte de; %aporte de la quebrada y 1-%aporte de la quebrada, éste último equivale al % de aporte del agua termal T2.

f (°T, C, TDS)	% aporte Q. Nereidas	% aporte T2
Temp °C	91.0%	9.00%
Conduc	92.21%	7.79%
TDS ppm	96.40%	3.60%

Tabla. 56 Relación porcentual del aporte que hace la Q. Nereidas y el agua termal T2.

(2) Calcular el valor teórico de $N_{desps+T2}$ de los parámetros temperatura, conductividad y TDS.

$$T^{\circ}C_{teórico} = (T_{NereidasAntes} * \%aporte\ Q.Nereidas) + (T_{termal} * \%aporte\ agua\ termal)$$

Esta misma operación se hace para los demás parámetros, cambiando los datos según la variable a calcular, el porcentaje de aporte se mantiene.

Parámetro	Q.Nereidas antes	T2	Q. Nereidas después	Ndesps+T2Teor	% Aporte	
Caudal	1.675	X	1.675	1.675	Quebrada	T2
Temp °C	12.23	62.4	16.8	16.75	91.0%	9.00%
Conduc	308.00	1469	398	398.42	92.21%	7.79%
TDS ppm	154.00	1047	186	186.15	96.40%	3.60%

Tabla. 57 Cálculo de Q. Nereidas después (Ndespués+T2 Teórico).

De la misma forma que con Río Claro, se trata de buscar el porcentaje de aporte de la Q. Nereidas y así el porcentaje de aporte del agua termal T2, va a variar, y por ende lo hará el valor de Ndespués+T2 Teórico. Todo esto con el fin de que ese porcentaje de aporte haga que los parámetros de temperatura, conductividad y TDS se acerquen al valor real de Q. Nereidas después, que fue tomado en campo.

(3) Finalmente con el porcentaje de aporte del agua termal obtenido, se calcula el caudal de T2.

$$Q_{T2}(m^3/s) = \%aporte\ agua\ termal * Q_{QNereidasdesps+T2\ teórico}$$

f (°T, C, TDS)	% aporte T2	Q T2 (m3/s)
Temp °C	9.00%	0.1508
Conduc	7.79%	0.1304
TDS ppm	3.60%	0.0603
Q (m3/s) Q. Nereidas		1.675

Tabla. 58 Caudal de T2 en función de la temperatura, conductividad y el TDS.

En conclusión, el caudal de aporte de termal T2 que interactúa directamente con la Q. Nereidas en el sector Botero Londoño, es de 0.1138 m3/s en promedio.

10.3 Manantial del sector La Quinta (T3)

Para llegar a los manantiales que emanan sobre la quebrada El Billar, se ingresó por el camino que conduce a finca La Quinta. En la Fig. 73 la estrella azul representa el manantial de este sector que emana mayoritariamente a través de los depósitos aluviales de la quebrada El Billar.

La toma de datos físicos se hizo sobre las aguas de la quebrada El Billar antes y después de su interacción con los termales que emanan por el cauce, y se tomaron datos del manantial T3 (Tabla.59).

	T °C	C μ S/cm	TDS ppm	pH	Q m ³ /s
● Quebrada El Billar antes	14.04	85	42	8.71	0.417
★ T3	68.4	1937	984	8.58	
● Quebrada El Billar después	17.17	201	100	8.67	0.417

Tabla. 59 Datos de la quebrada El Billar antes y después de su interacción con el termal T3.



Fig. 76 (A) Depósitos aluviales de la quebrada El Billar alterados por la interacción con el agua termal en contacto con los esquistos del Complejo Cajamarca, la línea roja representa el contacto de estas dos unidades (B) depósitos aluviales con alto grado de alteración hidrotermal.

El procedimiento para conocer el caudal de aporte de T3 es similar que como se hizo para T2 ya que la quebrada El Billar tampoco interactúa con otro cauce en el sector de interés:

- (1) Calcular directamente el porcentaje de aporte del agua de la quebrada El Billar después de su interacción con T3 ($N_{desps} + T2_{Teor}$) y del termal T3.

f (°T, C, TDS)	% aporte El Billar	% aporte T3
Temp °C	94.3%	5.75%
Conduc	93.73%	6.27%
TDS ppm	93.80%	6.20%

Tabla. 60 Relación porcentual del aporte que hace la quebrada El Billar y el agua termal T3.

(2) Calcular el valor teórico de Billardesps+T3 de los parámetros temperatura, conductividad y TDS.

$$T^{\circ}C_{teórico} = (^{\circ}T_{Q.ElBillarAntes} * \%aporte Q.El Billar) + (^{\circ}T_{termal} * \%aporte agua termal)$$

Esta misma operación se hace para los demás parámetros, cambiando los datos según la variable a calcular, el porcentaje de aporte se mantiene.

Parámetro	Q.El Billar antes	T3	Q. El Billar desps	Billardesps+T3 Teor	% Aporte	
					Quebrada	T3
Caudal	0.417	X	0.417	0.417		
Temp °C	14.04	68.4	17.17	17.17	94.3%	5.75%
Conduc	85.00	1937	201	201.12	93.73%	6.27%
TDS ppm	42.00	984	100	100.40	93.80%	6.20%

Tabla. 61 Cálculo de la quebrada El Billar después (Billardespués+T3 Teórico).

Como se realizó con los demás termales (T1 y T2), se debe buscar el porcentaje de aporte de la quebrada El Billar y así el porcentaje de aporte del agua termal T3 cambiará y de la misma manera, lo hará el valor de Billardespués+T3 Teórico. Todo esto con el fin de que ese porcentaje de aporte haga que los parámetros de temperatura, conductividad y TDS se acerquen al valor real de la quebrada El Billar después, que fue tomado en campo.

(3) Finalmente con el porcentaje de aporte del agua termal obtenido, se calcula el caudal de T3.

$$Q_{T3}(m^3/s) = \%aporte\ agua\ termal * Q_{Billar\ desps+T3\ te\ orico}$$

f (°T, C, TDS)	% aporte T3	Q T3 (m3/s)
Temp °C	5.75%	0.0240
Conduc	6.27%	0.0261
TDS ppm	6.20%	0.0259
Q (m3/s) El Billar		0.417

Tabla. 62 Caudal de T3 en función de la temperatura, conductividad y el TDS.

En conclusión, el caudal de aporte de termal T3 que interactúa directamente con la quebrada El Billar, es de 0.0253 m3/s en promedio.

Finalmente, el caudal total de aporte de las aguas termales en el sector estudiado es de 242.7 L/s; el porcentaje de aporte del T1 a Río Claro es de 1.6 %, el de T2 a la Q. Nereidas es de 6.80% y el de T3 a la quebrada El Billar es de 6.07%, dando un porcentaje promedio de aporte de 4.8% de las aguas termales al sistema hídrico visitado. Se pensaría que al sur del área habría otro aporte de caudal termal por las emanaciones que se conocen que para este estudio no se visitaron, asociado claramente al sistema deformativo que les da paso a las aguas subterráneas una circulación de fluidos que ascienden hasta superficie.

La cantidad de infiltración que se calculó previamente, de 130.03 mm en un área de 87.046 Km², se traduce en un caudal de entrada de 359.10 L/s, esta agua puede tomar muchos caminos por su trayecto en profundidad, uno de ellos puede ser agua que se queda almacenada en el reservorio, otra porción aprovechará las zonas de ascenso para salir mientras que se mezclan con las aguas meteóricas, etc. Según los estudios hechos por CHEC en 1983, la geoquímica de isotopos radioactivos H3 (Tritio) de las aguas termales muestra valores de 4 UT (unidad del tritio), indicando una edad aproximada de las aguas de la zona de este estudio de 26 años, dando a entender un periodo de tiempo significativo en el que el agua permanece en el subsuelo, las aguas de este estudio precisarían de información geoquímica detallada para conocer cuál fue el tiempo posible de recorrido en el subsuelo.

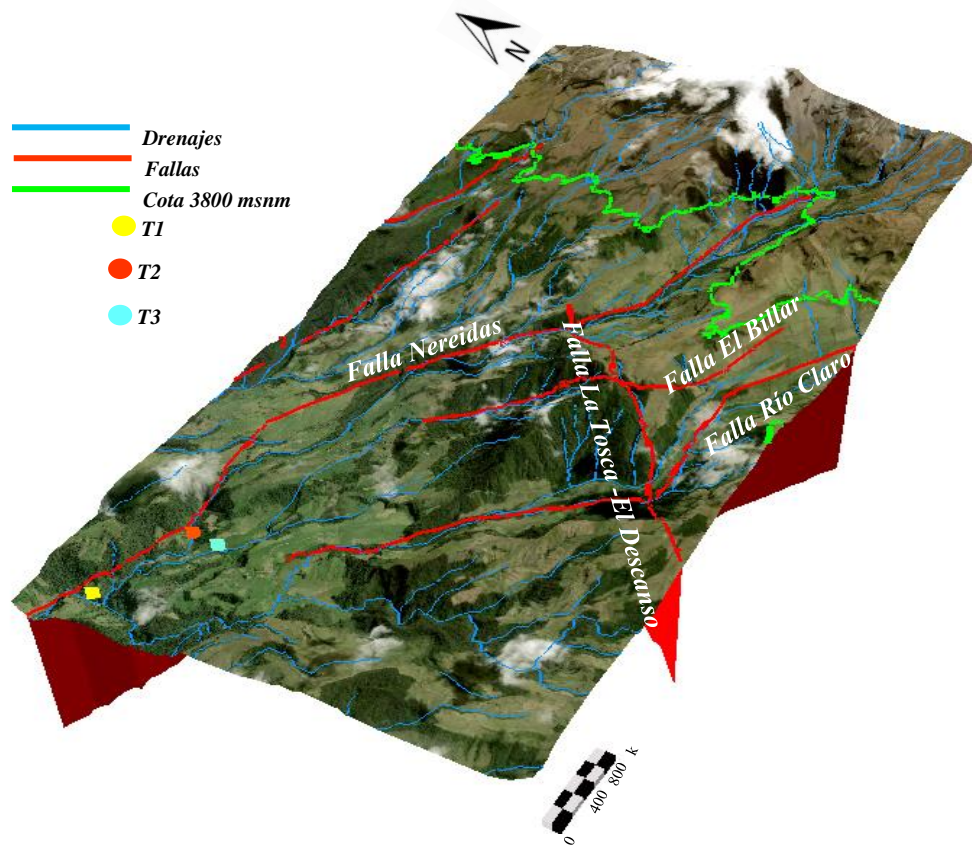


Fig. 77 Vista 3D de los elementos que se encuentran en la zona de estudio. Elaboración propia. Cartografía base tomada del IGAC plancha 225.

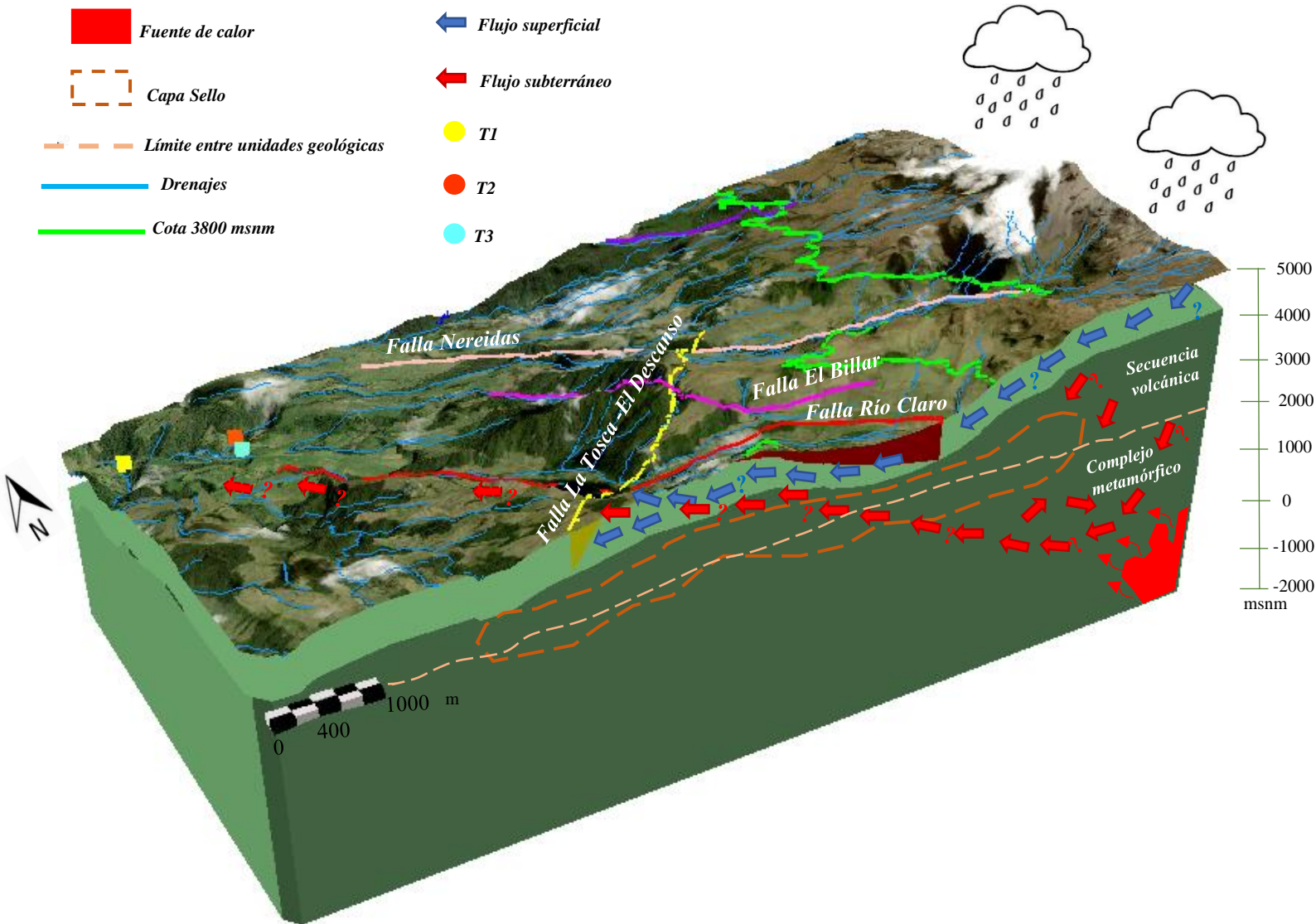


Fig. 78 Esquema representativo de migración de aguas dentro de la zona de estudio. Basado en el modelo geotérmico conceptual de Ortiz & López (CHEC), 2020. Cartografía base tomada del IGAC plancha 225.

En la Fig. 78 se observa la representación del posible camino que pueden tomar el agua lluvia luego de que interactúa con el suelo; como se sabe, hay una porción que se va por escorrentía, otra queda en la capa sub-superficial de los suelos, mientras que otra porción se infiltrará a manera de recarga efectiva. Los caminos que puede tomar esta agua luego de su

infiltración son diversos y de la misma manera ocurre con las zonas de ascenso y descarga; las diferentes rutas que puede tomar el agua son muy variables, aunque para las aguas de la zona visitada se piensa que está asociado al sistema deformativo de dirección NE-SE de la Falla Nereidas.



11. Conclusiones

- Según los valores de la precipitación media mensual multianual recolectado en el periodo de cuatro años (2016-2020), se puede decir que el área del proyecto presenta una característica climática que varía de escasa a abundante según la OMM (2008).
- En cuanto a la distribución espacial de la precipitación en la subcuenca Río Claro, entre los años 2016-2020, las mayores precipitaciones se presentan en las partes bajas de la cuenca, y de forma contraria, las menores precipitaciones se dan a mayores altitudes. Aun así, el comportamiento bimodal de este fenómeno es constante en toda el área de la cuenca, según los registros de las estaciones meteorológicas.
- La temperatura media mínima que se registra entre los años 2016-2020, se presenta en la estación Las Brisas con -3.78°C seguido de Q. Molinos PNNN con 1.03°C y finalmente Pirineos- Chec con 2.88°C , es decir, en las zonas más elevadas de la subcuenca. Por su parte, la temperatura media máxima registrada en este mismo periodo de tiempo, tiene lugar en la estación Río Claro- La Batea en el mes de febrero con 28.47°C , justamente en la parte más baja de la subcuenca.
- La distribución de la temperatura en la subcuenca Río Claro entre los años 2016-2020, se rige bajo las características altitudinales que hay presentes en la cuenca, pues las mayores temperaturas se registran en las zonas bajas, mientras que las menores temperaturas se sitúan a mayores elevaciones.
- El régimen hidrológico de la Quebrada Nereidas y del Río Molinos, para un periodo de ocho años desde 2011 hasta 2020, excluyendo el año hidrológico del 2018, presentan un comportamiento bimodal; con caudales bajos en enero-febrero y agosto, y caudales altos entre los meses de abril-mayo y noviembre. La tendencia del caudal a lo largo de este periodo, ha sido de una tasa de disminución que se debe muy posiblemente a el uso del suelo que se implementa en la región, posibles captaciones que se realizan aguas arriba de los cauces y a la disminución de la capa de hielo del VNR.
- La estación Río Claro- La Batea es la que tiene mayor ETP seguido de Río Claro- La Guayana, debido a su elevada temperatura en todo el año con respecto a las demás estaciones. En contraste, la ETP más baja se presenta en la estación Las Brisas, pues se ubica a los 4212 msnm a una temperatura de 4.35°C . El comportamiento de este fenómeno es de esperarse, pues la ETP está relacionada directamente con la temperatura, de manera que, en la zona más baja de la subcuenca Río Claro existe una pérdida de agua en el suelo en épocas de sequía.
- En las estaciones Río Claro-La Batea y Q. Nereidas-Chec no hay déficit hídrico debido a que durante todo el año hay agua en el almacén. En las estaciones

Pirineos- Chec, Q. Molinos PNNN y Las Brisas, ocurre déficit hídrico, asociado a las bajas precipitaciones de la zona. En todas las estaciones hubo excedente en los meses de mayor precipitación, siguiendo el comportamiento bimodal de este fenómeno en la subcuenca, lo que ocasiona un alza en la humedad del suelo.

- A través del balance hídrico propuesto, se pudo calcular una infiltración de 172.53 mm en un periodo de cuatro años para la subcuenca Río Claro. Con respecto a la infiltración que posiblemente se vaya por recarga efectiva, se encontró una infiltración que ocurre por encima de los 3800 msnm de 130.03 mm que se traduce en un caudal de entrada de 359.10 L/s. Estas aguas pueden tomar diferentes caminos cuando ya están en el subsuelo y su salida hacia superficie está relacionada con el sistema deformativo de la zona.
- Las características fisicoquímicas de los manantiales y de los cauces de la zona, se determinaron a partir de la sonda HANNA que permitió conocer la temperatura, el pH, la conductividad, y el total de sólidos disueltos (TDS) de estas aguas de interés. En cuanto a la química de elementos, se tomaron registros de datos históricos que disponen a su vez una clasificación que explica su posible origen, temperatura de reservorio, procesos de mezcla, etc.
- En el cálculo de caudal estimado para los termales T1, T2 y T3 se pueden observar que el porcentaje de aporte para T2 son datos dispersos en función de la temperatura, conductividad y TDS; esto asociado posiblemente a que en campo las muestras tomadas debían pasar por un tiempo de enfriamiento que podría afectar las propiedades del agua termal en la toma de datos físicos con la sonda.
- En el área muestreada, aflora un total de 242.7 L/s de las aguas termales, es probable que al sur del sector salga una cantidad similar o aun más ya que esta es una cantidad mínima estimada del aporte de caudal. Por lo tanto, se propone realizar una exploración más detallada de los manantiales aflorantes para estimar la contribución que hacen las aguas termales a la cuenca, con datos químicos que proporcionen mayor precisión de un posible porcentaje de aporte del reservorio a superficie.

12. Recomendaciones

- Se recomienda ahondar en construir un modelo hidrogeológico que permita entender a mayor detalle la dinámica del flujo del agua dentro y fuera del sistema, para de esta manera dar valores más precisos de qué tanta porción de agua entra al sistema por diferentes factores y cuales son los que le dan paso a la salida de los fluidos en superficie, pues se sabe que a pesar de que la mayor infiltración puede ocurrir a una altitud mayor a los 3800 msnm, existen agentes que dan paso a que este fenómeno se produzca en zonas mas bajas de la subcuenca, como lo son la permeabilidad secundaria en las rocas y suelos.
- Se recomienda, además, realizar estudios detallados de suelo que permitan conocer la capacidad de campo o recarga que tienen las unidades geológicas superficiales, con el fin de acercarse a un modelo más detallado y preciso del balance hídrico para la subcuenca Río Claro.

13. Referencias

Albentosa, L.M. (1975). La aplicación del método estadístico en Climatología: 105 años de precipitaciones en Barcelona. Revista de Geografía, vol. IX, n°1 II Parte.

Alfaro, C. (1998). Evaluación geoquímica En Volcán Nevado del Tolima. Evaluación sísmológica, glaciológica y geoquímica. Bogotá: INGEOMINAS. Informe Técnico, 61.

Alfaro, C., Aguirre, A., & Jaramillo, L. F. (2002). Inventario de fuentes termales en el parque nacional natural de los nevados. Bogotá: INGEOMINAS.

Angot, A. (1897). Régime des pluies de l'Europe occidentale. An. Bur. Central Mét, 1, 155-192.

Arango, E., Buitrago, J., Cataldi, R., Ferrara, G. C., Panichi, C., & Villegas, V. (1970). Preliminary Study on the Ruiz Geothermal Project. Colombia: Geothermics. Spe. Iss. 2., 43-44.

Aricapa, V.C. (2020). Estudio de recursos naturales en el área de Villamaría y Santa Rosa de Cabal. Tesis grado Geología. Universidad de Caldas.

Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (ASOCARS), Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS), Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales (UN). (2014). Plan de ordenación y manejo ambiental de



la cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el departamento de Caldas (POMCA).

Barrero, D., y Vesga, C. J. (1976). Mapa geológico del cuadrángulo K-9 Armero y parte del J-9 La Dorada. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá.

Barrero, LD. (1979). Geología de la Cordillera Occidental Central, al oeste de Buga y Roldanillo, Bogotá, Colombia. Ministerio de Minas y Energía, Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas-Mineras.

Bohórquez, O. P., Monsalve, M.L., Velandia, F., Gil, F., Mora, H. (2005). Marco Tectónico de la Cadena Volcánica más Septentrional de la Cordillera Central de Colombia. Boletín de Geología, 27. Vol 27 N° 1

Borrero, C.A., Parra, Y.A, & Ospina, J.C. (2006). Origen del Depósito Freatomágmático de la Cabaña, Cuenca Baja del Río Chinchiná, Caldas-Colombia. Boletín de Geología, 28(1), 49-59.

Botero, A. G., (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia; Facultad de Minas, Vol. 57, pp 3-1-01.

Botero-Gómez, L.A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., y Grajales, J.A. (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termal, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. Boletín de Geología, 40(3), 85-102. DOI: 10.18273/revbol.v40n3-2018005.



Calvache, M. y Monsalve, M.L. (1982). Geología, petrografía y análisis de xenolitos en el área A (Zona de Manizales) del proyecto Geotérmico en la Región del Macizo Volcánico del Ruiz. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias. Tesis de Grado. Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). Sección Geotermia, 118 p. Manizales.

Castillo Peñaloza, M. A. and Inoñán Morán, R. A. (2016). Determinación del balance hídrico en la cuenca del río Chicama, región La Libertad, Lima, Perú. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

Ceballos, G.D. (2017). Análisis geológicos y estructural detallado de una zona del proyecto geotérmico en el Valle de las Nereidas, Macizo Volcánico Nevado del Ruíz, para contribuir en el proceso de exploración geotérmica, CHEC.

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Ente Nazionale per L'energia Elettrica (ENEL). (1968). Proyecto de Investigación Geotérmica en la Región del Macizo Volcánico del Ruiz. Translation. 41 p. Manizales.

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). (1979). Investigación geotérmica en la región del Macizo Volcánico del Ruiz (Colombia), Fase I, Programa de trabajo. Colombia: Trabajo. 47.

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL), Consultoría Técnica Colombiana Ltda. (CONTECOL) & Geotérmica Italiana. (1983).



Investigación Geotérmica. Macizo volcánico del Ruiz. Fase II, Etapa A. Vol. I, II, III y IV.
Bogotá.

Cleves, J.A., Toro, J., Martínez, B. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimática, una revisión analítica. Doi:
<http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4460>

Chamorro, D. E., Carvajal, A. L., & Zuluaga, B. H. (2015). Estudio de impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná. *Gestión y Ambiente*, Volumen 18, 81-93.

Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Winkler, W., Ulianov, A., Mora, A., Chiaradia, M., (2014b). Distinguishing between in-situ and accretionary growth of continents along active margins. *Lithos* 202–203, 382–394.

Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD). (2017). Actualización del Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Villamaría, Caldas.

Consultoría Técnica Colombiana Ltda. (CONTECOL). (1983). Evaluación de los recursos geotérmicos del área San Vicente – Manizales – Tolima, geología regional.



Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS). (2020). Plan de Gestión Ambiental Regional, PGAR, del departamento de Caldas, 2020-2031. ANEXO 3.

Dastane, N.G. (1978). Effective rainfall in irrigated agricultura. FAO Irrigation and Drainage. Paper 25 FAO, Roma.

Delgado, M.E. (2020). Clasificación de cobertura del suelo con metodología Land Cover en el Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNN). Universidad de los Andes.

Díaz, A., Aguirre. M. (2014). Análisis estructural detallado de un sector del Valle de Nereidas, Macizo Volcánico Nevado del Ruíz, MVNR. Aporte al proyecto geotérmico EPM – CHEC. Universidad de Caldas.

Duque-Caro, H. (1980). Geotectónica y evolución de la región Noroccidental Colombiana, Bol. Geol. Ingeominas Vol 23 (3) pp. 4-37. Bogotá.

Forero, H. (1958). Fuentes Termales de Colombia. Investigación de Geología Económica. Servicio Geológico Nacional. 274 p. Bogotá.

García- Beltrán, N. (2021). Análisis de discontinuidades estructurales en el área del Valle de Nereidas, Villamaría, Caldas. Universidad de Caldas.



Grand, M., Handszer, A. (1989). Naturaleza y dinámica de un flujo piroclástico en la zona de Nereidas. Departamento de Caldas.

Geocónsul, S.A. de C.V. (1992). Evaluación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz. Informe Final. Preparado para Constructora y Perforadora Latina, S.A. de C.V. 57p. Morelia (Mexico).

Geoenergía Andina. (1996). Proyecto geotérmico macizo volcánico del Ruiz, Perforación pozo exploratorio Nereidas I (N1), Estudio de impacto ambiental.

Giggenbach, W. F., Garcia P., N., Londoño C., A., Rodriguez V., L., Rojas G., N., & Calvache V., M. L. (1990). The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1–2), 13–39. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90067-P](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90067-P)

Giggenbach, W. F., Garcia, N., Londoño, A., Rodriuez, L. V., Rojas, N., & Calvache, M. L. (1990). The Chemistry of fumarolic vapor and termalsprings discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia. Netherlands: Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 42.,13-39.



González, H., y Londoño, A.C. (2002). Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia. Granodiorita de Manizales (K2E1gdm). (Stock de Manizales). Cordillera Central. Departamento de Caldas. Comisión Estratigráfica de INGEOMINAS. 17p.

González, H., Lemoigne, I. y Martinez, J. O., (1977). La flora de la Formación Valle Alto Jurásico en la Cordillera Central de Colombia: Boletín de Ciencias de la Tierra, V. 2, pp. 107-122.

González, H. (2001). Planchas 206 y 225 Manizales – Nevado del Ruíz. Escala 1: 100.000, memoria explicativa. Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear (INGEOMINAS).

Herd, D.G. (1974). Glacial and volcanic geology of the Ruiz-Tolima volcanic complex. Cordillera Central Colombia. PhD Thesis, Uni. Of Washigton. 71p. Washington.

Hincapié-Jaramillo, G. (2013). Análisis estructural en la zona del proyecto geotérmico de EPM-CHEC.

Hincapié-Jaramillo, G. (2014). Análisis estructural en la zona del proyecto geotérmico de EPM-CHEC, segunda fase.

Ingeniería Strycon S.A.S. (2017). Estudio de impacto ambiental proyecto geotérmico macizo volcánico del Ruiz. etapa exploratoria. Atmósfera y clima. 103p.



Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear (INGEOMINAS). (1997). Geología superficial del área geotérmica de Nereidas (Nevado del Ruíz).

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2008). Levantamiento general de las coberturas de tierra y uso del suelo.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2014). Clasificación climática de Caldas – Lang.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). Protocolo de monitoreo del agua.

Jaramillo, R.A. (2005). Clima Andino y Café en Colombia. Chinchiná: Centro Nacional de Investigaciones del Café - CENICAFE.

López, J.A., y Aguirre, R. (2005). Tonalita Granodiorita de Manizales: Revisión formal de la nomenclatura litoestratigráfica de la Granodiorita de Manizales (Stock de Manizales). Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.

Martínez, L., Valencia L., Ceballos, J., Narváez, B., Pulgarín, B., Correa, A., Navarro, S., Murcia, H., Zuluaga, I., Rueda, J., y Pardo, N. (2014). Geología y estratigrafía del Complejo



Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final, Bogotá – Manizales – Popayán. Servicio Geológico Colombiano. 853p.

Martonne, E. (1963). Tratado de Geografía Física: Nociones Generales. Clima – Hidrografía. vol. I, p. 211. Barcelona.

Maya, M & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Boletín Geológico, Ingeominas, Vol. 35, p.43-57.

Maya, M. (1992). Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia. Ingeominas, Boletín Geológico., 32 (1-3): 127-187.

Mejía Toro, E.L. (2012). Características Cinemáticas y Condiciones de Deformación de un Segmento de la Falla Palestina al NE del Volcán Nevado del Ruiz. MSc Tesis, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 25p.

Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J.A., & Cramer, T (2012). Análisis Estructural al Noreste del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia – Aporte a la Exploración Geotérmica. Boletín de Geología, 34(36). Vol 34 N° 1

Mijailov, L. (1989). Hidrogeología.



Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A.d.J. & Toro-Toro, L.M. (2008). Proveniencia del material clástico del Complejo Quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Vol. 22 p. 27–38.

Mosquera, D. (1978). Geología del Cuadrángulo K-8 Manizales. Informe preliminar 1763. INGEOMINAS.

Murcia, A., and Cepeda, H. (1991). Geología de la Plancha 410 La Unión Departamento de Nariño, Memoria explicativa, Escala 1:100.000, p. 32.

Naciones Unidas (ONU). (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.

Nelson, H.W. (1957). Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. *Leidse Geol.* Vol. 22: 1-76.

Nivia, A., Marriner, G.F., Kerr, A.C., and Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 21, no. 4, p. 423–436, doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.002.

Ordóñez, C. O., Martins, P. M. Y Angel, C. P. (2001). Consideraciones Geocronológicas e Isotópicas preliminares del Magmatismo Cretáceo - Paleoceno en el norte de la Cordillera Central: *Memorias VIII Congreso Colombiano de Geología*.

Organización Meteorológica Mundial (OMN). (2018). Guía de Prácticas Climatológicas No. 100.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2008). Comprender los efectos a escala mundial.

Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2006). Estudio FAO riego y drenaje, “Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”.

Ortiz, J.A & López, J. CHEC - Grupo EPM. (2020). Características adecuadas para la planta de generación de electricidad, a partir de las estimativas del recurso en el proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruíz.

París, G. & Romero, J. (1994). Fallas activas en Colombia. Boletín Geológico, Ingeominas, Vol. 34, No 2-3, p. 3-25.

Pérez, G. (1980). Evolución geológica de la Cuenca Pacífica (Geosinclinal de Bolívar), sector noroccidental de Suramérica. Bol. De Geol. U.I.S. Bucaramanga, Vol. 14 N°. 28, p. 25-44.



Plazas, J.M. (2010). Caracterización Petrográfica y Termobarométrica del Stock Tonalítico-Granodiorítico de Manizales. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá, pp. 1-21 y Anexos.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colom. Cienc.* 28(107): 201-222. ISSN:0370-3908.

Poveda, G. & Mesa, O. J. 1999. La corriente del Chorro Superficial del Oeste ("Del Chocó") y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 23(89): 517-528. *Hidráulica. MéxicO,XI* (1):21-37.

Poveda, G. & Mesa, O. J. 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low level jet. *Geophys. Res. Lett.* 27(11): 1675-1678.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). INVTERMALES. Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2013). Caracterización Hidroclimática, Cuenca Río Chicama.



Schaefer, S.J. (1995). Nevado del Ruiz Volcano Colombia: magmatic system and evolution. Thesis Degree of Doctor of Philosophy. Arizona State University, Arizona. 147p.

Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME), IDEAM. Datos abiertos.

Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC). Datos abiertos.

Rodríguez, joselin de L. A. (2013). Estudios magnetoteléuricos con fines de interés geotérmico en el sector norte del Nevado del Ruíz. Universidad Nacional Autónoma de México.

Taboada, A., Dimaté, C., Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia: Deformación Continental Activa y Subducción. *Física de la Tierra* N° 10, 111-147.

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes. *Tectonics*, 19(5), 787–813.

Thornthwaite, C.W. y Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ. Climatol.*, 10(3): 185-311.

Thouret, J, C. (1984). Observations geomorphologiques preliminaires sur quelques Relief volcaniques des Andes de Colombie. *Geomorfologie, exemples sudamericanins, Trav. Et. Doc. Du CEGETC-ONRS*,52.



Thouret, J.C., Cantagrel, J.M., Salinas, R., and Murcia, A. (1990). Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4), 225-251. doi: 10.1016/0377-0273(90)90090-3.

Toussaint, J.F., Restrepo, J.J. (1976). Modelos Orogénicos de Tectónica de Placas en los Andes Colombianos. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 1: 1-48. 4 figs., 1 tab. Medellín.

Universidad Nacional de Colombia, & CORPOCALDAS. (2015). CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas. Recuperado de cdiac.manizales.unal.edu.co

Vélez, M. I., Parra-Palacio, E., Córdoba, S., López-Sánchez, J., & Raymond, J. (2018). Geothermal potential assessment of the Nevado del Ruiz Volcano based on rock thermal conductivity measurements and numerical modeling of heat transfer. *Journal of South American Earth Sciences*, 81, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.11.011>

Villagómez, D., Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos* 160-161, 228–249.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W. & Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central Cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3–4). p. 875–896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>



Water Resources Council US. (1982). Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, Revised Bulletin 17B of the Hydrology Committee.

Zapata, S., Cardona, A., Jaramillo, J. S., Patiño, A., Valencia, V., Leon, S., Mejía, D., Pardo-Trujillo, A. & Castañeda, J. P. (2018). Cretaceous extensional and compressional tectonics in the Northwestern Andes, prior to the collision with the Caribbean oceanic plateau. Gondwana Research.



ANEXO 1

REGISTRO PRECIPITACIÓN ESTACIONES DE TRABAJO

ppt mensual (mm)

Estación	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ppt anual (mm)
Río Claro - La Batea	2016												125.6	125.6
	2017	187.8		178.2	174.4	361.4	151.2		70.4	46.4	54.2	400.4	130.6	1755
	2018	128	307.6	290	230.6	230.4	77.4	105.2	79.8	138.6	378.8	218.6	73.4	2258.4
	2019	82	139.2	230.4	211.2	210.4	26.4	0	0	8.2	0.2	0	0	908
	2020	0	0	1.8	9.4	3.6	15	25.6	7.4	32	12.6	66.6	220.8	394.8
Pirineos - Chec	2016				37	534	204	236		233	563	840	400	3047
	2017	456	174	705.2	103.2	169.6	118	27	46	67.8	148.8	152	108	2275.6
	2018	57.4	100.4	100.4	150.8	157.6	36	45	38.4	67.8	199.6	131	45	1129.4
	2019	27.4	79.8	108.8	139.2	121	54.2	24.4	6.6	60.2	94.8	109.8	60	886.2
	2020	43.4	43.6	83.4	72.8	36.8	0	32	98.8	77.2	123.2	156.8	92	860
Q. Molinos PNNN	2012			18	89.8	61.6	0.8	0	0	0	0	0	0	170.2
	2013	0	41.6	9.6	0	0	0	0	0	0	0			51.2
	2014										0	0	0	0
	2015				0	0				39	77.8	93	36.4	246.2
	2016	20.8	63.2	20.4		60	41.8	52.4	11.4	59.8	118.6	157.8	75	681.2
	2017	74.4	356	225.8	114.2	152.2	98.4	26.6	40.4	60	96.6	145.2	88.4	1478.2
	2018	54	97.4	119.2	108.8	67.8	33.6							480.8
	2019		66	146.2	145.8	139.4	40.2	0	0				2.4	540
	2020	18.6	2	8	2	6.8	4.8	0	10.2	11.4	8.8	0	0	72.6
Q. Nereidas- Chec	2016				26.8	115.2	43	57.8	23.6	73.4	154	160	166.4	820.2
	2017	85.6	47.8	29.4	8.4	164.8	139	43.4	56.8	61.2	93.6	161.6	99	990.6
	2018	50.6	110.8	112.4	189.6	102.2	21.8	59.8	57.4	0.6	221.6	141.2	47.6	1115.6
	2019	37.4	59.4	67.4	53.4	76	33.8	11.2	1					339.6
	2020	2.8	66.2	70.4	86.6	34	73	59.2	90.6	61.6	107.6	136.4	45.4	833.8
Río Claro - La Guayana	2011						4.7	67.5	109.4	123.9	373	394.6	182.1	1255.4
	2012	127.6	26.1	87	37.1									277.9
	2013						286	56	67.6	148.8	21.8			580.2
	2014										124.6	124.4	47.6	296.6
	2015	36.4	61.8	160.2	105.2	80.8	22.6							467
	2016		2285.4	111.4	53.8	130	44.4	52.2	39.2	125.4	175.6	174.2	202.4	3394
	2017	164.2	117.8	161.6	146.8	271.2	158.4	55.2	67.4	127.4	29.2	12	5	1316.2
	2018	4.4	2.6	187	203.4	223	62	104	81.6	135	270	244.4	80.4	1597.8
	2019	73.8	199.2	249.6	321.2	190.4	79.6	110.4	37	113.4	143.6	246	217.4	1981.6
	2020	85.4	42.6	95.8	163.4	89.8	117.8	103.6	98.6	87.6	77.2	2	0	963.8

Las Brisas	2016	27.1	92	72.1	152.3	14	88	88	56.9	96.1	6	240	104.1	1036.6
	2017	97.7	48.6	293	157.4	272.3	156.9			85.1	123.6	161		1395.6
	2018		108.2	155.5	178.4	262.5	87.4	96.6	68.9	41	217.4	110.8	44.7	1371.4
	2019	61	111.7	157.4	156.3	181.1		57.8	16.7	107.3	162.2	140.9	68.6	1221
	2020	45.3	53.7	68.1	90.6	103.2	121.6	104.1	14.3					600.9
Papayal	2016	55	62	218	198	195	129	129	35	127	183	231	281	1843
	2017	185	54.3	259.8	168.9	242.9	142.1	53.3	60.7	91.1	251	316.9	166.5	1992.5
	2018	75.9	367.5	287.4	183.1	207.1	55.3	81.9	62.9	111.8	266.6	285.5	42.9	2027.9
	2019	83.4	121.7	266.2	240.6	235.7	90.9	108.9	30	103.4	94.5	203.9	166.3	1745.5
	2020	25.8												25.8

Registro de la precipitación original obtenida de las plataformas SIMA y DHIME.

ANEXO 2

Hemisferio Norte												Lat. grad.	Hemisferio Sur											
Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.		Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
0,0	6,6	11,0	15,6	21,3	24,0	24,0	17,6	12,8	8,3	2,3	0,0	70	24,0	17,4	13,0	8,4	2,7	0,0	0,0	6,4	11,2	15,7	21,7	24,0
1,1	7,3	11,1	15,3	19,7	24,0	22,3	17,0	12,7	8,7	4,1	0,0	68	21,9	16,7	12,9	8,7	4,3	0,0	1,7	7,0	11,3	15,3	19,9	24,0
3,9	7,8	11,2	14,9	18,7	22,0	20,3	16,4	12,7	9,0	5,2	1,9	66	20,1	16,2	12,8	9,1	5,3	2,0	3,7	7,6	11,3	15,0	18,8	22,1
5,0	8,2	11,2	14,7	17,9	20,3	19,2	16,0	12,6	9,3	6,0	3,7	64	19,0	15,8	12,8	9,3	6,1	3,7	4,8	8,0	11,4	14,7	18,0	20,3
5,7	8,5	11,3	14,4	17,3	19,2	18,4	15,7	12,6	9,5	6,6	4,8	62	18,3	15,5	12,7	9,6	6,7	4,8	5,6	8,3	11,4	14,5	17,4	19,2
6,4	8,8	11,4	14,2	16,8	18,4	17,7	15,3	12,5	9,7	7,1	5,6	60	17,6	15,2	12,6	9,8	7,2	5,6	6,3	8,7	11,5	14,3	16,9	18,4
6,9	9,1	11,4	14,1	16,4	17,8	17,2	15,1	12,5	9,9	7,5	6,2	58	17,1	14,9	12,6	9,9	7,6	6,2	6,8	8,9	11,5	14,1	16,5	17,8
7,3	9,3	11,5	13,9	16,0	17,3	16,8	14,8	12,4	10,1	7,9	6,7	56	16,7	14,7	12,5	10,1	8,0	6,7	7,2	9,2	11,6	13,9	16,1	17,3
7,7	9,5	11,5	13,8	15,7	16,8	16,4	14,6	12,4	10,2	8,2	7,1	54	16,3	14,5	12,5	10,2	8,3	7,2	7,6	9,4	11,6	13,8	15,8	16,9
8,0	9,7	11,5	13,6	15,4	16,5	16,0	14,4	12,4	10,3	8,5	7,5	52	16,0	14,3	12,5	10,4	8,6	7,5	8,0	9,6	11,6	13,7	15,5	16,5
8,3	9,8	11,6	13,5	15,2	16,1	15,7	14,3	12,3	10,4	8,7	7,9	50	15,7	14,2	12,4	10,5	8,8	7,9	8,3	9,7	11,7	13,6	15,3	16,1
8,6	10,0	11,6	13,4	15,0	15,8	15,5	14,1	12,3	10,6	9,0	8,2	48	15,4	14,0	12,4	10,6	9,0	8,2	8,5	9,9	11,7	13,4	15,0	15,8
8,8	10,1	11,6	13,3	14,8	15,5	15,2	14,0	12,3	10,7	9,2	8,5	46	15,2	13,9	12,4	10,7	9,2	8,5	8,8	10,0	11,7	13,3	14,8	15,5
9,1	10,3	11,6	13,2	14,6	15,3	15,0	13,8	12,3	10,7	9,4	8,7	44	14,9	13,7	12,4	10,8	9,4	8,7	9,0	10,2	11,7	13,3	14,6	15,3
9,3	10,4	11,7	13,2	14,4	15,0	14,8	13,7	12,3	10,8	9,6	9,0	42	14,7	13,6	12,3	10,8	9,6	9,0	9,2	10,3	11,7	13,2	14,4	15,0
9,5	10,5	11,7	13,1	14,2	14,8	14,6	13,6	12,2	10,9	9,7	9,2	40	14,5	13,5	12,3	10,9	9,8	9,2	9,4	10,4	11,8	13,1	14,3	14,8
9,6	10,6	11,7	13,0	14,1	14,6	14,4	13,5	12,2	11,0	9,9	9,4	38	14,4	13,4	12,3	11,0	9,9	9,4	9,6	10,5	11,8	13,0	14,1	14,6
9,8	10,7	11,7	12,9	13,9	14,4	14,2	13,4	12,2	11,1	10,1	9,6	36	14,2	13,3	12,3	11,1	10,1	9,6	9,8	10,6	11,8	12,9	13,9	14,4
10,0	10,8	11,8	12,9	13,8	14,3	14,1	13,3	12,2	11,1	10,2	9,7	34	14,0	13,2	12,2	11,1	10,2	9,7	9,9	10,7	11,8	12,9	13,8	14,3
10,1	10,9	11,8	12,8	13,6	14,1	13,9	13,2	12,2	11,2	10,3	9,9	32	13,9	13,1	12,2	11,2	10,4	9,9	10,1	10,8	11,8	12,8	13,7	14,1
10,3	11,0	11,8	12,7	13,5	13,9	13,8	13,1	12,2	11,3	10,5	10,1	30	13,7	13,0	12,2	11,3	10,5	10,1	10,2	10,9	11,8	12,7	13,5	13,9
10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	28	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8
10,5	11,1	11,8	12,6	13,3	13,6	13,5	12,9	12,1	11,4	10,7	10,4	26	13,5	12,9	12,2	11,4	10,7	10,4	10,5	11,1	11,9	12,6	13,3	13,6
10,7	11,2	11,8	12,6	13,2	13,5	13,3	12,8	12,1	11,4	10,8	10,5	24	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13,5
10,8	11,3	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,8	12,1	11,5	10,9	10,7	22	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3
10,9	11,3	11,9	12,5	12,9	13,2	13,1	12,7	12,1	11,5	11,0	10,8	20	13,1	12,7	12,1	11,5	11,1	10,8	10,9	11,3	11,9	12,5	13,0	13,2
11,0	11,4	11,9	12,4	12,8	13,1	13,0	12,6	12,1	11,6	11,1	10,9	18	13,0	12,6	12,1	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	11,9	12,4	12,9	13,1
11,1	11,5	11,9	12,4	12,7	12,9	12,9	12,5	12,1	11,6	11,2	11,1	16	12,9	12,5	12,1	11,6	11,3	11,1	11,1	11,5	11,9	12,4	12,8	12,9
11,3	11,6	11,9	12,3	12,6	12,8	12,8	12,5	12,1	11,7	11,3	11,2	14	12,7	12,4	12,1	11,7	11,4	11,2	11,2	11,5	11,9	12,3	12,7	12,8
11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	12	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7
11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	10	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6
11,6	11,7	11,9	12,2	12,4	12,5	12,4	12,3	12,0	11,8	11,6	11,5	8	12,4	12,3	12,1	11,8	11,6	11,5	11,6	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5
11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	6	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3
11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	4	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2
11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1
12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes. Tomado de Serie de Riego y Drenaje de la FAO (2006), “Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”.