

**ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN  
LA RECARGA DE ACUÍFEROS DE AGUAS TERMALES  
MEDIANTE MODELOS DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS  
CASO DE ESTUDIO: SISTEMA GEOTÉRMICO PAIPA**

**Vladimir Leonardo Caldas Afanador**

**Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Facultad de Ingeniería Civil  
Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos  
Hidráulicos y Medio Ambiente  
BOGOTÁ D.C.  
2023**



**ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN  
LA RECARGA DE ACUÍFEROS DE AGUAS TERMALES  
MEDIANTE MODELOS DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS  
CASO DE ESTUDIO: SISTEMA GEOTÉRMICO PAIPA**

**Vladimir Leonardo Caldas Afanador**

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en  
Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio  
Ambiente**

**Director**

**Ing., Msc., Dr. Yuly Andrea Sánchez Londoño**

**Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Facultad de Ingeniería Civil  
Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos  
Hidráulicos y Medio Ambiente  
BOGOTÁ D.C.**

**2023**



---

UNIVERSIDAD

El Trabajo de grado de maestría titulado “ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA RECARGA DE ACUÍFEROS DE AGUAS TERMALES MEDIANTE MODELOS DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA GEOTÉRMICO PAIPA”, presentado por Vladimir Leonardo Caldas Afanador, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

### Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---



---

**Yuly Andrea Sánchez Londoño**

**Director de trabajo de grado**

## **DEDICATORIA**

A mi padre Franciscos José Caldas y mi madre Rosalba Afanador de Caldas, dedico este trabajo, quienes con su gran esfuerzo y pujanza han despertado en mi la necesidad de siempre avanzar.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Doctora Yuly Andrea Sánchez Londoño expreso mi más sincero agradecimiento por su disposición y colaboración para adelantar el presente trabajo investigativo.

Finalmente, agradezco de la mejor manera a todos los docentes que han participado en mi formación profesional y que de una u otra forma participaron en la elaboración del presente documento.

## RESUMEN

Los datos climatológicos observados durante varios años han demostrado que el cambio climático es una realidad, por lo cual, es necesario investigar sus posibles efectos sobre diferentes procesos naturales en el planeta.

El aumento de gases de efecto invernadero ha provocado una marcada tendencia hacia el aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones a nivel mundial, afectando substancialmente el ciclo normal del agua, disminuyendo su disponibilidad para el consumo humano y de otras especies, que normalmente captan y aprovechan el agua a través de fuentes superficiales.

Otra alternativa para el aprovechamiento del recurso hídrico corresponde a las aguas subterráneas, que se generan a través de la infiltración por capas de materiales, depositándose en acuíferos de diferentes clases.

Actualmente los depósitos subterráneos de agua son aprovechados para diferentes fines como agricultura, consumo, turismo, recreación, etc. Sin embargo, principalmente las variaciones en precipitación y temperatura pueden afectar la recarga disminuyendo los niveles y haciendo más difícil a través del tiempo su accesibilidad.

El presente trabajo de investigación consistió en la estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos en el Sistema Geotérmico de Paipa, para lo cual, se recopiló y procesó un volumen importante de información extraída de fuentes primarias y secundarias, dando como resultado inicial un modelo hidrogeológico del sistema geotérmico compuesto por 434 unidades, que tiene en cuenta topografía,

relieve, geología, geomorfología, coberturas, suelos, etc., mediante el cual, se estimó inicialmente la recarga potencial mensual y anual para un periodo de control entre el año 1991 y 2021.

Posteriormente, se adoptó la investigación realizada por Ruiz (2010), en la cual se generaron escenarios de cambio climático para Colombia de periodos futuros (2011 – 2040), (2041 – 2070) y (2071 – 2100), utilizando modelos climáticos globales y regionales los cuales han sido utilizados históricamente para este tipo de investigación.

El conjunto de escenarios de cambio climático fue utilizado por el autor para generar un Multimodelo de acuerdo con la metodología planteada por Jones (2004). La investigación concluyó sobre la alta probabilidad del aumento de temperatura y disminución de la precipitación en el Departamento de Boyacá a determinadas tasas que fueron utilizadas para estimar estos parámetros mencionados en periodos futuros y estimar su correspondiente recarga.

Una vez obtenida la recarga potencial para el periodo de control (1991 – 2021) y la recarga potencial para periodos futuros (2011 – 2040), (2041 – 2070) y (2071 – 2100), se realizó una comparación con el fin de evidenciar cambios.

Se observó que, para periodos futuros, la disminución de la precipitación y el aumento de temperatura producirán una disminución importante en la recarga potencial de acuíferos, debido al aumento de la Evapotranspiración Real (ETR).

Así mismo, también se evidenció que la recarga potencial anual disminuirá 46.79% para el periodo (2011 – 2040), 43.96% para el periodo (2041 – 2070) y 38.17% para el periodo (2071 – 2100) con respecto al periodo de control (1991 – 2021).

De acuerdo con las tendencias propuestas por Ruiz (2010), el presente trabajo pronostica que posiblemente a futuro no solamente se verán afectadas las fuentes de agua superficial, sino también las fuentes de agua subterránea, las cuales para el caso del Municipio de Paipa son de especial importancia, debido a que son aprovechadas con fines recreativos y de salud, atrayendo un importante número de turistas a la región, fortaleciendo la economía local y del Departamento.

Con el fin de validar el modelo de cambio climático empleado, se realizó una proyección con las tendencias de temperatura y precipitación propuestas por Ruiz (2010) para el mes de marzo de 2021 a febrero de 2022 y se compararon datos con los registros históricos de las estaciones del IDEAM para el mismo periodo, encontrándose diferencias notorias que hacen inferir la necesidad de revisar o reevaluar el trabajo de Cambio Climático para Colombia.

Igualmente, para validar el modelo hidrogeológico elaborado en el presente trabajo, se realizó una comparación con estudio realizado por SGC (2017) para obtener recarga potencial, obteniéndose resultados significativamente similares.



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>26</b>
3.1	GENERAL .....	26
3.2	ESPECÍFICOS .....	26
<b>4</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO.....</b>	<b>27</b>
4.1	MUNICIPIO DE PAIPA.....	27
4.1.1	Localización .....	27
4.1.2	Economía.....	28
4.1.3	Fuentes termales del Municipio de Paipa .....	28
4.2	ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS .....	29
4.2.1	Balance de suelos .....	29
4.2.2	Fracción de lluvia interceptada por el follaje .....	30
4.2.3	Infiltración .....	31
4.2.4	Precipitación que infiltra mensualmente .....	34
4.2.5	Escorrentía superficial (ESC).....	35
4.2.6	Capacidad de campo, punto de marchitez, densidad y profundidad de raíces .....	35
4.2.7	Estimación de Evapotranspiración Potencial .....	37
4.2.8	Estimación de la Evapotranspiración Real (ETR) y humedad al final del mes (Hsf) .....	37
4.2.9	Recarga hídrica potencial acuífero (Rp) .....	40
4.3	MODELO CONCEPTUAL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA SGC (2017) .....	41
4.4	GEOLOGÍA SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA .....	48
4.5	GEOMORFOLOGÍA SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA.....	53
4.6	SUELOS PRESENTES EN EL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA .....	56
4.7	COBERTURA DE LOS SUELOS EN EL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA .....	58
4.8	HIDROLOGÍA SUPERFICIAL EN EL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA .....	59
4.9	EFFECTO INVERNADERO Y CALENTAMIENTO GLOBAL.....	60
4.10	CAMBIO CLIMÁTICO.....	61
4.11	CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA DE ACUERDO CON RUIZ (2010) .....	64
<b>5</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>72</b>

5.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	72
5.2	DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	73
5.3	ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLOGICO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA 73	
5.4	REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO.....	74
5.4.1	Selección de los puntos .....	74
5.4.2	Realización de pruebas de infiltración .....	75
5.4.3	Presentación de resultados obtenidos de las pruebas de infiltración .....	75
5.5	APLICACIÓN DE MODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	76
5.6	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	77
<b>6</b>	<b>ELABORACIÓN DEL MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL (ACTUAL Y FUTURA).....</b>	<b>78</b>
6.1	DELIMITACIÓN ÁREA DE TRABAJO .....	78
6.2	MODELO MORFOLÓGICO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA.....	80
6.3	MODELO GEOMORFOLÓGICO MAS COBERTURAS .....	82
6.4	MODELO DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS.....	84
6.4.1	Estimación de infiltración base, densidades, capacidad de campo, punto de marchitamiento y profundidad de las raíces, por unidad geomorfológica más coberturas. ....	84
6.4.2	Estimación de coeficiente de infiltración .....	85
6.4.3	Estimación Precipitación (P) del Sistema Geotérmico Paipa .....	87
6.4.4	Estimación de la precipitación que infiltra (Pi) y Escorrentía (ESC). ....	89
6.4.5	Estimación de Evapotranspiración Potencial .....	90
6.4.6	Estimación de la Evapotranspiración Real (ETR) y humedad al final del mes (Hsf). ....	92
6.4.7	Recarga hídrica potencial acuífero (Rp) .....	93
6.4.8	Recarga potencial (Rp) Anual para la Unidad Geomorfológica No 31. "Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos".....	93
6.5	ENSAYOS DE LABORATORIO Y PRUEBAS DE CAMPO.....	96
6.5.1	Selección de los puntos .....	96
6.5.2	Realización de pruebas de infiltración y toma de muestras de suelo .....	98
6.5.3	Resultados obtenidos.....	102
6.6	MODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	103
<b>7</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>106</b>
7.1	PROMEDIO RECARGA POTENCIAL (1991 – 2021).....	106
7.2	RECARGA POTENCIAL PERIODO (2011-2040), (2041 – 2070) Y (2071 – 2100). ....	107

7.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	108
7.4	OBSERVACIONES AL MODELO A LAS TENDENCIAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PROPUESTAS POR RUIZ (2010) - IDEAM.....	111
7.4.1	Comparación Temperatura datos históricos con temperatura tendencias de cambio climático Ruiz 2010.....	111
7.4.2	Comparación precipitación datos históricos con precipitación tendencias de cambio climático Ruiz 2010.....	112
7.4.3	Análisis de resultados .....	114
7.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE RECARGA POTENCIAL EN EL PRESENTE PROYECTO CON RESULTADOS DE ESTUDIO DE RECARGA POTENCIAL REALIZADO POR SGC (2017).....	115
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>9</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>121</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>125</b>

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización Municipio de Paipa.....	27
Figura 2. Localización Sistema Geotérmico de Paipa. ....	42
Figura 3. Modelo Estructural Sistema Geotérmico Paipa.....	43
Figura 4. Localización de manantiales termales del área geotérmica de Paipa. ....	45
Figura 5. Modelo conceptual Sistema Geotérmico de Paipa.....	48
Figura 6. Geología Local del Sistema Geotérmico de Paipa.....	53
Figura 7. Ambientes geomorfológicos. ....	54
Figura 8. Unidades Geomorfológicas Sistema Geotérmico de Paipa. ....	55
Figura 9. Mapa de suelos Sistema Geotérmico de Paipa .....	56
Figura 10. Mapa de Coberturas Sistema Geotérmico de Paipa .....	58
Figura 11. Hidrografía Sistema Geotérmico de Paipa. ....	59
Figura 12. Balance de energía solar.....	60
Figura 13. Etapas requeridas para proveer escenarios de cambio climático con el fin de estimar impactos.....	66
Figura 14. Escenarios de Cambio Climático propuestos por el IPCC .....	67
Figura 15. Superposición entre un GCM de resolución 2.5° y un RCM con las estaciones climáticas de Colombia .....	70
Figura 16. Metodología de investigación .....	72
Figura 17. Sistema Geotérmico de Paipa.....	79
Figura 18. Modelo Digital Sistema Geotérmico Paipa .....	80
Figura 19. Curvas de nivel Sistema Geotérmico Paipa .....	81
Figura 20. Morfología Sistema Paipa.....	82
Figura 21. Intersecado layer Geomorfología y Coberturas del sistema. ....	83
Figura 22. Estaciones climatológicas dentro del área de influencia del proyecto. ....	87
Figura 23. Precipitación mes de marzo de 1991. ....	89

Figura 24. Selección de puntos preliminares para realización de pruebas y tomas de muestras. .....	97
Figura 25. Recarga potencial año 1991 y año 2021.....	107
Figura 26. Recarga Potencial (Rp) mensuales periodos de interés. ....	109
Figura 27. Comparación de resultados para los periodos de interés .....	110
Figura 28. Comparación resultados de Rp obtenida en el presente proyecto con resultados de modelo del SGC (2017). ....	116
Figura 29. Imágenes satelitales Sistema Geotérmico de Paipa .....	118

### LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Valores de infiltración en función de la textura de los suelos.....	33
Tabla 2. Coeficiente de infiltración por pendiente (Kp).....	33
Tabla 3. Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal (Kv).....	34
Tabla 4. Valores de Capacidad de Campo, Punto de Marchitamiento y Densidad, en función de la textura de los suelos. ....	36
Tabla 5. Profundidad de las raíces en función del cultivo .....	36
Tabla 6. Porcentaje de horas de sol mensual.....	37
Tabla 7. Resultados obtenidos de cambio climático para el Departamento de Boyacá. ....	71
Tabla 8. Características físicas Unidad Geomorfológica más cobertura No31. ....	85
Tabla 9. Precipitación mensual año 1991.....	88
Tabla 10. Precipitación mensual año 2021.....	88
Tabla 11. Temperatura promedio mensual año 1991.....	91
Tabla 12. Temperatura promedio mensual año 2021.....	91
Tabla 13. Estimación de la Recarga Potencial (Rp) anual para la Unidad Geomorfológica más Cobertura No. 31.....	95
Tabla 14. Localización pruebas y toma de muestras .....	97
Tabla 15. Resultados prueba de Infiltración base .....	102

Tabla 16. Precipitaciones mensuales año (2011 – 2040).....	104
Tabla 17. Precipitaciones mensuales año (2041 – 2070).....	104
Tabla 18. Precipitaciones mensuales año (2071 – 2100).....	104
Tabla 19. Temperatura media mensual. ....	105
Tabla 20. Estimación de la recarga hídrica potencial mensual para los periodos de interés....	108
Tabla 21. Datos históricos temperatura y datos estimados de acuerdo con el trabajo de Ruiz (2010).....	111
Tabla 22. Datos históricos precipitación y datos de precipitación estimados de acuerdo con el trabajo de Ruiz (2010).....	112
Tabla 23. Diferencia en milímetros entre datos de precipitación históricos y datos de precipitación según tendencias IDEAM.....	113

### **LISTADO DE FOTOGRAFÍAS**

Fotografía 2. Anillos prueba de infiltración.....	98
Fotografía 3. Adecuación vehículo para pruebas de campo y toma de muestras. ....	99
Fotografía 4. Localización puntos seleccionados con equipo GPS Garmin Oregon 550.....	99
Fotografía 5. Unidades Geomorfológicas más Cobertura verificadas en campo. ....	100
Fotografía 6. Prueba de infiltración.....	101
Fotografía 7. Toma de muestras de suelo.....	102

## LISTADO DE SIGLAS

CAR:	Corporación Autónoma Regional
CMNUCC:	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DANE:	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DEM:	Digital Elevation Model
IDEAM:	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IPCC:	El Intergovernmental Panel on Climate Change
ITP:	Instituto Termal de Paipa
GCM:	Modelo Global Climático
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
ONU:	Organización de las Naciones Unidas
RCM:	Modelo Regional Climático
SGC:	Servicio Geológico Colombiano
UNITAR	United Nations Institute for Training and Research
UPTC:	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Retención si P es menor o igual a 5 mm/mes .....	30
Ecuación 2. Si el producto de $P \cdot C_{fo}$ es mayor o igual de 5 mm/mes .....	30
Ecuación 3. si P es mayor de 5mm/mes y el producto de $P \cdot C_{fo}$ es menor de 5 mm/mes .....	30
Ecuación 4. $K_{fc}$ para valores de $f_c$ entre 16 mm/día y 1568 mm/día .....	31
Ecuación 5. $K_{fc}$ para valores de $f_c$ menores a 16 mm/día .....	31
Ecuación 6. $K_{fc}$ para valores de $f_c$ mayores a 1568 mm/día $K_{fc}$ .....	31

Ecuación 7. $C_i$ cuando $K_p+K_v+K_{fc}$ es mayor que 1 .....	34
Ecuación 8. $C_i$ cuando $K_p+K_v+K_{fc}$ es menor o igual a 1 .....	34
Ecuación 9. Infiltración pluvial mensual ( $P_i$ ) .....	34
Ecuación 10. Escorrentía Superficial (ESC) .....	35
Ecuación 11. Evapotranspiración potencial (ETP) .....	37
Ecuación 12. Coeficiente de humedad $C_1$ .....	38
Ecuación 13. Coeficiente de Humedad $C_2$ .....	38
Ecuación 14. ETR si $((C_1+C_2)/2)ETP$ es menor o igual a HD .....	39
Ecuación 15. ETR si $((C_1+C_2)/2)ETP$ es mayor que HD .....	39
Ecuación 16. $H_{sf}$ si $(HD + PM - ETR)$ es menor que la capacidad de campo .....	40
Ecuación 18. $H_{sf}$ si $(HD + PM - ETR)$ es mayor o igual que la capacidad de campo .....	40
Ecuación 19. Recarga potencial mensual.....	41



## GLOSARIO

**Acuicludo:** definiéndose como aquella formación geológica o estrato confinante que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación (Herrera, 2019, p9).

**Acuífero:** aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación de agua por sus poros o grietas hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir sus necesidades (Custodio y Llamas, 1983, P259).

**Acuífero confinado:** estrato con agua atrapada entre dos estratos mucho menos permeables como arcilla o basamento de roca, es decir, es un acuífero limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables (Herrera, 2019, p8).

**Acuífero Libre:** depósito que se presentan cuando el manto freático carece de un estrato impermeable que lo limite por la parte superior, de modo que el nivel del agua puede subir o bajar libremente (Herrera, 2019, p8).

**Acuífugo:** formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo un macizo granítico no alterado o rocas metamórficas sin meteorización, ni fracturación (Herrera, 2019, p10).

**Acuitardo:** formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua, la transmiten muy lentamente, por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones (Herrera, 2019, p10).

**Agua subterránea:** parte de la precipitación que se infiltra a través de poros de los suelos y rocas fragmentadas.

**Ciclo Hidrológico:** el agua existe en un espacio llamado hidrosfera, que se extiende desde quince kilómetros arriba de la atmosfera hasta un kilómetro por debajo

de la litosfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrosfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico (Chow et al. 1994, p2).

**Escenarios de Cambio Climático:** De acuerdo con Pabón (2005), Un escenario de cambio climático no es ni un pronóstico ni una predicción climática, es una representación del clima afectada por una condición de gases de efecto invernadero.

**Escorrentía:** La escorrentía superficial consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre, y comprende el agua por exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y que se mueve libremente por la superficie del terreno (Herrera, 2019, p99).

**Estratigrafía:** ciencia que describe los estratos o que trata de la formación, composición, distribución, cronología, clasificación, secuencia y correlación temporal de las rocas dispuestas en estratos preexistente (Herrera, 2019, p41).

**Evapotranspiración:** es el proceso por el cual el agua líquida pasa al estado de vapor en condiciones naturales y se transfiere a la atmósfera (Herrera, 2019, p121).

**Fallas:** son fracturas o roturas de bloques de rocas, a lo largo de las cuales se producen desplazamientos de un bloque respecto a otro preexistente (Herrera, 2019, p50).

**Geología:** La Geología es la ciencia que estudia la formación, composición, estructura e historia de la Tierra.

**Hidrogeología:** es aquella parte de la Hidrología que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico, y sus reacciones con el hombre (Custodio y Llamas, 1983, P49).

**Hidrología:** Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos (Aparicio, 1992, P13).

**Infiltración:** Es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno en el suelo (Herrera, 2019, p92).

**Mineral:** sustancia inorgánica compuesta de por elementos químicos y estructura cristalina.

**Modelo Climático Regional (RCM):** modelo de clima de alta resolución que cubre un área limitada del globo, típicamente 5000 Km.X5000 Km., con una resolución horizontal típica de 50 kilómetros (Jones et al., 2004).

**Modelos de Cambio Climático Globales (GMCs):** La representación matemática del comportamiento de la atmósfera se hace a partir de las ecuaciones básicas que describen el flujo de masas de aire, el equilibrio térmico, el equilibrio hidrostático, el balance energético, la continuidad del aire seco y la continuidad de la humedad, principalmente. A este conjunto de ecuaciones se le denomina Modelo. Cuando el interés es, además, representar el comportamiento atmosférico de todo el planeta, se dice que el modelo es global. (Ovideo, 2010).

**Rocas ígneas:** las rocas ígneas comprenden aquellas que se han formado a partir de un material preexistente que ha tenido una etapa de fusión (Herrera, 2019, p23).

**Rocas metamórficas:** El metamorfismo puede definirse como el proceso o serie de procesos endógenos que conducen al cambio mineral y estructural de las rocas sólidas a condiciones fisicoquímicas diferentes de aquellas en donde se encontraban originalmente (Herrera, 2019, p32).

**Rocas sedimentarias:** El carácter común a las rocas exógenas es su origen a partir de la destrucción química o mecánica de una roca preexistente (Herrera, 2019, p36).

**Precipitación:** incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca (Chow et al. 1994, p65).

**Pozos de agua:** sondeos o pozos de pequeño diámetro (2" o 4"), donde se lleva el control continuo de muestras de roca que conforman el subsuelo (Herrera, 2019, p58).

**Recarga hídrica:** El agua que penetra en el suelo a través de la superficie del terreno se dice que se ha infiltrado y una parte es retenida por el suelo hasta alcanzar la capacidad de campo y una vez superada esta retención máxima, el resto del agua desciende por gravedad hasta el nivel freático. A este volumen se le denomina infiltración eficaz o recarga (Herrera, 2019, p134).

## 1 INTRODUCCIÓN

La actividad humana ha conllevado a un aumento en el volumen de gases de efecto invernadero que ocasionan el calentamiento progresivo del planeta, provocando una marcada variación en el ciclo del agua.

El Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, ha conceptualizado que uno de los previsibles efectos del cambio climático corresponde al aumento de la temperatura media y la disminución de la precipitación. Estos cambios en la precipitación y temperatura pueden afectar notoriamente la disponibilidad del recurso hídrico sobre la superficie terrestre, creando la necesidad de evaluar alternativas para el suministro de agua.

Las aguas subterráneas son un importante recurso que puede aprovecharse, sin embargo, el cambio climático también puede afectar su disponibilidad a futuro, haciendo necesaria la estimación de sus efectos en la recarga de acuíferos, con el fin de crear estrategias para su mitigación y adaptación. Acorde con lo anterior, la presente investigación se basa en la estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos del Sistema Geotérmico de Paipa, con el fin de determinar posibles consecuencias y brindar una herramienta para la justificación de elaboración de políticas de adaptación.

El presente documento, está compuesto por varias secciones dentro de las cuales se encuentra el Capítulo 2 “PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA” donde se describe la necesidad de llevar a cabo la presente investigación; Capítulo 3 “OBJETIVOS” en el cual

se establece claramente el propósito de la investigación; Capítulo 4 “MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO” que facilita al lector contextualizarse sobre la temática de la investigación; Capítulo 5 “MARCO METODOLÓGICO” se exponen los pasos seguidos para cumplir el objetivo de la investigación; Capítulo 6 “ELABORACIÓN DEL MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL (ACTUAL Y FUTURA)” se presentan los procedimientos realizados para la estimación de la recarga hídrica y su posible afectación por efectos del cambio climático; Capítulo 7 “RESULTADOS” y Capítulo 8 “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES” donde se establecen los datos que fueron estimados luego de la realización de la totalidad del proyecto de investigación y se presenta un análisis de las situaciones evidenciadas para finalmente recomendar alternativas y el Capítulo 9. “REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA” en el cual se muestra toda la información estudiada para el planteamiento, ejecución y finalización del presente trabajo de grado.

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años a través de la investigación científica, se ha evidenciado la existencia del cambio climático por el que atraviesa el planeta tierra; esta situación motiva la necesidad de cuantificar los posibles efectos que puede generar sobre diversos sectores socioeconómicos y ecosistemas naturales en todo el mundo (Pernía & Fornes, 2009). De acuerdo con el IPCC (2018), uno de los impactos más perceptibles generado por el efecto del cambio climático es la variabilidad del ciclo hidrológico, el cual es cambiante en un mundo cuyas temperaturas van en aumento debido al reforzamiento del efecto invernadero ocasionado por gases provenientes de la actividad natural y humana.

Durante el ciclo hidrológico el agua pasa por distintas etapas, entre las cuales están: la evaporación, evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía, etc. Es a través de la infiltración del flujo de agua que un acuífero puede recargarse, almacenarse y en algunos casos ser extraído para la actividad humana (Bolaños & Betancur, 2018). El agua subterránea por su naturaleza abundante constituye un recurso estratégico frente a la previsible disminución de los recursos hídricos superficiales (ríos, lagos, lagunas, quebradas, entre otros cuerpos de agua), en función de la profundidad que se encuentre el acuífero, el tipo de material que circula y su ubicación geográfica (Pernía & Fornes, 2009).

Debido a la necesidad de investigar fuentes hídricas diferentes a las superficiales, las aguas subterráneas se presentan como una alternativa, teniendo en cuenta que han sido, son y pueden llegar a ser la principal fuente de abastecimiento en el mundo para la actividad humana, ya que constituyen la mayor reserva de agua dulce

líquida del planeta, 95 % descontando los casquetes polares y hielos glaciares (Bolaños & Betancur, 2018).

En América Latina, las aguas subterráneas representan un recurso abundante, sin embargo, su explotación sin control y los posibles efectos del cambio climático pueden llevar a la disminución en la capacidad de recarga de acuíferos (Foro Mundial del Agua 2018.), llevando a un desafío en cuanto al control y seguimiento del recurso hídrico. Colombia presenta un gran potencial de aguas subterráneas; el Servicio Geológico Colombiano (SGC) resalta en el Mapa Hidrogeológico de Colombia (1986) y en el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (2004) que aproximadamente el 75% del territorio presenta condiciones favorables para el almacenamiento de agua subterránea.

Según Alfaro et al. (2018), el Municipio de Paipa en el Departamento de Boyacá, se encuentra ubicado geográficamente en una zona de riqueza de aguas subterráneas; en el mismo existe un área denominada “Sistema Geotérmico de Paipa”, cuyo subsuelo está compuesto en parte por rocas a altas temperaturas que transfieren energía calórica a las aguas circulantes, que son descargadas a través de manantiales, interceptadas a través de sistemas hidráulicos y aprovechadas con fines medicinales, terapéuticos, recreacionales, etc.

Actualmente, el recurso hidrotermal del Municipio de Paipa es utilizado como principal fuente de atracción, generando una economía basada principalmente en la industria turística y hotelera, sin embargo, dicho aprovechamiento del recurso puede verse limitado a futuro por los efectos del cambio climático. Alcaldía de Paipa (2023).



La literatura especializada sobre efectos de cambio climático sugiere que ha futuro una variación en las temperaturas y las precipitaciones, van a influir en el volumen del recurso hídrico subterráneo, por lo cual, es necesario investigar la influencia de estos factores en la recarga de acuíferos en el Sistema Geotérmico de Paipa. Lo anterior, con el fin de desarrollar políticas de manejo y gestión adecuada del recurso hídrico fundamentadas en los posibles efectos del cambio climático en el mundo.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 GENERAL

- ✓ Estimar los posibles efectos del cambio climático sobre la recarga de acuíferos de aguas termales del Sistema Geotérmico de Paipa.

#### 3.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Evaluar los posibles efectos del cambio climático para la zona de estudio en el municipio de Paipa, departamento de Boyacá.
- ✓ Cuantificar el recurso hídrico mediante la implementación de herramientas computacionales para el cálculo del balance hídrico.
- ✓ Estimar y describir los efectos en la recarga de acuíferos debido a los posibles escenarios de cambio climático.

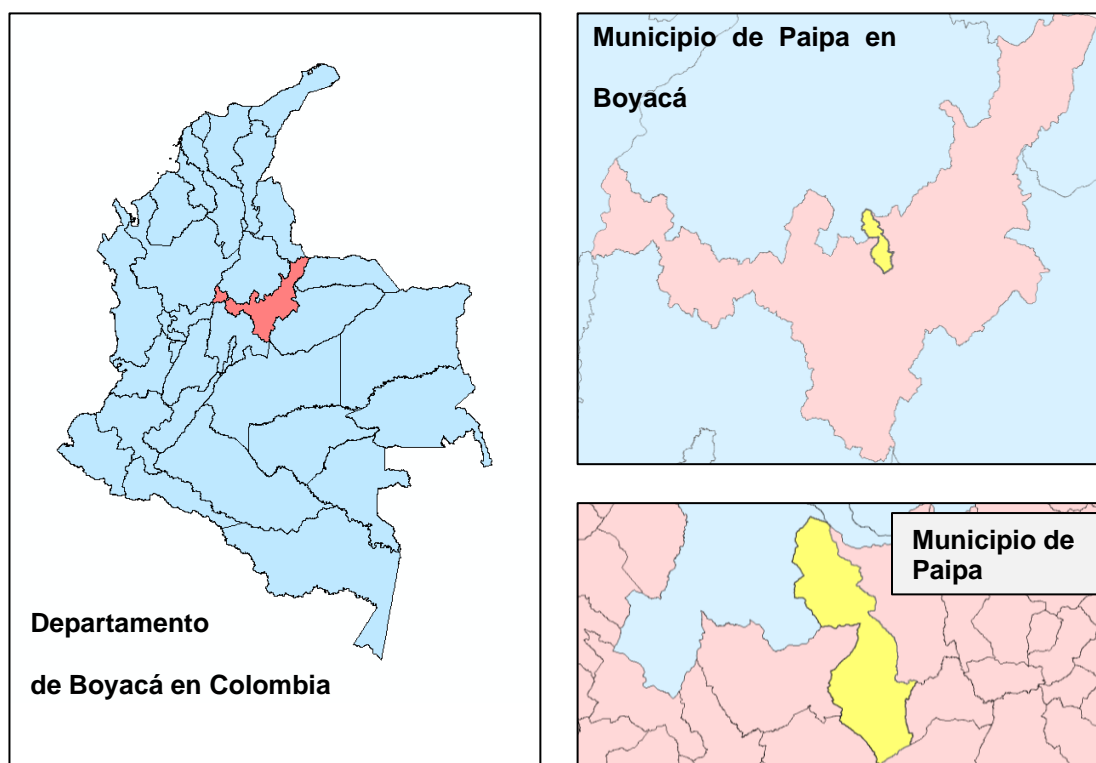
## 4 MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

### 4.1 MUNICIPIO DE PAIPA

#### 4.1.1 Localización

La Figura 1 presenta la localización del Municipio de Paipa en el Departamento de Boyacá, situado al centro – oriente de Colombia. Administrativamente, Paipa se encuentra en la provincia de Tundama del departamento. Es el sexto Municipio más poblado de Boyacá, después de Tunja, Sogamoso, Duitama, Chiquinquirá y Puerto Boyacá. (Alcaldía de Paipa, 2023).

**Figura 1. Localización Municipio de Paipa.**



**Fuente: DANE (2023)**

#### **4.1.2 Economía**

En la estructura económica regional, Paipa participa ampliamente con diversos productos en cada uno de los sectores económicos. En el sector primario se maneja la agricultura, la ganadería y la minería. Dentro de la agricultura se cultivan avena, cebada, maíz, trigo, papa y legumbres. En la ganadería se obtienen productos como la leche y la carne. También se cultivan frutales. Lo mismo que la explotación artesanal minera del carbón, la arena y mineral de piedra. (Alcaldía de Paipa, 2023).

En el sector secundario sobresalen algunas industrias de textiles, químicos, fabricación de productos en madera, productos alimenticios y de construcción. En el sector terciario se destaca principalmente el turismo el cual es una de las principales actividades económicas que presenta el Municipio, destacándose como una de las mayores fuentes de empleo, sin dejar de lado el sector transporte ya que es el medio de conexión entre el turista y los atractivos. (Alcaldía de Paipa, 2023).

#### **4.1.3 Fuentes termales del Municipio de Paipa**

De acuerdo con Alfaro et al (2018), en Paipa, Departamento de Boyacá, existen aguas termales conocidas por las comunidades que han habitado la zona, desde tiempos muy remotos. Uno de los primeros documentos en donde se hizo referencia a estos manantiales fue escrito en 1829 por un investigador francés de apellido Boussingault quien describió la gran cantidad de sales y gases que observó en las aguas termales de una hacienda llamada El Salitre y cómo los indios recuperaban del suelo la sal después del tiempo seco, con el fin de dársela al ganado para engorde. Este investigador escribió

*“(...) No creo que se haya encontrado todavía en la naturaleza un agua mineral tan cargada de sales (...)”*

Como se advirtió anteriormente, una de las principales actividades económicas del Municipio de Paipa es el turismo, debido en mayor medida por las fuentes de agua termal presentes. De acuerdo con investigaciones realizadas por SGC, el origen de las fuentes termales se debe a un flujo de agua que transita por un sistema de fallas hasta llegar a un depósito de rocas volcánicas, que transfieren el calor y son condensadas a un acuífero más próximo a la superficie. (Alfaro, 2018).

## **4.2 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS**

Schosinsky (2006), propone una metodología para la estimación de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.

### **4.2.1 Balance de suelos**

El potencial de las aguas subterráneas de un acuífero representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero, para que no sea sobreexplotado. Dicho potencial se estima mediante la recarga al acuífero, que se determina conociendo en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo (Schosinsky, 2006).

#### **4.2.2 Fracción de lluvia interceptada por el follaje**

Lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración debido a que se considera que, en un mes con lluvia, al menos 5mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky & Losilla, 2000). Además, se considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12% (Butler, 1957) de la precipitación mensual. Sin embargo, en bosques muy densos, la retención de la lluvia se considera en un 20% (Linsley et al., 1958). Se define como coeficiente de follaje (Cfo) el porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno. Un valor de 0,12 para follajes mientras que un valor de 0,20 para bosques densos. Para determinar la Retención (Ret) de lluvia mensual interceptada por follaje se emplea la ecuación 1 y la ecuación 2, dependiendo que se presente cada una de las siguientes situaciones:

##### **Ecuación 1. Retención si $P$ es menor o igual a 5 mm/mes**

$$Ret = P$$

##### **Ecuación 2. Si el producto de $P \cdot Cfo$ es mayor o igual de 5 mm/mes**

$$Ret = P * Cfo$$

##### **Ecuación 3. Si $P$ es mayor de 5mm/mes y el producto de $P \cdot Cfo$ es menor de 5 mm/mes**

$$Ret = 5$$

Donde:

$P$ : Precipitación mensual (mm/mes)

$Ret$ : Retención de lluvia en el follaje (mm/mes)

$Cf$ : Coeficiente de retención del follaje (adimensional)

### 4.2.3 Infiltración

De acuerdo con Schosinsky (2006), uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo ( $K_{fc}$ ), el cual puede estimarse de acuerdo con la ecuación 4, ecuación 5 y ecuación 6, dependiendo de cada escenario.

#### **Ecuación 4. $K_{fc}$ para valores de $f_c$ entre 16 mm/día y 1568 mm/día**

$$K_{fc} = 0.267 \ln(f_c) - 0.000154 f_c - 0.723$$

#### **Ecuación 5. $K_{fc}$ para valores de $f_c$ menores a 16 mm/día**

$$K_{fc} = \frac{0.0148 * f_c}{16}$$

#### **Ecuación 6. $K_{fc}$ para valores de $f_c$ mayores a 1568 mm/día $K_{fc}$ .**

$$K_{fc} = 1$$

Donde:

$f_c$  = Infiltración básica del suelo (mm/día)

El valor de  $f_c$  corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad, por considerar que este espesor es el que está en contacto directo con el agua lluvia. Este valor se obtiene de pruebas en campo, para lo cual se usa principalmente el infiltrómetro de doble anillo (Schosinsky, 2006).

**Moreno et al. (2008)**, establece que el uso del infiltrómetro de doble anillo es una técnica sencilla que permite determinar la capacidad de infiltración del agua en un suelo. Esta técnica da valores de “tasa de infiltración” en unidades de volumen de agua por

unidad de tiempo y superficie de suelo. Es aplicable en casi todo tipo de terreno, sin exceso de pedregosidad o de raíces grandes próximas a la superficie. La capacidad de infiltración disminuye con el tiempo según el suelo se va saturando de agua, de forma que después de un tiempo suficiente, se aproxima a un valor constante próximo a la conductividad hidráulica saturada.

El método se basa en la medida de la velocidad de infiltración del agua en un anillo metálico clavado en el suelo, rodeado de un anillo exterior, también lleno de agua, con el fin de impedir la expansión lateral del bulbo de humectación creado por el anillo de medida. En la fotografía 1, se presenta el montaje del infiltrómetro de doble anillo que básicamente consiste en el hincado de los dos anillos coaxiales y la colocación de una regla para la medición del nivel de agua (Moreno et al., 2008).

**Fotografía 1. Montaje infiltrómetro de doble anillo**



**Fuente: Moreno et al. (2008)**



Para los casos en que no se realicen ensayos para conocer la infiltración básica o base del suelo ( $f_c$ ), Herrera (2019) propone la Tabla 1, en la cual se establece valores de infiltración en función del tipo de textura del suelo.

**Tabla 1. Valores de infiltración en función de la textura de los suelos.**

Textura del suelo	Infiltración (cm/hora)
Arenoso	5 (2.5 – 25)
Arenoso-franco Franco-arenoso	6* 0.8-1.02 – 6* (1.3 – 7.6)
Franco	1.3 – 16* (0.8 – 2)
Franco-arcilloso	0.8 (0.3 – 1.5)
Franco-Arcillo-arenoso Arcillo-arenoso	0.6 – 1* 0.25 (0.03 – 0.5)
Arcillo limoso Arcilloso	1 – 1.25* 0.02 - 0.5 - 0.9* (0.01 – 0.9)

**Fuente: Herrera (2019), p95.**

El coeficiente de infiltración ( $C_i$ ) no solo depende de la textura del suelo, también depende de la pendiente del terreno ( $K_p$ ) y de la vegetación ( $K_v$ ). Para estimar los parámetros correspondientes, se puede hacer uso de las Tabla 2 y la Tabla 3 con valores recomendados por (Schosinsky & Losilla, 2000).

**Tabla 2. Coeficiente de infiltración por pendiente ( $K_p$ )**

Pendiente	Pendiente (%)	$K_p$
Muy plana	0.002 – 0.06	0.30
Plana	0.3 – 0.4	0.20
Algo Plana	1 – 2	0.15
Promedio	2 – 7	0.10
Fuerte	Mayor de 7	0.06

**Fuente: (Schosinsky & Losilla, 2000).**

**Tabla 3. Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal (Kv)**

Cobertura Vegetal	Kv
Cobertura de zacate menos del 50%	0.09
Terreno Cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más del 75%	0.21

**Fuente: (Schosinsky & Losilla, 2000).**

Los coeficientes mencionados, conforman el coeficiente de infiltración (Ci), basado en las siguientes ecuaciones (ONU, 1972):

**Ecuación 7. Ci cuando  $Kp+Kv+Kfc$  es mayor que 1**

$$Ci = 1$$

**Ecuación 8. Ci cuando  $Kp+Kv+Kfc$  es menor o igual a 1**

$$Ci = Kp + Kv + Kfc$$

Donde

Kp: Coeficiente de infiltración por pendiente (adimensional)

Kv: Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal (adimensional)

Kfc: Coeficiente de infiltración por textura del suelo.

#### **4.2.4 Precipitación que infiltra mensualmente**

Para determinar la precipitación que infiltra mensualmente (Pi) se requiere conocer, la precipitación mensual, retención pluvial mensual y el coeficiente de infiltración (Schosinsky, 2006). Su cálculo puede realizarse con la ecuación 9.

**Ecuación 9. Infiltración pluvial mensual (Pi)**

$$Pi = Ci * (P - Ret)$$

Donde:

Pi: Precipitación que infiltra mensualmente (mm/mes)

*C<sub>i</sub>*: Coeficiente de infiltración mensual (adimensional)

*P*: precipitación mensual (mm/mes) (Dato tomado de estaciones meteorológicas)

*Ret*: Retención de lluvia mensual por follaje en [mm/mes]

#### **4.2.5 Escorrentía superficial (ESC)**

La parte de lluvia que no infiltra y tampoco es retenida por el follaje de la vegetación se convierte en Escorrentía superficial (ESC), puede estimarse de acuerdo con la ecuación 10 (Schosinsky, 2006).

#### **Ecuación 10. Escorrentía Superficial (ESC)**

$$ESC = P - Ret - P_i$$

Donde:

*ESC*: Escorrentía Superficial (mm/mes).

*P*: Precipitación mensual (mm/mes) (Dato tomado de estaciones meteorológicas).

*Ret*: Retención de lluvia mensual por follaje (mm/mes).

*P<sub>i</sub>*: Precipitación que infiltra mensualmente (mm/mes).

#### **4.2.6 Capacidad de campo, punto de marchitez, densidad y profundidad de raíces**

De acuerdo con Herrera (2019), en función del tipo de textura del suelo es posible estimar no solo el parámetro de velocidad de infiltración (*f<sub>c</sub>*), sino también la Capacidad de Campo, Punto de Marchitez y densidad, como se aprecia en la Tabla 4:

**Tabla 4. Valores de Capacidad de Campo, Punto de Marchitamiento y Densidad, en función de la textura de los suelos.**

Textura del suelo	Capacidad de Campo (%)	Punto de Marchitez (%)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
Arenoso	9 (6 – 12)	4 (2 – 6)	1.65 (1.5 – 1.8)
Arenoso-franco	16 – 19.5 *	9 – 10.3*	1.15 – 1.6
Franco-arenoso	15 – 20 – 31* (10 – 18)	7.5 – 18* (4 – 8)	0.93-1.08* 1.2 – 1.4*
Franco	22 – 38* (18 – 26)	10 – 30* (8 – 12)	1.03 - 1.4* (1.3 – 1.5)
Franco-arcilloso	27 (23 – 31)	13 (11 – 15)	1.35 (1.3 – 1.4)
Franco-Arcillo-arenoso	20 – 27* 30 – 42*	9 – 16.5* 19 – 26*	1.1* 0.85 – 1.3*
Arcillo-arenoso	31 (27 – 35)	15 (13 – 17)	1.3 (1.25– 1.35)
Arcillo limoso	42.4* (26 – 33)*	24.2* (15 – 22.7)*	1* (0.9–1.16)*
Arcilloso	31 – 38* (31 – 39)	24 – 25* (15 – 19)	1.03 -1.25* (1.2 – 1.3)

**Fuente: Herrera (2019), p95.**

\* Valores obtenidos por Herrera en Guatemala.

De otra parte, para la estimación de la profundidad de las raíces de diferentes capas vegetales, Grassi (1976) propone la Tabla 5.

**Tabla 5. Profundidad de las raíces en función del cultivo**

Cultivo	Metros
Alfalfa (pastos)	1 - 2
Algodón	1 - 1,7
Banano	0,5 - 0,8
Caña de azúcar	1,20 - 2
Frijol	0,5 - 0,7
Cebolla	0,3 - 0,5
Cítricos	1,20 - 2,0
Zacate	0,3 - 0,5
Bosques	2,0 - 3,0

**Fuente: Grassi (1976)**

#### 4.2.7 Estimación de Evapotranspiración Potencial

Otro de los parámetros necesarios para la estimación de la recarga potencial corresponde a la evapotranspiración (ETP), para lo cual existen varios métodos estimativos. Para el caso específico se utiliza el método propuesto por Blaney y Criddle (1972).

#### Ecuación 11. Evapotranspiración potencial (ETP)

$$ETP \left( \frac{mm}{mes} \right) = (8.1 + 0.46 * T) * P_s$$

Donde  $P_s$  corresponde al porcentaje de horas de luz solar mensual con respecto al año y  $T$  a la temperatura media mensual (dato meteorológico). El Sistema geotérmico de Paipa se encuentra aproximadamente sobre la latitud  $5^\circ$ , por lo cual, el porcentaje de horas de sol mensual es el presentado en la Tabla 6.

**Tabla 6. Porcentaje de horas de sol mensual.**

Latitud Norte	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
$5^\circ$	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.6	8.23	8.42	8.07	8.3	8.32	7.57

**Fuente: Hernández (2019)**

#### 4.2.8 Estimación de la Evapotranspiración Real (ETR) y humedad al final del mes (Hsf).

De acuerdo con Schosinsky (2006), Al inicio de un mes cualquiera, el suelo contiene una humedad inicial ( $H_{si}$ ), si no se considera evapotranspiración, la precipitación que infiltra ( $P_i$ ) aumentaría la humedad en el suelo, lo que se traduciría en una mayor evapotranspiración teniendo en cuenta que a medida que aumenta la humedad del suelo

aumenta dicho parámetro, si no consideramos dicho parámetro el coeficiente de humedad C1 se estimaría con la ecuación 12:

**Ecuación 12. Coeficiente de humedad C1**

$$C1 = \frac{Hsi - PM + Pi}{CC - PM}$$

Donde

*Hsi*: Humedad al inicio del mes (mm).

*PM*: Punto de Marchitez (mm).

*Pi*: Precipitación que infiltra (mm-mes).

*CC*: Capacidad de campo (mm).

Sin embargo, el coeficiente C1 no puede ser mayor que la unidad, por lo cual, cuando el resultado es superado este valor se asume un valor máximo de uno (1).

Si se considera la ETP, una vez ocurrida la infiltración el coeficiente de humedad al final del mes (C2) sería:

**Ecuación 13. Coeficiente de Humedad C2**

$$C2 = \frac{Hsi - PM + Pi - (C1 * ETP)}{CC - PM}$$

*Hsi*: Humedad al inicio del mes (mm).

*PM*: Punto de Marchitez (mm).

*Pi*: Precipitación que infiltra (mm-mes).

*CC*: Capacidad de campo (mm).

Dado el caso que, el coeficiente de humedad C2 calculado sea mayor que la unidad del mismo modo que el coeficiente C1, se asume el valor de la unidad.

Otro parámetro necesario para la estimación de la recarga potencial según Schosinsky (2006), es la Humedad Disponible (HD), definida como aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar. La humedad disponible está dada por la siguiente

**Ecuación 14. Humedad Disponible (HD)**

$$HD \left( \frac{mm}{mes} \right) = HSi + Pi - PM$$

Donde

*HD*: Humedad Disponible (mm/mes).

*Hsi*: Humedad de suelo al inicio del mes (mm).

*Pi*: Precipitación que infiltra (mm-mes).

*PM*: Punto de Marchitez (mm).

Para la determinación de la Evapotranspiración Real (ETR), se aplica la ecuación 15 y la ecuación 16:

**Ecuación 15. ETR si  $((C1+C2)/2)ETP$  es menor o igual a HD**

$$ETR (mm/mes) = \left( \frac{C1 + C2}{2} \right) ETP$$

**Ecuación 16. ETR si  $((C1+C2)/2)ETP$  es mayor que HD**

$$ETR \left( \frac{mm}{mes} \right) = HD$$

Donde

*ETR*: Evapotranspiración real (mm/mes).

*ETP*: Evapotranspiración potencial (mm/mes).

*C1*: Coeficiente de humedad máximo (adimensional).

*C2*: Coeficiente de humedad mínimo (adimensional).

*HD*: Humedad disponible (mm/mes).

Ahora bien, de acuerdo con la metodología planteada por Schosinsky (2006), se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, para lo cual, se aplica la ecuación 17 y la ecuación 18 dependiendo de cada situación:

***Ecuación 17. Hsf si (HD + PM – ETR) es menor que la capacidad de campo***

$$HSf = HD + PM - ETR$$

Donde:

*Hsf*: humedad del suelo al final del mes (mm/mes)

*HD*: Humedad disponible (mm/mes)

*PM*: Punto de Marchitez (mm)

***Ecuación 18. Hsf si (HD + PM – ETR) es mayor o igual que la capacidad de campo***

$$HSf = CC$$

#### **4.2.9 Recarga hídrica potencial acuífero (Rp)**

Finalmente, Schosinsky (2006) propone que la recarga al acuífero ocurre si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante es la recarga al acuífero y está dada por la ecuación 19.



**Ecuación 19. Recarga potencial mensual**

$$Rp = Pi + HSi - HSF - ETR$$

Donde

*Rp*: Recarga potencial (mm/mes).

*Pi*: Precipitación que infiltra (mm-mes).

*Hsi*: Humedad de suelo al inicio del mes (mm).

*Hsf*: humedad del suelo al final del mes (mm/mes).

*PM*: Punto de Marchitez (mm).

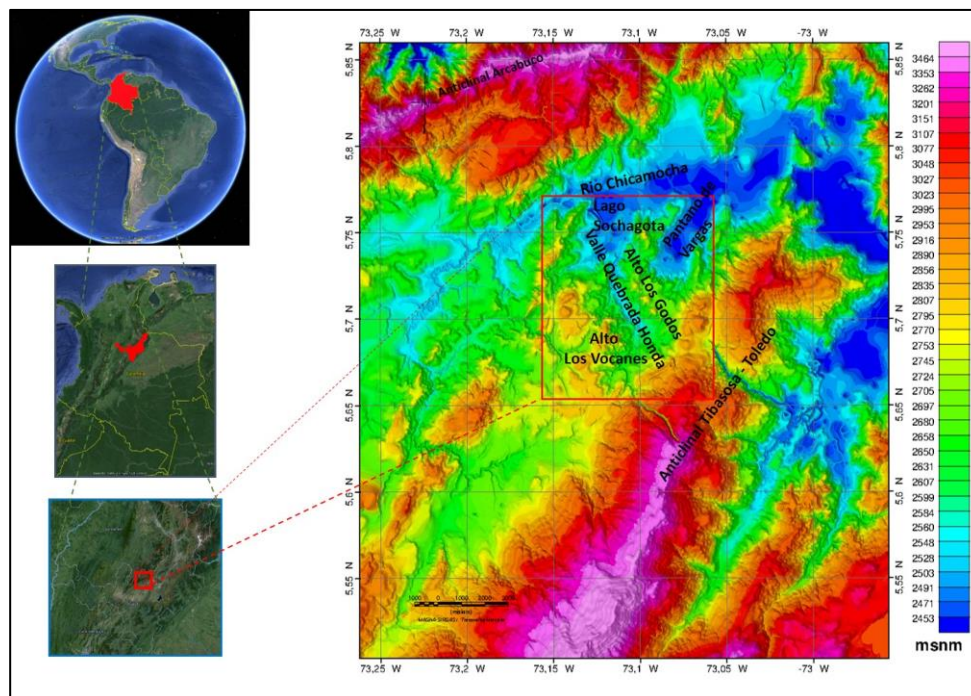
*ETR*: Evapotranspiración real (mm/mes).

**4.3 MODELO CONCEPTUAL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA SGC (2017)**

Alfaro et al. (2017), elaboraron un modelo conceptual del área geotérmica de Paipa, propuesto a partir de pruebas geofísicas de campos potenciales y la integración de observaciones, datos, información y resultados de los trabajos de geoquímica de rocas y fluidos, alteración hidrotermal, sondeos eléctricos verticales, mediciones de temperatura superficial y resultados parciales de modelo resistivo basado en el estudio magnetotelúrico.

En la Figura 2 se aprecia el modelo elaborado por (Alfaro et al., 2017), en el cual el sistema geotérmico se produce en un terreno inclinado de sur a norte donde encuentra la cota más baja cercana o en alrededores del río Chicamocha. La recarga principal del reservorio ocurre desde el sur y suroriente (Anticlinal Tibasosa – Toledo) a través de afloramientos de gran extensión de la Formación Une.

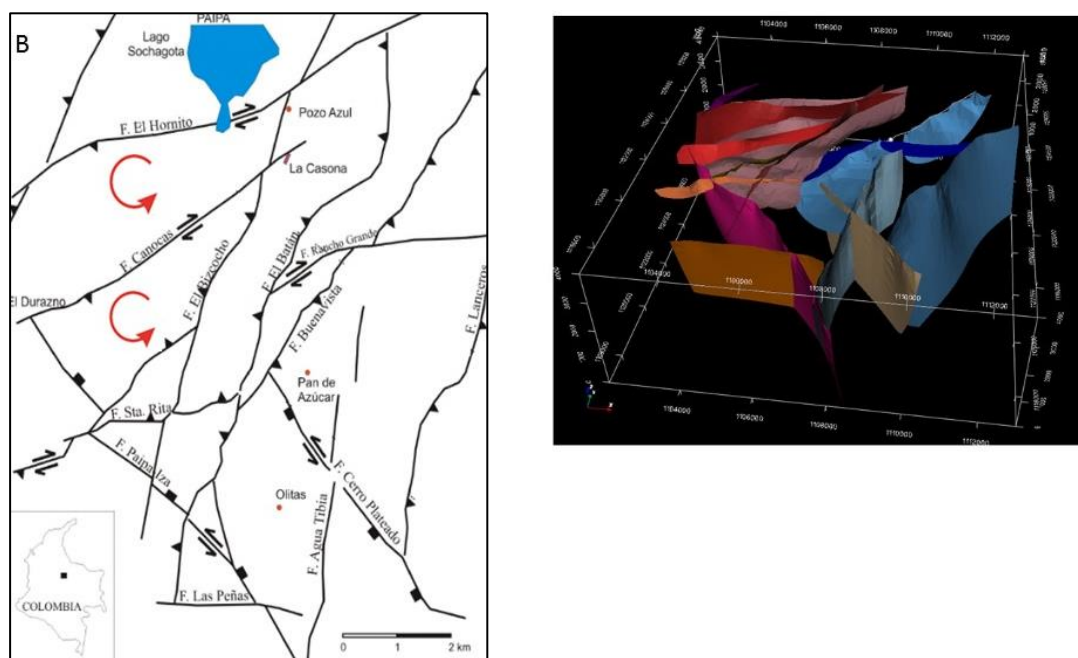
**Figura 2. Localización Sistema Geotérmico de Paipa.**



**Fuente: Alfaro et al. (2017)**

La recarga profunda a un posible reservorio que estaría alojado en el basamento ocurriría a través de estructuras extensivas como fallas, cruces entre fallas y planos de contactos entre las intrusiones ígneas y rocas de basamento y de la cobertura sedimentaria. Dicho reservorio tendría una extensión lateral limitada a fallas y fracturas hidráulicas. El flujo ascendente del fluido termal desde el reservorio profundo se acumularía en la formación Une, conformando un reservorio sedimentario, entre intrusiones ígneas que subyacen los complejos de domos Alto Los Volcanes y Alto Los Godos, al sur de la falla Cerro Plateado, a través de la cual inicia un flujo lateral principalmente a través de la misma formación Une, hasta su descarga en manantiales (Alfaro et al., 2017). A continuación, se presenta la Figura 3 en la cual se ilustra el sistema de fallas locales anteriormente mencionado.

**Figura 3. Modelo Estructural Sistema Geotérmico Paipa**



**Fuente: Alfaro et al. (2017).**

De acuerdo con el análisis de Velandia et. al (2003), el modelo estructural local de la zona está conformado por dos estilos de fallas, uno de piel delgada (y bajo Angulo) y piel gruesa (y Alto Angulo). El primer estilo domina en la zona noroccidental del área geotérmica a partir de la falla Buenavista e incluye las fallas El Batán, El Bizcocho, Canocas, El Hornito, Santa Rita y el Turno y El Turno (todas inversas) y el segundo estilo domina en la zona suroriental y está conformado por fallas que alcanzan el basamento e incluye fallas normales como Paipa – Iza, Cerro Plateado, Las Peñas y fallas inversas como Lancers y Agua Tibias. El mismo autor, considera que las fallas Paipa – Iza y Cerro Plateado son estructuras reactivadas que facilitarían la circulación de fluidos hidrotermales y magma.

Según Cepeda & Pardo (2004), las fallas Aguas Tibias, Cerro Plateado y Paipa Iza, podrían corresponder localmente a las paredes de la caldera. Igualmente, los

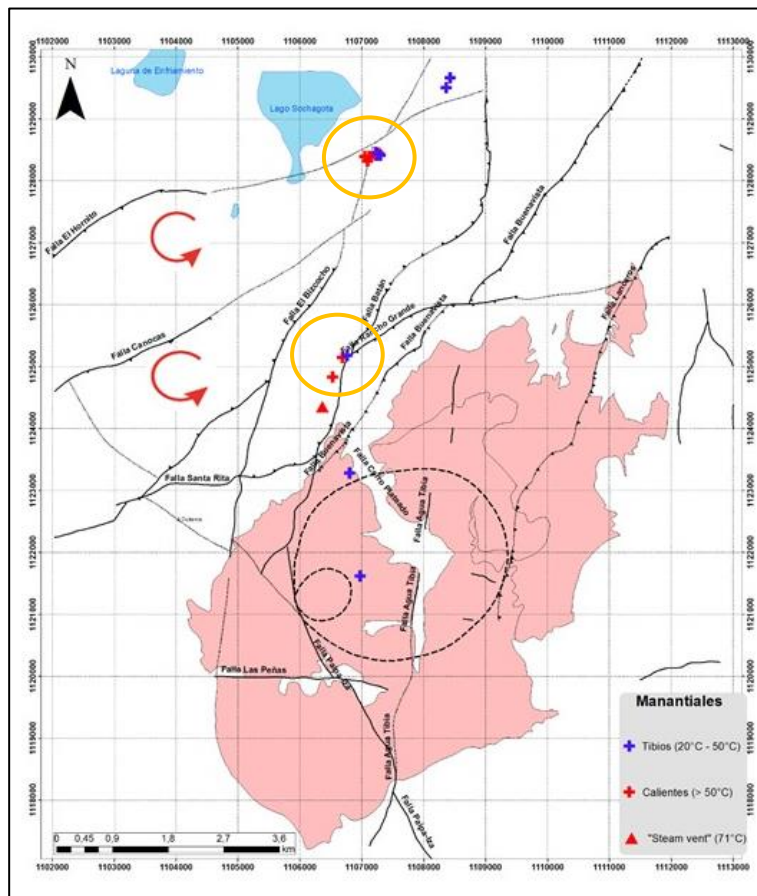
autores manifiestan que la Falla Paipa – Iza está relacionada con focos eruptivos de olitas y su trazo relacionaría los domos de Paipa con domos de Iza, la falla alcanzaría la corteza y facilitaría el ascenso de material magmático desde el manto a capas más superficiales.

Por lo anterior, Alfaro et al. (2017), señala que los rasgos del modelo estructural son favorables al Sistema Geotérmico de Paipa, debido a fallas de basamento y zonas de contacto entre intrusiones ígneas y rocas de la cobertera sedimentaria, que podrían servir como conductos de infiltración y circulación profunda de fluidos, zonas extensivas superficiales (cruces de fallas, giros de bloques, con permeabilidad primaria) que favorecen la recarga y la descarga de fluidos a la superficie.

Ahora bien, la fuente de calor mediante la cual se elevaría la temperatura del flujo de agua, estaría asociada a tres posibles causas: el calor residual de los eventos magmáticos que dieron lugar a las intrusiones ígneas cuya edad más reciente, es del orden de 1 millón de años, calor radiogénico por concentración anómala de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en las intrusiones ígneas y el calor asociado a un gradiente geotérmico normal, debido a que la infiltración a por lo menos 2 km que podría contribuir al aumento de la temperatura hasta máxima de descarga de los manantiales ( $76^{\circ}\text{C}$ ); sin embargo, la existencia de un proceso de mezcla de gran magnitud con una fuente no termal, así como la alteración hidrotermal identificada, sugieren una mayor temperatura en el reservorio (Alfaro et al., 2017).

El sistema geotérmico propuesto tiene dos áreas de descarga principales; una de baja permeabilidad en el sector de La Playa a menos de 1 km al norte de la falla Cerro Plateado, límite norte del reservorio sedimentario, en donde se encuentran el manantial de máxima temperatura de descarga (76°C) y un ventiladero de vapor y, una de mayor permeabilidad en el sector ITP-Lanceros a tres (3) km al norte de la anterior, en donde se concentra el mayor número de manantiales (Alfaro et al., 2017). En la figura 4 se presentan las dos zonas principales, delimitadas con una línea continua color naranja.

**Figura 4. Localización de manantiales termales del área geotérmica de Paipa.**



**Fuente: Alfaro et al. (2017)**

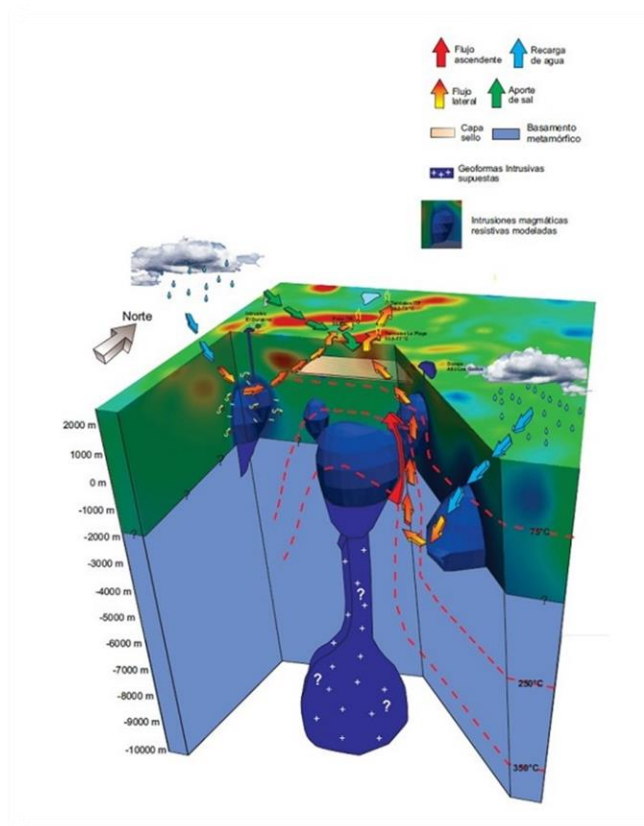
De otra parte, en cuanto a las condiciones climáticas de la zona (precipitación y evaporación) parecen favorecer la formación de evaporitas como evidencian la presencia de eflorescencias de sales visibles en superficie (mirabilita y thernardita) y se infiere de observaciones indirectas por métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos, de zonas de circulación de agua salada. Su concentración en sales es tan elevada que ha permitido el beneficio de sulfato de sodio en la planta Sales de Paipa (SALPA). La extensión y profundidad de una fuerte anomalía negativa de resistividad eléctrica observada en modelos magnetotelúricos 2D y 3D, al noroccidente y occidente del sistema, permite suponer que la fuente salada está originada en la disolución de las sales más solubles (sulfato de sodio) de evaporitas alojadas en niveles inferiores la secuencia sedimentaria (Alfaro et al., 2017).

De acuerdo con lo señalado por Alfaro et al., la mezcla del fluido termal originado en el reservorio geotérmico y la fuente salada, es de tal magnitud que enmascara su composición química e isotópica, e impide inferir condiciones fisicoquímicas del reservorio a partir de la caracterización del agua descargada por los manantiales termales. Además de la descarga en fase líquida, los manantiales termales y salados de baja temperatura registran abundancia de gases con alta concentración relativa de  $\text{CO}_2$  frente a  $\text{CH}_4$ , cuyo origen podría estar relacionado con el aporte de gases magmáticos de bajo contenido de metano o con la oxidación de  $\text{CH}_4$ . La firma isotópica del  $^{13}\text{C}$  en  $\text{CH}_4$  sugiere la posible contribución de gases orgánicos.

Debido a que los fluidos descargados por los manantiales no son representativos del fluido geotérmico por los procesos de mezcla, la temperatura del reservorio no puede ser estimada de forma confiable, sin embargo, con ayuda del termómetro de cuarzo, se estimó que la temperatura sería de 120°C, el modelo de mezcla simple entalpia – silice indica una temperatura máxima alrededor de los 230°C, aunque depósitos de biotita secundaria en vena evidenciada en muestras de xenolitos metamórficos sugiere temperaturas máximas de 320°C.

De acuerdo con las observaciones y resultados alcanzados en los trabajos de exploración realizados por los equipos de investigación del Servicio Geológico Colombiano, el Sistema Geotérmico de Paipa se encuentra localizado entre las coordenadas geográficas Latitud 5,50 Norte a Latitud 5,90 Norte y Longitud 72.95 Oeste a 73.30 Oeste. La principal zona de recarga del sistema se encuentra en el Anticlinal Tibasosa – Toledo por infiltración a través de niveles y estructuras permeables. El origen de la fuente termal es debido posiblemente al calor remanente de rocas volcánicas, contacto con elementos radioactivos y a la profundidad que alcanza el flujo de agua. Finalmente, en la Figura 5, se presenta el modelo del Sistema Geotérmico de Paipa actualizado propuesto por Alfaro et al. (2017).

**Figura 5. Modelo conceptual Sistema Geotérmico de Paipa.**



**Fuente: SGC (2017)**

#### **4.4 GEOLOGÍA SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA**

Para la delimitación del Sistema Geotérmico de Paipa Alfaro et al. (2017) utilizaron el trabajo realizado por Velandia (2003) titulado “Cartografía Geológica y Estructural Sector Sur del Municipio de Paipa”, sin embargo, el mismo autor indica en su trabajo que la cartografía geológica debía ser actualizada y mostrar a tal detalle que permitiera explicar en forma más completa el marco tectónico (fuente de calor – volcanismo y geología estructural) del sistema.



En el marco del convenio 1610, suscrito entre la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC, Gobernación de Boyacá y la Corporación Autónoma Regional del Boyacá – CAR, se realizó la actualización de las planchas geológica 171 y 191.

De acuerdo con la geología de las planchas mencionadas a escala 1:100.000, en la zona del Sistema Geotérmico de Paipa se encuentran las siguientes unidades Geológicas:

**Depósitos cuaternarios (Qal y Qc):** Según Velandia (2003), *“estos depósitos se encuentran extendidos en la depresión que marca el nacimiento del río Chicamocha, incluyendo zonas bajas como la del pantano de Vargas, lago Sochagota y el Salitre al sur de Paipa. Se trata de depósitos de arenas, limos, arcillas y conglomerados correspondientes a la actividad más reciente de tipo aluvial, lacustre y Fluvio-Lacustre, los cuales estarían descansando en forma discordante sobre la formación Tilatá”*

**Formación Tilatá (Tst):** igualmente, en el trabajo de Velandia (2003) “Cartografía Geológica y Estructural Sector Sur del Municipio de Paipa”, se establece que:

*“Esta unidad está ampliamente distribuida desde la Sabana de Bogotá y a lo largo del Altiplano Cundiboyacense hasta Duitama. En la zona aparece en las partes bajas cercanas al Lago Sochagota y con morfología suavemente alomada al E de La Casona, hacia la Vereda Cruz de Murcia. La unidad se compone predominantemente de niveles arenosos en capas medias a gruesas, intercaladas con limolitas y arcillolitas abigarradas. Las arenas son cuarzosas, bien seleccionadas, muy friables y de grano que*

*varía de grueso a fino, redondeado a subredondeado. Son comunes los óxidos de hierro tanto en los niveles duros como blandos.*

*Se presentan capas de lignito, explotados en la zona como carbón de regular calidad. La cartografía de la Formación Tilatá se hace en el sentido de Renzoni & Rosas (1983), incluyendo las gravas o niveles de conglomerados con matriz arenolimoso y líticos de areniscas, chert y cuarzo que conforman lomas redondeadas en la zona y que según Reyes (2001) hacen parte de una unidad más antigua. Renzoni (1981) calcula un espesor en el área de 50 m y reporta una edad del Plioceno a Pleistoceno calculada por Van Der Hammen a partir de palinología de muestras de lignitos. En los alrededores de Paipa, Pardo (en preparación) reporta ceniza con cristales angulares de sanidina y plagioclasa en la Formación Tilatá”*

**Formación Churubita (Ksch):** La unidad se localiza hacia el centro oriente del área Sistema Geotérmico de Paipa. Aflora con intercalaciones de capas delgadas a gruesas con estratificación plana paralela continua de shale negro con areniscas cuarzosas de grano fino con niveles abundantes en glauconita, muscovita, restos fósiles de bivalvos, escamas de peces e ichnofósiles (thalassinoides); también algunos niveles de caliza. Renzoni (1981), infiere una edad del Cenomaniano a Turoniano y un espesor aproximado de 215 m en el extremo SE de la Plancha 171-Duitama, donde se localiza la zona de interés (Velandia, 2003).

**Formación Conejo (Kscn):** Nombre propuesto por Renzoni (1981), para una sucesión de shales negros con intercalaciones de areniscas, limolitas y calizas. En la zona aflora en capas medias a muy gruesas de shale negro con intercalaciones delgadas

de areniscas cuarzosas de grano fino. Se distinguen concreciones calcáreas “rueda de carreta”. Renzoni (1981) establece una edad Coniaciano a Santoniano para la Formación Conejo y reporta 165 m de espesor en sección levantada en el extremo SE de la Plancha 171-Duitama (Velandia, 2003).

**Formación Bogotá (Tb):** *“Esta formación aflora como una unidad relativamente dura en los cerros al W de Paipa y S de la Termoeléctrica. Se trata de areniscas cuarzosas y de líticos en capas delgadas a medias con estratificación ondulada no paralela continua a lenticular, con grano fino a grueso, subangular a subredondeado. Son friables e inmaduras en su mayoría y se encuentran intercaladas con capas medias de limolitas y arcillolitas de color gris a crema; presentan abundantes óxidos rojizos”* Velandia (2003). Se estima un espesor entre los 250 y 500 metros.

**Andsitas (Ta):** corresponde a depósitos de rocas de origen ígneo compuesta de varios minerales, significativamente alteradas (Gobernación de Boyacá et al.,2019).

**Miembro Calcáreo Superior (Kmt1):** unidad geológica compuesta principalmente de calizas y shales, formando techos. Se presume un espesor de 132 a 150 metros (Gobernación de Boyacá et al.,2019).

**Formación Une (Kv2):** Velandia (2003), establece que, *“La Formación Une aparece hacia el oriente del área con niveles predominantemente duros en morfología alomada a escarpada. Se observan afloramientos de capas delgadas a gruesas con laminación cruzada de areniscas cuarzosas de grano tamaño grueso a fino según conformen paquetes más espesos o delgados, en algunos niveles es conglomerático;*

*su grano varía de subredondeado a redondeado; son maduras y friables y presentan óxidos de hierro. Se presentan intercalaciones relativamente abundantes de shale pardo a gris en capas finas a gruesas. Renzoni (1981) describe la Formación Une como concordante sobre la Formación Tibasosa, le asigna un espesor de 510 m en el área y una edad de Albiano superior a Cenomaniano”.*

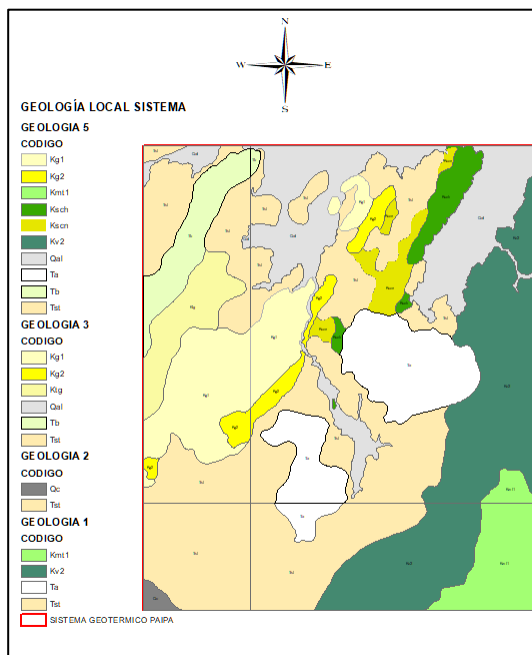
**Formación Labor y Tierna (Kg1):** *“La unidad se presenta en morfología alomada con capas medias a muy gruesas de arenisca cuarzosa de grano grueso a fino, redondeado a subredondeado; madura y friable. Es posible que esta exposición corresponda con la sucesión superior de areniscas de la Formación Labor- Tierna de Renzoni (1981), la cual presenta un espesor variable por cambios laterales de la unidad; sin embargo, se infiere un espesor promedio de 100 m en la zona de interés” (Velandia, 2003).*

**Formación Plaeners (Kg2):** De acuerdo con Velandia (2003) esta formación hace parte del grupo Guadalupe, unidad ampliamente extendida en el altiplano Cundiboyacense. Afloran capas delgadas a medias de lilitas silíceas intensamente fracturadas, con niveles ricos en fosforitas, foraminíferos (sifogenerinoides), escamas y restos de peces.

**Formación Guaduas (Ktg):** esta unidad de distribución regional en la cordillera oriental aflora en la zona como arcillolitas color violeta, gris y crema en capas medias a muy gruesas y con intercalaciones abundantes de areniscas cuarzosas de grano fino a en capas medias muy delgadas con estratificación onduladas paralela continua con óxido de hierro.

La Figura 6 presenta la geología local del sistema, donde se distingue la ubicación de cada una de las formaciones anteriormente mencionadas.

**Figura 6. Geología Local del Sistema Geotérmico de Paipa**



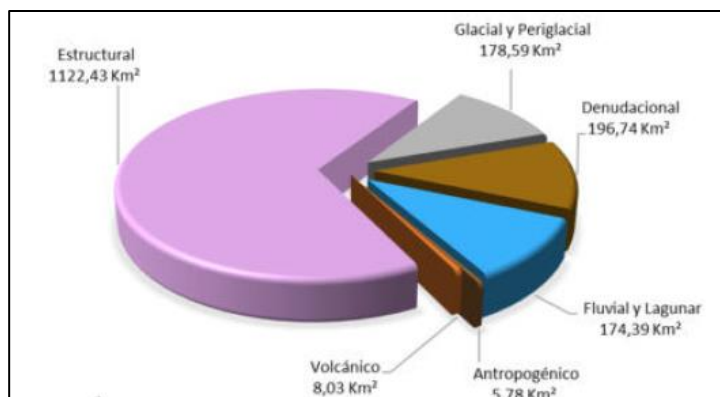
**Fuente: Gobernación de Boyacá (2019)**

#### **4.5 GEOMORFOLOGÍA SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA**

La Gobernación de Boyacá en el desarrollo de sus funciones ha generado insumos para facilitar la toma de decisiones en el territorio boyacense mediante la ejecución de convenios y alianzas con diferentes entes de orden nacional y departamental. Uno de los productos generados corresponde a la geomorfología del Departamento, de la cual se extrajo información de la zona de interés que corresponde al Sistema Geotérmico de Paipa.

De acuerdo con lo consignado en el Atlas Geomorfológico del Departamento de Boyacá (2020), la interacción de los procesos exógenos (externos) relacionados con el deterioro de la superficie terrestre primario a través del tiempo geológico, le han dado el aspecto característico actual al cuadrángulo denominado “DUITAMA” plancha 171 del SGC, estos procesos dieron lugar a seis (6) ambientes geomorfológicos con los siguientes porcentajes: Estructural 66.58%, Denudacional 11.67%, Glacial y Periglacial 10.59% Fluvial y Lagunar 10.34% Volcanico 0.47% y Antropogenico 0.34%. el área en kilómetros cuadrados se representa en la Figura 7.

**Figura 7. Ambientes geomorfológicos.**

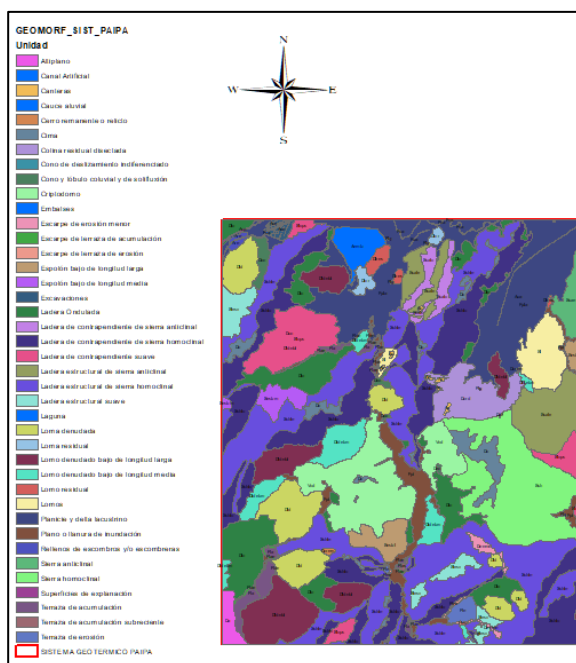


**Fuente: Gobernación de Boyacá (2020)**

De acuerdo con el trabajo realizado por la Gobernación de Boyacá, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC y la Corporación Autónoma Regional de Boyacá – CORPOBOYACÁ en el año 2020, en el área del Sistema Geotérmico de Paipa, se identificaron 40 unidades geomorfológicas localizadas espacialmente como aparecen en la Figura 8: Canteras (Ac), Canal Artificial (Aca), Embalses (Aemb), Rellenos de escombros y/o escombreras (Are), Excavaciones (Ase), Superficies de explanación (Asp), Altiplano (Da), Cima (Dc), Cono y lóbulo coluvial y de soliflución

(Dco), Colina residual disectada (Dcrd), Cerro remanente o relicto (Dcrem), Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi), Escarpe de erosión menor (Deeme), Loma denudada (Dld), Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl), Lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm), Ladera Ondulada (Dlo), Loma residual (Dlor), Lomo residual (Dlres), Cauce aluvial (Fca), aguna (Flg), Plano o llanura de inundación (Fpi), Planicie y delta lacustrino (Fpla), Terraza de acumulación (Fta), Escarpe de terraza de acumulación (Ftae), Terraza de acumulación subcreciente (Ftas), Terraza de erosión (Fte), Escarpe de terraza de erosión (Ftee), Espolón bajo de longitud larga (Sesbl), Espolón bajo de longitud media (Sesbm), Lomos (Sl), Ladera de contrapendiente suave (Slcps), Ladera estructural suave (Slesv), Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal (Ssalc), Ladera estructural de sierra anticlinal (Ssale), Sierra anticlinal (Ssan), Sierra homoclinal (Ssh), Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc), Ladera estructural de sierra homoclinal (Sshle) y Criptodomo (Vcd).

**Figura 8. Unidades Geomorfológicas Sistema Geotérmico de Paipa.**



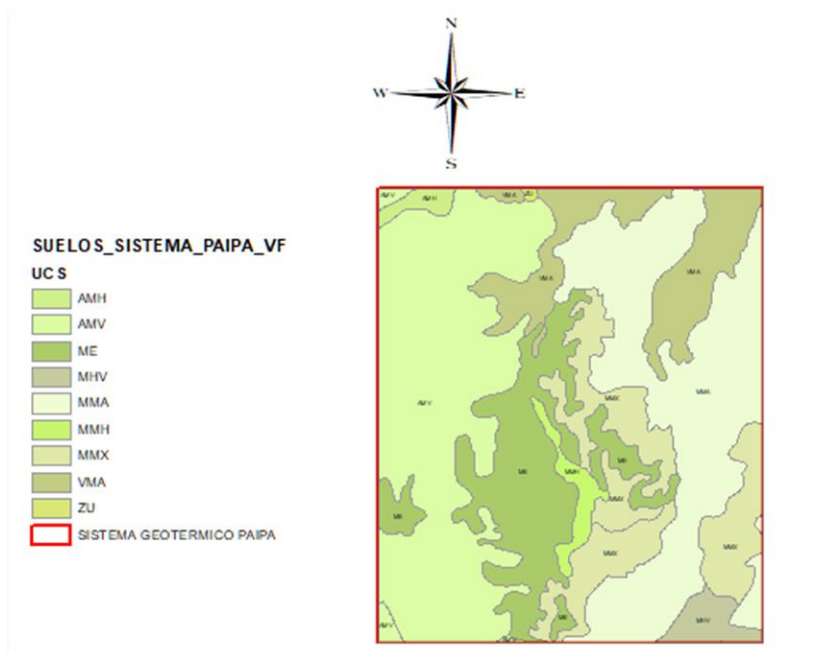
**Fuente: Gobernación de Boyacá et al. (2020)**

#### 4.6 SUELOS PRESENTES EN EL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA

UPTC & IGAC (2005), aunaron esfuerzos para adelantar la caracterización de los suelos en el Departamento de Boyacá, toda vez que resulta ser territorio estratégico y de interés nacional por su riqueza agropecuaria. En dicho trabajo se establecieron características físicas como la textura de los suelos y densidades.

De la caracterización realizada por éstas dos Entidades, se extrajo información del área delimitada del Sistema Geotérmico de Paipa encontrándose al menos nueve (9) tipos de suelos diferentes como se aprecia en la Figura 9.

**Figura 9. Mapa de suelos Sistema Geotérmico de Paipa**



**Fuente: IGAC & UPTC (2005).**



**AMH:** Relieve plano con pendientes de 0 – 1%; suelos muy superficiales limitados por nivel freático alto, probablemente drenados, de reacción química muy fuertemente acida, saturación de bases moderada a alta y fertilidad natural moderada, textura franco-arenosa.

**AMV:** Relieve moderado fuertemente quebrado y moderadamente empinada y escarpada, con pendientes de 12 – 25%. 25 – 50%, afectados por escurrimiento difuso en grado ligero y moderado; suelos profundos y muy profundos, bien drenados texturas franco finas, reacción muy fuerte y fuertemente acidas, saturación de aluminio mayor de 70% y fertilidad baja, textura Franco-arcillosa.

**ME:** Relieve moderado a fuertemente escarpado, con pendiente superiores a 50%, paisajes modelados previamente por glaciares y posteriormente afectados por meteorización física y erosión glaciárica, donde procesos de ablación, textura franco-limosa.

**MHV:** Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado con pendientes entre 12.5-25%, 25 - 50% y 50 – 75%, hay evidencia de movimientos en masa (pata de vaca) afectados sectores por fragmentos de roca en superficie; suelos muy superficiales por saturación de aluminio mayor del 70%, bien drenados, texturas medias y fertilidad bajo, textura de suelo franco.

**MMA:** Relieve moderado a fuertemente quebrado, con pendientes superiores al 12 a 75% localmente mayores, afectadas por escurrimiento difuso en grado ligero y pedregosidad superficial; suelos moderadamente profundos a superficial, bien drenados, fertilidad muy baja, textura de suelo franco-arenosa.

**MMH:** relieve plano con pendientes entre 1-3%, predominan alternancia de procesos de acumulación y erosión. Los suelos son moderadamente profundos, limitados por cantos redondeados, texturas francas reacción ligera a fuertemente acida y fertilidad moderada a alta, textura de suelo franco.

**MMX:** relieve ligero a fuertemente quebrado, con pendientes 7 – 12%, 12 – 25% y 25 – 50%. Afectados por movimientos en masa (soliflucción) terracetos, repación y erosión hídrica en grados ligeros, fertilidad baja alta, textura de suelo franco.

**VMA:** relieve plano con pendientes 0 – 1%, frecuentemente encharcables suelos moderadamente profundos y muy superficiales, imperfecto y muy pobremente drenadas texturas finas. Fertilidad baja, textura franco-arcillosa.

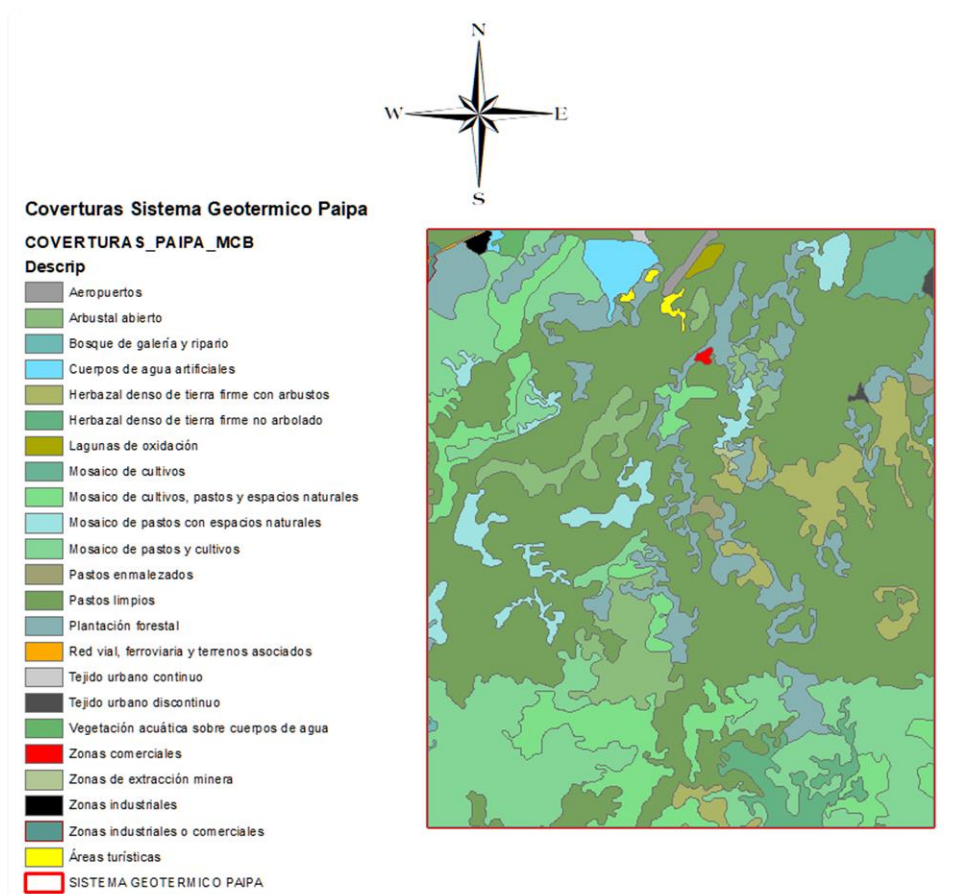
**ZU:** Se refiere a Zona Urbana.

#### 4.7 COBERTURA DE LOS SUELOS EN EL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, ha dispuesto para el público información sobre la cobertura de los suelos en el territorio nacional, dentro de la cual se encuentran archivos en formato shape, que además de contener información de geográfica y de posicionamiento también contiene atributos que resultan de gran interés para la realización del presente trabajo.

De acuerdo con información disponible en la Página del IGAC, en el sistema se encuentra 23 tipos de coberturas de los suelos, distribuidos espacialmente como aparece en la Figura 10.

**Figura 10. Mapa de Coberturas Sistema Geotérmico de Paipa**

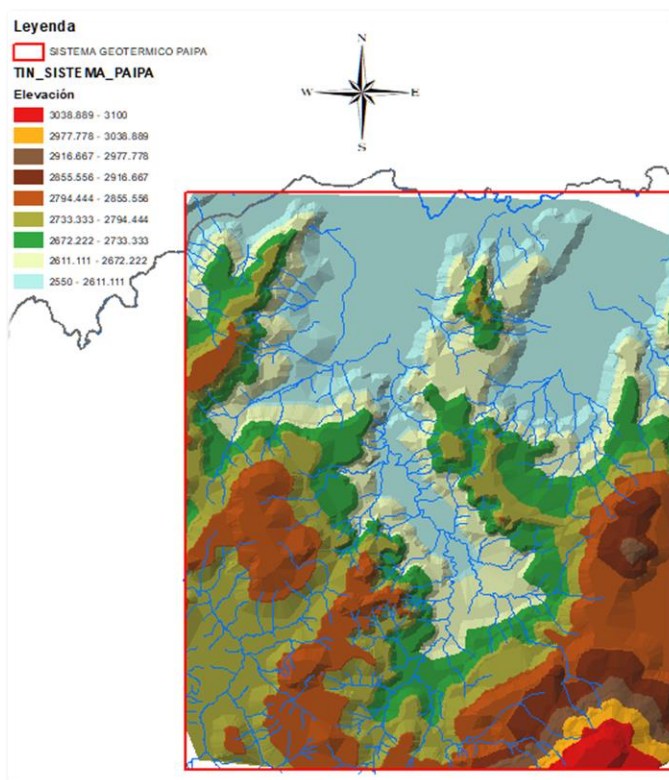


**Fuente: IGAC (2018).**

#### 4.8 HIDROLOGÍA SUPERFICIAL EN EL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA

Es importante aclarar que el presente trabajo de investigación se basa principalmente en el estudio del flujo de agua subterránea, sin embargo, se realizó un trabajo de reconocimiento de los drenajes permanentes e intermitentes del área de interés que corresponde al Sistema Geotérmico de Paipa. De las planchas 171IVC, 171IVD, 191IIA y 191IIB, se extrajo los shape de drenajes sencillos y dobles, como se aprecia a continuación en la Figura 11.

**Figura 11. Hidrografía Sistema Geotérmico de Paipa.**



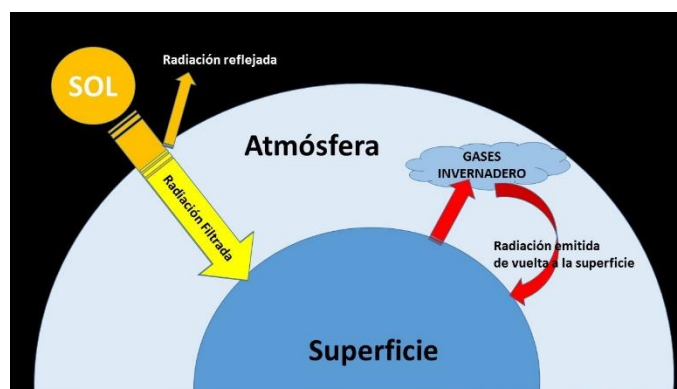
**Fuente: autor**

La anterior figura, evidencia que en el área del sistema geotérmico se encuentra numerosos drenajes tributarios afluentes del Río Chicamocha localizado en la parte norte. En resumen, una parte de la precipitación es transportada como escorrentía hacia el Río Chicamocha mientras la otra parte se infiltra verticalmente.

#### 4.9 EFECTO INVERNADERO Y CALENTAMIENTO GLOBAL

El IDEAM argumenta que la temperatura del planeta es controlada por el balance entre la cantidad de energía solar que ingresa al planeta contra cuanta de esa energía es reflejada (re-irradiada) por la tierra al espacio, tal como se presenta en la Figura 12.

**Figura 12. Balance de energía solar**



**Fuente: IDEAM**

Cuando la energía solar alcanza la superficie terrestre, hace que esta se caliente y como resultado emita ondas de radiación infrarroja. Una parte de esas ondas son retenidas en el planeta gracias a la atmósfera, que está compuesta por gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{NO}_3$ ), entre otros, los cuales absorben esas ondas, atrapando la energía emitida por la superficie de la Tierra y permitiendo que la temperatura del planeta aumente hasta los

14 – 15 °C, en promedio. Básicamente, este aumento en la temperatura permite que la vida prospere en la Tierra como lo afirma UNITAR (2014).

A este fenómeno de retener calor en el planeta gracias a la composición de la atmósfera se le conoce como el efecto invernadero y de no existir en la Tierra, se calcula que la temperatura media del planeta sería de aproximadamente -19°C (UNITAR, 2014).

Sin embargo, la actividad humana ha acrecentado los valores de Gases de Efecto Invernadero – GEI, provocando un desbalance en la atmósfera y por ende un aumento en la temperatura global. Según informe de la Organización Meteorológica Mundial (2022), los niveles atmosféricos de los tres principales gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) alcanzaron nuevos máximos históricos en 2021, lo cual, supone otra fatídica advertencia del cambio climático, evidenciando que, *“el continuo aumento de las concentraciones de los principales gases que retienen el calor y la aceleración sin precedentes de la acumulación de metano en la atmósfera muestran que vamos en la dirección equivocada”*.

#### **4.10 CAMBIO CLIMÁTICO**

De acuerdo con el IPCC (2018), el Cambio Climático hace referencia a una variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante periodos prolongados, generalmente décadas o periodos más largos. La CMNUCC lo define como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

El IDEAM insiste en que el mayor problema de un cambio acelerado en el clima radica en que la sociedad no está preparada para asumir estas variaciones que pueden traer consecuencia como el derretimiento de las masas glaciares y nevados que abastecen acueductos, cambios en los ciclos de floración y fructificación de las plantas de cultivo, ascensos en los niveles de los mares donde hay población viviendo, mayor ocurrencia y fuerza de lluvias, sequias, huracanes, heladas y granizadas en áreas urbanas y rurales, entre otros fenómenos que sin duda reducen nuestra calidad de vida.

Observaciones y medidas de parámetros climatológicos realizadas por diferentes entidades en el mundo, han demostrado un cambio significativo especialmente en la precipitación en la temperatura, evidenciando cambios meteorológicos.

Por lo anterior, en la web de la NASA se presenta información sobre el Cambio Climático determinando que es real y que la actividad humana es la causa principal. En el sitio se concluye que:

- ✓ Mientras que el clima de la Tierra ha cambiado a lo largo de su historia, el calentamiento actual está ocurriendo a un ritmo no visto en los últimos 10.000 años.
- ✓ Según el IPCC, *"Desde que comenzaron las evaluaciones científicas sistemáticas en la década de 1970, la influencia de la actividad humana en el calentamiento del sistema climático ha evolucionado de la teoría al hecho establecido"*.

- ✓ La información científica extraída de fuentes naturales (como núcleos de hielo, rocas y anillos de árboles) y de equipos modernos (como satélites e instrumentos) muestra signos de un clima cambiante.
- ✓ Desde el aumento de la temperatura global hasta el derretimiento de las capas de hielo, abunda la evidencia del calentamiento del planeta.

Debido a lo expuesto, se ha puesto en marcha planes para el estudio del cambio climático y sus posibles efectos en etapas del ciclo hidrológico. Pernía y Fornes (2009), analizaron cómo podría afectar el cambio climático a las aguas subterráneas, así como los ecosistemas naturales asociados. Resultado de la reflexión realizada, se concluyó que efectivamente se hace necesario una serie de investigaciones por los potenciales efectos negativos en la recarga de acuíferos que posiblemente se utilicen para su explotación.

Pisani et. al. (2014), presentó la investigación titulada “Estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa mediante modelos hidrológicos de balance de agua” en el cual se establece claramente que la evidencia del cambio climático motiva la necesidad de cuantificar sus posibles efectos en los recursos hídricos. En el mismo documento, se presentan resultados de la evaluación de los efectos del cambio climático en la recarga de los acuíferos de la Plana de la Galera y del Aluvial del Ebro den Tortosa, mediante la proyección de temperatura y precipitación según modelos de escenarios de Cambio Climático, concluyendo que la recarga de los acuíferos disminuirá un 30% para finales del presente siglo.

Colombia no está exenta en proceder a realizar investigación sobre los posibles efectos del cambio climático en el recurso hídrico, según Bolaños y Betancur (2018), a partir de la revisión de 60 referencias de los últimos 10 años, se empezó a consolidar un marco referencial y se efectuó la primera aproximación a la evaluación de los efectos del cambio climático sobre tres sistemas hidrogeológicos en Colombia, Valle de Aburra, Urabá Antioqueño y Cuenca del río Ranchería. En dicho estudio nuevamente se concluye sobre la necesidad de gestionar el recurso hídrico subterráneo teniendo en cuenta los posibles efectos del cambio climático que podría poner en peligro la cantidad y calidad del agua.

De acuerdo con lo anterior, se prevé realizar la investigación cuyo enfoque se basa principalmente en evaluar los posibles efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos, específicamente para el caso del sistema geotérmico de Paipa en el departamento de Boyacá.

#### **4.11 CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA DE ACUERDO CON RUIZ (2010)**

Revisadas bases de datos con información disponible sobre el cambio climático en Colombia, se encontró el trabajo realizado por Ruiz (2010), titulado “CAMBIO CLIMÁTICO EN TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y HUMEDAD RELATIVA PARA COLOMBIA USANDO MODELOS METEOROLÓGICOS DE ALTA RESOLUCIÓN” (PANORAMA 2011-2100)”, el cual establece que la climatología de Colombia específicamente en la región andina tiende al aumento de la temperatura y disminución de la precipitaciones, afirmación sustentada de acuerdo con trabajos previos realizados entre los cuales se destaca el de Pabón (2010). Por lo anterior, la investigación se justifica debido a la necesidad de proyectar el clima del futuro simulando fenómenos



meteorológicos de alta resolución, para estimar los efectos e impactos del cambio climático en diferentes sistemas, con el fin que los agentes del estado, responsables de la toma de decisiones, puedan proponer, elaborar y materializar políticas que permitan el cuidado del medio ambiente y por ende la preservación de la especie humana.

Ruiz (2010), establece una serie de conceptos básicos para facilitar la comprensión de su trabajo, en primer lugar, manifiesta que un escenario de cambio climático no es ni un pronóstico ni una predicción climática, es una representación del clima afectada por una condición de emisión de gases de efecto invernadero, en ese sentido define lo siguiente:

“(…)

**Predicción:** decir con anticipación lo que ocurrirá en un momento o período futuro en un medio determinado (predicción del tiempo, predicción climática).

**Proyección:** Estimación de una situación futura mediante el estudio de la condición actual o a través de una extrapolación (estadística, numérica o dinámica) del curso de los procesos (por ejemplo: extrapolación de tendencias).

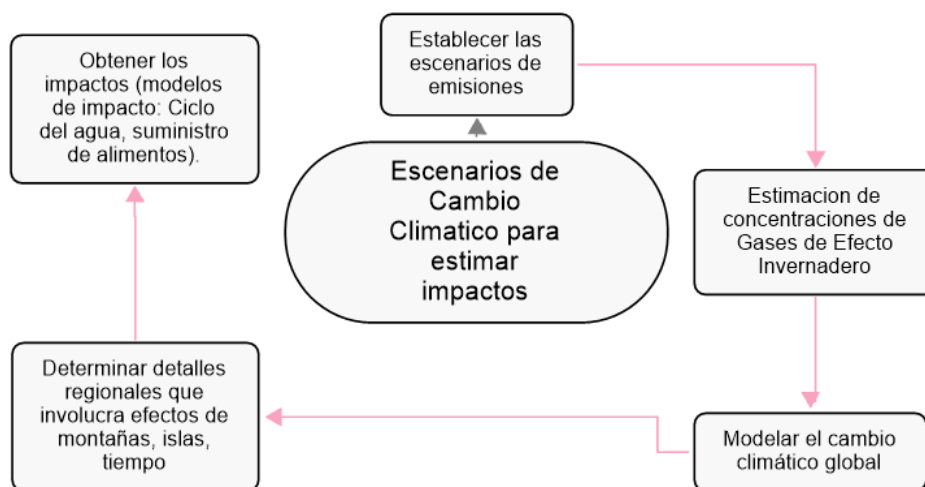
**Escenario:** Representación de una situación posible que puede darse bajo una situación determinada.

**Escenario de cambio climático:** representación del clima que se observa bajo una concentración determinada de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmosfera.

(…)”

El documento establece claramente que las etapas requeridas para proveer escenarios de cambio climático con el fin de estimar impactos son las presentadas en la Figura 13.

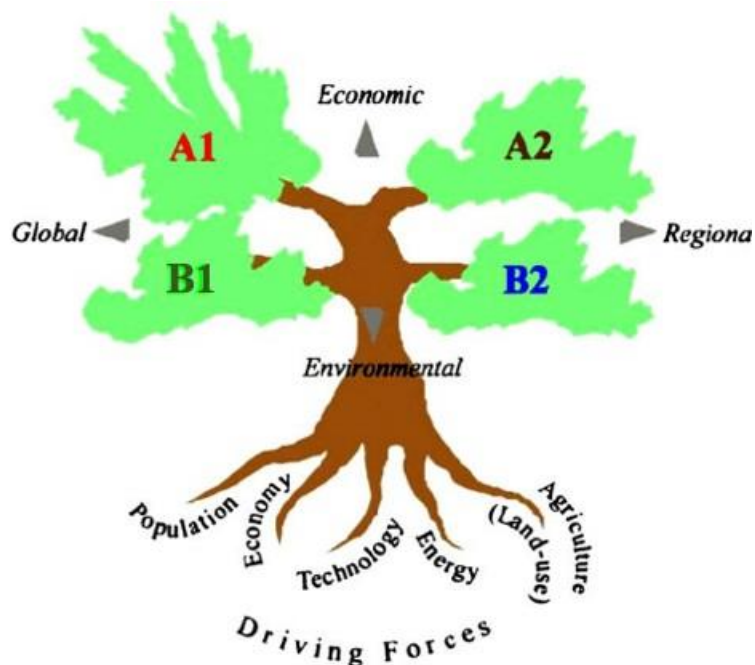
**Figura 13. Etapas requeridas para proveer escenarios de cambio climático con el fin de estimar impactos.**



**Fuente: Autor**

Para la estimación del cambio climático en temperatura y precipitación, Ruiz (2010) señala que el IPCC desarrollo nuevos escenarios denominados “SRES escenarios”, los cuales son representaciones posibles de futuras emisiones de sustancias como por ejemplo, gases de efecto invernadero. Lo anterior, basado sobre un conjunto de supuestos coherentes e internamente consistentes acerca de factores externos tales como la demografía, desarrollo socio-económico y cambio tecnológico y sus clases de relaciones. Los escenarios SRES comprenden cuatro (4) familias: A1, A2, B1 y B1.

**Figura 14. Escenarios de Cambio Climático propuestos por el IPCC**



**Fuente: IPCC (2004)**

**A1:** Línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población que alcanza su máximo valor hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de nuevas tecnologías nuevas y más eficiente.

**A2:** La línea evolutiva y familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo, sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento.

**B1:** La línea evolutiva y familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza el valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios e información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos.

**B2:** La línea evolutiva y familia de escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con un nivel de desarrollo económico

intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1.

De otra parte, un Modelo Climático Regional (RCM) es un modelo de clima de alta resolución que cubre un área limitada al globo, típicamente 5000Km X 5000Km, con una resolución horizontal típica de 50 km (Jones et al., 2004). Los RCMs se basan sobre leyes físicas, representadas por ecuaciones matemáticas que son resueltas usando grillas tridimensionales, por lo tanto, son modelos físicos comprensivos que usualmente incluyen componentes de suelo y atmosfera del sistema climático y contienen las representaciones de importantes procesos del sistema climático (por ejemplo, lluvia, radiación, nubosidad, hidrología).

En ese sentido, para generar escenarios de cambio climático, Ruiz (2010) utilizó tres (3) modelos regionales: El modelo global de alta resolución del Japón GSM-MRI con resolución horizontal de 20kmX20km, PRECIS de Reino Unido con resolución horizontal de 25kmX25km y el modelo WRF con el cual se generaron resultados a 4kmX4km para la región Andina (Ruiz, 2010).

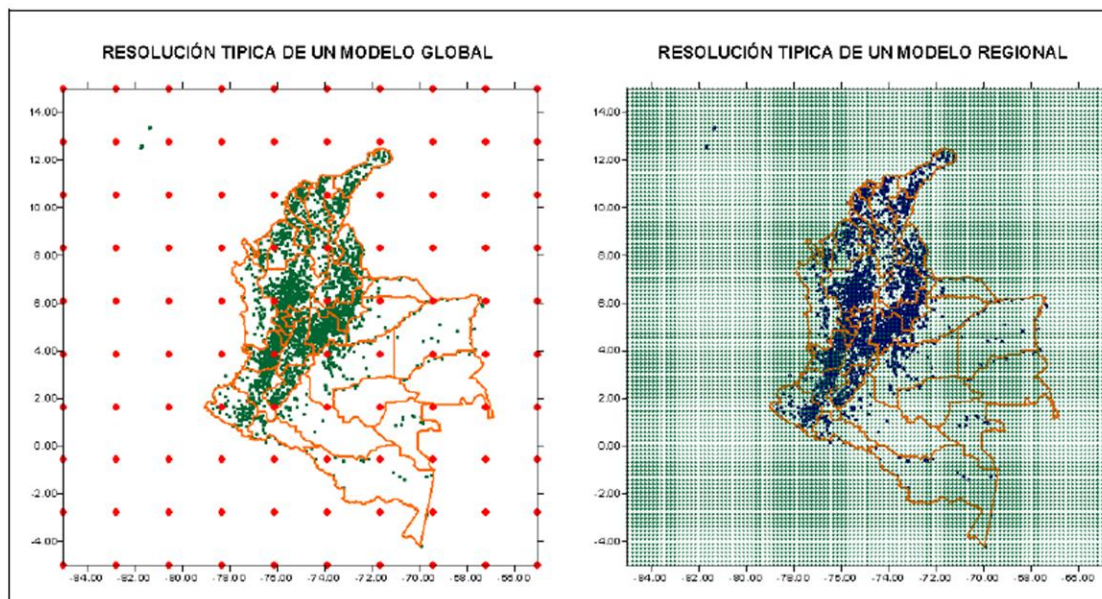
Para obtener cambio climático regional existen varias metodologías, siendo las tres más utilizadas: Método Estadístico, Dinámico e Híbrido (Estadístico – Dinámico). Para los modelos GSM – MRI y PRECIS se aplicó la técnica Dinámico – Estática, construyendo relaciones estadísticas entre los modelos regionales y datos históricos tomados en estaciones climáticas (Ruiz, 2010).

En el caso del modelo regional WRF, la técnica usada fue netamente dinámica; para este caso Ruiz (2010), tomó como línea base el año 1990, ya que el acumulado anual de lluvia, de los registros IDEAM, termino dentro de los valores normales en gran parte del territorio nacional y las diferencias en clima futuro se hicieron respecto del año mencionado.

Con respecto a la verificación del trabajo y proyección de clima de Ruiz (2010), es importante aclarar que ningún modelo dará una perfecta validación de la climatología o de las observaciones. Jones et al (2004) recomienda validar dos o más modelos climáticos para escoger el más apropiado con el fin de ser usado en el escenario para una región y, agrega que, la corrida de clima-presente es requerida para las proyecciones futuras de cambio climático ya que sus resultados deben ser comparados con la climatología de las observaciones sobre el mismo período de tiempo dado.

En ese sentido y como puede observarse en la Figura 15, cada valor meteorológico de lluvia y temperatura registrado por la estación meteorológica se comparó con el punto de grilla más cercano suministrado por los modelos, luego se analizó su estacionalidad y, en particular, si se encontraba que el modelo adelantaba o atrasaba la temporada lluviosa, se corregía a través de un desplazamiento de la serie del modelo, sincronizando el desfase del modelo. Una vez realizado esto, se procedió a calibrar la amplitud mediante el error cuadrático medio (ECM) característico de cada mes.

**Figura 15. Superposición entre un GCM de resolución 2.5° y un RCM con las estaciones climáticas de Colombia**



**Fuente: Ruiz (2010)**

Varios escenarios con diferentes modelos y condiciones iniciales fueron simulados. Particularmente para el periodo 2011 -2070, donde se obtuvo resultados para los escenarios de emisión A2 y B2 sin sulfatos junto con el escenario A1B con sulfatos, mientras que para 2071 – 2100 además de los mencionados se tienen resultados de los escenarios A2 y B2.

Teniendo en cuenta que todos los escenarios son plausibles, pero no existen medios de saber las probabilidades de ocurrencia; se determinaron tres normales climatológicas (2011 - 2040, 2041 - 2070 y 2071 - 2100) con el fin de obtener los promedios sobre los multi-miembros ensamblados como una respuesta de los factores forzantes sobre el clima modelado (Jones et al., 2004). Igualmente, para los cálculos finales se utilizaron

tendencias determinadas con datos observados y datos extrapolados de acuerdo con las mismas.

Específicamente para el departamento de Boyacá, se obtuvieron datos de precipitación y temperatura para los periodos (2011 -2040), (2041 – 2070) y (2071 – 2100). En la Tabla 7 se cuantifica los cambios estimados para la variable de temperatura y precipitación.

**Tabla 7. Resultados obtenidos de cambio climático para el Departamento de Boyacá.**

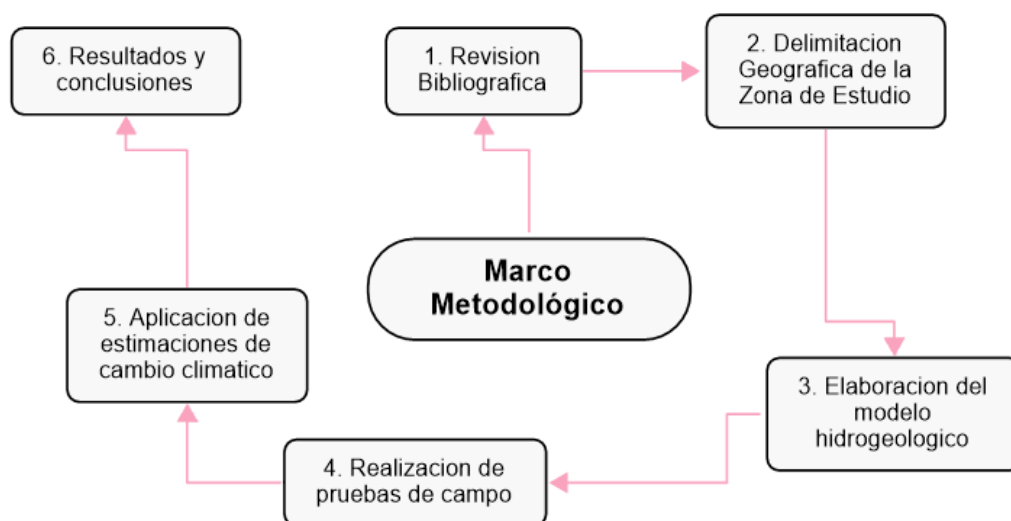
Departamento	Temperatura Media			% de aumento o disminución de lluvia con respecto al clima presente (promedio escenarios)		
	(2011 - 2040)	(2041 - 2070)	(2071 - 2100)	(2011 - 2040)	(2041 - 2070)	(2071 - 2100)
Boyacá	1.3	2.1	2.7	-8.6	-7.7	-7.8

**Fuente: Ruiz (2010)**

## 5 MARCO METODOLÓGICO

Para estimar posibles efectos del cambio climático sobre la recarga de acuíferos del Sistema Geotérmico de Paipa, es necesario establecer una metodología acorde con el tipo de investigación. básicamente se definieron una serie de pasos o etapas plasmadas en la Figura 16, como resultado de la consulta de varias fuentes bibliográficas entre las que destacan, artículos, revistas, libros, publicaciones, bases de datos, etc.

**Figura 16. Metodología de investigación**



**Fuente: autor**

### 5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Definido el objetivo general de la investigación, es necesario realizar la revisión general del estado del arte con documentos nacionales e internacionales, mediante los cuales se establezca métodos, herramientas, ensayos, pruebas, etc. a realizar durante el desarrollo del proyecto.



## **5.2 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El objetivo general consiste básicamente en estimar efectos de cambio climático en la recarga de acuíferos en el Sistema Geotérmico de Paipa. Es necesario conocer los límites geográficos del sistema con el fin de trabajar exclusivamente sobre el área necesaria, en aras de no invertir recursos en actividades que no tendrán ninguna incidencia en los resultados de la investigación.

De acuerdo con lo anterior, se requiere analizar y procesar la información primaria y secundaria recolectada en la fase de revisión bibliográfica, mediante la cual sea posible entender el posible funcionamiento del sistema geotérmico y definir límites basados en resultados obtenidos en investigaciones previas.

## **5.3 ELABORACIÓN DE MODELO HIDROGEOLOGICO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA**

Con la información primaria y secundaria recolectada para el sistema, Es imperativo elaborar un modelo hidrogeológico, que tenga en cuenta topografía, morfología, relieve, suelos, geología, geomorfología, climatología, coberturas, etc., con el fin de disponer de una herramienta mediante la cual sea posible estimar los efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos en el Sistema Geotérmico de Paipa.

Dicha herramienta podrá ser utilizada para estimar la recarga en función de parámetros de precipitación y temperatura, obtenidos de series históricas de datos recolectados en estaciones meteorológicas y estimados de acuerdo con modelos de cambio climático.

## **5.4 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO**

Con el fin de verificar los datos extraídos de fuentes primarias y secundarias, es necesario realizar pruebas de campo en algunos puntos dentro del Sistema Geotérmico de Paipa. aquellos datos tomados en campo son reales, por lo cual deben ser incorporados al modelo hidrogeológico que se elabore, para obtener resultados mas confiables.

Se prevé realizar pruebas de infiltración en varios puntos dentro del sistema, para medir la infiltración base, parámetro necesario para la obtención de la recarga potencial al sistema de acuíferos.

### **5.4.1 Selección de los puntos**

Una vez definidos los límites geográficos del área del Sistema Geotérmico de Paipa, es necesario seleccionar para la realización de pruebas de campo y toma de muestras. Para la selección de los puntos mencionados, se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- Localización cercana a vías de acceso, teniendo en cuenta que para la prueba de infiltración se requiere contar con suministro de agua potable y desplazamiento de elementos de laboratorio.
- Tres unidades Geomorfológicas más Cobertura diferentes.
- Permiso de propietarios para la realización de pruebas.

Cada uno de los puntos debe ser clasificado o caracterizado mínimamente con información de localización, unidad geomorfológica y coordenadas.

#### **5.4.2 Realización de pruebas de infiltración**

Para la realización de infiltración en los puntos seleccionados, localizados dentro de los límites geográficos definidos en las etapas anteriores, se requiere de materiales y seguir un procedimiento resumido a continuación.

- ✓ **Materiales:** Vehículo tipo camioneta para el transporte de recursos humanos y materiales; Equipo GPS para la ubicación de los puntos determinados; Dos anillos de altura 30 cm, diámetros de 50 cm y 30cm, con espesor mínimo de  $\frac{1}{4}$  de pulgada con el fin de facilitar el hinchamiento; Equipo para el suministro de agua durante el desarrollo de la prueba; Cronometro; Regla de medición; Cámara Fotográfica.
  
- ✓ **Procedimiento:** 1. Localización de los puntos seleccionados con el equipo GPS. 2. Colocación e hincado de los anillos 10 cm asegurándose de alterar lo menos posible el suelo. 3. Instalación de regla de medición. 4. Llenado de agua del anillo exterior para asegurar la saturación del material. 4. Llenado de anillo interior hasta 10 cm por encima del suelo e iniciar el cronometro para realizar las mediciones del nivel del agua durante el tiempo necesario, hasta que la infiltración se vuelva constante dando como resultado la infiltración base.

#### **5.4.3 Presentación de resultados obtenidos de las pruebas de infiltración**

Los resultados deben presentar en tablas con mínimo información de número, nombre o descripción del punto, tasa de infiltración obtenida.

## 5.5 APLICACIÓN DE MODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO

En el numeral 5.3 se estableció que el modelo hidrogeológico para el Sistema Geotérmico de Paipa debía realizarse no solo en función de la topografía, morfología, relieve, suelos, geología, geomorfología, coberturas, etc., sino también en función de la precipitación y temperatura.

Por una parte, puede estimarse la recarga potencial promedio actual con datos de precipitación y temperatura de registros históricos tomados de las estaciones que se encuentren dentro del área de influencia del proyecto. De otra parte, es posible estimar datos de precipitación y temperatura para periodos futuros mediante Modelos Regionales Climáticos afectados por escenarios de cambio climático elaborados por agencias mundiales como es el caso del IPCC.

El IDEAM a través de investigaciones realizadas por diferentes autores ha realizado proyecciones del clima futuro con el fin de estimar datos que pueden ser aprovechados por entidades para la toma de decisiones.

Para incorporar el cambio climático en el modelo hidrogeológico elaborado en las etapas previas, es necesario utilizar datos, proyecciones, modelos, entre otros recursos, resultado de investigaciones previas. Específicamente para el presente proyecto se asumirán los datos proporcionados en la investigación realizada por Ruiz (2010), en la cual se determina el cambio climático para Colombia, a nivel departamental, para proyectar datos de precipitación y temperatura para periodos futuros, para posteriormente alimentar el modelo hidrogeológico y obtener recarga potencia futura de acuíferos en el sistema mencionado.

## **5.6 RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Estimada la recarga potencial mediante el modelo hidrogeológico del Sistema Geotérmico de Paipa para periodos con datos históricos de precipitación y temperatura tomados de las estaciones meteorológicas y datos de precipitación y temperatura estimados para periodos futuros mediante Modelos Regionales Climáticos afectados por escenarios de cambio climático, se debe comparar los resultados obtenidos y concluir si la recarga potencial de acuíferos en el Sistema Geotérmico de Paipa se verá afectada a futuro por el cambio climático que de acuerdo a investigaciones se prevé que ocurra.

## **6 ELABORACIÓN DEL MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL (ACTUAL Y FUTURA)**

El presente capítulo establece las actividades realizadas para el cumplimiento del objetivo general y objetivos específicos señalados en el Capítulo 3 del presente documento, mediante las cuales específicamente se procede a la estimación de la recarga potencial, para el periodo (1991 – 2021) con series de datos históricos de precipitación y temperatura, así como para periodos futuros (2011 – 2040), (2041 – 2070) y (2071 – 2100) con datos de precipitación y temperatura calculados de acuerdo con proyecciones realizadas por Ruiz (2010) en su trabajo titulado “CAMBIO CLIMÁTICO EN TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y HUMEDAD RELATIVA PARA COLOMBIA USANDO MODELOS METEOROLÓGICOS DE ALTA RESOLUCIÓN” (PANORAMA 2011-2100”).

### **6.1 DELIMITACIÓN ÁREA DE TRABAJO**

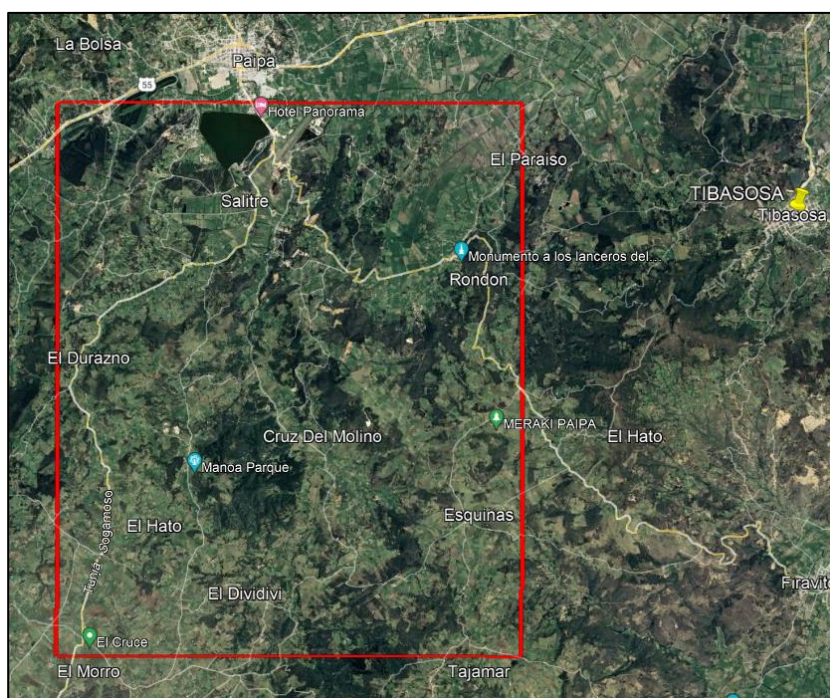
Como se expuso anteriormente en el numeral 4.3 “Modelo Conceptual Sistema Geotérmico de Paipa SGC (2017)”, Alfaro et al. (2017), elaboraron un modelo conceptual del área geotérmica de Paipa, propuesto a partir del consolidado de una serie de trabajos realizado con apoyo del SGC que incluyeron trabajos de oficina y de campo.

El trabajo define el área geográfica o delimitación del sistema geotérmico de paipa la cual incorpora un punto de recarga principal del reservorio en el sur y suroriente (Anticlinal Tibasosa – Toledo) a través de afloramientos de gran extensión de la Formación Une hasta dos puntos de descarga del sistema, que corresponde al sector

ITP Lanceros y la Playa, distanciados aproximadamente tres (3) kilómetros (Alfaro et al.,2017).

En conclusión, el Sistema Geotérmico de Paipa se encuentra localizado entre las coordenadas geográficas Latitud 5,50 Norte a Latitud 5,90 Norte y Longitud 72.95 Oeste a 73.30 Oeste, formando el polígono que se aprecia en la Figura 17.

**Figura 17. Sistema Geotérmico de Paipa**



**Fuente: Google Earth**

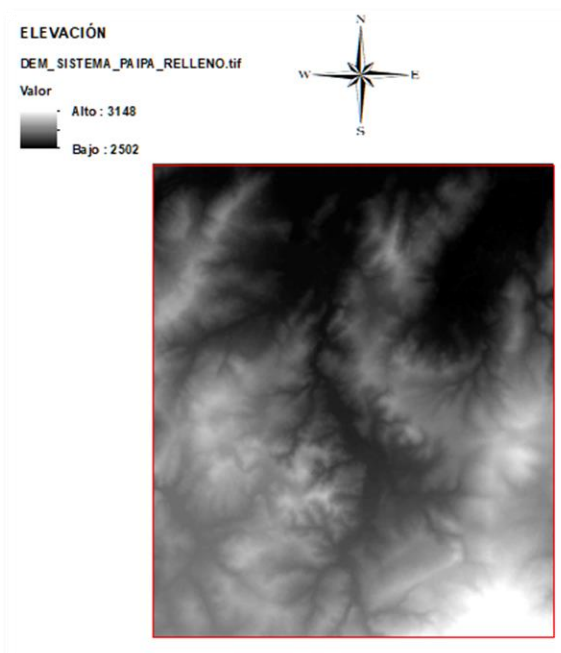
Teniendo en cuenta los trabajos previos al presente, que fueron consolidados en su mayoría por Alfaro et al. (2017) para definir el Área del Sistema Geotérmico de Paipa, para esta investigación se asume el polígono de la anterior figura para estimar la recarga potencia en la misma.

## 6.2 MODELO MORFOLÓGICO DEL SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA

Actualmente, existen numerosas bases de Datos de Modelos de Elevación Digital - DEM de la Superficie Terrestre, generados a partir del procesamiento de imágenes satelitales por parte de diferentes entidades gubernamentales.

Revisadas las bases de datos del Instituto Geográfico de la Universidad de Alaska, se encontró un modelo digital en formato raster de la zona, el cual fue procesado en el software ARCGIS en dos etapas, la primera consistió en ser recortado de acuerdo con el Área del Sistema Geotérmico de Paipa y la segunda en rellenar vacíos o información faltante. Finalmente se obtuvo el modelo digital de elevaciones ajustado al sistema geotérmico presentado en la Figura 18.

**Figura 18. Modelo Digital Sistema Geotérmico Paipa**

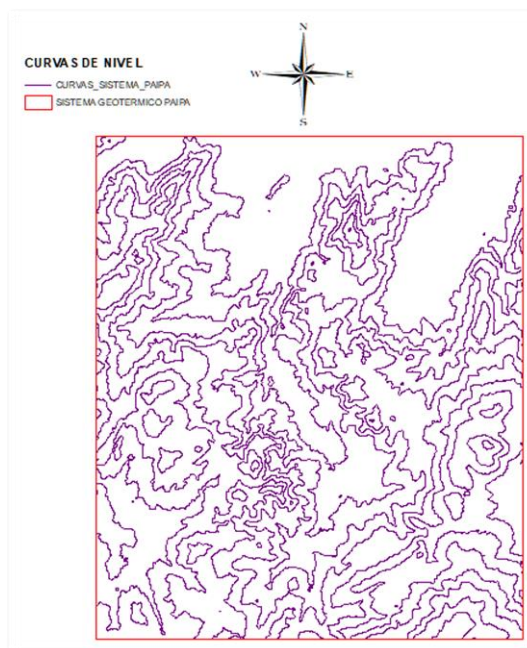


**Fuente: Autor**



Como lo evidencia la Figura 19, DEM del Sistema, se generó curvas de nivel, con el fin de ver de manera detallada y entendible su topografía. Las elevaciones presentadas en el área geotérmica se encuentran aproximadamente entre la cota 2502 y 3148.

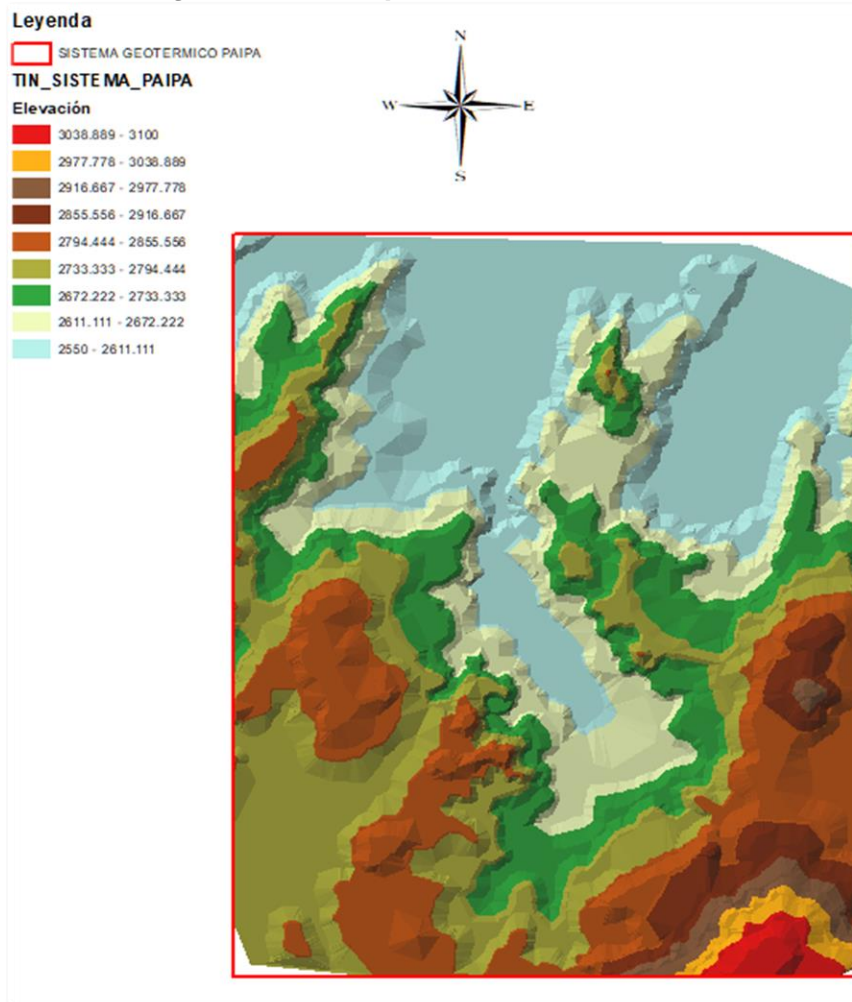
**Figura 19. Curvas de nivel Sistema Geotérmico Paipa**



**Fuente: Autor**

A partir de las curvas se elaboró un modelo de superficie TIN, para recrear la morfología del sistema, como se observa Figura 20.

**Figura 20. Morfología Sistema Paipa**



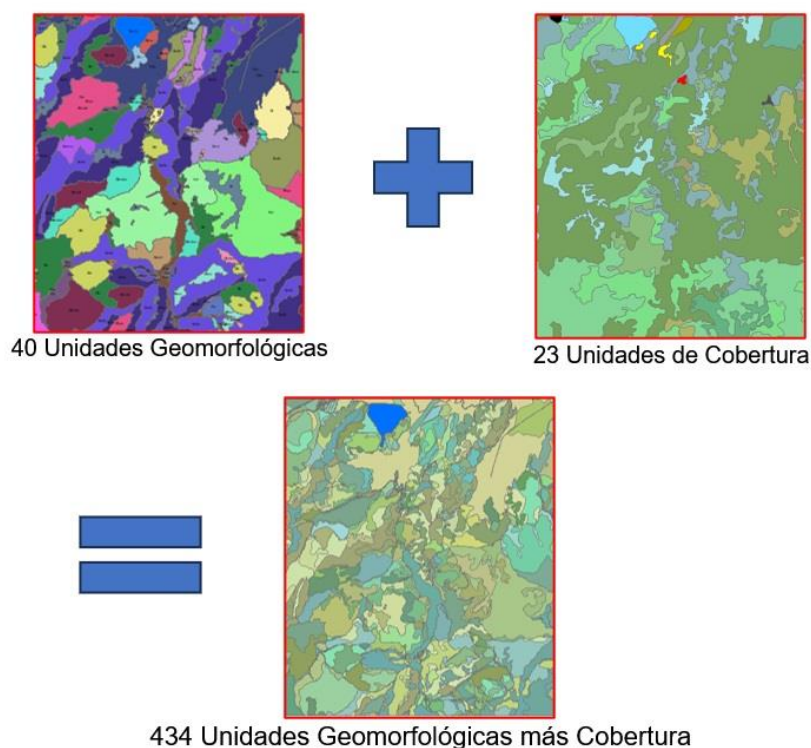
**Fuente: autor**

### 6.3 MODELO GEOMORFOLÓGICO MAS COBERTURAS

Uno de los trabajos previos al presente mencionados anteriormente en el numeral 4.5, fue la elaboración de la Geomorfología del Departamento de Boyacá por parte de la Gobernación del Departamento. Es preciso indicar que los mapas geomorfológicos se elaboran con información morfológica, topográfica, relieves, geológica, etc. Con ayuda del Software ARCGIS se extrajo la información geomorfológica del polígono del sistema, identificándose 40 unidades en el sistema.

Igualmente, en el numeral 4.7 se indicó que IGAC, dispuso en sus bases datos publicas información sobre la cobertura de los suelos en el país. De archivo tipo shape descargado de la plataforma se extrajo información de cobertura del sistema geotérmico, identificándose 23 unidades de cobertura. Con los layer de Geomorfología y cobertura del Sistema Geotérmico de Paipa, se realizó el proceso de intersección en el software ARCGIS, obteniendo un layer con 434 unidades denominadas Geomorfológicas más Cobertura, cuya información resulta importante y necesaria para la estimación de la Recarga Potencial del acuífero del principal del Sistema. En la figura 21

**Figura 21. Intersecado layer Geomorfología y Coberturas del sistema.**



**Fuente: autor**

Posteriormente, el layer elaborado de Unidades Geomorfológicas mas Cobertura fue complementado con la información de suelos presentes en el sistema, a partir de un intersecado con el layer de suelos presentado en el numeral 4.6.

#### **6.4 MODELO DE BALANCE HÍDRICO DE SUELOS**

Para la elaboración del modelo hidrogeológico del Sistema Geotérmico de Paipa, es necesario realizar modelos de balance hídrico de suelos para cada una de las unidades geomorfológicas más coberturas previamente establecidas (434 en total). Por lo anterior, es necesario contar con características físicas de los suelos, como la capacidad de infiltración, densidad, capacidad de campo, punto de marchitez, profundidad de raíz, etc. para la estimación de la recarga potencial mensual y anual.

Se utiliza la metodología recomendada por Schosinsky (2006) y Herrera (2019), para la estimación de la recarga potencial y construcción de un modelo hidrogeológico del Sistema Geotérmico de Paipa.

##### ***6.4.1 Estimación de infiltración base, densidades, capacidad de campo, punto de marchitamiento y profundidad de las raíces, por unidad geomorfológica más coberturas.***

Como se explicó anteriormente, Herrera (2019) establece que en función del tipo de la textura del suelo es posible estimar no solo el parámetro de velocidad de infiltración (fc), sino también la Capacidad de Campo, Punto de Marchitez y densidad.

A manera de ejemplo, la unidad geomorfológica más cobertura No. 31 “Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos” de acuerdo con el estudio realizado por IGAC & UPTC

(2005), tiene una textura Franco Arcillosa; de acuerdo con la Tabla 4 sus características físicas se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8. Características físicas Unidad Geomorfológica más cobertura No31.**

Numero	Unidad Geomorfológica más cobertura	UCS	TIPO DE TEXTURA	Infiltración básica (cm/hora)	Infiltración básica (mm/día)	Capacidad de Campo (%)	Punto de Marchitez (%)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
31	Altiplano+Mosaico de pastos y cultivos	AMV	Franco Arcillosa	0.8	192 384*	27	13	1.3

**Fuente: autor**

Para el tipo de suelo AMV con textura Franco - Arcillosa, se realizó prueba de infiltración básica en campo obteniéndose un resultado de 384 mm/día. Valor real que será utilizado para la estimación de la recarga potencial para la unidad tomada como ejemplo.

Para la estimación de la profundidad de las raíces, puede utilizarse los valores presentados en la Tabla 5, recomendados por Grassi (1976), por lo cual para la unidad geomorfológica más cobertura No 31 “Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos”, se estima una profundidad de raíces de 0,3 metros o 300 milímetros.

#### **6.4.2 Estimación de coeficiente de infiltración**

Como se mencionó anteriormente, el coeficiente de infiltración esta dado por tres variables que corresponden a la textura del suelo, pendiente y tipo de vegetación. A continuación, se presenta el cálculo de los coeficientes mencionados para la Unidad Geomorfológica más cobertura No. 31.

Para determinar el coeficiente de infiltración por textura del suelo ( $K_{fc}$ ) puede emplearse la ecuación 4, ecuación 5 y ecuación 6, dependiendo de cada situación. Específicamente para la Unidad No.31, debe emplearse la ecuación 4, entonces:

$$K_{fc} = 0.267 \ln(384) - 0.000154(384) - 0.723 = 0,807$$

La unidad geomorfológica más cobertura No. 31 Con pendientes entre 12% - 50% y cobertura de mosaico de pastos y cultivos, le corresponde un  $K_p=0.21$  y un  $K_v$  de 0.10 de acuerdo con la Tabla 2 y Tabla 3 respectivamente.

Determinado los coeficientes  $K_p$ ,  $K_v$  y  $K_{fc}$ , el coeficiente de infiltración ( $C_i$ ) general (adimensional) se puede estimar con la ecuación 7 y ecuación 8, dependiendo de cada situación descrita anteriormente, específicamente para la Unidad Geomorfológica más Cobertura No. 31, se aplica la ecuación 8.

$$C_i = K_{fc} + K_p + K_v$$

Por lo cual  $C_i$  para la unidad mencionada es igual a:

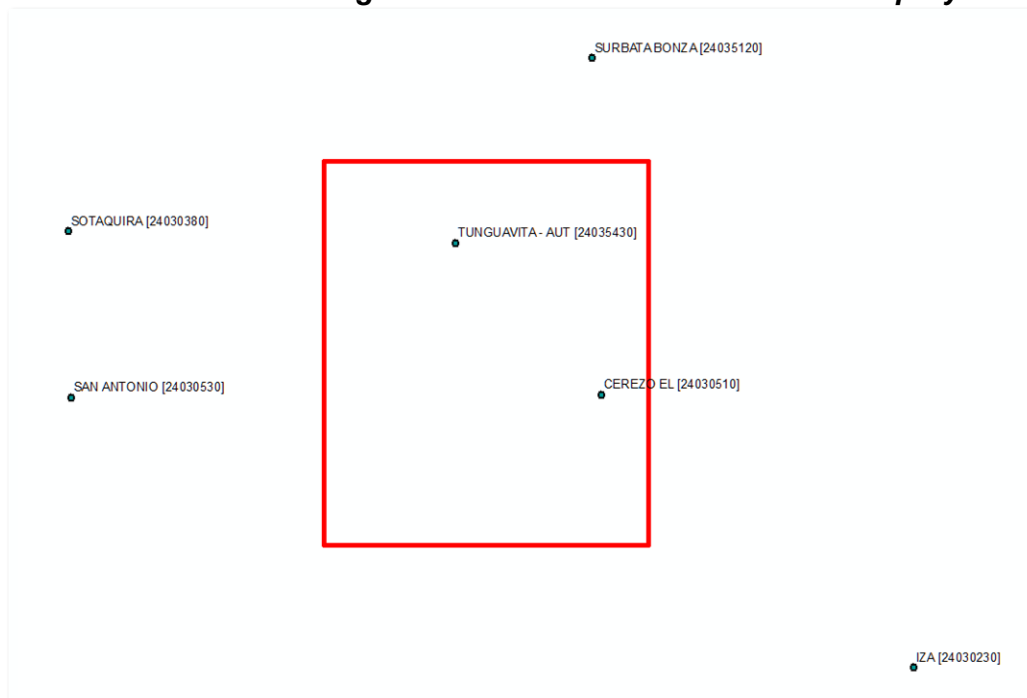
$$C_i = 0.807 + 0.21 + 0.10 = 1,117$$

Como el valor supera la unidad se asume un valor de 1.0 como lo recomienda Schosinsky (2006).

### 6.4.3 Estimación Precipitación (P) del Sistema Geotérmico Paipa

Revisado el catálogo de estaciones climáticas del IDEAM, se identificaron seis (6) estaciones climatológicas con datos de precipitación diaria en el área de influencia del proyecto, ubicadas geográficamente como aparece en la Figura 23, para los periodos de interés (marzo de 1991 a febrero 1992 y marzo de 2021 a febrero de 2022). Es preciso indicar que los datos históricos de precipitación obtenidos de las bases de datos del IDEAM se presentan como Anexo A. listado en el Capítulo 10.

**Figura 22. Estaciones climatológicas dentro del área de influencia del proyecto.**



**Fuente: autor**

Una vez obtenido los datos, fueron procesados para obtener información de precipitación para todos los meses del año, de cada una de las estaciones (Tunguavita, Sotaquirá, Iza, San Antonio, Cerezo El Y Surbata), como aparece en la Tabla 9 y la Tabla 10.

**Tabla 9. Precipitación mensual año 1991.**

Estación	PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
	AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
TUNGUAVITA	1991	104.2	101.1	116.1	47	24.5	15	85.7	80.2	172.5	61.2	13.1	15.2
SOTAQUIRÁ	1991	183.3	132.7	185.7	147.3	167.6	27.8	164.9	117.6	89.4	64.8	10.3	27.4
IZA	1991	90.2	63	141.8	26.7	35.9	29	34	64.1	97.7	27.7	5.6	7.9
SAN ANTONIO	1991	82.5	91	168.8	41.6	54.4	18.7	75.3	52.1	82.9	19.7	0	15.2
CEREZO EL	1991	152.2	113.3	159.1	27.3	37.8	10	69.6	70.6	201.5	42.6	8.2	27
SURBATA	1991	122.4	96.4	150.4	31.5	16.6	14	77.6	60.4	110.2	25	16.5	15.7

**Fuente: autor**

**Tabla 10. Precipitación mensual año 2021.**

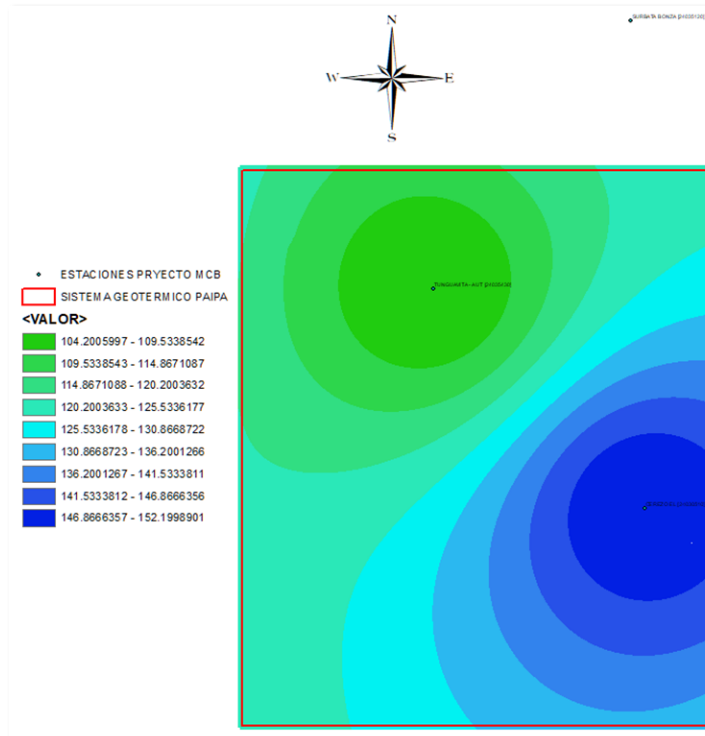
Estación	PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
	AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
TUNGUAVITA	2021	130.2	125.3	109.7	175.7	27	96.4	33.5	135.3	94	52.9	9.3	80.3
SOTAQUIRA	2021	157.7	163.8	182.8	104.3	47.2	163.7	41.2	182.6	99.1	79.7	18.8	123.9
IZA	2021	109.2	97.2	108.4	77.4	24.8	101.7	32.6	64.2	61	8.9	11.4	100.8
SAN ANTONIO	2021	109.7	138.4	155.8	77.4	34.4	112.3	75.2	170.8	68.7	42.8	8.3	72.9
CEREZO EL	2021	120.5	179.1	144.4	105.5	27.1	79.1	29.4	183.6	140.3	30.8	4	128.7
SURBATA	2021	142.5	127.8	87.3	79	17.5	89	42.5	111.2	57	54.3	7.6	77.2

**Fuente: autor**

Con la ubicación de las estaciones y datos de precipitación mensual en mm, se realizaron interpolaciones obteniendo mapas en formato ráster, de los cuales se extrajo información de lluvia de cada una de las unidades geomorfológicas más cobertura, para los periodos de estudio. A manera de ilustración, a continuación, en la Figura 24, se presenta la interpolación realizada de los datos obtenidos del mes de marzo, de cada una de las estaciones pluviométricas



**Figura 23. Precipitación mes de marzo de 1991.**



**Fuente: autor**

Una vez obtenida la información de precipitación mensual del área de influencia, se procedió a extraer los valores para cada una de las Unidades Geomorfológicas más cobertura, datos necesarios para el cálculo de la recarga potencial del acuífero en estudio.

#### **6.4.4 Estimación de la precipitación que infiltra ( $P_i$ ) y Escorrentía ( $ESC$ ).**

Como se explicó anteriormente, Schosinsky & Losilla (2000) establecen que lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración en los suelos ya que se considera que, en un mes de lluvia, al menos 5mm son retenidos por el follaje. Para

el caso específico de la Unidad Geomorfológica más cobertura No31 Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos”, la retención se calcula de acuerdo con la ecuación 2:

$$Ret = P * Cfo$$

$$Ret \left( \frac{mm}{mes} \right) = 121,58mm * 0.12 = 14.59m$$

La fracción de precipitación que infiltra (Pi) está dada por el Coeficiente de Infiltración (Ci), la precipitación y la retención, para la unidad mencionada se obtendría con la ecuación 9:

$$Pi = Ci * (P - Ret)$$

$$Pi \left( \frac{mm}{mes} \right) = 1.0 * (121.58mm - 14.59mm) = 106.99mm$$

De la Unidad, una vez obtenida la precipitación, determinada la fracción que infiltra y la parte retenida, es posible determinar la Escorrentía superficial (ESC) mediante la ecuación 10:

$$ESC \left( \frac{mm}{mes} \right) = P - Ret - Pi$$

$$ESC \left( \frac{mm}{mes} \right) = 121.58mm - 14.59mm - 106.99mm = 0.0mm$$

#### **6.4.5 Estimación de Evapotranspiración Potencial**

De acuerdo con los registros de IDEAM, La estación climatológica Tinguavita cuenta con datos de temperatura mínima y máxima de los periodos de interés, datos

procesados para obtener los siguientes resultados de temperatura promedio mensual, presentados en la Tabla 11 y Tabla 12:

**Tabla 11. Temperatura promedio mensual año 1991.**

Parámetro	Temperatura (°C) año 1991											
	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
Tmin (°C)	11.07	10.71	12.0	11.2	10.2	10.2	10.7	9.5	11.4	10.2	8.4	8.7
Tmax(°C)	20.67	19.7	19.7	19.6	19.0	18.9	19.9	19.4	19.4	21.5	22.2	23.4
Tprom(°C)	15.87	15.2	15.8	15.4	14.6	14.6	15.3	14.5	15.4	15.9	15.3	16.0

**Fuente: autor**

**Tabla 12. Temperatura promedio mensual año 2021**

Parámetro	Temperatura (°C) año 2021											
	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
Tmin (°C)	10.61	11.4	11.0	10.3	9.1	9.9	9.0	10.8	10.3	10.6	7.8	9.9
Tmax(°C)	19.64	19.8	19.4	19.2	19.0	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4
Tprom(°C)	15.1	15.6	15.2	14.7	14.1	14.6	14.2	15.1	14.9	15.0	13.6	14.6

**Fuente: autor**

Por lo tanto, para el mes de marzo de 1991, la ETP de la Unidad Geomorfológica más cobertura “Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos” estimada con la ecuación 11 será:

$$ETP \left( \frac{mm}{mes} \right) = (8.1 + 0.46 * T) * Ps$$

$$ETP \left( \frac{mm}{mes} \right) = (8.1 + 0.46 * 15.87) * 8.47 = 130.44 \frac{mm}{mes}$$

#### 6.4.6 Estimación de la Evapotranspiración Real (ETR) y humedad al final del mes (Hsf).

Para determinar la ETR del mes de marzo de 1991, es necesario estimar los coeficientes de humedad C1 mediante la ecuación 12.

$$C1 = \frac{Hsi - PM + Pi}{CC - PM}$$

$$C1 = \frac{105.3mm - 50.7mm + 102.84mm}{105.3mm - 50.7mm} = 2,88 ; \text{ se asume } 1.0$$

Sin embargo, el coeficiente C1 no puede ser mayor que la unidad, por lo cual se asume un valor máximo de uno (1).

Igualmente, es necesario calcular el coeficiente humedad C2 mediante la ecuación 13.

$$C2 = \frac{Hsi - PM + PI - (C1 * ETP)}{CC - PM}$$

$$C2 = \frac{105.3mm - 50.7mm + 106.99mm - (1.0 * 130.44mm)}{105.3mm - 50.7mm} = 0,57$$

Finalmente, la Evapotranspiración Real (ETR) puede estimarse de acuerdo con la ecuación 14 o ecuación 15 según sea el caso. Específicamente para la Unidad No. 31, se debe utilizar la ecuación 14 así:

$$ETR \left( \frac{mm}{mes} \right) = \left( \frac{C1 + C2}{2} \right) * ETP$$

$$ETR \left( \frac{mm}{mes} \right) = \left( \frac{1 + 0.57}{2} \right) * 130.44mm = 102.40mm$$

$$HD \left( \frac{mm}{mes} \right) = 105.3 + 106.99 - 50.7 = 161.59mm$$

Para el caso,  $161.59 \text{ mm} + 50.7 \text{ mm} - 105.40 \text{ mm}$  es igual  $106.89 \text{ mm}$  entonces Hsf es igual  $105.3 \text{ mm}$ .

#### **6.4.7 Recarga hídrica potencial acuífero (Rp)**

Como se explicó anteriormente, la recarga del acuífero ocurre si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante es la recarga al acuífero y se estima con la ecuación 19:

$$Rp = Pi + HSi - HSF - ETR$$

De acuerdo con lo anterior, para la Unidad Geomorfológica más Cobertura No. 31. "Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos" la recarga potencial para el mes de marzo de 1991 es:

$$Rp \left( \frac{mm}{mes} \right) = 106.99mm + 105.30mm - 105.3mm - 102.40m = 4.59 \text{ mm}$$

#### **6.4.8 Recarga potencial (Rp) Anual para la Unidad Geomorfológica No 31. "Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos"**

Una vez obtenida la recarga potencial en el mes de marzo de 1991 para la Unidad Geomorfológica más Cobertura No.31. de acuerdo con la metodología recomendada por

Schosinsky (2006), fue necesario repetir el procedimiento para los meses siguientes hasta completar el año, es decir, hasta el mes de febrero de 1992.

Igualmente, el procedimiento anteriormente descrito fue realizado para cada una de las 434 Unidad Geomorfológicas más Cobertura que componen el Sistema Geotérmico de Paipa.

Con el fin de facilitar los cálculos mencionados, se realizó el procedimiento a través de hojas de cálculo en Excel, programadas lógicamente. A manera de ilustración, a continuación, se presenta la Tabla 13 en la cual se resumen las estimaciones realizadas para determinar la Recarga Potencial (Rp) anual del año 1991 para la Unidad Geomorfológica No. 31. Igualmente, el cálculo realizado para la estimación de la recarga potencia (Rp) de cada una de las 434 unidades geomorfológicas más cobertura del sistema se presenta como Anexo B. y Anexo C., listados en el Capítulo 10.

**Tabla 13. Estimación de la Recarga Potencial (Rp) anual para la Unidad Geomorfológica más Cobertura No. 31**

**BALANCE HIDRICO DE SUELOS**

Zona de Estudio: Altiplano + Mosaico de pastos y cultivos  
 Fecha: Cfo Coeficiente de follaje No 31  
 Textura del suelo: Franco Arcillosa  
 Cobertura: Mosaico de pastos y cultivos

**Simbología:**

fc: Capacidad de infiltración	P: Precipitación Media Mensual
I: Coeficiente de Infiltración	Pi: Precipitación que infiltra
CC: Capacidad de campo	ESC: escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez	ETP: Evapotranspiración potencial
PR: Profundidad de Raíces	ETR: Evapotranspiración real
(CC-PR): Rango de agua disponible	Hsi: Humedad del suelo inicial
DS: Densidad del suelo	HD: Humedad disponible
C1: Factor ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	Hsf: Humedad del suelo final
C2: Factor ETP, por cierre de estomas, después que ocurra ETR	DCC: déficit de capacidad de campo
Kp: Factor por pendiente	Rp: Recarga potencial
Kv: Factor por vegetación	NR: necesidad de riego
Kfc: Factor estimado con base en prueba de infiltración	Ret: retención de lluvia

fc (mm/día)	384		
Kp	0.21		
Kv	0.10		
Kfc	0.807		
Ci	1.000		
DS (g/cm3)	1.30		
PR (mm)	300		
Hsi (%)	27.00		
Lluvia retenida - Cfo	0.12		
		Por peso (%)	(mm)
		CC	27% 105.3
		PM	13% 50.7
		(CC-PM)	14.0% 54.6

Parametro	Unidad	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Total
P	mm	121.58	103.17	153.88	52.58	55.55	17.32	86.57	73.40	135.31	41.77	7.95	19.32	868.41
Ret	mm	14.59	12.38	18.47	6.31	6.67	5.00	10.39	8.81	16.24	5.01	5.00	5.00	113.87
Pi	mm	106.99	90.79	135.41	46.27	48.88	12.32	76.18	64.59	119.07	36.76	2.95	14.32	754.53
ESC	mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T	(°C)	15.87	15.21	15.85	15.36	14.58	14.56	15.29	14.46	15.42	15.87	15.26	16.05	
Ps	(%)	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.60	8.23	8.42	8.07	8.30	8.32	7.57	
ETP	mm	130.44	125.15	133.13	127.54	128.37	127.26	124.55	124.21	122.61	127.82	125.8	117.21	1514.09
Hsi	mm	105.3	105.30	105.30	105.30	87.80	72.50	50.70	64.61	67.09	105.30	78.15	50.70	
HD	mm	161.59	145.39	190.01	100.87	85.98	34.12	76.18	78.50	135.46	91.36	30.40	14.32	
C1	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.62	1.00	1.00	1.00	1.00	0.56	0.26	
C2	-	0.57	0.37	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	
ETR	mm	102.40	85.7	133.1	63.8	64.2	34.1	62.3	62.1	76.0	63.9	30.4	14.3	792.36
Hsf	mm	105.30	105.30	105.30	87.80	72.50	50.70	64.61	67.09	105.30	78.15	50.70	50.70	
DCC	mm	0.00	0.00	0.00	17.50	32.81	54.60	40.70	38.21	0.00	27.15	54.60	54.60	
Rp	mm	4.59	5.06	2.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.84	0.00	0.00	0.00	16.77
Nr	mm	28.0	39.4	0.0	81.3	97.0	147.7	103.0	100.3	46.6	91.1	150.0	157.5	1041.89

## **6.5 ENSAYOS DE LABORATORIO Y PRUEBAS DE CAMPO.**

Con el fin de verificar los datos tomados de estudios anteriores y características estimadas de tablas y cuadros de la literatura disponible, se realizaron pruebas en campo y ensayos de laboratorio en varios puntos dentro del sistema geotérmico de paipa. Los ensayos consistieron en la realización de pruebas de infiltración y toma de muestras de suelo, en tres puntos dentro del Sistema Geotérmico de Paipa.

### **6.5.1 Selección de los puntos**

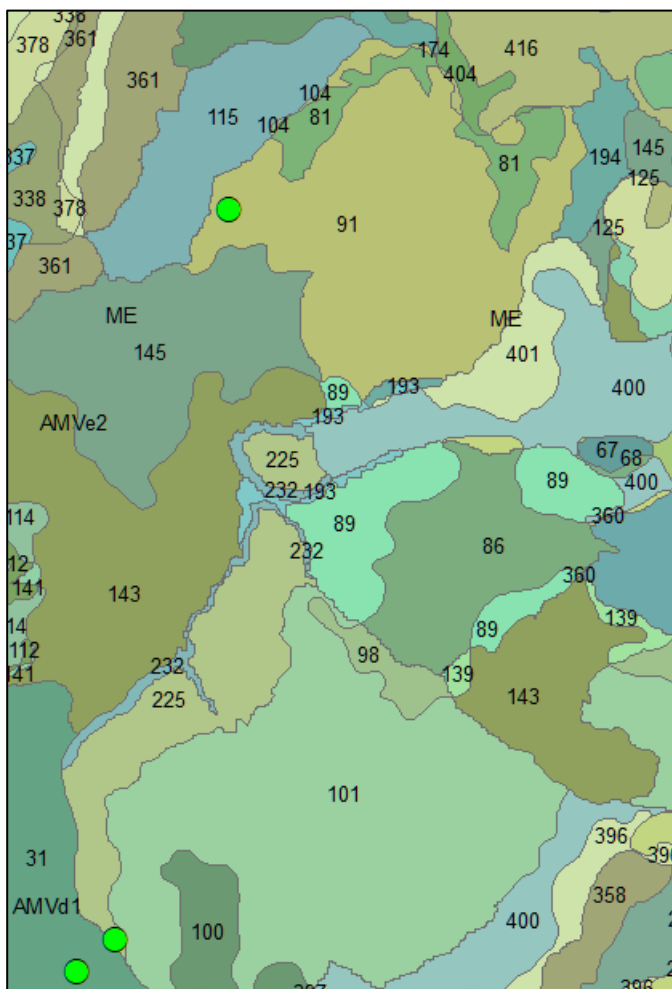
Elaborado el mapa de Geomorfología más Coberturas, se determinaron tres puntos para las pruebas de campo y toma de muestras de suelos. Los criterios de selección básicamente consistieron en:

- Localización cercana a vías de acceso, teniendo en cuenta que para la prueba de infiltración se requiere contar con suministro de agua potable y desplazamiento de elementos de laboratorio.
- Tres unidades Geomorfológicas más Cobertura diferentes.
- Permiso de propietarios para la realización de pruebas.

De acuerdo con lo anterior, se seleccionaron preliminarmente los puntos mencionados dentro del área del Sistema Geotérmico de Paipa en las ubicaciones señaladas con color verde en la Figura 25.



**Figura 24. Selección de puntos preliminares para realización de pruebas y tomas de muestras.**



**Fuente: autor**

Cada uno de los puntos fue caracterizado de acuerdo con su Unidad Geomorfológica más Cobertura y sus coordenadas, como se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 14. Localización pruebas y toma de muestras**

No.	Unidad Geomorfológica más cobertura	Coordenada E	Coordenada N
31	Altiplano+Mosaico de pastos y cultivos	1102403.737	1117116.934
91	Loma denudada Pastos limpios	1103214.283	1121138.200
225	Terraza de acumulación+Mosaico de pastos y cultivos	1102611.639	1117294.556

**Fuente: autor**

### **6.5.2 Realización de pruebas de infiltración y toma de muestras de suelo**

Para las pruebas de infiltración fue necesaria la construcción de dos anillos de 50cm y 30 cm, en hierro de espesor  $\frac{1}{4}$  de pulgada, los cuales fueron afilados para facilitar su hinchamiento en los suelos de donde se realizaría la prueba. En la Fotografía 2 se presenta los anillos utilizados para el ensayo o prueba de infiltración en campo.

**Fotografía 2. Anillos prueba de infiltración.**



**Fuente: autor**

Como puede observarse en la Fotografía 3, para el suministro de agua de la prueba de infiltración, se adecuo un vehículo con un tanque de almacenamiento plástico de aproximadamente 200 Litros de agua, el cual se provisionó de un sistema de recarga y descarga para el suministro de agua.

**Fotografía 3. Adecuación vehículo para pruebas de campo y toma de muestras.**



**Fuente: autor**

Con la disponibilidad de los recursos necesarios (humano, materiales, equipos, etc), se realizó el desplazamiento hacia los puntos seleccionados en las Unidades Geomorfológicas más Cobertura en las coordenadas previamente extraídas del modelo del Sistema Geotérmico de Paipa, haciendo uso de un dispositivo GPS marca Garmin modelo Oregon 550 como puede verificarse en la Fotografía 4.

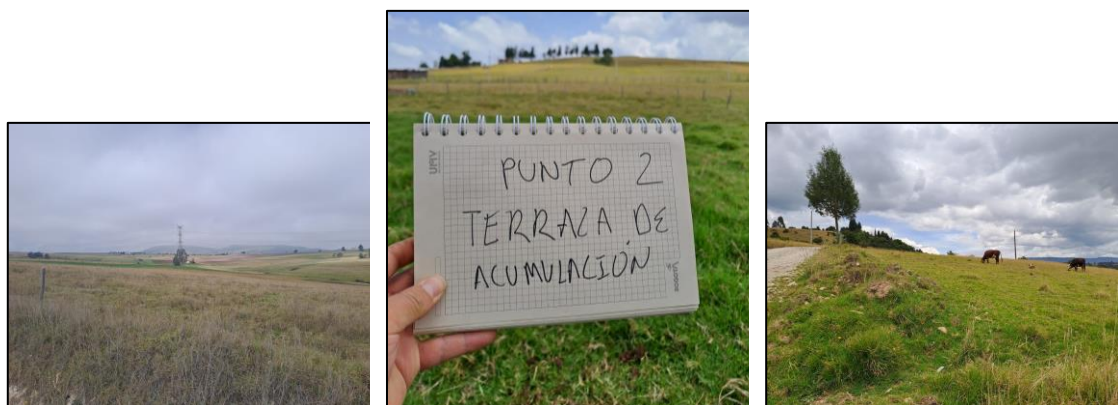
**Fotografía 4. Localización puntos seleccionados con equipo GPS Garmin Oregon 550**



**Fuente: autor**

Localizadas cada una de las Unidades geomorfológicas más Cobertura, se tomó registro fotográfico, evidenciándose que cada una corresponde a los plasmado en mapas e informes recopilados para el presente trabajo, tal y como lo demuestra la Fotografía 5.

**Fotografía 5. Unidades Geomorfológicas más Cobertura verificadas en campo.**



Unidad Geomorfológica más Cobertura No 31. Altiplano+Mosaico de pastos y cultivos.

Unidad Geomorfológica más Cobertura No 225. Terraza de acumulación+Mosaico de pastos y cultivos.

Unidad Geomorfológica más Cobertura No 91. Loma de denudada+Pastos limpios.

**Fuente: autor**

En cada una de las unidades geomorfológicas más Cobertura seleccionadas (UGC\_31, UGC\_91 y UGC\_225), se realizó ensayos de infiltración base como puede apreciarse en la Fotografía 6.

**Fotografía 6. Prueba de infiltración.**



**Unidad Geomorfológica más  
Cobertura No 31.**



**Unidad Geomorfológica más  
Cobertura No 225.**



**Unidad Geomorfológica más  
Cobertura No 91.**

***Fuente: autor***

Así mismo, como lo evidencia la Fotografía 7, de cada uno de los suelos de la UGC se tomaron muestras de suelo, con el propósito de calcular su humedad natural y determinar su densidad aparente. Para dicha actividad el autor se valió de un barreno manual, que fue hincado mecánicamente entre los 30 cm y 50 cm.

**Fotografía 7. Toma de muestras de suelo.**



Unidad Geomorfológica más  
Cobertura No 31.

Unidad Geomorfológica más  
Cobertura No 225.

Unidad Geomorfológica más  
Cobertura No 91.

**Fuente: autor**

**6.5.3 Resultados obtenidos**

Realizadas las pruebas de campo se obtuvieron datos de infiltración base que fueron procesados, obteniéndose los resultados plasmados en la Tabla 15.

**Tabla 15. Resultados prueba de Infiltración base**

No	Unidad Geográfica más cobertura	Tasa de infiltración (mm/H)	Tasa de infiltración (mm/día)
31	Altiplano+Mosaico de pastos y cultivos.	24	576
91	Loma desnuda+Pastos limpios	12	288
225	Terraza de acumulación+Mosaico de pastos y cultivos	12	288
		<b>Promedio</b>	<b>384</b>

**Fuente: autor**

Teniendo en cuenta que en las tres unidades se presenta el mismo tipo de suelo según estudio de IGAC & UPTC (2005), se tomó un valor de infiltración base promedio para la

elaboración del modelo de balance hídrico de suelos para los diferentes años, es decir, que para la familia de suelos con textura “Franco Arcillosos” fc es igual 384mm/día.

## **6.6 MODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Para la estimación de los efectos del cambio climático se adoptó el trabajo presentado por Ruiz (2010), en el cual se cuantifica las variaciones de la temperatura y precipitación con respecto al periodo de referencia (1971 – 2000), para los periodos (2011 – 2040), (2041 – 2070) y (2071 – 2100), en el Departamento de Boyacá. En el Anexo A. listado en el Capítulo 10, se presenta el resumen de los valores de precipitación proyectados para los periodos futuros.

Como se advirtió anteriormente, la estimación de los efectos se realizó a través de la elaboración de escenarios de cambio climático que fueron utilizados para un multimodelo de condiciones, obteniéndose un promedio, metodología recomendada por Jones (2004).

En el trabajo mencionado, se establece que, con respecto al periodo de referencia, la temperatura media ascenderá 1.3 grados centígrados para el año 2040, para finales de 2070 la temperatura ascenderá 2.1 grados centígrados y para finales del siglo XXI ascenderá 2.7 grados centígrados.

Así mismo se establece que, con respecto año 2000, la precipitación para finales del año 2040 disminuirá 8.6%, para finales de 2070 disminuirá 7.7% y disminuirá 7.8% para finales del siglo XXI.

De acuerdo con lo estimado por Ruiz (2010), se proyectó la precipitación hacia los periodos de referencia (2011 – 2040) Tabla 16, (2041 – 2070) Tabla 17 y (2071 – 2100) Tabla 18.

**Tabla 16. Precipitaciones mensuales año (2011 – 2040).**

Estación	PROYECCIÓN PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
	AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
TUNGUAVITA	2040	94.9	52.7	100.7	63.6	59.3	47.2	101.2	106.7	54.8	19.8	5.3	10.3
SOTAQUIRÁ	2040	119.6	78.8	166.3	114.1	69.4	33.5	152.2	134.5	64.4	32.6	10.6	5.8
IZA	2040	39.1	57.5	94.3	32.2	50.7	83.8	83.0	84.8	45.9	10.5	16.3	11.8
SAN ANTONIO	2040	67.4	53.8	97.0	71.9	44.8	24.4	120.7	137.8	8.7	24.7	10.0	5.6
CEREZO EL	2040	68.1	48.5	83.8	63.3	71.5	50.5	91.6	120.9	23.1	21.8	5.9	32.9
SURBATA	2040	96.4	50.1	111.8	73.4	54.7	35.2	99.7	105.6	34.0	17.5	10.8	13.3

**Fuente: autor**

**Tabla 17. Precipitaciones mensuales año (2041 – 2070).**

Estación	PROYECCIÓN PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
	AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
TUNGUAVITA	2070	95.8	53.3	101.7	64.2	59.9	47.6	102.2	107.7	55.4	20.0	5.4	10.4
SOTAQUIRA	2070	120.7	79.6	167.9	115.2	70.1	33.9	153.7	135.9	65.1	33.0	10.7	5.9
IZA	2070	39.5	58.1	95.3	32.5	51.2	84.6	83.8	85.7	46.3	10.6	16.4	11.9
SAN ANTONIO	2070	68.0	54.4	97.9	72.6	45.2	24.6	121.9	139.2	8.8	24.9	10.1	5.6
CEREZO EL	2070	68.8	49.0	84.6	64.0	72.2	50.9	92.5	122.1	23.4	22.0	6.0	33.2
SURBATA	2070	97.4	50.6	112.9	74.1	55.3	35.5	100.7	106.6	34.3	17.6	10.9	13.4

**Fuente: autor**

**Tabla 18. Precipitaciones mensuales año (2071 – 2100).**

Estación	PROYECCIÓN PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
	AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
TUNGUAVITA	2100	95.7	53.2	101.6	64.2	59.8	47.6	102.1	107.6	55.3	20.0	5.3	10.4
SOTAQUIRA	2100	120.6	79.5	167.7	115.1	70.0	33.8	153.5	135.7	65.0	32.9	10.7	5.9
IZA	2100	39.5	58.0	95.2	32.5	51.2	84.5	83.7	85.6	46.3	10.6	16.4	11.9
SAN ANTONIO	2100	68.0	54.3	97.8	72.6	45.2	24.6	121.8	139.0	8.8	24.9	10.0	5.6
CEREZO EL	2100	68.7	49.0	84.5	63.9	72.1	50.9	92.4	122.0	23.3	21.9	6.0	33.2
SURBATA	2100	97.3	50.5	112.8	74.0	55.2	35.5	100.6	106.5	34.3	17.6	10.9	13.4

**Fuente: autor**

Con la información estimada de cambio climático para la variable climatológica de precipitación, se realizó el proceso de interpolación ya mencionado en el presente informe para la obtención de las isoyetas, posteriormente se extrajeron datos de precipitación para cada una de las Unidades Geomorfológicas más Cobertura.



Así mismo, la temperatura media del Sistema Geotérmico de Paipa fue proyectada a los periodos de interés dando como resultado los valores presentados en la Tabla 19.

**Tabla 19. Temperatura media mensual.**

Parámetro	Temperatura (°C) Mensual											
	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
<b>Tprom(°C) 2040</b>	16.9	16.7	16.1	16.3	15.5	15.3	15.7	16.0	17.1	15.8	15.6	16.3
<b>Tprom(°C) 2070</b>	17.70	17.5	16.9	17.1	16.3	16.1	16.5	16.8	17.9	16.6	16.4	17.1
<b>Tprom(°C) 2100</b>	18.30	18.1	17.5	17.7	16.9	16.7	17.1	17.4	18.5	17.2	17.0	17.7

**Fuente: autor**

En el Anexo L. listado en el Capítulo 10 del presente documento, se encuentra los datos de temperaturas tomados de estaciones del IDEAM, así como los calculados y proyectados para periodos futuros.

Con las variables de temperatura y precipitación estimadas para periodos futuros, se procedió a correr el modelo elaborado con información, morfológica, geológica, coberturas, climatología, suelos, etc. para la observación del efecto en la recarga del acuífero con respecto al promedio estimado para el periodo (1991 a 2021).

## 7 RESULTADOS

Una vez efectuados todos los procedimientos planteados anteriormente en el presente documento para la estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos, se obtuvieron los siguientes resultados:

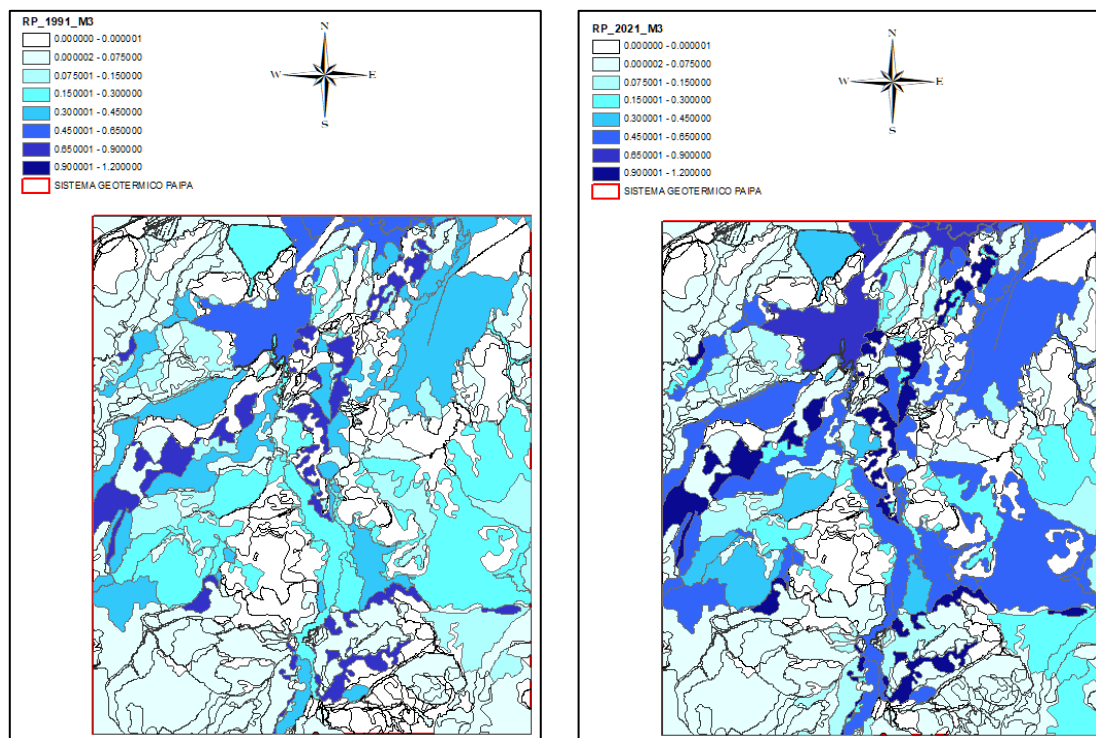
### 7.1 PROMEDIO RECARGA POTENCIAL (1991 – 2021)

Como fue mencionado, para la elaboración de los modelos hidrogeológicos que permite estimar la recargar potencial de cada año o periodo de interés, fue necesario recopilar y extraer información, a través de consulta de varias fuentes de datos, así como la realización de pruebas de cambio. Resultado de lo anterior, se obtuvo un sistema compuesto de 434 Unidades Geomorfológicas más Cobertura para las cuales fue estimada una a una su correspondiente recarga potencial, de acuerdo con las características, morfología, suelo, climatología, estructura, geología, cobertura, etc.

La recarga potencial estimada para el año 1991 es de  $6.23 \times 10^6$  metros cúbicos, cuyos cálculos y estimaciones se presentan en el Anexo B y Anexo C, listados en el Capítulo 10. Para el año 2021 se estimó la recarga potencial, obteniéndose un valor de recarga anual de  $9.50 \times 10^6$  metros cúbicos e igualmente los cálculos y estimaciones se encuentran como Anexo D y Anexo E, listados en el capítulo 10.

A continuación, se presenta la Figura 26 elaborada con recarga potencial estima año 1991 y 2021.

**Figura 25. Recarga potencial año 1991 y año 2021.**



**Fuente: autor**

De acuerdo con lo anterior, la recarga promedio durante el periodo (1991 – 2021) se estima en  $7.87 \times 10^6$  metros cúbicos.

## **7.2 RECARGA POTENCIAL PERIODO (2011-2040), (2041 – 2070) Y (2071 – 2100).**

De acuerdo con las condiciones climáticas del ensamble multimodelo de cambio climático para el periodo (2011 – 2040) en el Departamento de Boyacá, se estimó una recarga potencial de  $3,64 \times 10^6$  metros cúbicos en el Sistema Geotérmico de Paila. Los cálculos y estimaciones realizados para determinar la recarga potencial del periodo se presentan como Anexo F y Anexo G.

Igualmente, para el periodo (2041 – 2070) se estimó una recarga potencial de  $3,42 \times 10^6$  metros cúbicos. Los cálculos y estimaciones realizados para determinar la recarga potencial del periodo se presentan como Anexo H y Anexo I.

Finalmente, para el periodo (2071 – 2100) se estima una recarga potencial de  $2,97 \times 10^6$  metros cúbicos, igualmente los cálculos realizados se presentan como Anexo J y Anexo K, del presente documento.

### 7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

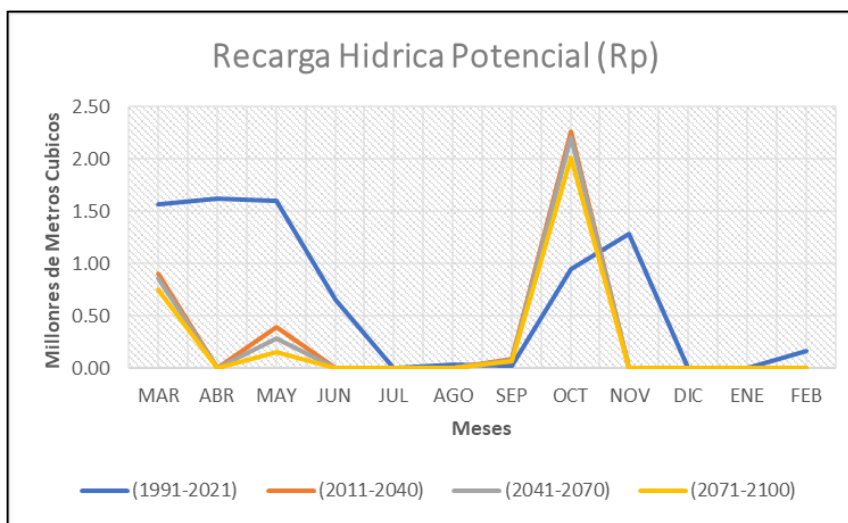
Para estimar posibles efectos de cambio climático en la recarga hídrica de acuíferos del Sistema Geotérmico de Paipa, es necesario comparar la recarga obtenida a partir del modelo hidrogeológico con las condiciones climáticas obtenidas de estaciones climatológicas (1991 – 2021) con la recarga obtenida para el mismo modelo, pero incorporando las condiciones climáticas estimadas de acuerdo con el multimodelo de cambio climático periodos (2011-2040), (2041-2070) y (2071-2100). De acuerdo con lo anterior. En la Tabla 20 se presenta el resultado obtenido para cada mes de los periodos evaluados.

**Tabla 20. Estimación de la recarga hídrica potencial mensual para los periodos de interés**

PERIODO	MILLONES DE METROS CÚBICOS											
	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
(1991 - 2021)	1.57	1.62	1.60	0.66	0.00	0.03	0.02	0.95	1.29	0.00	0.00	0.17
(2011-2040)	0.91	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.09	2.26	0.00	0.00	0.00	0.00
(2041-2070)	0.86	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.08	2.21	0.00	0.00	0.00	0.00
(2071-2100)	0.75	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.07	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00

**Fuente: autor**

**Figura 26. Recarga Potencial (Rp) mensuales periodos de interés.**



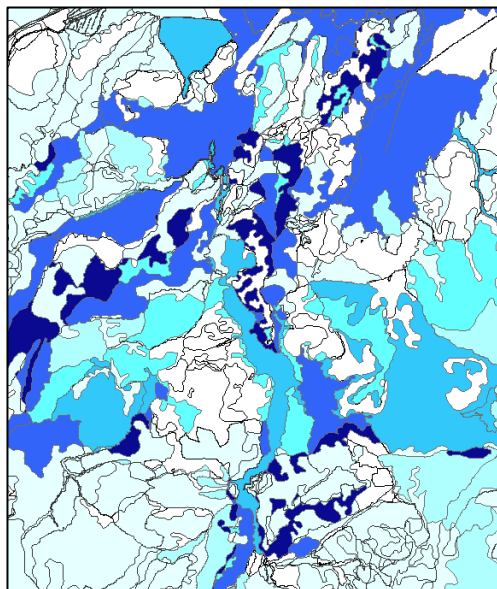
**Fuente: autor**

En la Figura 27, en el periodo (1991 – 2021) la recarga potencial es mayor en los meses de marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, mientras que para los periodos futuros (2011 – 2040), (2041 – 2070) y (2071 – 2100) es máxima en el mes de octubre.

Con respecto a la recarga potencia anual, para el periodo actual (1991 – 2021) se estima un volumen de  $7.87 \times 10^6$  metros cúbicos, para el periodo (2011 – 2041) un volumen de  $3,64 \times 10^6$  metros cúbicos, para el periodo (2041 – 2070) un volumen de  $3,42 \times 10^6$  metros cúbicos y finalmente para el periodo (2071 – 2100) un volumen de  $2,97 \times 10^6$  metros cúbicos. En la Figura 28 se representa gráficamente los valores estimados de recarga potencial para cada una de las 434 unidades geomorfológicas mas cobertura, para cada uno de los periodos de interés, con el fin de evidenciar los posibles cambios a futuro, que básicamente se resumen en una disminución de la recarga potencial de acuíferos.

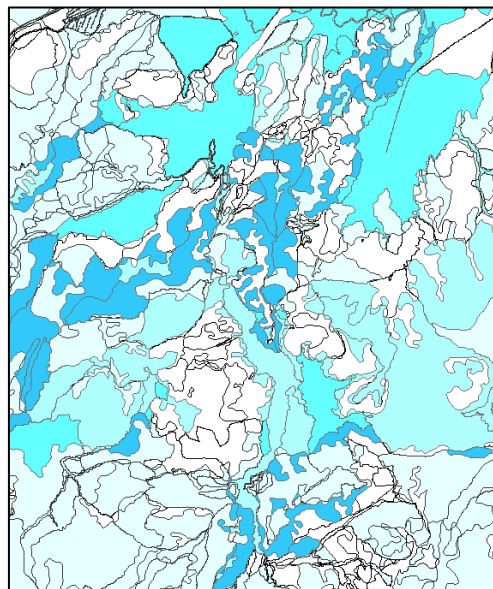
**Figura 27. Comparación de resultados para los periodos de interés**

**(1991 – 2021)**



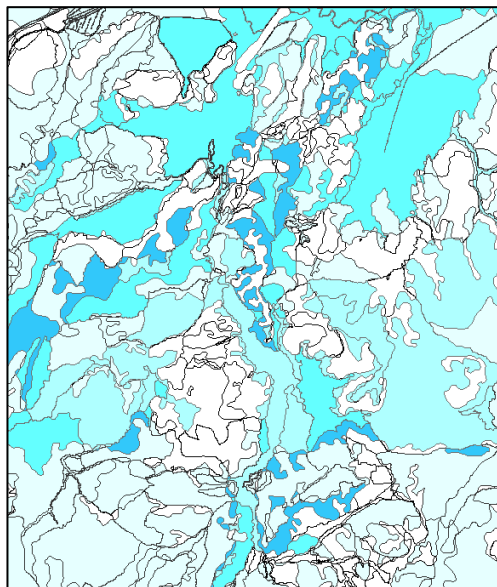
**Recarga Potencial  $7.87 \times 10^6$  metros cúbicos**

**(2011 – 2040)**



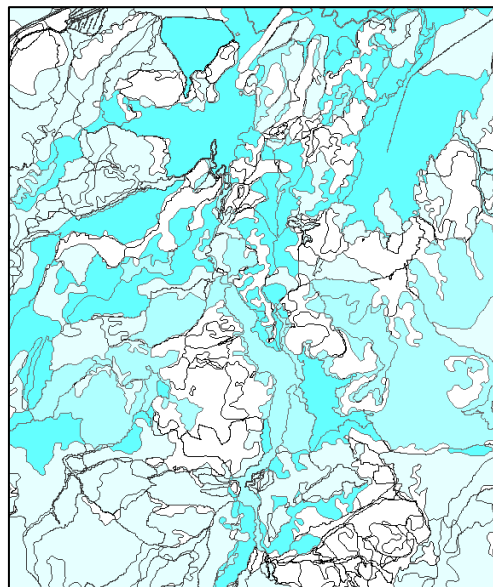
**Recarga Potencial  $3,64 \times 10^6$  metros cúbicos**

**(2041 – 2070)**

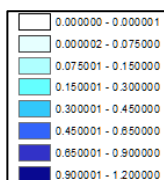


**Recarga Potencial  $3,42 \times 10^6$  metros cúbicos**

**(2071 – 2100)**



**Recarga Potencial  $2,97 \times 10^6$  metros cúbicos**



## 7.4 OBSERVACIONES AL MODELO A LAS TENDENCIAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PROPUESTAS POR RUIZ (2010) - IDEAM.

Con el fin de evaluar la precisión de las tendencias de cambio climático para el Departamento de Boyacá estimadas por el IDEAM en cabeza de Ruiz (2010), se proyectó la temperatura media mensual en grados centígrados y la precipitación mensual en milímetros para el periodo correspondiente a marzo de 2021 a febrero de 2022. Posteriormente, se comparó los resultados con los datos históricos del IDEAM para el mismo periodo obteniendo los siguientes resultados:

### 7.4.1 Comparación Temperatura datos históricos con temperatura tendencias de cambio climático Ruiz 2010.

En la Tabla 21 se presentan los registros históricos de temperatura media en grados centígrados (°C) de la estación Tunguavita del IDEAM para el periodo comprendido entre el mes de marzo de 2021 a febrero de 2022, así como los datos de temperatura estimados de acuerdo con las tendencias propuestas por RUIZ (2010) para el mismo periodo.

**Tabla 21. Datos históricos temperatura y datos estimados de acuerdo con el trabajo de Ruiz (2010).**

Parámetro	Temperatura (°C) año 2021 - 2022											
	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
Tprom(°C) Datos IDEAM	15.8	15.5	15.0	14.7	14.3	13.8	14.2	15.5	15.6	14.6	14.6	14.8
Tprom(°C) Multimodelo cambio climático Ruiz (2010)	16.32	16.08	15.48	15.68	14.88	14.68	15.08	15.38	16.48	15.18	14.98	15.68
Diferencia (°C)	0.54	0.56	0.48	0.99	0.56	0.84	0.85	-0.07	0.91	0.55	0.37	0.84

**Fuente: autor**

De la Tabla 21, se puede evidenciar que la temperatura estimada para la mayoría de meses del periodo comprendido entre marzo de 2021 a febrero de 2022 de acuerdo con las tendencias de temperatura propuestas por el IDEAM en cabeza de Ruiz (2010) se encuentran por encima de los valores tomados de la estación meteorológica TUNGUAVITA en el Municipio de Paipa para el mismo periodo, salvo el mes de octubre en el cual se presente un valor de temperatura media similar entre los datos proyectados de temperatura con el registro histórico del mismo mes.

De acuerdo con lo anterior, es claro que los datos históricos difieren en buena medida con los datos pronosticados por Ruiz (2010).

#### **7.4.2 Comparación precipitación datos históricos con precipitación tendencias de cambio climático Ruiz 2010.**

En la Tabla 22 se presentan los registros históricos de precipitación de diferentes estaciones del IDEAM para el periodo comprendido entre el mes de marzo de 2021 a febrero de 2022, así como los datos de precipitación estimados de acuerdo con las tendencias propuestas por RUIZ (2010) para el mismo periodo.

**Tabla 22. Datos históricos precipitación y datos de precipitación estimados de acuerdo con el trabajo de Ruiz (2010).**

Fuente	Estación	AÑO	PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)											
			MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
Datos IDEAM	TUNGUAVITA	2022	130.2	125.3	109.7	175.7	27	96.4	33.5	135.3	94	52.9	9.3	80.3
Datos IDEAM	SOTAQUIRÁ	2022	157.7	163.8	182.8	104.3	47.2	163.7	41.2	182.6	99.1	79.7	18.8	123.9
Datos IDEAM	IZA	2022	109.2	97.2	108.4	77.4	24.8	101.7	32.6	64.2	61	8.9	11.4	100.8
Datos IDEAM	SAN ANTONIO	2022	109.7	138.4	155.8	77.4	34.4	112.3	75.2	170.8	68.7	42.8	8.3	72.9
Datos IDEAM	CEREZO EL	2022	120.5	179.1	144.4	105.5	27.1	79.1	29.4	183.6	140.3	30.8	4	128.7



Fuente	Estación	PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
		AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
Datos IDEAM	SURBATA	2022	142.5	127.8	87.3	79	17.5	89	42.5	111.2	57	54.3	7.6	77.2
Cambio climático Ruiz (2010)	TUNGUAVITA	2022	99.1	55.1	105.2	66.5	62	49.3	105.7	111.4	57.3	20.7	5.5	10.8
Cambio climático Ruiz (2010)	SOTAQUIRÁ	2022	124.9	82.3	173.7	119.2	72.5	35	159	140.6	67.3	34.1	11.1	6.1
Cambio climático Ruiz (2010)	IZA	2022	40.9	60.1	98.5	33.6	53	87.6	86.7	88.6	47.9	11	17	12.3
Cambio climático Ruiz (2010)	SAN ANTONIO	2022	70.4	56.2	101.3	75.1	46.8	25.5	126.1	144	9.1	25.8	10.4	5.8
Cambio climático Ruiz (2010)	CEREZO EL	2022	71.1	50.7	87.6	61.6	74.7	52.7	95.7	126.3	24.2	22.7	6.2	34.4
Cambio climático Ruiz (2010)	SURBATA	2022	100.7	52.3	116.8	76.7	57.2	36.8	104.2	110.3	35.5	18.2	11.3	13.8

**Fuente: autor**

En la Tabla 23 se presenta la diferencia en milímetros entre los datos de precipitación tomados del registro histórico de las estaciones climatológicas cercanas al presente proyecto propiedad del IDEAM y los datos de precipitación estimados de acuerdo con las tendencias propuestas por Ruiz (2010).

**Tabla 23. Diferencia en milímetros entre datos de precipitación históricos y datos de precipitación según tendencias IDEAM.**

Estación	PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)												
	AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
TUNGUAVITA	2022	31.1	70.2	4.5	109.2	-35	47.1	-72.2	23.9	36.7	32.2	3.8	69.5
SOTAQUIRÁ	2022	32.8	81.5	9.1	-14.9	-25.3	128.7	-117.8	42	31.8	45.6	7.7	117.8
IZA	2022	68.3	37.1	9.9	43.8	-28.2	14.1	-54.1	-24.4	13.1	-2.1	-5.6	88.5
SAN ANTONIO	2022	39.3	82.2	54.5	2.3	-12.4	86.8	-50.9	26.8	59.6	17	-2.1	67.1
CEREZO EL	2022	49.4	128.4	56.8	39.3	-47.6	26.4	-66.3	57.3	116.1	8.1	-2.2	94.3
SURBATA	2022	41.8	75.5	-29.5	2.3	-39.7	52.2	-61.7	0.9	21.5	36.1	-3.7	63.4
	Diferencia Mínima	31.1	37.1	-29.5	-14.9	-47.6	14.1	-117.8	-24.4	13.1	-2.1	-5.6	63.4
	Diferencia Máxima	68.3	128.4	56.8	109.2	-12.4	128.7	-50.9	57.3	116.1	45.6	7.7	117.8

**Fuente: autor**

Como se evidencia en la Tabla 23, los datos de precipitación tomados de las diferentes estaciones meteorológicas para el periodo de estudio que va desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022 no son similares a los datos de precipitación obtenidos con

las tendencias de Ruiz (2010), en algunos meses los datos históricos de precipitación son mayores que los datos estimados de acuerdo con las tendencias de Ruiz (2010), mientras que en otros meses los datos históricos de precipitación están por debajo que los datos estimados de acuerdo con las tendencias de Ruiz (2010).

### **7.4.3 Análisis de resultados**

Como se observó en los numerales 7.4.1 y 7.4.2, revisados los datos históricos de las estaciones meteorológicas y comparando con los estimados de acuerdo con lo propuesto por Ruiz (2010) para un periodo entre marzo de 2021 y febrero de 2022, existen diferencias totalmente significativas, que hacen inferir que deben revisarse las tendencias propuestas.

Sin embargo, a pesar de las notorias diferencias de datos de temperatura y precipitación, estimados con las tendencias de cambio climático del Departamento de Boyacá con los datos históricos, no puede afirmarse que no existe el cambio climático, por el contrario los registros históricos a la fecha si demuestran que los valores de precipitación para cada mes del año han cambiado significativamente, por ejemplo, en el mes de marzo de 1991 se presentó una precipitación de 104.2 milímetros mientras que en el mes de marzo de 2021 se presentó una precipitación mayor de 130.2 mm. Otro ejemplo aun más excepcional es que en el periodo de marzo de 1991 a febrero de 1992 la precipitación total ascendió a los 835.8 mm mientras que la precipitación total en el periodo comprendido entre el mes de marzo de 2021 a febrero de 2022 ascendió a los 1069.6 milímetros, una marcada diferencia.

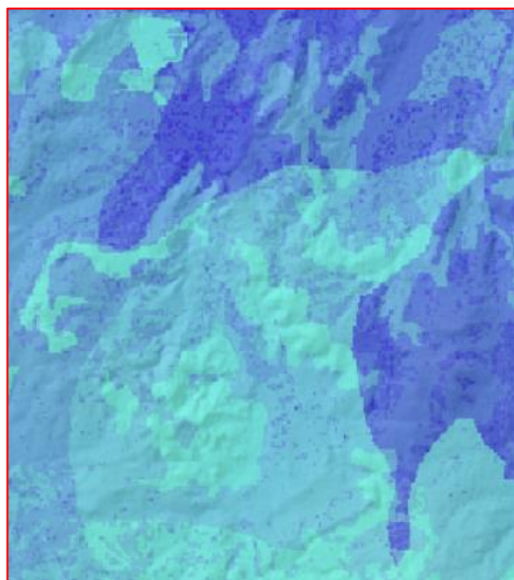
En conclusión, de acuerdo con el trabajo realizados de Cambio Climático para Colombia en cabeza de Ruiz (2010), la tendencia de la temperatura media para el Departamento de Boyacá se dirigía hacia el aumento, mientras que la tendencia de las precipitaciones era hacia la disminución, sin embargo, de acuerdo con los registros históricos para el periodo entre el mes de marzo de 1991 y febrero de 1992 la temperatura media anual fue de 18.3 °C y para el periodo de marzo de 2021 a febrero de 2022 la temperatura media es de 14.9°C, lo que evidencia una disminución.

#### **7.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE RECARGA POTENCIAL EN EL PRESENTE PROYECTO CON RESULTADOS DE ESTUDIO DE RECARGA POTENCIAL REALIZADO POR SGC (2017).**

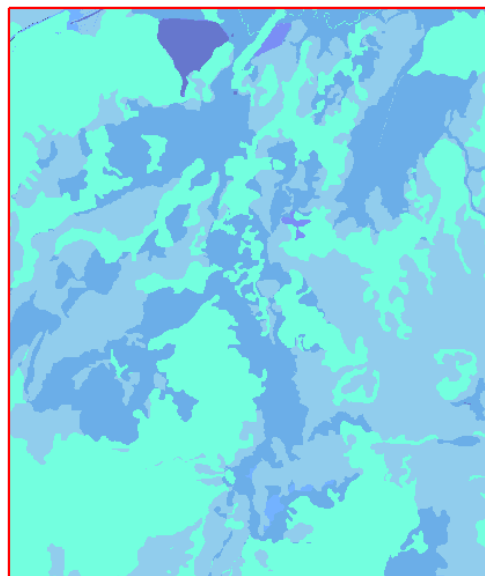
Con el fin de validar el modelo hidrogeológico elaborado en el presente proyecto, los resultados obtenidos de recarga potencial para el periodo comprendido entre marzo de 2021 a febrero de 2022 fueron comparados con estudio realizado por el SGC (2017).

Para realizar dicha comparación, se elaboró el mapa de recarga potencial en milímetros teniendo en cuenta que los resultados del estudio del SGC también se encuentran en milímetros. igualmente, para la clasificación de las áreas de recarga se utilizaron los mismos rangos y códigos de color muy similares obteniéndose los siguientes resultados:

**Figura 28. Comparación resultados de  $R_p$  obtenida en el presente proyecto con resultados de modelo del SGC (2017).**



**MODELO SGC RECARGA POTENCIA**



**MODELO PROYECTO**

En la Figura 28 se puede apreciar que la recarga potencial obtenida en el presente proyecto guarda una importante similitud con los resultados obtenidos por SGC (2017), validando el modelo hidrogeológico elaborado para aplicar las tendencias de cambio climático propuestas por Ruiz (2010).

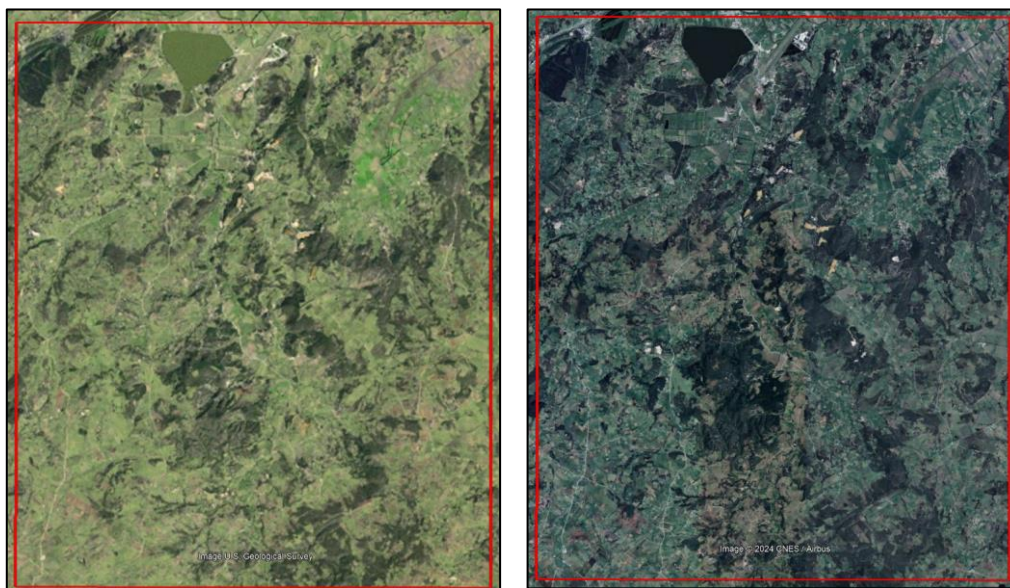
## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Para periodos futuros, la disminución de la precipitación y el aumento de temperatura producirán una disminución importante en la recarga potencial de acuíferos, debido al aumento de la Evapotranspiración Real (ETR).
- ✓ El aumento de la Evapotranspiración real (ETR) provocará un aumento en las necesidades de la capa vegetal que recubre la mayoría de los suelos en el Sistema Geotérmico de Paipa, disminuyendo el volumen de agua que recarga los acuíferos.
- ✓ La recarga disminuirá 46.79% para el periodo (2011 – 2040), 43.96% para el periodo (2041 – 2070) y 38.17% para el periodo (2071 – 2100), con respecto al periodo de control (1991 – 2021).
- ✓ En el periodo de control (1991 – 2021), la recarga potencial es mayor en los meses de marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, mientras que para los periodos futuros (2011 – 2040), (2041 – 2070) y (2071 – 2100) es máxima en el mes de octubre, lo que evidencia no solo un cambio en el volumen anual de recarga sino también en los meses donde se produce la recarga máxima durante el año.
- ✓ La recarga potencial es sensible con respecto al parámetro “Cobertura”, por lo cual se recomienda a la Entidades encargadas del manejo y gestión del recurso

hídrico, revisar adecuadamente permisos que se otorguen mediante los cuales se permita el endurecimiento de los suelos.

Haciendo énfasis en las coberturas del Sistema Geotérmico de Paipa, se presenta las siguientes imágenes satelitales, la primera tomada en el 1969 y la segunda tomada en el año 2022. Se puede evidenciar que las coberturas del sistema a lo largo de los años no han cambiado significativamente, lo cual evidencia una buena precisión en los parámetros calculados que dependen de las coberturas.

**Figura 29. Imágenes satelitales Sistema Geotérmico de Paipa**



**Año 1969**

**Año 2022**

**Fuente: Google Earth Engine**

- ✓ De acuerdo con el trabajo realizado de Cambio Climático para Colombia en cabeza de Ruiz (2010), la tendencia de la temperatura media para el

Departamento de Boyacá se dirigía hacia el aumento, mientras que la tendencia de las precipitaciones era hacia la disminución, sin embargo, de acuerdo con los registros históricos para el periodo entre el mes de marzo de 1991 y febrero de 1992 la temperatura media anual fue de 18.3 °C y para el periodo de marzo de 2021 a febrero de 2022 la temperatura media es de 14.9°C, lo que evidencia una disminución.

- ✓ Teniendo en cuenta las diferencias presentadas entre los datos de precipitación y temperatura proyectados con las tendencias propuestas por Ruiz (2010) con los datos obtenidos de estaciones climatológicas para el periodo marzo de 2021 a febrero de 2022, se recomienda evaluar o revisar dicho trabajo para obtener cambio climático para Colombia.
  
- ✓ La comparación realizada entre el mapa de recarga potencial para la zona centro de Boyacá elaborado por el SGC (2017) con el mapa del modelo hidrogeológico del presente proyecto para obtener recarga potencial en el Sistema Geotérmico de Paipa, evidenció una gran similitud en los resultados obtenidos, por lo cual puede inferirse que los procedimientos y la información (primaria y secundaria) estuvo acorde con la investigación.
  
- ✓ Es recomendable que las entidades públicas encargadas del manejo del recurso hídrico cuenten con modelos matemáticos que describan su comportamiento hidrogeológico, con el fin de contar con una herramienta que le permita tomar decisiones de manera más acertada al momento de otorgar cualquier clase de permisos, específicamente para el Municipio de Paipa, teniendo en cuenta que

una de las principales actividades económicas de la zona es el turismo atraído por las fuentes termales.



## 9 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Intergovernmental Panel on Climatic Change IPPC (2018). Glosario. p.75.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15\\_Glossary\\_spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf).
2. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2023).  
"Conceptos Básicos Sobre El Cambio Climático"  
<http://www.cambioclimatico.gov.co/otras-iniciativas>.
3. United Nations Institute for Training and Research UNITAR (2014). "Articles" –  
UNITAR <https://www.diplomacy.unitar.org/>.
4. Organización Meteorológica Mundial (2022). "*Se suceden las malas noticias para el planeta: los niveles de gases de efecto invernadero alcanzan nuevos máximos*".  
<https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/se-suceden-las-malas-noticias-para-el-planeta-los-niveles-de-gases-de>
5. National Aeronautics and Space Administration – NASA (2023). "Global Climate Change". <https://climate.nasa.gov/en-espanol/datos/evidencia/>
6. Pernia, J.& Formes, J. (2009). Cambio climático y agua subterránea. "*Enseñanza De Las Ciencias De La Tierra*", (pp. 172-178).  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3309116>.

7. Pisani, B., Samper, F. & Yanmei, L. (2013). "*Estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa mediante modelos hidrológicos de balance de agua*"  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4526018>
8. Bolaños, S. & Betancur, T. (2018). "*Estado del arte sobre el cambio climático y las aguas subterráneas. Ejemplos en Colombia*"  
<https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/984>.
9. Cepeda, h. & Pardo, N. (2004). "*Vulcanismo de Paipa. INGEOMINAS. Informe técnico*". 103 p. Bogotá.
10. Velandia, F. (2003). "*Cartografía Geológica y Estructural Sector Sur Del Municipio De Paipa*"  
[https://www.researchgate.net/publication/305046090\\_Informe\\_tecnico-Cartografia\\_geologica\\_y\\_estructural\\_sector\\_sur\\_del\\_municipio\\_de\\_Paipa](https://www.researchgate.net/publication/305046090_Informe_tecnico-Cartografia_geologica_y_estructural_sector_sur_del_municipio_de_Paipa)
11. Renzoni, G. (1981). "*Geología del Cuadrángulo J-12 Tunja. Boletín Geológico V 24*".
12. Grassi, C. (1976). "*Resumen de propiedades físicas del suelo, métodos de riego*". 265 Pg.
13. Schosinsky, G. & Losilla, M., (2000). "*Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*".
14. Linsley, R., Kohler, M. & Paulus, L., (1958), "*Hydrology for engineers*". 34o Pg.

15. Oviedo, B., 2010, "*Generación De Escenarios De Cambio Climático Regionales Y Locales A Partir De Modelos Globales - Guía Para Tomadores De Decisiones*".
16. Pabón, D., (2005), "*Escenarios de Cambio climático para territorio colombiano*" Documento INAPPDF-B/GECC/I. Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional. Bogotá, Colombia.
17. Pabón, D., 2010: Informe de evaluación del Cambio Climático en Colombia. Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional. Bogotá, Colombia.
17. Jones, R., M. Noguer, D. Hassell, D. Hudson, S. Wilson, G. Jenkins & J. Mitchell, (2004). "*Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*" Hadley Center for Climate Prediction and Research.
18. Custodio, E. & Llamas, M. (1983). "*Hidrología Subterránea*". Volumen II. Ediciones Omega.
19. Ruiz, F. (2010). "Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100)". IDEAM.
20. Herrera, I. (2019). "*Hidrogeología Aplicada*". Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos (CARA).

21. Monsalve, G. (1995). *“Hidrología en la Ingeniería”*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
22. Alfaro, C., Matiz, J., Rueda, J., Rodriguez, G., González, C., Beltrán, M., Rodriguez, G. & Malo, Jaison., (2017). *“Actualización del Modelo Conceptual del Área Geotérmica de Paipa”*. Servicio Geológico Colombiano – SGC.
23. Banco Interamericano de Desarrollo (2018). *“Proceso Regional de las Américas - Foro Mundial Del Agua 2018”*. Sector Agua.
24. Alcaldía Municipal de Paipa (2023), *“Turismo – Sitios de Interés”*. <https://www.paipa-boyaca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Sitios-de-Interes.aspx>.
25. Moreno, M., Castaño, S. & Jimenes, E., (2008). *“Diseño, ejecución y puesta a punto de procedimientos de laboratorio y métodos de campo para la caracterización del comportamiento hidráulico de la zona no saturada”*.

## 10 ANEXOS

Anexo A. Precipitación estaciones climatológicas y estimadas a periodos futuros.

Anexo B. Recarga potencial (Rp) año 1991.

Anexo C. Memorias de cálculo (Rp) unidades año 1991.

Anexo D. Recarga potencial (Rp) año 2021.

Anexo E. Memorias de cálculo (Rp) unidades año 2021.

Anexo F. Recarga potencial (Rp) año 2040.

Anexo G. Memorias de cálculo (Rp) unidades año 2040.

Anexo H. Recarga potencial (Rp) año 2070.

Anexo I. Memorias de cálculo (Rp) unidades año 2070.

Anexo J. Recarga potencial (Rp) año 2100.

Anexo K. Memorias de cálculo (Rp) unidades año 2100.

Anexo L. Resumen temperaturas proyecto