

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 Caldas

MS. Candidate, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia
Vladimir.caldas@mail.escuelaing.edu.co

Yuly Sánchez

Professor of Center for Environment Studies, Universidad Escuela Colombiana Julio Garavito
Bogotá, Colombia
yuly.sanchez@escuelaing.edu.co

German Santos

Professor and Director of Ms program Civil Engineering, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia
german.santos@escuelaing.edu.co

***Palabras clave:** cambio climático, hidrogeología, recarga potencial y recursos hídricos

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 en la temperatura (T) y la disminución de la precipitación (P) ocasionados por el aumento de gases de efecto invernadero, afecta notoriamente el ciclo del agua, disminuyendo la disponibilidad del recurso hídrico especialmente las fuentes superficiales.

Otra alternativa de aprovechamiento del recurso hídrico corresponde a las aguas subterráneas, que pueden ser aprovechadas en mayor medida para atender la demanda de la humanidad. En el Municipio de Paipa, Departamento de Boyacá – Colombia, existe una zona denominada Sistema Geotérmico de Paipa, la cual es de gran riqueza en aguas subterráneas termales que son aprovechadas para el turismo, recreación y salud.

Para estimar los posibles efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos, se elaboró un modelo hidrogeológico compuesto por 434 unidades homogéneas y se estimó la recarga potencial promedio actual con datos de precipitación y temperatura históricos (1991-2021). Igualmente, dicho modelo hidrogeológico del Sistema Geotérmico de Paipa fue utilizado para estimar la recarga potencial para periodos futuros (2011-2040), (2041-2070) y (2071-2100), de acuerdo con los datos de temperatura y precipitación para el departamento de Boyacá, propuestos por investigaciones realizadas previamente por el IDEAM en cabeza de Ruiz (2010).

Una vez obtenida la recarga potencial promedio para el periodo actual y la recarga potencial para periodos futuros, se realizó una evaluación mediante la cual 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 principalmente al aumento de la Evapotranspiración Real (ETR).

Para 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.

I. INTRODUCCIÓN

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.

El Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, ha conceptualizado que uno de los previsible 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, el presente artículo se basa principalmente sobre la investigación realizada para 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.

II. ÁREA DE ESTUDIO

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 1, se aprecia el modelo elaborado, 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.

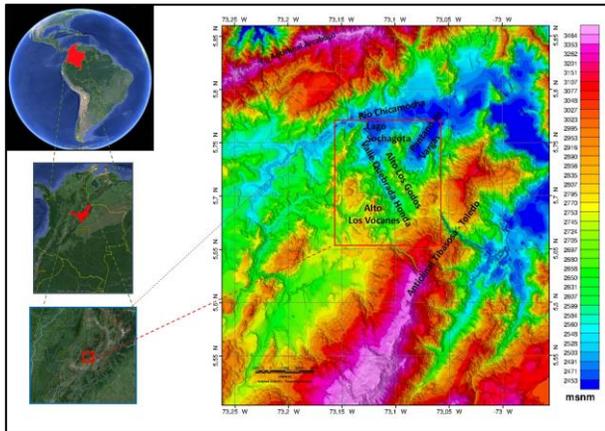


Figura 1. Sistema Geotérmico de Paipa.

III. MODELO HIDROGEOLÓGICO SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA

Con información primaria y secundaria recolectada para el sistema, se elaboró un modelo hidrogeológico, que tiene en cuenta características de topografía, morfología, relieve, suelos, geología, geomorfología, climatología, coberturas, etc., con el fin de disponer de una herramienta mediante la cual se estime los efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos en el Sistema Geotérmico de Paipa.

La Gobernación de Boyacá, ha generado insumos técnicos para facilitar la toma de decisiones acertadas en su territorio, entre los cuales está la geomorfología del Departamento, disponible en formato shape, la cual fue procesada mediante el software ARCGIS para extraer específicamente la geomorfología del sistema, presentada en la Figura 2.

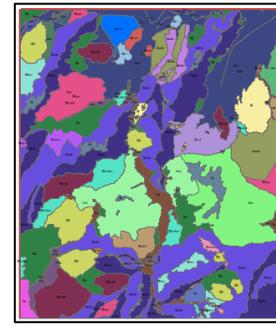


Figura 2. Geomorfología Sistema Geotérmico Paipa

Para el conocimiento del tipo de suelo se analizó la investigación realizada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC en el año 2005, mediante la cual se adelantó la caracterización de los suelos en el Departamento de Boyacá. 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 la información del sistema geotérmico con ayuda del software ARCGIS, evidenciando al menos nueve (9) tipos de suelos diferentes como se aprecia en la Figura 3.

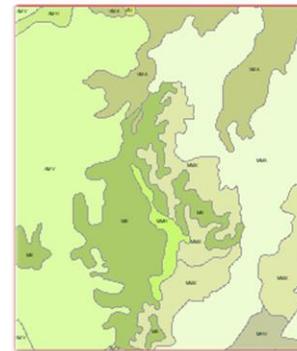


Figura 3. Suelos Sistema Geotérmico de Paipa

El IGAC, ha dispuesto para el público información técnica 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 contienen atributos que resultan de gran interés para la realización de la presente investigación.

De acuerdo con la información de IGAC, en el sistema geotérmico se encuentra veintitrés (23) tipos de coberturas de los suelos, distribuidos espacialmente como aparece en la Figura 4.



Figura 4. Mapa de Coberturas Sistema Geotérmico de Paipa

Con el fin de obtener unidades con características homogéneas, los layer de Geomorfología y Coberturas del Sistema Geotérmico de Paipa, fueron procesados mediante la herramienta 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 5. Se presenta el resultado obtenido.

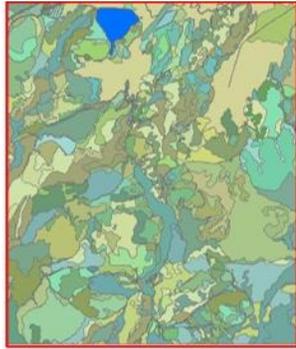


Figura 5. Unidades geomorfológicas más cobertura

Para la elaboración del modelo hidrogeológico del Sistema Geotérmico de Paipa, se realizó el modelo 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.

Es importante destacar que para la estimación de la recarga potencial se utilizó la metodología recomendada por Schosinsky (2006) y Herrera (2019).

IV. MODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA

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 las precipitaciones.

De acuerdo con las tendencias propuestas por Ruiz (2010), el Departamento de Boyacá experimentaría a futuro un aumento en la temperatura y una disminución en la precipitación, en las proporciones indicadas en la Tabla 1.

Departam ento	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

Tabla 1. Tendencias precipitación y temperatura Ruiz (2010)

V. ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PERIODOS (2011-2040), (2041-2070) Y (2071-2100).

De acuerdo con las tendencias establecidas por Ruiz (2010) para la zona de estudio, se proyectaron datos de temperatura y precipitación a los periodos de interés (2011-2040), (2041-2070) Y (2071-2100), con el fin de ser insertados al modelo hidrogeológico del Sistema Geotérmico de Paipa para finalmente estimar la recarga potencial.

VI. RESULTADOS

Con los datos históricos de las estaciones cercanas al proyecto del IDEAM, para el periodo comprendido entre el mes de marzo de 1991 a febrero de 1992, se obtuvo una recarga potencial (Rp) de aproximadamente 6.23×10^6 metros cúbicos, como se aprecia en la Figura 6.

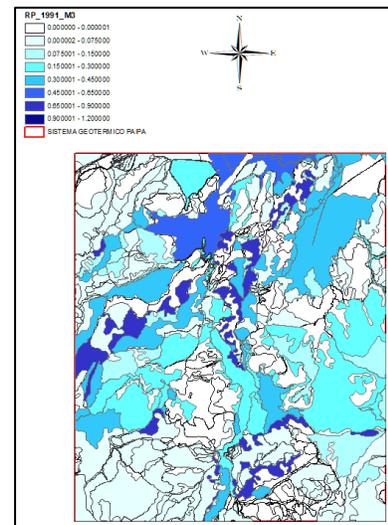


Figura 6. Recarga potencia año 1991

Igualmente, Con los datos históricos de las estaciones cercanas al proyecto del IDEAM, para el periodo comprendido entre el mes

de marzo de 2021 y febrero de 2022, se obtuvo una recarga potencia (Rp) de aproximadamente 9.50×10^6 metros cúbicos.

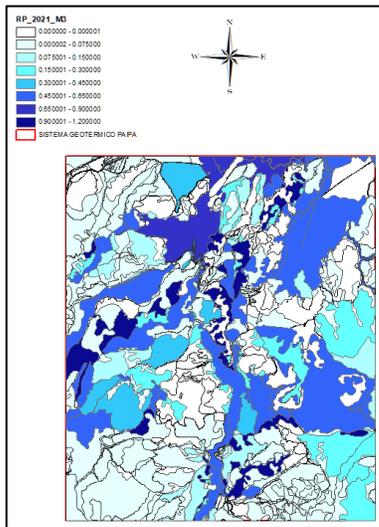


Figura 7. Recarga potencial 2021

Con los datos obtenidos anteriormente, se determinó una recarga potencial promedio para el periodo (1991-2021) de aproximadamente 7.87×10^6 metros cúbicos, ver Figura 8.

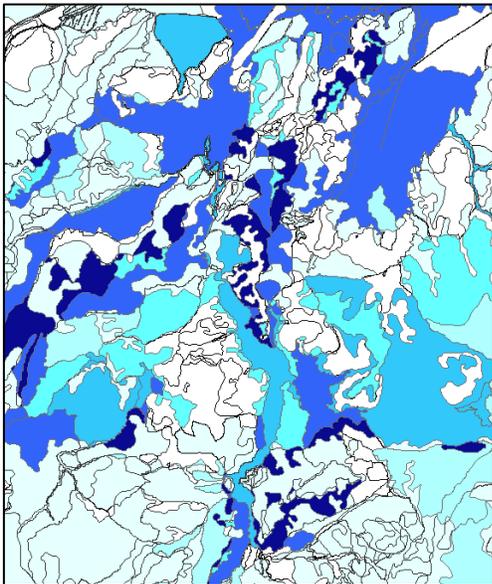


Figura 8. Recarga Potencial Promedio (1991 -2021)

Con los datos de temperatura y precipitación proyectados de acuerdo con las tendencias propuestas por Ruiz (2010), se estimó la recarga potencia futura para los periodos (2011-2040) obteniéndose una recarga potencial de $3,64 \times 10^6$ metros cúbicos, ver Figura 9 , (2041 – 2070) obteniéndose una recarga potencial de $3,42 \times 10^6$ metros cúbicos, ver Figura 10 y (2071-2100) obteniéndose una recarga potencial de Recarga Potencial $2,97 \times 10^6$ metros cúbicos en la Figura 11.

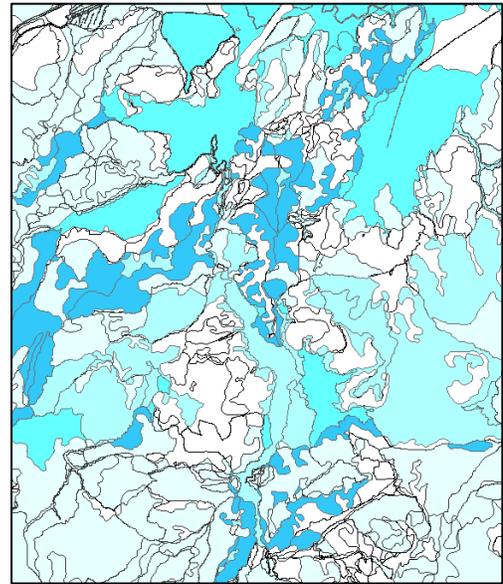


Figura 9. Recarga Potencial (2011-2040)

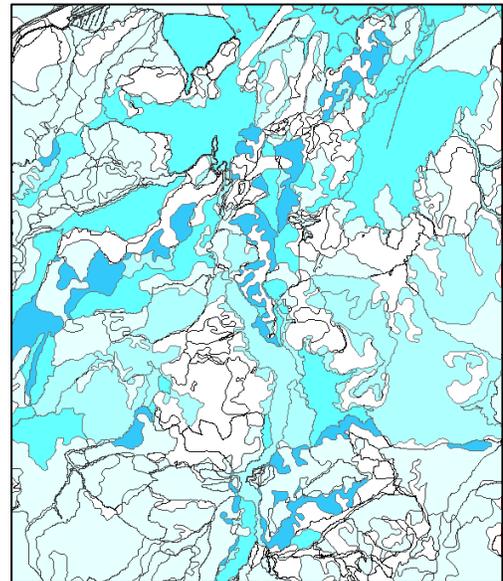


Figura 10. Recarga Potencial (2041-2070)

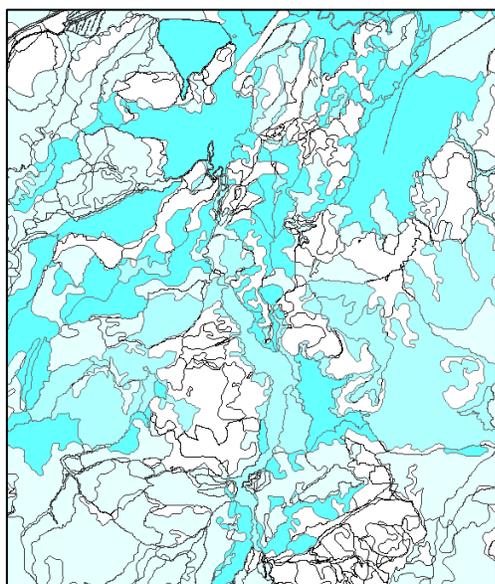
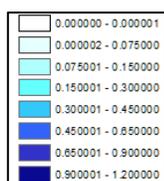


Figura 11. Recarga potencial (2071-2100)



VII. DISCUSIÓN

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:

Parámetro		Tprom(°C) Datos IDEAM	Tprom(°C) Multimodelo cambio climático Ruiz (2010)	Diferencia (°C)
Temperatura (°C) año 2021 - 2022	MAR	15.8	16.32	0.54
	ABR	15.5	16.08	0.56
	MAY	15	15.48	0.48
	JUN	14.7	15.68	0.99
	JUL	14.3	14.88	0.56
	AGO	13.8	14.68	0.84
	SEP	14.2	15.08	0.85
	OCT	15.5	15.38	-0.07
	NOV	15.6	16.48	0.91
	DIC	14.6	15.18	0.55

ENE	14.6	14.98	0.37
FEB	14.8	15.68	0.84

Tabla 2. Datos históricos temperatura y datos estimados de acuerdo con el trabajo de Ruiz (2010).

De la Tabla 2, 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.

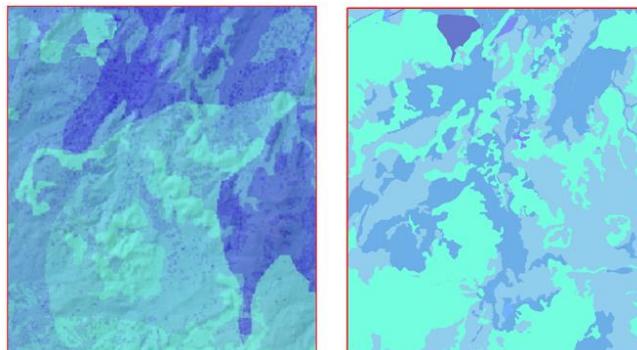
En la Tabla 23, se presenta la diferencia en milímetros entre los datos de precipitación tomados del registro histórico de las estaciones climatológicas cercanas al presente proyecto propiedad del IDEAM y los datos de precipitación estimados de acuerdo con las tendencias propuestas por Ruiz (2010) para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

	TUNGU.	SOTA.	IZA	SAN ANT.	CER.	SUR.
MAR	31.1	32.8	68.3	39.3	49.4	41.8
ABR	70.2	81.5	37.1	82.2	128.4	75.5
MAY	4.5	9.1	9.9	54.5	56.8	-29.5
JUN	109.2	-14.9	43.8	2.3	39.3	2.3
JUL	-35	-25.3	-28.2	-12.4	-47.6	-39.7
AGO	47.1	128.7	14.1	86.8	26.4	52.2
SEP	-72.2	-117.8	-54.1	-50.9	-66.3	-61.7
OCT	23.9	42	-24.4	26.8	57.3	0.9
NOV	36.7	31.8	13.1	59.6	116.1	21.5
DIC	32.2	45.6	-2.1	17	8.1	36.1
ENE	3.8	7.7	-5.6	-2.1	-2.2	-3.7
FEB	69.5	117.8	88.5	67.1	94.3	63.4

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).

Como se observó anteriormente, 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.

De otra parte, 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). Ver Figura 12.



En la Figura 12, 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).

VIII. CONCLUSIONES

- ✓ 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).
- ✓ 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.

IX. REFERENCIAS

1. Intergovernmental Panel on Climatic Change IPPC (2018). Glosario. p.75. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/S_R15_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-sucedan-las-malas-noticias-para-el-planeta-los-niveles-de-gases>.
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_tec

nico-
Cartografía geológica 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.

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.

18. Jones, R., M. Noguier, 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.

19. Custodio, E. & Llamas, M. (1983). “*Hidrología Subterránea*”. Volumen II. Ediciones Omega.

20. Ruiz, F. (2010). “Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100)”. IDEAM.

21. Herrera, I. (2019). “*Hidrogeología Aplicada*”. Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos (CARA).

22. Monsalve, G. (1995). “*Hidrología en la Ingeniería*”. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

23. Alfaro, C., Matiz, J., Rueda, J., Rodríguez, G., González, C., Beltrán, M., Rodríguez, G. & Malo, Jaison., (2017). “*Actualización del Modelo Conceptual del Área Geotérmica de Paipa*”. Servicio Geológico Colombiano – SGC.

24. Banco Interamericano de Desarrollo (2018). “*Proceso Regional de las Américas - Foro Mundial Del Agua 2018*”. Sector Agua.

25. Alcaldía Municipal de Paipa (2023), “*Turismo – Sitios de Interés*”. <https://www.paipa-boyaca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Sitios-de-Interes.aspx>.

26. 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*”.