

UCUENCA

**Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental**

Evaluación de los efectos de la disponibilidad del agua en la generación de energía hidroeléctrica bajo escenarios de cambio climático. Caso de estudio en el complejo hidroeléctrico Paute

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero Ambiental

Autores:

Paula Camila Guzmán Ordóñez

CI: 0104777677

Correo electrónico: paula_camila2@hotmail.es

Jonnathan Mateo Feijoo Barzallo

CI: 0104017181

Correo electrónico: mateofbar08@gmail.com

Director:

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco PhD.

CI: 0102247186

Tutor:

Ing. Dario Xavier Zhiña Villa MSc.

CI: 0105044481

Cuenca – Ecuador

21-Noviembre-2022

Resumen

El cambio climático actualmente es un problema que cada vez se vuelve más notorio, este fenómeno es el responsable de los eventos extremos de los últimos años (inundaciones y sequías), provocando impactos severos en sectores urbanos, agrícolas, hidroenergéticos, entre otros. En este sentido, la modelación hidrometeorológica y el uso de escenarios climáticos se han convertido en una de las mejores alternativas para realizar proyecciones con respecto al comportamiento de estas variables (caudal, precipitación, temperatura, entre otros). El sector hidroeléctrico es particularmente afectado por estos extremos climáticos perjudicando a la principal fuente de energía renovable del Ecuador. La producción de energía hidroeléctrica en el país es de alrededor del 90% de la energía total del Ecuador, por lo que una alteración en los caudales que alimentan las centrales de generación afectaría esta producción y por lo tanto a todas las actividades productivas. El presente estudio utilizó escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5) para el análisis del comportamiento del caudal del río Paute en el periodo 2011-2050 en la estación Paute AJ Dudas, la cual es la más cercana al embalse de Mazar perteneciente al complejo Hidroeléctrico Paute Integral. Para este análisis se modeló el caudal de la estación Paute AJ Dudas mediante el uso de modelos de regresión múltiple. Los resultados muestran que en el futuro el caudal aumentará en los próximos años, sin embargo, estas diferencias no son tan notorias hasta el periodo 2050, periodo en el cual la diferencia entre ambos escenarios no son significativas. Se estima que en los próximos años exista una alteración en el caudal que podría perjudicar la producción hidroenergética, con la consecuente afectación de la población y la economía del país. Además, se encontró que la evapotranspiración no resultó ser un óptimo controlador para el pronóstico de caudal en la zona de estudio. Este estudio serviría como base para la gestión de operaciones en el embalse de Mazar.

Palabras clave: Cambio climático. Caudales. Generación de Hidroenergía. Regresión lineal. Escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Abstract

Climate change is currently a problem that is becoming more and more noticeable, this phenomenon is responsible for the extreme events of recent years (floods and droughts), causing severe impacts on urban, agricultural, hydropower sectors, among others. In this sense, hydrometeorological modeling and the use of climate scenarios have become one of the best alternatives to make projections regarding the behavior of these variables (flow, precipitation, temperature, among others). The hydroelectric sector is particularly affected by these climatic extremes, harming Ecuador's main source of renewable energy. The production of hydroelectric energy in the country is around 90% of the total energy in Ecuador, so an alteration in the flows that feed the generation plants would affect this production and therefore all productive activities. The present study used climate change scenarios (RCP 4.5 and 8.5) to analyze the behavior of the Paute river flow in the period 2011-2050 at the Paute AJ Dudas station, which is the closest to the Mazar reservoir belonging to the complex. Hydroelectric Paute Integral. For this analysis, the flow of the Paute AJ Dudas station was modeled using multiple regression models. The results show that in the future the flow will increase in the coming years, however these differences are not as noticeable until the 2050 period, a period in which the difference between both scenarios is not significant. It is estimated that in the coming years there will be an alteration in the flow that could harm hydroelectric production, with the consequent affectation of the population and the economy of the country. In addition, it was found that evapotranspiration did not turn out to be an optimal controller for the flow forecast in the study area. This study would serve as the basis for the management of operations in the Mazar reservoir.

Keywords: Climate scenarios. Precipitation. Temperature. Flow. Linear regression.

INDICE

CAPÍTULO I.....	13
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Objetivos	23
1.2.1 Objetivo General	23
1.2.2 Objetivos Específicos.....	23
CAPÍTULO II	24
2 MARCO TEÓRICO	24
2.1 Cambio Climático.....	24
2.2 Modelación.....	24
2.2.1 Etapas de la modelación.....	25
2.3 Modelos de regresión.....	26
2.3.1 Relleno de Datos	26
2.3.2 Modelos de regresión lineal simple.....	27
2.3.3 Modelos de regresión lineal múltiple.....	27
2.4 Modelos Climáticos Globales.....	28
2.5 Escenarios de Cambio climático	28
2.6 Forzamiento radiativo.....	29
2.7 Escenarios RCP	30
2.8 Multimodelo Ensamble	30
2.9 Downscaling	30
2.10 Multicolinealidad.....	31
2.11 Factor de Inflación de Varianza (VIF).....	32
CAPITULO III.....	33
3 MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 Descripción del área de estudio	33
3.2 Recolección de datos.....	36
3.2.1 Información Pluviométrica e Hidrológica.....	37
3.2.2 Información de Temperatura	48
3.3 Datos Futuros.....	53
3.4 Modelación de caudal actual.....	54
3.4.1 Factor de Inflación de Varianza	54
3.4.2 Calibración y Validación.....	55
3.5 Modelación de caudal futuro	56
CAPÍTULO IV	57

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1 Validación del Relleno de Datos	57
4.2 Modelación Actual.....	59
4.2.1 Modelación de caudal actual con datos de caudal	60
4.3 Modelación de caudal actual con datos de precipitación	64
4.4 Modelación de caudal actual con datos de evapotranspiración.....	71
4.5 Modelación de caudal actual con datos de caudal, precipitación y evapotranspiración.....	77
4.6 Modelación de caudal futuro	83
CAPÍTULO V.....	95
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
REFERENCIAS.....	98
ANEXOS.....	105

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Centrales Hidroeléctricas Mazar, Molino y Sopladora	16
Figura 2. Subcuencas de la cuenca del río Paute	33
Figura 3. Altitud de la cuenca del río Paute	34
Figura 4. Zona alta, media y baja de la cuenca del río Paute.....	36
Figura 5. Estaciones de precipitación ubicadas dentro de la cuenca del río Paute.....	39
Figura 6. Estaciones caudal ubicadas dentro de la cuenca del río Paute	42
Figura 7. Interpolación de Temperatura Enero - Junio para la cuenca del río Paute	51
Figura 8. Interpolación de Temperatura Julio Diciembre para la cuenca del río Paute	51
Figura 9. Estaciones seleccionadas de Caudal	60
Figura 10. Serie de Tiempo Caudal - Calibración (80%)	62
Figura 11. Serie de Tiempo - Validación (20%).....	63
Figura 12. Dispersión 80% Caudal.....	63
Figura 13. Dispersión 20% Caudal.....	63
Figura 14. Estaciones seleccionadas para el modelo de caudal con datos de precipitación.....	68
Figura 15. Serie de tiempo de caudal utilizando datos de precipitación Calibración (80%)	69
Figura 16. Serie de tiempo de caudal utilizando datos de precipitación Validación (20%)	70
Figura 17. Gráfico de dispersión para el periodo de calibración.....	71
Figura 18. Gráfico de dispersión para el periodo de validación	71
Figura 19. Estaciones seleccionadas para el modelo de caudal con datos de evapotranspiración	74
Figura 21 Serie de tiempo de caudal utilizando datos de evapotranspiración Validación (20%).....	76
Figura 22. Gráfico de dispersión para el periodo de calibración.....	76
Figura 23. Gráfico de dispersión para el periodo de validación	76
Figura 24. Estaciones seleccionadas para el modelo actual	80
Figura 25. Serie de tiempo utilizando el modelo actual 80%	81
Figura 26. Serie de tiempo utilizando el modelo actual 20%	82
Figura 27. Gráfica de dispersión para el periodo de calibración.....	82
Figura 28. Gráfica de dispersión para el periodo de validación	82
Figura 29. Estaciones seleccionadas para el modelo futuro.....	85
Figura 30. Serie de Tiempo Modelo Futuro 80%	86
Figura 31. Serie de Tiempo Modelo Futuro 20%	87

Figura 32. Gráfica de dispersión del periodo de Calibración	88
Figura 33. Gráfica de dispersión del periodo de Validación	88
Figura 35. Análisis estacional de caudal para el escenario RCP 4.5	90
Figura 36. Análisis estacional de caudal para el escenario 8.5	91
Figura 37. Boxplot - Periodo Base vs RCP 4.5 y RCP 8.5.....	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Modelos Hidrológicos.....	17
Tabla 2. Métodos de Relleno de Datos	26
Tabla 3. Escenarios Climáticos - Líneas evolutivas. Fuente: (Magaña et al., 2009)	29
Tabla 4. Interpretación de los valores del VIF	32
Tabla 5. Caracterización de las diferentes zonas de la cuenca del río Paute. Fuente: Vicuña (2009)	35
Tabla 6. Número de vacíos de las estaciones de precipitación separadas por regímenes	40
Tabla 7. Número de vacíos de las Estaciones de Caudal	42
Tabla 8. Estaciones Precipitación con un 5% más de vacíos.....	44
Tabla 9. Estaciones de caudal con un 5% más de vacíos	45
Tabla 10. Características del Sistema NASA-POWER.....	49
Tabla 11. Evaluación del relleno de datos de Caudal.....	57
Tabla 12. Métricas Precipitación Régimen BM1	58
Tabla 13. Métricas Precipitación Régimen BM2	58
Tabla 14. Métricas Precipitación Régimen UM2	59
Tabla 15. Modelos estaciones Caudal	61
Tabla 16. VIF de los modelos de Caudal	61
Tabla 17. Resultados del Modelo de Caudal	62
Tabla 18. Modelos Precipitación Primer Método	64
Tabla 19. Modelo Precipitación Segundo Método	65
Tabla 20. Modelos Precipitación Tercer Modelo.....	66
Tabla 21. Mejores modelos de precipitación de cada método.....	66
Tabla 22. VIF de los modelos finales de Precipitación.....	67
Tabla 23. Resultados del Modelo de Precipitación	68
Tabla 24. Modelos Caudal vs Evapotranspiración.....	72
Tabla 25. Factor de Inflación de Varianza Modelos Evapotranspiración.....	73
Tabla 26. Resultados del Modelo de Caudal vs Evapotranspiración.....	74
Tabla 27. Estaciones pre-seleccionadas	78
Tabla 28. Modelos Finales de caudal.....	78
Tabla 29. Resultados Modelo Final.....	80
Tabla 30. Modelos Futuros.....	83
Tabla 31. Resultado Modelo Futuro	85

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Paula Camila Guzmán Ordóñez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de los efectos de la disponibilidad del agua en la generación de energía hidroeléctrica bajo escenarios de cambio climático. Caso de estudio en el complejo hidroeléctrico Paute", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de noviembre del 2022



Paula Camila Guzmán Ordóñez

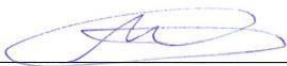
C.I: 0104777677

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jonnathan Mateo Feijoo Barzallo en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de los efectos de la disponibilidad del agua en la generación de energía hidroeléctrica bajo escenarios de cambio climático. Caso de estudio en el complejo hidroeléctrico Paute", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de noviembre de 2022



Jonnathan Mateo Feijoo Barzallo

C.I: 0104017181

Cláusula de Propiedad Intelectual

Paula Camila Guzmán Ordóñez, autor/a del trabajo de titulación “Evaluación de los efectos de la disponibilidad del agua en la generación de energía hidroeléctrica bajo escenarios de cambio climático. Caso de estudio en el complejo hidroeléctrico Paute”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de noviembre de 2022



Paula Camila Guzmán Ordóñez

C.I: 0104777677

Cláusula de Propiedad Intelectual

Jonnathan Mateo Feijoo Barzallo, autor/a del trabajo de titulación “Evaluación de los efectos de la disponibilidad del agua en la generación de energía hidroeléctrica bajo escenarios de cambio climático. Caso de estudio en el complejo hidroeléctrico Paute”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de noviembre de 2022



Jonnathan Mateo Feijoo Barzallo

C.I: 0104017181

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

El recurso agua es uno de los elementos predominantes del planeta representando así un área de 31 millones de km². El 89% de la superficie en el hemisferio sur es ocupado por dicho recurso y un 53% en el hemisferio norte (Gu, 2019). Sin embargo, de estas cifras únicamente el 2.5% del agua es considerada agua dulce, de la cual el 70% se encuentra congelado, el 30% es otorgado a los acuíferos y únicamente el 1% es el agua disponible para los ecosistemas y consumo humano, la cual a su vez ha servido también como recurso principal para la generación de energía (Apolo, 2021).

El consumo de combustibles fósiles como fuente de energía ha venido aumentando desde el año 1850 hasta la actualidad, convirtiéndose en la principal fuente de energía a nivel mundial, lo que ha causado un incremento de gases de efecto invernadero, causando graves daños climáticos. En una escala global, el 80% de fuentes energéticas utilizan el petróleo y sus derivados; en América Latina el 74% de la energía es obtenida a base del petróleo, estos valores se han triplicado en lo que va del siglo, esto a causa del desarrollo que se presenta en varios países los cuales dependen principalmente de esta clase de recurso no renovable (Vicente, 2021). Dadas estas condiciones, se ha considerado buscar alternativas para la producción de energía a base de energías renovables, por lo que la energía hidroeléctrica es considerada una de las mejores opciones en varios países alrededor del mundo, principalmente porque este tipo de energía es amigable con el medio ambiente y genera un menor impacto que las fuentes no renovables.

La hidro-energía constituye el 97% de toda la energía producida por energías renovables y es una excelente opción para países en desarrollo. Además, se considera que este sistema de energía renovable es mucho más económico y rentable que plantas térmicas o nucleares que además de ser sistemas ampliamente costosos, muchos de sus procesos generan altos niveles de contaminación (Manzano-Agugliaro et al., 2017).

La economía del Ecuador ha dependido principalmente de la extracción y exportación de petróleo, estas actividades fueron las encargadas de mejorar la economía del país, sin

UCUENCA

embargo, estas traen consigo una serie de impactos ambientales que no son remediabiles afectando directamente a los ecosistemas. Con los años, la demanda de energía en Ecuador ha venido aumentando, debido principalmente por el incremento poblacional, la

mayor demanda de energía proviene de los sectores de transporte, industria y residencial. Desde los años 70 el petróleo ha venido dominando la oferta de energía primaria, por lo que en los últimos años se ha considerado la implementación de fuentes de energía que sean renovables y que tengan un menor impacto ambiental como la hidroenergía, eólica o solar. por lo que se ha visto que la implementación de estas energías secundarias ha tenido mayor presencia en la última década (Vicente, 2021).

La energía hidroeléctrica en el Ecuador representa más del 90% de toda la energía producida en todo el país, la misma que aporta al Sistema Nacional Interconectado, volviéndose así una energía indispensable para la población ecuatoriana y para su desarrollo industrial y económico. Es por esto la importancia de la gestión y manejo de los recursos hídricos para poder garantizar la disponibilidad del agua y asegurar una producción de energía segura y permanente (CELEC, 2021).

Hasta el año 2018 en el país existían 317 centrales de generación eléctrica, de este total solo 133 de ellas están conectadas al Sistema Nacional Interconectado (SNI) mientras que las 184 son las encargadas de brindar energía a zonas de difícil acceso, estas centrales están divididas en energías renovables y no renovables. Las centrales que predominan son las hidroeléctricas y térmicas las cuales están distribuidas a lo largo de todo el territorio por su potencia efectiva (Vicente, 2021), como se observa en la Imagen 1.

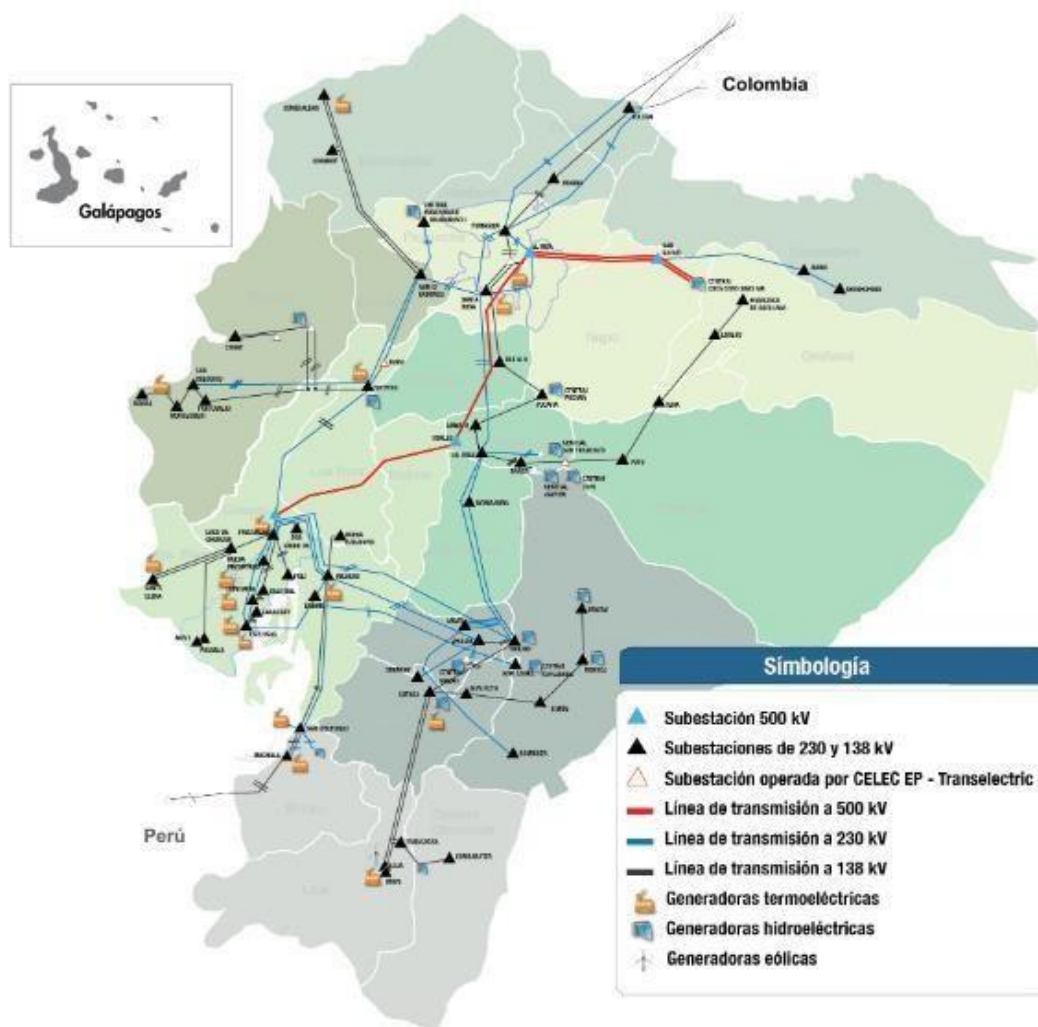


Imagen 1. Sistema de Transmisión de Energía en el Ecuador. Fuente: CELEC EP (2022)

Según el Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables en el año 2021 la producción de energía renovable ha crecido un 87.6% durante el periodo 2011-2021, principalmente por el amplio crecimiento de la generación de energía hidroeléctrica. Las hidroeléctricas durante el año 2021 fueron las que tuvieron mayor participación con un 58.5%, seguida de la energía térmica la cual participo con un 39.2%, mientras que el 2.3% restante corresponde a otras energías renovables como la energía eólica, biogás, solar y biomasa.(Ministerio de Energía, 2021). En este sentido, la energía hidroeléctrica es considerada relevante para el desarrollo del país. El complejo hidroeléctrico de Paute ubicado al sur del país es uno de los más importantes con respecto a la producción energética ya que aporta con el 35% de la energía total al SNI. Dentro de este complejo existen tres centrales hidroeléctricas que son Mazar, Molino y Sopladora, las cuales

generan 170 MW, 1100 MW y 487 MW respectivamente, las cuales se pueden observar en la Figura 1 (Zalamea, 2021).

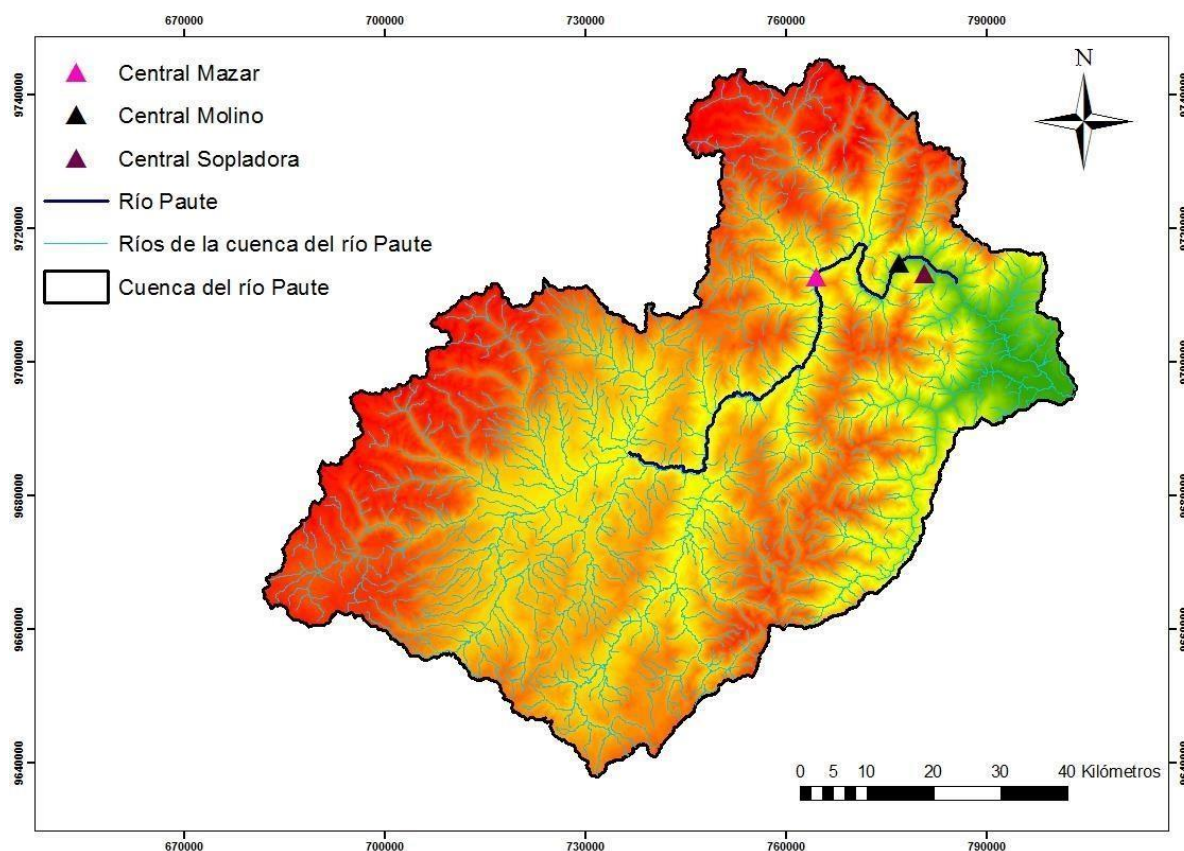


Figura 1. Centrales Hidroeléctricas Mazar, Molino y Sopladora. Fuente: Elaboración propia.

En el país la energía hidroeléctrica es principalmente la más utilizada para satisfacer las necesidades de todo el territorio (alumbrado público, servicios públicos, residencias, etc.), las cuales con el tiempo se han incrementado. Según análisis realizados por parte del Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, el consumo per cápita de energía entre el año 2011 y 2021 se incrementó un 30.9%, aumentando sus valores de 1.18 kWh a 1.53 kWh por habitante, este consumo disminuyó en el año 2020 debido a los efectos de la pandemia de COVID-19, con valores de 1.47 kWh por habitante, sin embargo, este valor aumentó nuevamente a 1.54 kWh por habitante para el año 2021 (Ministerio de Energía, 2021). El aumento en el consumo de energía se ve directamente relacionado con el crecimiento poblacional. Se conoce que entre el año 2011 al año 2021 la población del país aumentó de 15.3 millones de habitantes a 17.8 millones.

aproximadamente. Si sigue esta tendencia, se estima que en el año 2050 la población estará alrededor de los 23 millones de personas. La velocidad en el crecimiento poblacional es resaltante, y como consecuencia incrementaría la demanda interna de energía del país. Esto conllevaría a un incremento en el consumo de recursos en el país, que podría ser no sostenible. En este sentido, los análisis de la disponibilidad de agua en el futuro son importantes, donde la modelación hidroclimática se muestra como una de las alternativas para aumentar el conocimiento para la toma sustentada de decisiones (Del Cioppo Morstadt, 2019).

La modelación hidroclimática es una herramienta utilizada para mejorar el conocimiento de la afectación de variables climáticas en el ciclo hidrológico, especialmente en el comportamiento de los caudales de los ríos. Esta tiene varias aplicaciones en la gestión de recursos hídricos, sequías, inundaciones y estudios relacionados al cambio climático (Madsen et al., 2020). Los modelos hidrológicos se clasifican en tres grupos principalmente, de acuerdo a la conceptualización de procesos básicos, la naturaleza de los algoritmos y dependiendo de su representación espacial, cada uno de estos se subdivide en diferentes modelos (Cabrera, 2012), los cuales se explica en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de Modelos Hidrológicos.

Conceptualización de procesos básicos	M. Empírico	Estos son modelos que se basan en relaciones de entrada-salida, sin definir comportamientos individuales.
	M. Físicos o Teóricos	Estos modelos se basan en ecuaciones físicas involucrando todos los procesos del fenómeno a simular.
	M. Conceptuales	Consideran leyes físicas, y se conocen algunos de los procesos internos del modelo.
Naturaleza de los algoritmos	M. Estocásticos	Estos modelos expresan su comportamiento mediante ecuaciones, si existe alguna variable aleatoria el modelo se considera estocástico.

Representación Espacial	M. Determinísticos	De igual forma se manejan los modelos determinísticos, con la diferencia en que en este caso las variables no son aleatorias.
	M. Agrupados	Utilizados para cuencas pequeñas, con características homogéneas.
	M. Distribuidos	Utilizados para cuencas de mayor tamaño con características heterogéneas.

La modelación hidrológica es una herramienta que se ha usado a escala global para diferentes aplicaciones, como por ejemplo reconstruir series de datos de variables hidrometeorológicas. En muchas de las veces los datos hidrológicos utilizados en investigaciones y diferentes proyectos no están completos y se necesita rellenar los vacíos en las series de información. Es donde la modelación se hace relevante para obtener los datos faltantes y tener series completas de información. Otros casos en los que se aplica el modelamiento es para conocer la oferta hídrica de una zona en específico, conocer el comportamiento de las variables hidrológicas, posibles alteraciones del ciclo hidrológico, evaluar posibles amenazas de origen climatológico, entre otros (Vargas & Giraldo, 2018).

Existen varios estudios dirigidos a la modelación hidrológica alrededor del mundo aplicando diferentes métodos. Un estudio realizado de manera global por Hadi H. Jaafar (2019) aplicó el método de número de curvas, el cual está diseñado específicamente para la modelación de lluvia y escorrentía. Este estudio realizó un análisis hidrológico geoespacial con una resolución espacial de 250m a partir de la cobertura terrestre. Los resultados mostraron que el potencial de escorrentía media y alta oscila entre los 75 – 85 a nivel global, los números de curva globales fueron de 62,78 y 90 para condiciones secas, promedio y húmedas. La conclusión del estudio presenta a Australia como la zona con mayor potencial de escorrentía, mientras que Europa será considerada la región con menor valor. Además, el estudio mostró que el método utilizado de Número de Curvas Globales 250 (GCN por sus siglas en inglés) es considerado el mejor en comparación con otros estudios en los que se utilizan bases de datos ya existentes.

Por otro lado, el estudio de Wanders et al., (2019), desarrollado en toda Europa con el fin de realizar pronósticos hidrológicos estacionales mediante el método de un Sistema Pan-europeo Multimodelo de Predicción Hidrológica Estacional con datos de precipitación y temperatura. En este estudio se menciona la importancia de los pronósticos hidrológicos, los cuales no son de fácil acceso, por lo que el método a aplicar busca brindar un conjunto de pronósticos hidrológicos estacionales por medio de cuatro modelos de circulación combinados con cuatro modelos hidrológicos. Las predicciones se proporcionan en una escala diaria, con seis meses de anticipación a una resolución espacial de 5km durante el periodo historio de 1993-2012. Como resultado el modelo asegura un mejor pronóstico de datos hidrológicos, estos análisis se los pudo realizar en una resolución diaria y con tres meses de anticipación con una predicción máxima de seis meses, este modelo apoyó al proyecto de Europa con respecto a la buena gestión del agua, demostrando las ventajas que tiene la aplicación de modelos múltiples para la modelación hidrológica.

En Chile, donde se ha venido experimentando un periodo de sequía desde el año 2010, causando graves alteraciones en la precipitación normal de la zona y una disminución en los caudales, se desarrolló un estudio por parte de Castillo (2022). Estos autores utilizaron la herramienta WEAP (*Water Evaluation and Planning*) para evaluar el comportamiento de los caudales a través de un modelo futuro operacional en el río Itata ubicado en el centro sur de Chile. Esta herramienta es un modelo basado en procesos físicos, cuya característica principal es que incluyen procesos hidrológicos de manera más explícita. Los datos considerados para el modelo fueron topográficos, de clima, precipitación, uso de suelo y geología, para poder evaluar cuáles serían las ventajas y desventajas entre los datos simulados y observados. Finalmente se llegó a la conclusión de que la modelación realizada con la herramienta WEAP no fue del todo significativa debido a la falta de información, por lo que se recomendó mantener un estudio enfocado en el agua superficial y subterránea de la zona e identificar las actividades externas que afectan al caudal del río.

En las zonas montañosas la modelación hídrica es considerada más compleja a comparación de otras cuencas a raíz de que se cuenta con una menor cantidad de datos, una climatología variada, su geología heterogénea y topografía irregular, lo cual influye la severa variabilidad de la precipitación (Castillo, 2022). En un estudio realizado en las zonas montañosas de Cuba se aplicó el Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (HEC-

HMS, por sus siglas en inglés), el cual es un modelo ampliamente utilizado para simular procesos hidrológicos. En este caso, basándose en el método de precipitación escurriénta utilizó 4 componentes: el modelo de la cuenca, el modelo meteorológico, especificaciones de uso y sus datos de entrada. El estudio llegó a la conclusión de que los parámetros utilizados en el estudio facilitaron la simulación de datos en zonas montañosas en caso de que estos no cuenten con la información necesaria (Estrada, 2012).

En Colombia un estudio realizado por Valencia & Zambrano, (2018) se realizó un estudio similar con el mismo método HEC-HMS, en una cuenca pequeña dentro de la zona montañosa de la ciudad de Manizales. El objetivo del estudio fue analizar el comportamiento hidrológico en cuencas urbanas y como la urbanización afecta el comportamiento de la cuenca. Las alteraciones en los caudales se dan principalmente por un cambio permanente en el uso del suelo, provocando que la impermeabilización del suelo cause un aumento en la escurriénta lo que aumenta el riesgo de inundaciones. Como conclusión se obtuvo que la respuesta hidrológica ante estos casos es más rápida en zonas urbanas, mientras que las zonas no intervenidas responden con menor velocidad, lo que indicó que lo más importante en este análisis es el uso de suelo.

Ecuador es considerado un país con una amplia riqueza hídrica, en donde existen principalmente dos estaciones ampliamente notables, la estación de lluvia y la estación seca, las cuales se verán alteradas a causa del cambio climático en un futuro, ya sea por un aumento en el nivel de precipitación que cause una época de lluvias mucho más severa o a su vez que las épocas secas se extiendan. Este comportamiento de las variables meteorológicas desencadenaría una serie de eventos naturales como deslizamientos o erosión del suelo, crecidas, inundaciones, entre otros, afectando directamente a la población y a su economía (León Baque et al., 2021). Se conoce, que en épocas de lluvia la disponibilidad de agua rodea los 4 320 000 hm³ mientras que en épocas secas la disponibilidad de agua se encuentra cerca de los 146 000 hm³ (Agencia de Regulación y control del agua, 2018). En términos de volumen, es importante tomar en cuenta la estacionalidad y los cambios drásticos en el comportamiento de las variables hidrometeorológicas en cada estación. Donde se hace necesario un almacenamiento responsable del recurso en épocas de invierno, para que en periodos de escases se logre abastecer las demandas productivas y a la población.

Ecuador como el resto de países en el mundo se ha visto afectado por los estragos del cambio climático (CC) sobre los recursos hídricos. Además, existe mucha incertidumbre del comportamiento de la disponibilidad de agua en el futuro y las potenciales medidas que se pueden adoptar para afrontar los impactos del CC. Por otro lado, el cambio en el uso del suelo también afecta directamente al ciclo hidrológico. La alteración en el uso del suelo afecta a los ecosistemas y como consecuencia de estos efectos la disponibilidad de agua también es perjudicada (Pozo, 2018). La vegetación es parte fundamental del suelo, cuando está es removida se reduce su capacidad de infiltración y cambia el comportamiento de la escorrentía superficial, erosionando el suelo y a consecuencia de esto los sedimentos provocados por esta erosión afectarán a las propiedades normales del agua (Del Valle, 2014).

En el país existe una gran cantidad de diferentes ecosistemas, cada uno cumpliendo un rol específico para la naturaleza, sin embargo, los páramos son considerados de los más importantes ya que ocupan un 7% dentro del territorio ecuatoriano, los cuales se encuentran a una altura promedio de 3300 m.s.n.m. A causa de su baja evapotranspiración, humedad alta, entre otros, los páramos sirven como fuentes directos de agua los cuales proveen a las grandes ciudades, además de servir como un gran sumidero de gases de efecto invernadero, especialmente la disminución de carbono en el aire (Chuncho, 2019).

En Ecuador el estudio realizado por Carvajal et al., (2017) analiza la disponibilidad de recursos hídricos para la generación de energía hidroeléctrica mediante el uso de modelos climáticos globales del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados en su fase 5 (CMIP5). El estudio se realizó en seis ríos por los cuales atravesaban un total de 10 centrales hidroeléctricas, concluyendo que la disponibilidad de energía en Ecuador en un futuro es incierta y que el cambio climático afectaría directamente a su producción, concluyendo también que en un futuro el país afrontaría estaciones húmedas y secas mucho más intensas.

Por otra parte, un estudio realizado por Sucozhañay & Célleri (2018), ubicado en una cuenca de páramo al sur de los Andes Ecuatorianos analizó la variabilidad espacio-temporal de la precipitación y caudal en zonas montañosas. En este estudio se utilizó el modelo de HBV-light, el cual es un modelo conceptual de lluvia escorrentía. Este modelo se aplicó bajo seis escenarios de lluvia en escala diaria, cuya principal característica era

la cantidad de pluviómetros utilizados; el primer modelo incluía 11 pluviómetros, el resto de modelos incluían entre tres y cuatro. Los resultados mostraron que entre más pluviómetros se incluían mejor era la estimación del caudal. Finalmente, los autores concluyeron que la incertidumbre de datos en regiones de montaña está ligada a la precipitación espacial y la ubicación y número de pluviómetros.

Los páramos se encuentran afectados por impactos ambientales como el cambio climático y también por actividades antropogénicas, los cuales cambian las características naturales de la zona, teniendo como consecuencia la alteración de los servicios ambientales, especialmente los servicios hidrológicos (caudales de los ríos y la disponibilidad del agua para los diferentes usos) (Chuncho, 2019). A pesar de la importancia de recursos hídricos para la generación de energía y otros usos (Pozo, 2018), se han realizado pocos estudios al respecto. Por esta razón el presente estudio pretende analizar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua futura en el río Paute para la producción de energía hidroeléctrica.

1.1 Objetivos

1.2.1 Objetivo General:

Evaluar los efectos de la disponibilidad de agua en la generación de energía hidroeléctrica en el complejo hidroeléctrico de Paute, bajo escenarios de cambio climático.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Analizar y evaluar las proyecciones de caudal de la cuenca del río Paute entre los años 2015-2050.
- Aplicar un modelo estadístico para evaluar el caudal del río Paute antes del embalse de Mazar.
- Evaluar las proyecciones futuras de disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica en las distintas salidas de la modelación climática regional y escenarios de cambio climático.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Cambio Climático

El cambio climático está definido como un cambio de clima causado directa o indirectamente por actividad humana, afectando las condiciones normales de la atmósfera mundial (Naciones Unidas, 2013). Se sabe que en los últimos dos siglos la temperatura del planeta ha aumentado muy rápidamente, esto debido principalmente al fuerte aumento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), por lo que se tiene como objetivo estabilizar la emisión de gases alrededor del mundo de forma que los ecosistemas se adapten naturalmente a los cambios del mismo (Castillo & Montero, 2017). Los efectos del cambio climático han sido cada vez más notorios con el pasar de los años. La temperatura es una de las variables dentro de este contexto que se ha visto muy afectada, se sabe que hasta el año 2017 la temperatura de la Tierra aumentó 1°C. Dadas estas condiciones se considera que en los próximos años la temperatura siga en aumento y sobrepase los 2°C lo que afectará directamente a la vida en la Tierra, causando eventos extremos cada vez más comunes, además de que estos cambios se han dado rápidamente que los ecosistemas están perdiendo su capacidad de adaptación (Dietz et al., 2020).

Los Andes ecuatorianos cuentan con una estacionalidad bimodal, la cual presenta dos estaciones lluviosas principales en el año, una que comprende los meses de marzo a mayo y la segunda de septiembre a noviembre, por efectos del cambio climático el desarrollo normal de las fuentes de agua se verá afectadas, alterando los niveles de precipitación, la cantidad de agua y su duración en épocas de lluvia generando diferentes impactos ecosistémicos (Vuille, 2013).

2.2 Modelación

El principal objetivo de la modelación hidrológica es interpretar los procesos climáticos relacionados con la distribución de lluvia, caudales, contaminación, calidad de agua, entre otros. Este tipo de modelación ha sido aplicada desde el siglo XIX principalmente para el desarrollo de obras hidráulicas, a partir del siglo XX, la modelación hidrológica era expresada en fórmulas matemáticas para desarrollar información de cada proceso

hidrológico individualmente. A partir de los años 60 la modelación fue evolucionando con la tecnología hasta convertirse en una de las herramientas más utilizada para el estudio de los ciclos hidrológicos (Jorquera, 2012).

2.2.1 Etapas de la modelación

Para asegurarnos que el modelo será bien ejecutado existen ciertos criterios a seguir que son importantes en el momento de llevarlo a cabo. El diagrama que se muestra en la Imagen 2, resume esos criterios a continuación.

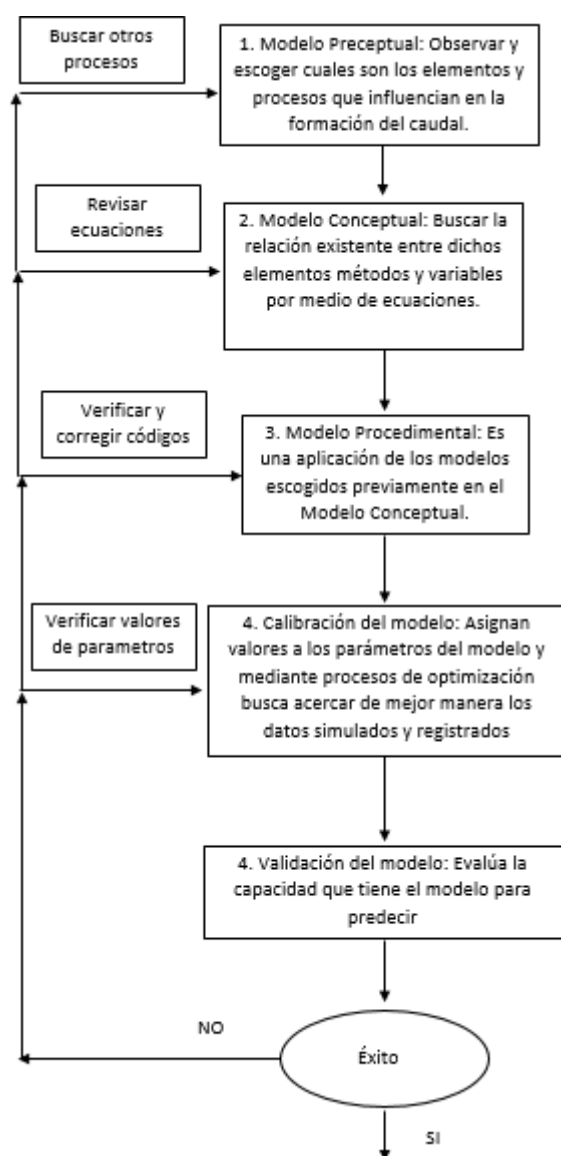


Imagen 2. Diagrama de procesos de un Modelo. Fuente: Cabrera (2012)

2.3 Modelos de regresión

Los modelos de regresión son un análisis estadístico, los cuales consisten en estudiar la semejanza que existe entre dos variables, a través de una función matemática, para de esta forma conocer la correlación que existe entre las variables en cuestión. Existen dos tipos principales de regresión, la regresión lineal simple y la múltiple (Montero, 2016).

2.3.1 Relleno de Datos

Muchas de las veces un banco de datos hidrometeorológicos provenientes de alguna estación en específico u otro centro de datos no cuentan con la información completa, muchas de las veces esto sucede debido a la reubicación de las estaciones, defectos en el instrumental, cambios en el entorno, entre otros, por lo que se recomienda siempre verificar la base de datos. Para esto existe una serie de métodos que pueden ser usados en estos casos, los cuales se presentan en la Tabla 2 (Campozano et al., 2014).

Tabla 2. Métodos de Relleno de Datos. Fuente: Campozano et al. (2014)

#	Infill method	Code
1	Average value nearer stations by distance	AVNSd
2	Average value nearer stations by R	AVNSR
3	Climatological mean of the day	CMD
4	Nearest neighbour value by distance	NNVd
5	Nearest neighbour value by R	NNVR
6	Inverse distance weight power 1	IDW+1
7	Inverse distance weight power 2	IDW+2
8	Inverse distance weight power $\frac{1}{2}$	IDW+1/2
9	Linear regression with the nearest station by distance	LRNd
10	Linear regression with the nearest station by R	LRNR
11	Linear regression with the nearest station by R/d ratio	LRNR/d
12	Multiple linear regression weighted by distance power -1	MLRWd-1
13	Multiple linear regression weighted by distance power -2	MLRWd-2
14	Multiple linear regression weighted by R power 1	MLRWR+1
15	Multiple linear regression weighted by R power 2	MLRWR+2
16	Multiple linear regression weighted by R/d ratio power 1	MLRWR/d+1
17	Multiple linear regression weighted by R/d ratio power 2	MLRWR/d+2

2.3.2 Modelos de regresión lineal simple

La regresión simple se define como el cálculo de la ecuación perteneciente a la recta que describa de mejor manera la relación entre la variable dependiente e independiente. La regresión simple tiene una sola variable independiente, por la que este tipo de modelos se los utiliza para estudios no muy complejos (Carrasquilla-Batista et al., 2016). La Ecuación 1 es la que se utiliza en el análisis de la regresión lineal simple

$$y = b_0 + b_1x \quad (1)$$

Donde:

y = variable dependiente

b_0 = intersección

b_1 = pendiente

x = variable independiente

2.3.3 Modelos de regresión lineal múltiple

Una regresión lineal múltiple al igual que la regresión lineal simple nos permite conocer la relación que existe entre variables dependientes e independientes, solamente que en el caso de una regresión múltiple, existen más de dos variables independientes involucradas, por lo que esta regresión es utilizada en estudios más reales y complejos (Cadenas Anaya & Guaita, 2021). La Ecuación 2 representa el cálculo de la regresión lineal múltiple.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \dots + b_nx_n \quad (2)$$

Donde:

y = variable dependiente

b_0 = intersección

b_1, b_2 = pendiente

2.4 Modelos Climáticos Globales

Se los conoce como Modelos Climáticos Globales por sus siglas en inglés (GCM). Estos modelos representan una dinámica atmosférica multidimensional alrededor del planeta, cuyo objetivo es mostrar los diferentes procesos físicos de la atmósfera y de la superficie terrestre, de esta manera estos modelos realizan simulaciones del comportamiento climático en un futuro, siendo esta la herramienta más utilizada para analizar el aumento de gases de efecto invernadero a causa del cambio climático (Armenta Porras et al., 2016).

Los modelos climáticos tienen una resolución horizontal que se encuentra entre 250 y 600 km, con alrededor de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, esta escala es bastante amplia por lo que su resolución es bastante baja, por esto se realizan mejoras en cada modelo. Para el análisis de los modelos se utilizan variables iniciales en cada cuadrícula como la humedad del aire, temperatura, concentración de gases de efecto invernadero, entre otros. Estas variables luego son analizadas junto con las variables del modelo, dando como resultado futuros datos meteorológicos (Zuñiga, 2021).

2.5 Escenarios de Cambio climático

Una de las herramientas para poder comprender de mejor manera la relación que existe entre las actividades humanas y el sistema climático son los escenarios climáticos, los cuales se definen como una descripción congruente de un estado futuro del planeta. Cabe recalcar que ninguno de estos escenarios debe ser considerados como pronósticos futuros, sino más bien estos son posibles escenarios que muestran diferentes circunstancias futuras bajo ciertas condiciones dadas (Armenta Porras et al., 2016).

Los escenarios de cambio climático se enfocan principalmente en la producción de gases de efecto invernadero y como estos afectan al desarrollo futuro del medio ambiente. El aumento de estos gases de efecto invernadero se da según el desarrollo de una sociedad en aspectos demográficos, sociales, económicos y tecnológicos. Estos avances evolutivos involucran también un impacto en el medio ambiente debido a la necesidad de recursos

(Magaña et al., 2009). Se han definido 4 líneas evolutivas en los cuales cada uno representa una alternativa futura distinta con condiciones diferentes (A1, A2, B1, B2) detalladas en la Tabla 3:

Tabla 3. Escenarios Climáticos - Líneas evolutivas. Fuente: (Magaña et al., 2009)

Condición	Escenarios	Descripción
A1	2.6	• Crecimiento económico muy rápido • La población mundial llega a su punto máximo y comienza a decrecer • Introducción de tecnologías nuevas y eficientes
A2	4.5	• Población global en constante aumento • Crecimiento económico lento y fragmentado
B1	6	• Población similar a A1 • Cambios en las estructuras económicas • Reducción de uso de materiales • Introducción de tecnologías limpias
B2	8.5	• Sustentabilidad económica, social y ambiental • Población en continuo crecimiento • Desarrollo económico intermedio

Se puede decir entonces que los escenarios “A” pronostican un futuro con alto crecimiento económico mientras que los “B” es un crecimiento más moderado, así mismo se considera que los escenarios “A1”y “B1” suponen una globalización en cuanto a la economía mientras que los escenarios “A2” y “B2” se refieren a un crecimiento más regional, todo este análisis parte entonces de suposiciones de variables evolutivas (Magaña et al., 2009).

2.6 Forzamiento radiativo

Un forzamiento es un desequilibrio climático que puede darse por circunstancias normales o a causa de actividades humanas. Un forzamiento radiativo es un cambio de

radiación dentro o fuera de un sistema climático. Existen forzamientos negativos y positivos, los negativos enfrían el sistema es decir que la cantidad de energía perdida es mayor que la recibida, en cambio los positivos calientan el sistema es decir se recibe más energía de la que se emite. El forzamiento radiativo se da principalmente por incrementos de especies activas como los GEI o aerosoles (Alley, 2018).

2.7 Escenarios RCP

Los escenarios específicos de emisiones han sido denominados como escenarios que logran representar cada trayectoria de forzamiento radiativo, estos escenarios se los conoce como Rutas Representativas de Concentración (RCP por sus siglas en inglés Representative Concentration Pathways) en donde cada RCP muestra un solo posible escenario futuro bajo las condiciones de ese forzamiento radiativo. Dentro de varias posibles vías representativas, se escogieron 4 escenarios debido a su alto forzamiento radiativo: RCP 2.6, 4.5, 6, 8.5 (Armenta Porras et al., 2016). Cada una de estas cuatro rutas representativas de concentración presentan distintos niveles de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, la primera es un escenario de mitigación estricta, es decir que se van a emitir menos gases de efecto invernadero (RCP 2.6), dos escenarios intermedios (RCP 4.5) donde se considera que poco a poco se reducirán las emisiones de GEI y (RCP 6.0) donde se considera que la reducción de emisiones no será muy notoria, y un escenario con un alto nivel de emisiones (RCP 8.5) donde se considera que la humanidad no realizará ningún cambio para evitar los efectos del cambio climático (IPCC, 2014).

2.8 Multimodelo Ensamble

Un ensamble se refiere a una combinación de un conjunto de modelos climáticos, dando como resultado diferentes proyecciones de una variable para futuros más probables, de esta forma se reduce la incertidumbre para así poder evaluar el impacto que tendrán los escenarios (Armenta Porras et al., 2016).

2.9 Downscaling

La reducción de escala o downscaling consiste en comparar un GCM con datos reales de la zona a analizar, para de esta forma aumentar la resolución del modelo para así eliminar el sesgo y poder concentrar los datos a nivel local (Montenegro-Murillo et al., 2019). Existen dos categorías de downscaling, la primera es la reducción de escala dinámica la cual utiliza simulaciones con una alta resolución para poder extrapolar los procesos climáticos de gran escala y representarlos a menores escalas (regionales o locales), en resumen, el dinámico construye un modelo climático regional (RCM) a partir de un modelo climático global (GCM). La otra opción de downscaling vendría a ser la reducción estadística, la cual desarrolla relaciones entre variables atmosféricas a gran escala y variables locales en la superficie. Como resultado se obtienen estimaciones puntuales del clima generalmente temperatura y precipitación.

2.10 Multicolinealidad

La multicolinealidad se define como un fenómeno estadístico que se presenta cuando dos o más variables en un modelo de regresión presentan una alta correlación, si existe un poco de multicolinealidad el impacto no es muy significativo, pero en caso de presentarse una multicolinealidad muy alta, esta se debe resolver (Daoud, 2018). Existen dos tipos de multicolinealidad, la perfecta y la imperfecta. La multicolinealidad perfecta se refiere a cuando todas las variables de un modelo no tienen relación alguna, por lo que los coeficientes de determinación se mantienen invariables, por otra parte, la multicolinealidad imperfecta ocurre cuando una o más variables tienen una alta correlación entre sí. Cuando esto sucede los valores de los coeficientes se alteran por lo que no estarían reflejando valores reales, lo que causa que se den resultados errados (Coa Clemente, 2019). Se puede identificar la presencia de multicolinealidad en los datos cuando se presentan grandes cambios al momento de que una de las variables es alterada o eliminada. Hay dos casos en los que la multicolinealidad se puede presentar. El primer caso es la multicolinealidad basada en datos, en este caso este fenómeno estadístico se presenta debido a un mal diseño del modelo o una mala recopilación de datos. El segundo caso es la multicolinealidad estructural, esta se presenta cuando se predicen datos a partir de uno ya conocido. La correlación de variables es un punto clave, sin embargo, no se puede confiar solo en ese punto, es necesario tomar en cuenta que esto depende también de la fuente de datos y el campo de investigación, por lo que para detectar la

multicolinealidad se usa un indicador conocido como el Factor de Inflación de Varianza (VIF) (Daoud, 2018).

2.11 Factor de Inflación de Varianza (VIF)

El Factor de Inflación de Varianza es una herramienta para cuantificar como aumenta o disminuye la varianza de una serie de datos (Daoud, 2018), en otras palabras este es un factor utilizado para analizar los problemas de multicolinealidad que existe en una serie de datos, esta multicolinealidad se refiere a cuando las variables que intervienen en un modelo están altamente correlacionadas, por lo que los resultados pueden llegar a ser redundantes (Quevedo et al., 2007). El VIF puede ser interpretado según lo que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Interpretación de los valores del VIF. Fuente: Daoud (2018)

VIF – value	Conclusión
VIF = 1	No correlacionado
1 < VIF ≤ 5	Moderadamente correlacionado
VIF > 5	Altamente correlacionado

El VIF es utilizado en cada uno de los modelos con los que se esté trabajando y como indica la tabla anterior, mientras los valores del VIF se encuentren menores a 5 la correlación es aceptable, pasado este valor la correlación es muy alta y se debe resolver o de ser el caso eliminar la variable (Daoud, 2018). El VIF está representado por la Ecuación (3).

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (3)$$

Donde:

R^2 = Coeficiente de determinación.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

La zona de estudio es la cuenca del río Paute, esta tiene un área de 6436 km² aproximadamente, la misma se encuentra distribuida entre las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago (Vicuña, 2009). Esta cuenca está conformada por 18 subcuencas y estas a su vez están divididas por 75 microcuencas, Figura 2.

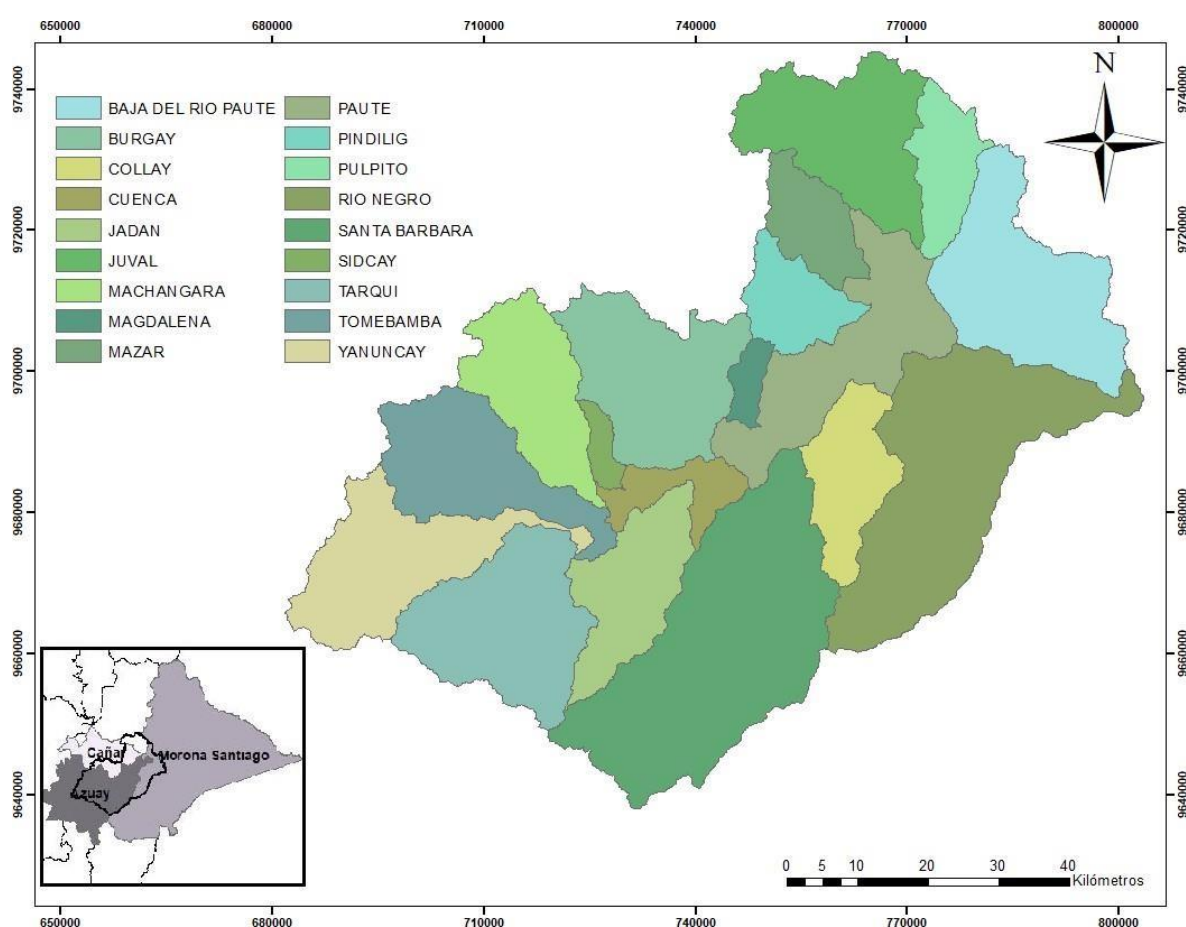


Figura 2. Subcuencas de la cuenca del río Paute. Fuente: Elaboración propia

La cuenca del río Paute tiene pendientes que se encuentran en un rango de 25 – 50% y su rango altitudinal se encuentra alrededor de los 500 – 4600 m.s.n.m. La red hidrográfica en la cuenca del río Paute es bastante amplia y es de las más importantes, ya que esta es alimentada por varios ríos que descienden por cada subcuenca, cuatro de estos ríos

proviene del cantón Cuenca, los cuales forman el río Cuenca, el cual a continuación se une al río Santa Bárbara formando así el río Paute. Esta red hidrológica cruza por diferentes cantones por lo que es utilizada en proyectos de riego e influye directamente en el caudal entrante en la central Hidroeléctrica de Mazar (Figura 3).

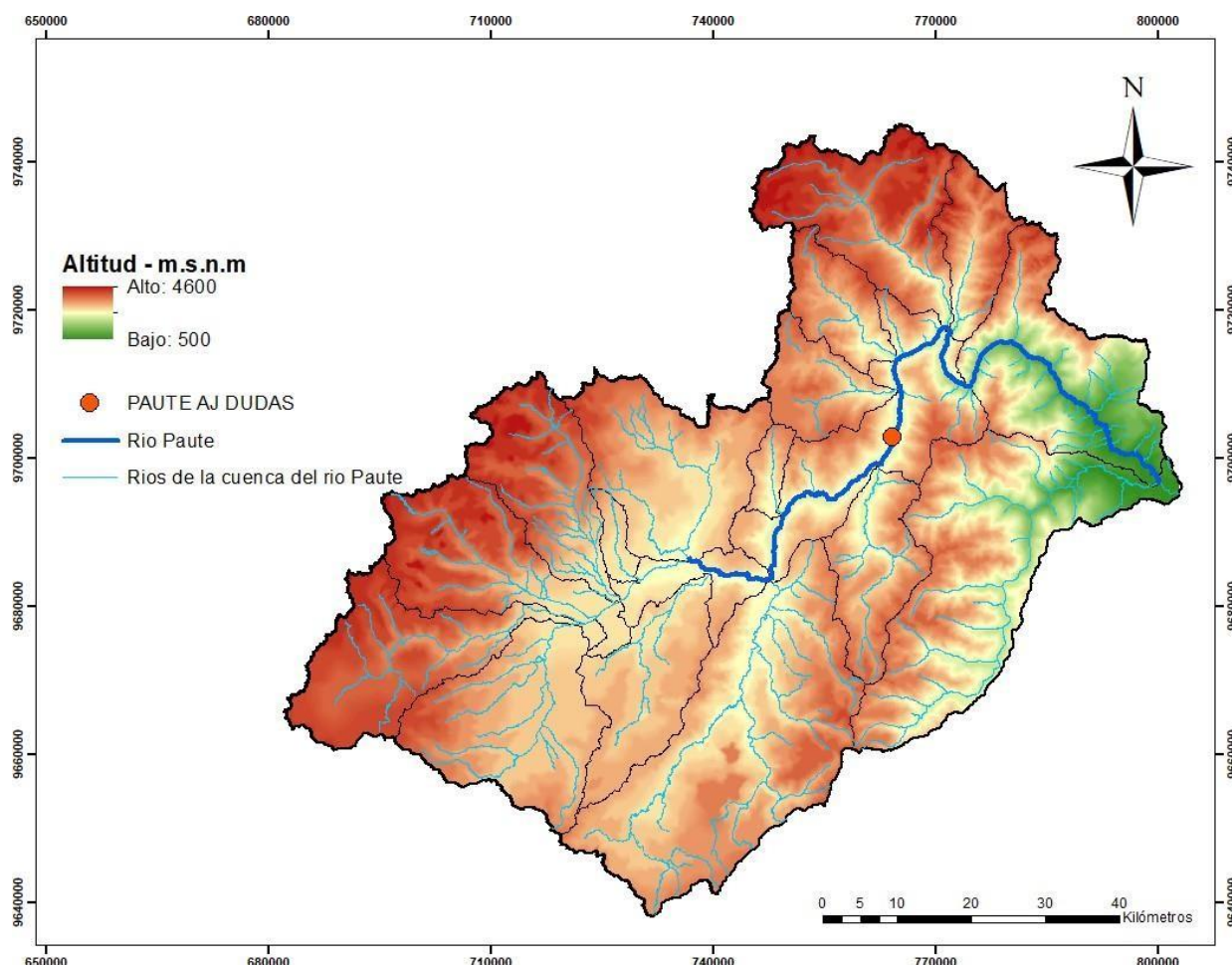


Figura 3. Altitud de la cuenca del río Paute. Fuente: Elaboración propia

La cuenca tiene un gradiente altitudinal bastante variado por lo que sus niveles máximos de precipitación anual están entre 2500 – 3000 mm y los niveles mínimos entre 600 – 800 mm. De igual manera la temperatura es variada a lo largo de toda la cuenca, esta se encuentra entre un rango de 4.4 – 18.6° C (Vicuña, 2009); mientras que la evapotranspiración en la cuenca es de alrededor 690 – 1260 mm anualmente (Pozo, 2018). Una característica de la cuenca es que está dividida por regímenes pluviales Unimodales y Bimodales. Cabe mencionar que las zonas de menor temperatura corresponden a las

cumbres de la cordillera Occidental de Los Andes con un promedio de temperatura de 6°C y las zonas más cálidas se encuentran en los valles interandinos con un promedio de 24°C (Vicuña, 2009). Dentro del área yacen total y parcialmente dos zonas protegidas que son el Parque Nacional El Cajas y el Parque Nacional Sangay, por lo que consta de un ecosistema mayoritariamente de páramo.

La cuenca está dividida en 3 zonas: alta, media y baja (Vicuña et al., 2009), cada una de estas tienen características específicas que se detallan a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización de las diferentes zonas de la cuenca del río Paute. Fuente: Vicuña (2009).

	Altitud	Clima	Temperatura	Uso de Suelo
Cuenca Alta	2600-4600 msnm	Frío Semihúmedo	8°C	Páramo, cereales, hortalizas
Cuenca Media	2200 – 2600 msnm	Templado semihúmedo	15°C	Mayor actividad agrícola, pastos, caña de azúcar, frutales, maíz
Cuenca Baja	500 – 2200 msnm	Meso-térmico húmedo	20°C	Bosque natural, asentamientos humanos.

Dentro del área existen varias estaciones automáticas y manuales que son las encargadas de recolectar información hidrometeorológica, específicamente caudal, precipitación y temperatura.

La estación de caudal Paute AJ Dudas, ubicada en la subcuenca del Paute, dentro de la zona media de la cuenca, se encuentra en el río Paute y es la más cercana al embalse de la central de Mazar, por lo que se considera que es la estación más adecuada para realizar un pronóstico de la disponibilidad de agua en los próximos años (Figura 4).

3.2 Recolección de datos

Los datos fueron obtenidos por los registros del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). El periodo de tiempo a tomar en cuenta es a partir del año 1982 hasta el 2008, con un total de 27 años para el análisis, con temporalidad mensual. El número de estaciones escogidas por variable se basó principalmente por la cantidad de información que existía en la base de datos de origen, por lo que para la investigación se utilizaron aproximadamente 18 estaciones para precipitación, 11 estaciones para caudal y 8 estaciones para temperatura. Para incluir varios procesos hidrológicos en la cuenca, en el análisis también se incluyó el cálculo de la evapotranspiración con los datos de temperatura utilizando la ecuación de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

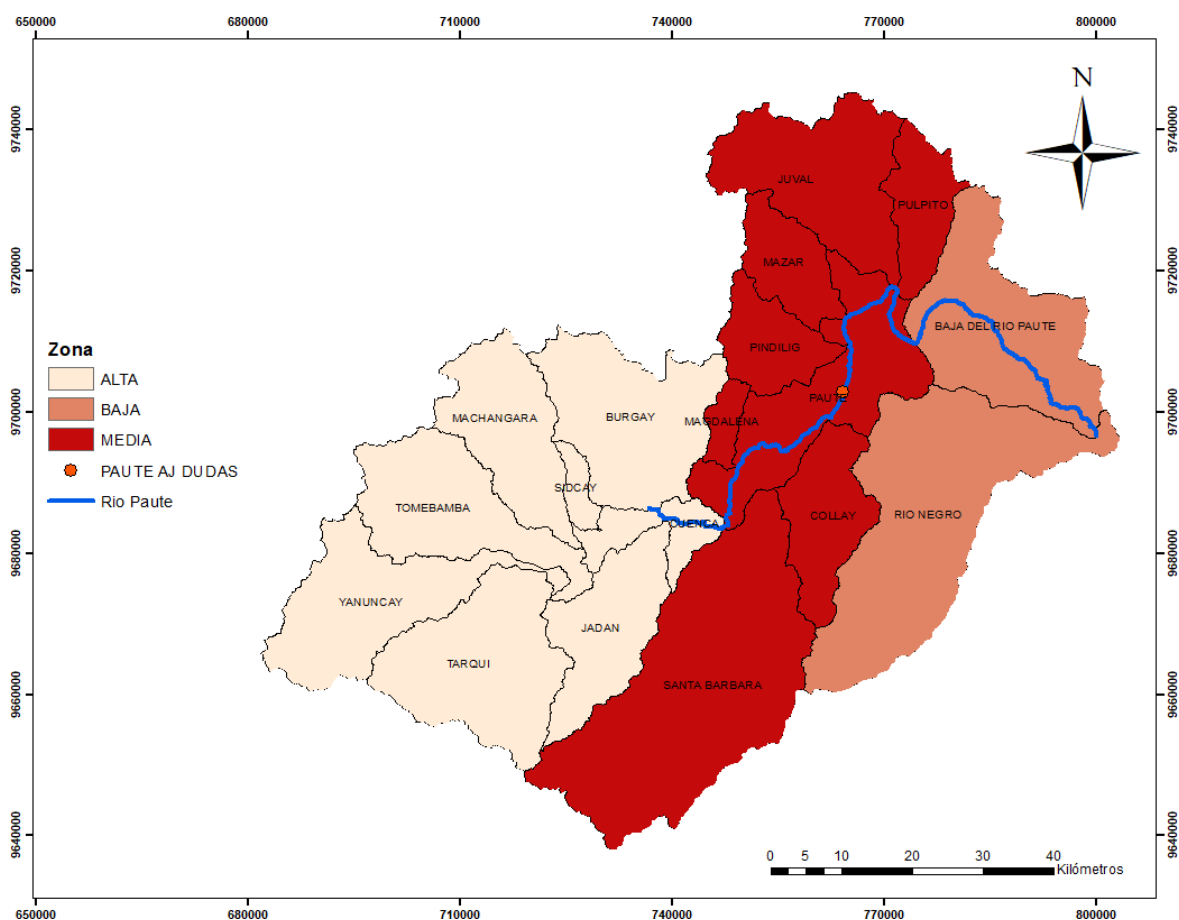


Figura 4. Zona alta, media y baja de la cuenca del río Paute. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Información Pluviométrica e Hidrológica

Debido a que la información recolectada por parte del INAMHI presentaba vacíos, se realizó un relleno de los datos faltantes tanto para precipitación como para caudal; para esto, se utilizó la librería de R MissForest (Stekhoven, 2012).

3.2.1.1 Librería R MissForest

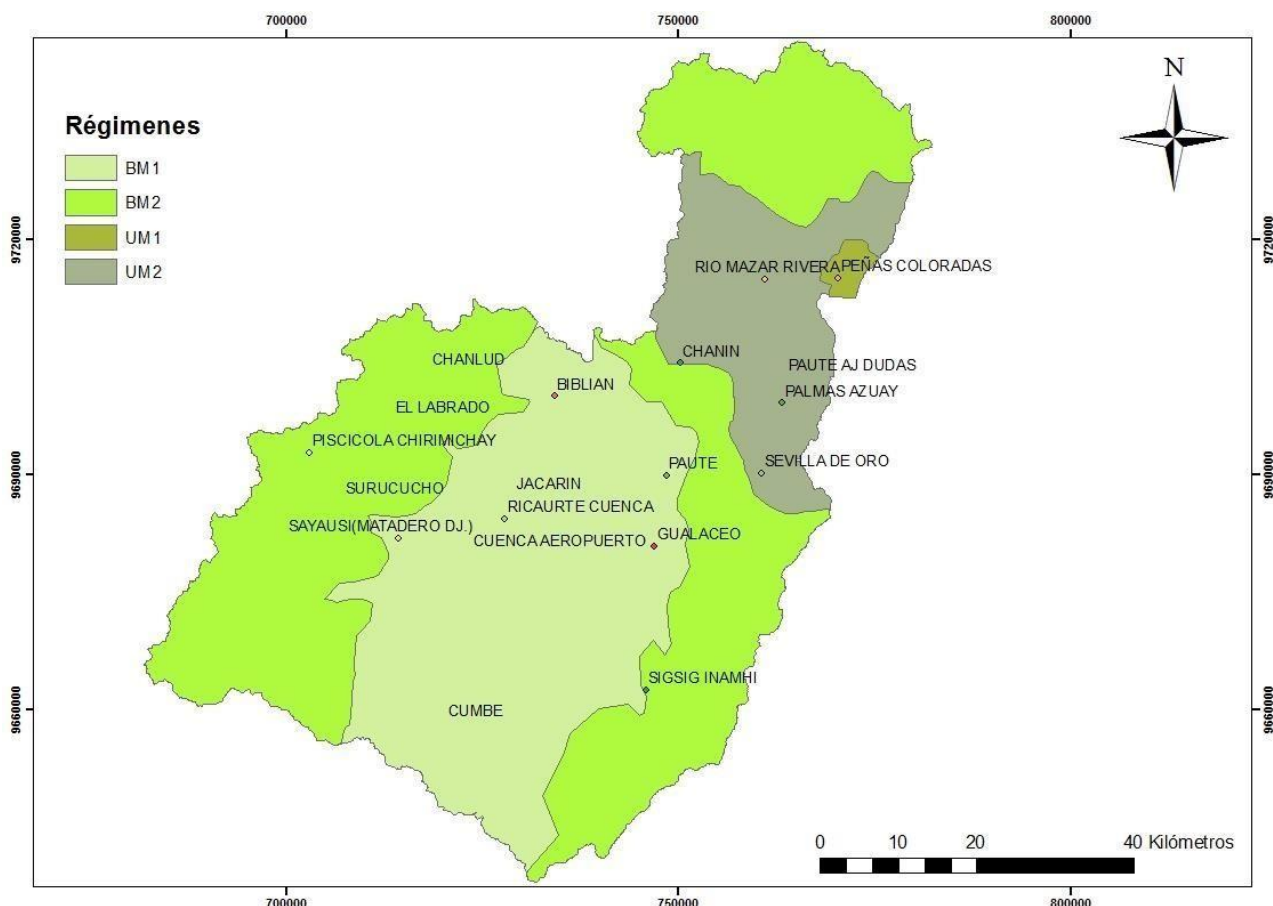
La librería “MissForest” consiste en un algoritmo de imputación de datos aleatorios para datos faltantes, utilizando la media. Con esto “MissForest” ajusta un banco de datos aleatorios con respecto a la parte observada y finalmente predice la parte faltante de forma que los nuevos valores a obtener sigan una tendencia y tengan sentido. Es importante saber que esta librería trabaja de forma iterativa, se actualiza continuamente y evalúa su comportamiento entre iteraciones (Stekhoven & Bühlmann, 2011). El algoritmo para cada variable que actúa en esta herramienta se ajusta formando un bosque aleatorio basado en los datos observados para luego poder predecir las zonas faltantes. Dicho algoritmo repite estos pasos hasta que se cumpla un criterio base o uno establecido. Estos cálculos se basan en la estimación del error fuera de la bolsa (OOB por sus siglas en inglés), lo que representa una estimación del error interno del bosque aleatorio mientras se está construyendo (Stekhoven, 2012).

3.2.1.2 Resultados del Relleno de Datos

Para el relleno de datos de precipitación se separó las estaciones según regímenes de la zona Unimodal (UM) y Bimodal (BM) que son catalogadas como los regímenes de lluvias contrastantes presentes en el área de estudio. El estudio de los regímenes de precipitación tiene el fin de encontrar comportamientos espaciales similares de lluvia entre diferentes puntos de la misma zona, lo cual brinda la posibilidad de estimar la distribución de la lluvia a partir de varios puntos existentes en la cuenca permitiendo de esta manera tener valores rellenos que sean más cercanos a la realidad. La literatura indica que la

correlación entre estaciones pertenecientes al régimen UM y las estaciones del régimen BM es muy baja, es decir que al involucrar estaciones que pertenecen a diferentes regímenes la correlación de datos no supera el 0.10 en el 90% de los casos. Sin embargo, la correlación entre estaciones que pertenecen al mismo régimen por ejemplo al UM son en la mayoría de casos superiores a 0.73, así también entre estaciones pertenecientes al régimen BM los valores de correlación son cercanos a 0.8 (Celleri et al., 2007). La división por regímenes se da principalmente por los niveles de precipitación que se presentan en toda la cuenca los cuales son muy variados, por lo que no es factible considerar todas las estaciones para un mismo resultado. El régimen UM se encuentra cerca del borde de la cuenca, sin embargo, existe un notorio cambio en niveles de precipitación debido a las condiciones orográficas de la zona por lo que se dividieron en dos regímenes UM1 y UM2, en donde la precipitación media anual en el primer régimen varía entre 2900 y 3400 mm, mientras que en el segundo régimen la precipitación varía entre 1100 y 1600. El régimen bimodal fue dividido dependiendo de la correlación que presentaban las estaciones, se nombró régimen BM1 a las estaciones que se encontraban a menos de 3000 m.s.n.m ya que fueron las que presentaron una mayor correlación, con una precipitación media anual de 660 a 1100 mm, las demás estaciones pertenecen al régimen BM2 con precipitaciones de 1000 a 1800 mm. Cabe mencionar que el régimen que cubre más área dentro de la cuenca es el régimen BM2 con 2530 km² de territorio, mientras que el régimen BM1 cubre un 36% del total; los regímenes UM1 y UM2 son los que cubren menos área con 1% y 14% respectivamente (Celleri et al., 2007).

La división de estaciones por regímenes ayuda a que el análisis con la herramienta MissForest sea más adecuada, ya que la relación de precipitación que existe entre estaciones en cada régimen es altamente significativa, permitiendo que los resultados obtenidos sean más cercanos a la realidad. Dicho esto, las estaciones quedaron agrupadas en tres regímenes de acuerdo a su ubicación ya que la correlación fue mejor entre las estaciones que se encuentren en el mismo régimen. El régimen BM1 está conformado por la estación de: Biblián, Cuenca Aeropuerto, Cumbe, Gualaceo, Jacarin, Paute, Ricaurte Cuenca, Sayausí Matadero. El Régimen BM2 conformado por las estaciones de: Chanlud, El Labrado, Piscícola Chirimichay, Surucucho (Llulluchis), Chanin, Sígsg. Finalmente, el régimen UM2 conformado por las estaciones de: Palmas Azuay, Peñas Coloradas, Río Mazar, Sevilla de Oro. Con un total de 18 estaciones las cuales se observan en la Figura 5.



*Figura 5. Estaciones de precipitación ubicadas dentro de la cuenca del río Paute.
Fuente: Elaboración propia.*

Con esta división de estaciones en regímenes se pretende tener valores más acertados durante el relleno de datos debido a la cercanía que existe entre cada una de ellas y además porque tienen el mismo régimen de precipitación.

El número y el porcentaje de datos faltantes en las estaciones de precipitación se pueden observar en la Tabla 6. Estos datos faltantes o datos perdidos son los que se pretenden rellenar con la herramienta MissForest mencionada en la sección 3.2.1.1.

Tabla 6. Número de vacíos de las estaciones de precipitación separadas por regímenes

Estaciones Régimen BM1		
	N° de vacíos	% de vacíos
Sayausí Matadero	0	0
Ricaurte Cuenca	13	4.01
Paute	49	15.12
Gualaceo	60	18.52
Jacarin	188	58.02
Cumbe	20	6.17
Cuenca Aeropuerto	158	48.77
Biblián	76	23.46
Estaciones Régimen BM2		
Chanlud	146	45.06
El Labrado	36	11.11
Piscícola	44	13.58
Surucucho	49	15.12
Chanin	23	7.1
Sígsig	25	7.72

Estaciones Régimen UM2		
Palmas Azuay	59	18.21
Peñas Coloradas	73	22.53
Río Mazar	27	8.33
Sevilla de Oro	21	6.48

El mismo método utilizado previamente para los datos de precipitación mencionados en la sección 3.2.1.1, fue también aplicado para las estaciones de caudal, sin ninguna división en específico, las estaciones seleccionadas para la aplicación de este método fueron las que presentaron la menor cantidad de datos faltantes, quedándonos así con las siguientes estaciones: Dudas en Pindilig, Gualaceo, Jadán AJ Paute, Matadero, Mazar, Surucucho, Tarqui, Tomebamba, Yanuncay, Paute AJ Dudas y Paute en Paute. Con un total de 11 estaciones, las cuales se pueden observar en la Figura 6.

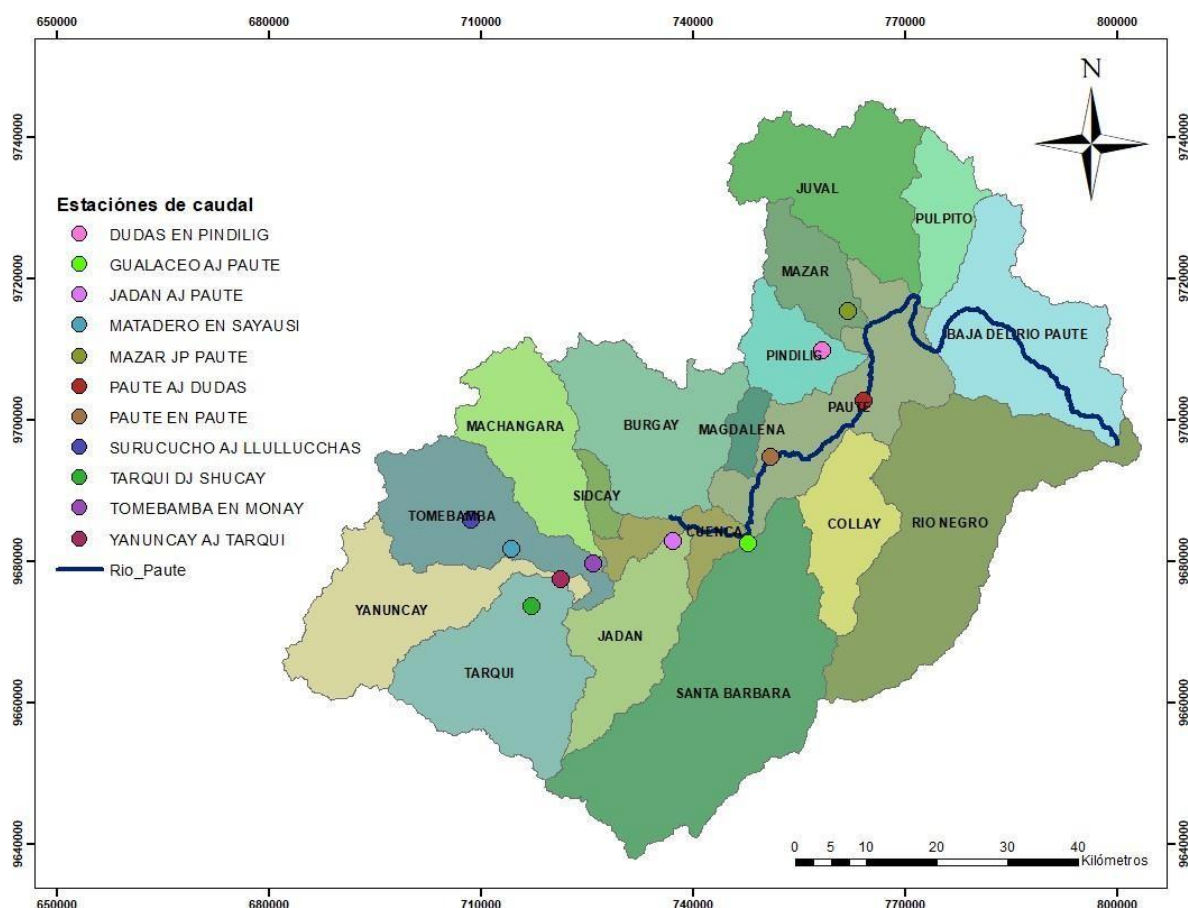


Figura 6. Estaciones de caudal ubicadas dentro de la cuenca del río Paute. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar el número de datos faltantes en cada estación de caudal seleccionada, lo cual se puede observar en la Tabla 7. Como se había mencionado anteriormente, este es el porcentaje y número de vacíos que se pretende rellenar con la herramienta antes mencionada.

Tabla 7. Número de vacíos de las Estaciones de Caudal

Estaciones	Nº de vacíos	% de vacíos
Dudas	135	41.67
Gualaceo	265	81.79

Jadán	194	59.88
Matadero	3	0.93
Mazar	170	52.47
Surucucho	26	8.33
Tarqui	269	83.02
Tomebamba	33	10.49
Yanuncay	233	71.91
Paute AJ	91	28.09
Dudas		
Paute en	72	22.2
Paute		

3.2.1.3 Validación del método de relleno de datos

Es necesario demostrar la fiabilidad del método MissForest para el relleno de datos de las estaciones de precipitación y caudal, la validación del método consiste en lo siguiente: Para empezar, contamos con un banco de datos que contiene un conjunto de 18 estaciones de precipitación y 11 estaciones de caudal, cada una de estas estaciones cuentan con 324 datos, ya que son datos mensuales obtenidos en una serie de 27 años. En la Tabla 7 mencionadas anteriormente se puede observar el número original de vacíos que existe en cada una de las estaciones, al aplicar el método de MissForest este número de vacíos se relleno por datos generados aleatoriamente a través de diferentes iteraciones. Ahora si bien queremos comprobar que estos datos obtenidos a través de este método son factibles lo que se hizo fue eliminar un 5% más de datos aleatoriamente en toda la base de datos original, de esta forma datos reales que ya existían en la base de datos serán eliminados y reemplazados nuevamente por datos aleatorios de MissForest, con el fin de comprobar que los datos a obtener a través de MissForest sean muy similares a los valores

eliminados. En las Tablas 8 y 9 se muestran los valores de las estaciones al haber eliminado un 5% más de datos tanto en precipitación como caudal.

Tabla 8. Estaciones Precipitación con un 5% más de vacíos

Estaciones Régimen BM1		
	N° de vacíos	% de vacíos
Sayuasí Matadero	16	4.94
Ricaurte Cuenca	28	8.64
Paute	64	19.75
Gualaceo	73	22.53
Jacarin	197	60.8
Cumbe	35	10.8
Cuenca Aeropuerto	165	50.93
Biblián	87	26.85
Estaciones Régimen BM2		
Chanlud	157	48.46
El Labrado	51	15.74
Piscicola	58	17.9
Surucucho	61	18.83

Chanin	39	12.04
Sigsig	39	12.04
Estaciones Régimen UM2		
Palmas Azúay	71	21.91
Peñas Coloradas	87	26.85
Río Mazar	43	13.27
Sevilla de Oro	36	11.11

Tabla 9. Estaciones de caudal con un 5% más de vacíos

Estaciones	N° de vacíos	% de vacíos
Dudas	142	43.83
Gualaceo	270	83.33
Jadán	200	61.73
Matadero	19	5.86
Mazar	181	55.86
Surucucho	41	12.65
Tarqui	272	83.95
Tomebamba	49	15.12

Yanuncay	237	73.15
Paute AJ Dudas	102	31.48
Paute en Paute	85	26.23

Estas tablas muestran los nuevos datos a rellenar con MissForest, como podemos observar el número de vacíos aumento en todas las estaciones, con el fin de que la herramienta MissForest coloque nuevos datos en estos nuevos vacíos para de esta forma observar cómo es su comportamiento con respecto a este cambio. Finalmente, se utilizaron tres métricas para poder comprobar la correlación de los datos (R^2 , KGE y NSE).

3.2.1.4 Métricas

Se utilizaron tres métricas para comprobar la validez del relleno de datos: R^2 , KGE y NSE, las cuales son métricas que según la literatura son utilizadas para el análisis hidrológico (Lavado, 2020). Estas métricas se utilizan también al momento de calibrar y validar un modelo hidrológico entre lo observado y simulado (Knoben et al., 2019). Las métricas se describen a continuación.

El coeficiente de determinación (R^2) o también conocido como coeficiente de correlación múltiple se define como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación. La ecuación 5 es la que define el coeficiente de determinación.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

Donde:

$\bar{y}$ = Promedio observado

y_i = Simulación del modelo.

Su rango de análisis se encuentra entre 0 y 1, el valor de 0 significa que no existe correlación alguna, en caso de que el valor sea 1 significa que existe una buena correlación entre lo observado y simulado (Krause et al., 2005).

Kling-Gupta (KGE) el cual es un criterio para evaluar modelos en conjunto con la media, la varianza y la correlación en el rendimiento del modelo y es una métrica que se utiliza cada vez más para la calibración y validación de modelos hidrológicos. La Ecuación 5 es la que describe la eficiencia de KGE:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (5)$$

Donde:

σ_{sim} = Desviación estándar de lo simulado.

σ_{obs} = Desviación estándar de lo observado.

μ_{sim} = La media de la simulación

μ_{obs} = La media del observado.

El rango de eficiencia del KGE es de 0 a 1, cuando este es igual o cercano a 1 quiere decir que los modelos son perfectos, en caso de ser igual o cercano a 0 quiere decir que la modelación no es buena (Knoben et al., 2019).

El Nash-Sutcliffe (NSE) es una de las métricas más comúnmente utilizadas para este tipo de análisis, ya que es de fácil interpretación. La fórmula de esta métrica se muestra en la Ecuación 6

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q})^2} \quad (6)$$

Donde:

Q_{sim} = Datos simulados.

Q_{obs} = Datos observados.

Si el valor de NSE es 1, esto quiere decir que hay una correlación perfecta en el modelo, en caso de que NSE sea igual a 0, la correlación no es satisfactoria (Knoben et al., 2019).

Estas métricas fueron aplicadas mediante la librería HydroGof con la función GOF en el programa Rstudio versión 4.1.

3.2.2 Información de Temperatura

Otra variable a considerar es la temperatura. Se consideraron 18 estaciones para el análisis, pero solo 8 de estas contaban con datos suficientes. Al no contar con la suficiente información dentro de los datos del INAHMI para poder aplicar el método de Miss Forest, se optó por utilizar un programa de predicción llamado NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (NASA-POWER - <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), ilustrado en la Imagen 3

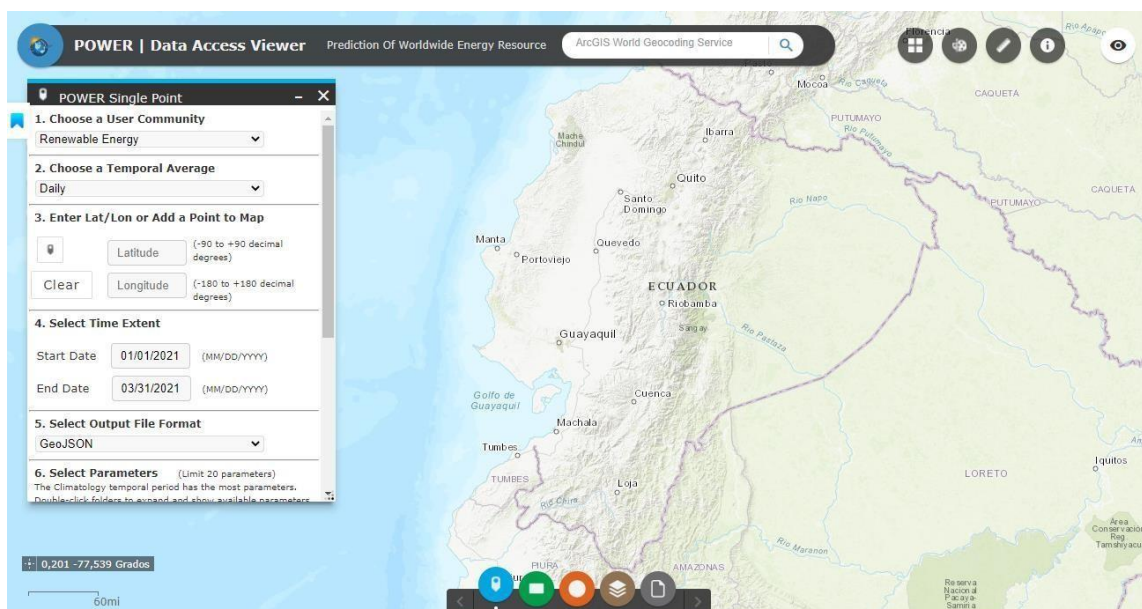


Imagen 3. Vista de la página NASA POWER.

Fuente: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

NASA POWER es un geo portal en el cual es posible exportar datos climáticos a una escala mundial, esta información es recopilada mediante satélites, datos medidos directamente, entre otros. Las características de este sistema se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Características del Sistema NASA-POWER

Parámetro	Características
Periodo de Datos	Información desde 1981 hasta la actualidad
Cobertura geográfica	El sistema de Nasa Power tiene una cobertura a nivel global
Resolución Temporal	Los datos se pueden encontrar en temporalidad Diaria o Mensual
Resolución Espacial	0.5° * 0.5° para variables de temperatura y humedad relativa

3.2.2.1 Corrección de datos

Como se menciona en la Tabla 10 una de las características del sistema NASA-POWER es que esta base de datos tiene información desde el año 1981 hasta la actualidad. Para nuestro estudio, se eligió la opción de temperatura a dos metros del suelo, en el periodo de 1982 a 2008. Como siguiente paso se debe introducir las coordenadas del lugar, que en este caso fueron las ocho estaciones que disponían datos, finalmente se descarga la información en formato CSV (valores separados por comas).

Para estos datos se aplicó un factor de corrección estacional (Ecuación 1), el cual consiste en sacar un promedio de cada mes durante todo el periodo de tiempo de estudio de las ocho estaciones de la base original del INAHMI, las cuales, si contaban con los suficientes datos, es decir que obtenemos un valor promedio por cada mes. Así mismo se

hace un promedio con los datos obtenidos por NASA-POWER para cada estación, de esta manera obtenemos un promedio para cada mes tanto de los datos originales como de los datos obtenidos por el sistema NP. El promedio de los datos originales es decir de los datos observados, es dividido para el promedio de los datos simulados por el sistema NP. De esta división se obtiene un factor de corrección para cada mes. Estos factores de corrección pertenecen a las ocho estaciones con las que comenzamos el estudio.

$$F = \frac{V_{obs}}{V_{sim}} \quad (7)$$

Donde:

V_{obs} = Valores observados

V_{sim} = Valores pronosticados

Con estos factores, se realizó una interpolación con el programa ArcMap (10.4.1), para conseguir el factor de corrección para las demás estaciones que no tienen datos suficientes para realizar una comparación efectiva. De igual manera se consiguieron 12 datos para cada una de las diez estaciones sobrantes. La interpolación de datos se la puede observar en las Figuras 7 y 8.

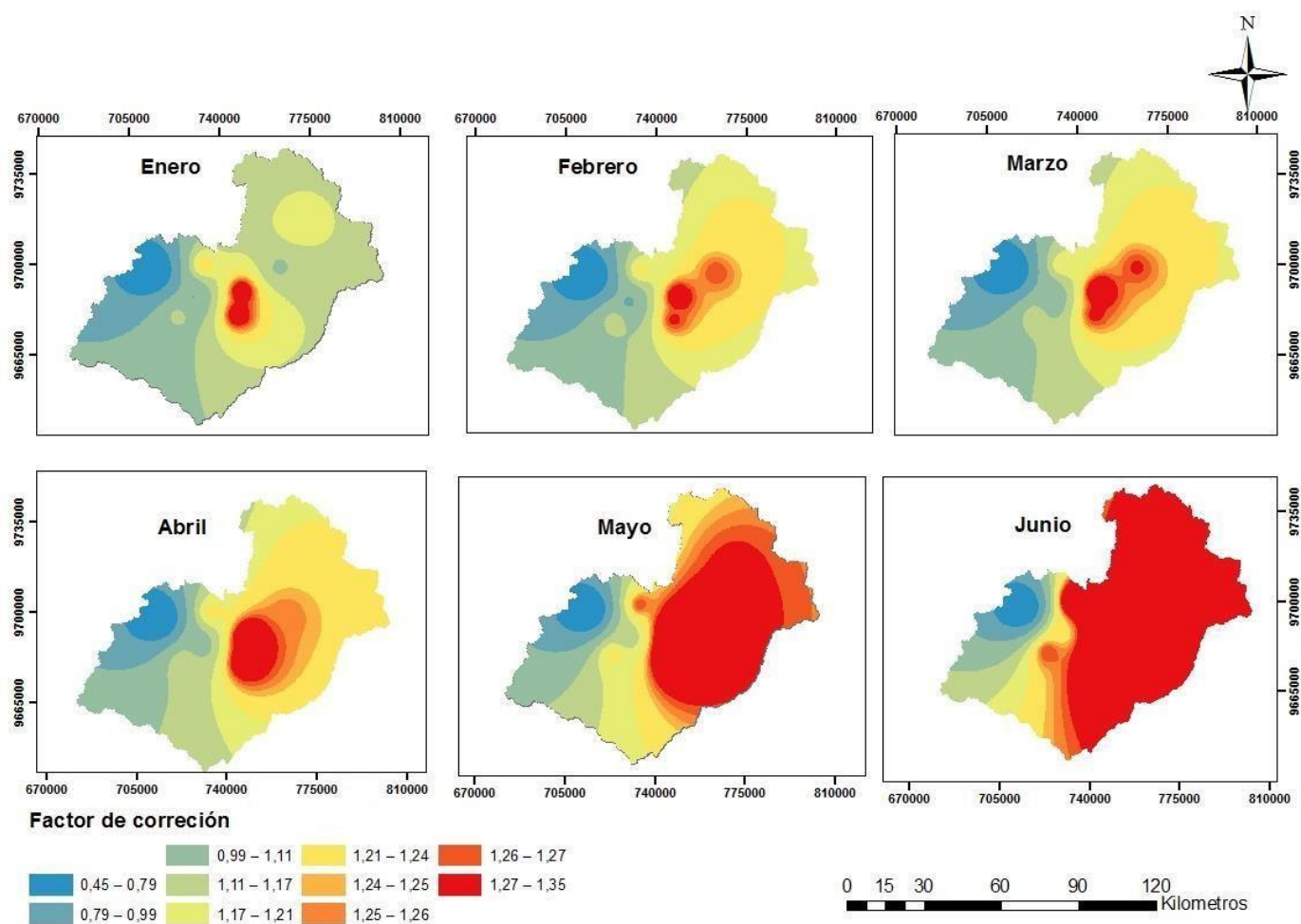


Figura 7. Interpolación de Temperatura Enero - Junio para la cuenca del río Paute.

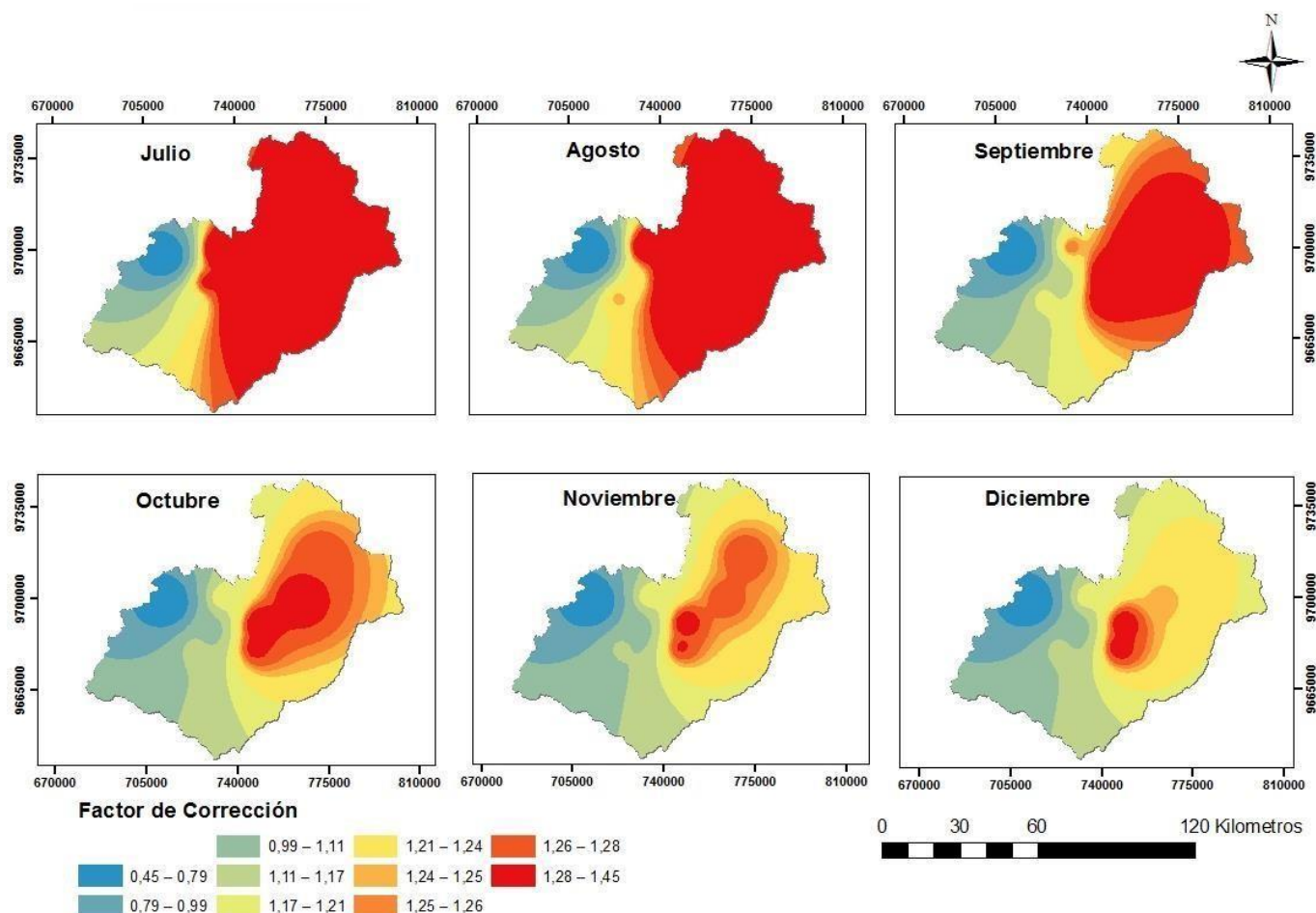


Figura 8. Interpolación de Temperatura Julio - Diciembre para la cuenca del río Paute

La corrección de datos consiste en que el valor obtenido por ejemplo para enero sea multiplicado por todos los valores simulados de enero y así sucesivamente hasta diciembre. De esta forma los datos estarán completamente corregidos.

3.2.2.2 Evapotranspiración

La relación entre temperatura y caudal no es mayormente significativa por lo que se consideró pertinente incluir el proceso hidrológico de la evapotranspiración en lugar de solo tomar en cuenta la variable de la temperatura. La evapotranspiración es una variable que depende de varios factores como la humedad, la velocidad del viento, entre otros, por lo que esta puede influir mayormente en los niveles de caudal. Para obtener estos datos de evapotranspiración se utilizó el método de Thornthwaite.

3.2.2.2.1 Método de Thornthwaite

El método de Thornthwaite es ampliamente utilizado ya que este solo requiere de dos variables específicas que son la temperatura y la latitud de la zona, por lo que es un método ampliamente utilizado (Chen et al., 2005). La ecuación de Thornthwaite se desarrolla a continuación.

$$ET_p = 16 d \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (8)$$

Donde ET es la evapotranspiración potencial; T es la temperatura media mensual en °C; d es el factor de corrección que depende de la latitud y el mes; I es un índice de calor anual y a es un valor que se calculan con las Ecuaciones 9 y 10.

$$I = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (9)$$

$$a = (6,75 \times 10^{-7})I^3 - (7,71 \times 10^{-5})I^2 + (1,79 \times 10^{-2})I + 0,49 \quad (10)$$

Para la obtención del método de Thornthwaite se aplicó la librería SPEI en el software RStudio versión 4.1. Con este método se calculó los datos de evapotranspiración de las estaciones que serán utilizadas para el modelo.

3.3 Datos Futuros

Para obtener los datos futuros de precipitación y temperatura se utilizó un modelo ensamble, el cual es la combinación de varios modelos climáticos dando como resultado la proyección de datos de determinadas variables en un periodo establecido. En el presente estudio se obtuvieron datos futuros en el periodo de 2011 a 2050, la evolución

que existirá en el futuro es evaluada bajo los escenarios de Rutas Representativas de Concentración (RCP). Los escenarios 4.5 y 8.5 son nombrados de esta forma por su forzamiento radiativo, el cual determina cual es el flujo de energía que se presenta ante procesos naturales y antropogénicos en la tierra. Los escenarios realizan un análisis a partir de ciertas condiciones dadas como la cantidad de sustancias contaminantes, emisiones y gases de efecto invernadero, todas estas dadas en diferentes concentraciones dependiendo del escenario (Pozo, 2018).

3.4 Modelación de caudal actual

Al contar con los datos completos de todas las variables (caudal, precipitación y evapotranspiración), el siguiente paso consistió en realizar diferentes modelos de regresión lineal múltiple para cada variable con respecto a la estación de caudal Paute AJ Dudas, esto se aplicó a través del criterio *backward elimination*, el cual consiste en trabajar con un modelo completo, es decir un modelo que incluya todas las variables de entrada y una intersección, para luego ir eliminando una a una las variables que no contribuyen a mejorar el modelo, este enfoque se basa en un criterio de selección de variables predeterminadas (Wang et al., 2013). De esta manera se eligen las estaciones que tengan mayor correlación y mayor influencia sobre la variable de caudal. Las variables fueron evaluadas bajo tres métricas mencionadas en la sección 3.2.1.4, las cuales se miden en un rango de 0 a 1, mientras más cercanos sean los valores a uno mejor es considerado el modelo, sin embargo valores mayores a 0.5 son considerados aceptables (Moriasi et al., 2007), (Cislaghi et al., 2020).

3.4.1 Factor de Inflación de Varianza

Algo importante a tomar en cuenta al momento de realizar estos modelos es la multicolinealidad, término utilizado cuando existen relaciones lineales entre los predictores del modelo, lo que indica que la información entre una o más variables es redundante (Ramirez et al., 2005). Para esto se aplicó el factor de inflación de varianza (VIF) el cual es uno de los métodos más ampliamente utilizados para la detección de multicolinealidad (Ramirez et al., 2005). De acuerdo a la literatura, umbrales entre 5 y 10 muestran que las variables son excesivamente colineales, por lo que se necesita mantener

umbrales menores a 5 para que no exista multicolinealidad entre las variables (Blanco et al., 2014). Para realizar este procedimiento se utilizó el software RStudio con la librería CAR (Fox & Weisberg, 2019), que contiene una herramienta VIF que permite calcular el factor de inflación de varianza que existe entre estaciones, al aplicar esta herramienta se especificó el umbral máximo que nos habíamos propuesto, por lo que todas las estaciones que se escogieron en cada modelo debieron cumplir un umbral menor a 5 para poder ser consideradas.

3.4.2 Calibración y Validación

Se realizó la calibración y validación de los datos, la calibración consiste en la interpretación de los modelos, con la definición de una ecuación para el pronóstico de variables, la validación de datos en cambio consiste en realizar una comparación entre los datos observados con los datos simulados y analizar su comportamiento (Sanabria & García, 2006). Para esto, la calibración se llevó a cabo con el 80% de los datos totales, es decir, los datos comprendidos desde enero de 1982 hasta agosto de 2003, mientras que la validación se la realizó con el 20% de datos restantes conformados a partir de septiembre del 2003 a diciembre del 2008, estos procesos fueron evaluados con las métricas mencionadas en la sección 3.2.1.4.

El modelo de caudal actual se lo realizó bajo diferentes escenarios: Caudal-Caudal, Precipitación-Caudal, Evapotranspiración-Caudal y Precipitación-Caudal-Evapotranspiración y bajo el criterio de backward elimination descrito previamente. Para esto se contó con 11 estaciones de caudal, con las cuales se realizaron alrededor de ocho modelos; 18 estaciones de precipitación con las que se realizaron tres métodos, el primero fue realizar un modelo con todas las 18 estaciones, el segundo método incluía solo las estaciones más cercanas las cuales se encontraban en un radio de 20 km de la estación de estudio y el tercero dividía las estaciones según sus regímenes, cada uno de estos métodos obtuvo varios modelos, para finalmente escoger el que mejor resultados brinda. Por último, se utilizaron 8 estaciones de evapotranspiración, con las que se realizaron alrededor de cinco modelos. Con el fin de analizar el comportamiento de cada una de estas variables con la estación de estudio y de esta forma ir descartando las estaciones que no estén muy correlacionadas con la misma.

3.5 Modelación de caudal futuro

Para la evaluación final del caudal futuro se realizó una regresión lineal simple con los datos futuros detallados en la sección 3.3. Se utilizaron datos futuros entre los años 2011-2050 con temporalidad mensual. Estos datos fueron extraídos a partir de un conjunto de modelos climáticos conocido como Ensamble el cual es una combinación de un conjunto de modelos climáticos, dando como resultado un conjunto de proyecciones de precipitación y temperatura para los futuros más probables, de esta forma se reduce la incertidumbre y se logra evaluar el impacto de estos escenarios (Armenta Porras et al., 2016). Los datos proyectados fueron de precipitación y evapotranspiración (derivada de la temperatura), correspondiente a las estaciones finales que hayan sido escogidas en el modelo de regresión. Estas proyecciones se presentan en dos escenarios de Rutas Representativas de Concentración (RCP. 4.5 y 8.5). El RCP 4.5 es un escenario donde el forzamiento radiativo es de 4.5 Watts por metro cuadrado, y tiene un comportamiento de estabilización de los gases de efecto invernadero en el futuro. El RCP 8.5 combina variables energéticas junto con la sobrepoblación, creando un escenario futuro en el que exista una alta demanda de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero aumenten en ausencia de políticas climáticas, siendo este escenario la ruta con mayor emisión de gases de efecto invernadero (R. Castillo & Montero, 2017). El escenario 4.5 considera que el forzamiento radiativo en un futuro se mantendrá estable con una emisión de gases de efecto invernadero de 538 ppm; por otra parte, el escenario 8.5 estima que habrá un amplio crecimiento del forzamiento radiativo con una emisión de gases de efecto invernadero de 936 ppm. Por lo que al escenario 4.5 se lo considera ideal y optimista ya que se logran adaptar estrategias que ayuden a disminuir las emisiones durante los próximos años, mientras que el escenario 8.5 es crítico y pesimista debido a que en estas circunstancias la emisión de gases es descontrolada y va en aumento en el futuro (Pozo, 2018).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Validación del Relleno de Datos

Como se presentó en la sección 3.2.1.3, para la validación del relleno de datos, se incrementó un 5% más de vacíos, para de esta forma analizar la efectividad del método de MissForest, evaluando el mismo con tres métricas (R^2 , KGE y NSE), mencionadas en la sección 3.2.1.4. Los resultados de las métricas al comparar los valores observados con los rellenos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Evaluación del relleno de datos de Caudal

Estaciones	R^2	KGE	NSE
Dudas	0.83	0.91	0.82
Gualaceo	0.93	0.96	0.93
Jadán	0.93	0.92	0.91
Matadero	0.88	0.76	0.84
Mazar	0.8	0.78	0.79
Surucucho	0.75	0.84	0.74
Tarqui	0.9	0.93	0.89
Tomebamba	0.87	0.89	0.85
Yanuncay	0.98	0.98	0.98
Paute AJ Dudas	0.88	0.92	0.88
Paute en Paute	0.96	0.97	0.95

Los resultados expuestos en la Tabla 11 confirman que las modelaciones de caudal fueron óptimas.

De igual manera la Tabla 12, 13 y 14 muestran los resultados de las métricas para las estaciones de precipitación las cuales fueron evaluadas por regímenes.

Tabla 12. Métricas Precipitación Régimen BM1

Precipitación Régimen BM1				
Datos 5% vacíos	R²	KGE	NSE	
Biblián	0.85	0.92	0.84	
Cuenca Aeropuerto	0.95	0.92	0.94	
Cumbe	0.7	0.73	0.7	
Gualaceo	0.91	0.95	0.91	
Jacarín	0.98	0.97	0.98	
Paute	0.7	0.78	0.7	
Ricaurte Cuenca	0.89	0.79	0.83	

Tabla 13. Métricas Precipitación Régimen BM2

Precipitación Régimen BM2				
Datos 5% vacíos	R²	KGE	NSE	
Chanlud	0.95	0.9	0.94	
El labrado	0.87	0.92	0.87	
Piscicola	0.83	0.87	0.82	
Surucucho	0.5	0.67	0.44	
Chanin	0.57	0.59	0.55	

Sigsig	0.74	0.81	0.74
---------------	------	------	------

Tabla 14. Métricas Precipitación Régimen UM2

Precipitación Régimen UM2			
Datos 5% vacíos	R²	KGE	NSE
Palmas Azuay	0.94	0.96	0.94
Peñas Coloradas	0.86	0.93	0.85
Río Mazar Rivera	0.81	0.88	0.81
Sevilla de Oro	0.78	0.84	0.77

Como se observa en las tablas anteriores, los resultados de R², KGE, NSE son satisfactorios, lo que coincide con un estudio realizado por (Stekhoven & Bühlmann, 2011) en el que se destaca la importancia de la aplicación de algoritmos para la modelación de datos. El estudio realizó una comparación de eficiencias entre tres algoritmos de imputación para el relleno de información, siendo uno de estos MissForest, dando como conclusión, que este algoritmo es considerado una buena alternativa para la imputación de datos perdidos, especialmente en variables continuas las cuales se definen como variables que tienen un número infinito de valores y en variables categóricas las cuales se distinguen por tener un número finito de categorías. Además, se reconoce que MissForest es un método de fácil aplicación. Al comprobar que MissForest es un método altamente confiable se puede continuar con los siguientes pasos de la modelación, en este caso MissForest fue aplicado dentro del programa RStudio versión 4.1.

4.2 Modelación Actual

Como se indicó en la sección de materiales y métodos, la modelación se la realizó de la siguiente forma:

- Caudal-Caudal

- Caudal-Precipitación
- Caudal-Evapotranspiración
- Caudal-Precipitación-Evapotranspiración

4.2.1 Modelación de caudal actual con datos de caudal

Dadas las condiciones expuestas en la sección 3.4.1, las estaciones que mostraron más correlación con respecto a la estación de estudio Paute AJ Dudas y las que obtuvieron umbrales menores a 5 en el Factor de Inflación de Varianza son Gualaceo, Matadero y Paute en Paute, cuya ubicación se puede observar en la Figura 9.

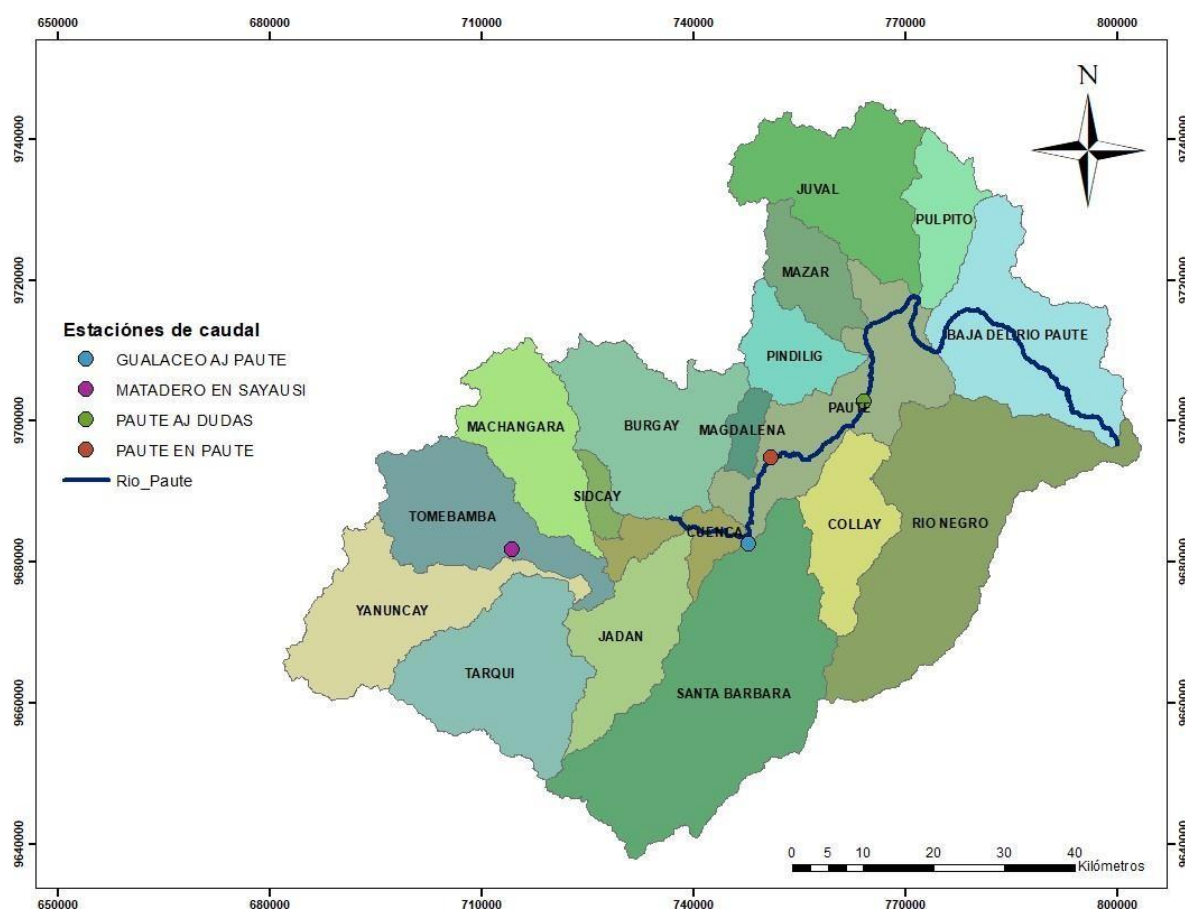


Figura 9. Estaciones seleccionadas de Caudal. Fuente: Elaboración Propia.

Para llegar a este resultado se realizaron en total ocho modelos, los cuales fueron evaluados mediante regresiones y el valor de su umbral de varianza, eliminando las estaciones que no cumplían con esas características, el Anexo 1 y 2 muestran los

resultados de los ocho modelos y sus factores de inflación de varianza. Finalmente se escogieron los tres mejores modelos expuestos en la Tabla 15.

Tabla 15. Modelos estaciones Caudal

	Estaciones	R ²	KGE	NSE
Modelo 1	Gualaceo, Jadán, Mazar, Surucucho, Paute en Paute	0.89	0.92	0.89
Modelo 2	Gualaceo, Matadero, Paute en Paute	0.87	0.91	0.87
Modelo 3	Gualaceo, Jadán, Surucucho	0.84	0.88	0.84

En la Tabla 16 se exponen los factores de inflación de varianza para cada una de las estaciones en los diferentes modelos escogidos, cabe recalcar que los modelos elegidos no solo dependen de este factor sino también de la correlación que existe con la estación de estudio.

Tabla 16. VIF de los modelos de Caudal

	Factor de Inflación de Varianza					
	Gualaceo	Jadán	Mazar	Matadero	Surucucho	Paute en Paute
Modelo 1	4.01	1.78	1.01	---	2.32	4.56
Modelo 2	3.99	---	---	2.29	---	4.14
Modelo 3	1.77	1.61	---	---	2.26	---

Los resultados de la modelación de caudal tanto en el período de calibración y validación se exponen en la Tabla 17:

Tabla 17. Resultados del Modelo de Caudal

Métricas	Calibración	Validación
R^2	0.87	0.89
KGE	0.91	0.79
NSE	0.87	0.82

Se observa que los resultados impartidos por cada métrica son mayores a 0.5 por lo que de acuerdo a la literatura (la cual indica que una modelación es aceptable cuando es posible pronosticar el 50% de varianza), los resultados son considerados como válidos (Moriasi et al., 2007). De igual manera en la Figura 10 y 11 es más sencillo observar que los datos simulados siguen la misma tendencia que los datos observados presentando un modelo satisfactorio, lo cual concuerda con el resultado del coeficiente de determinación que tiene un valor de 0.87.

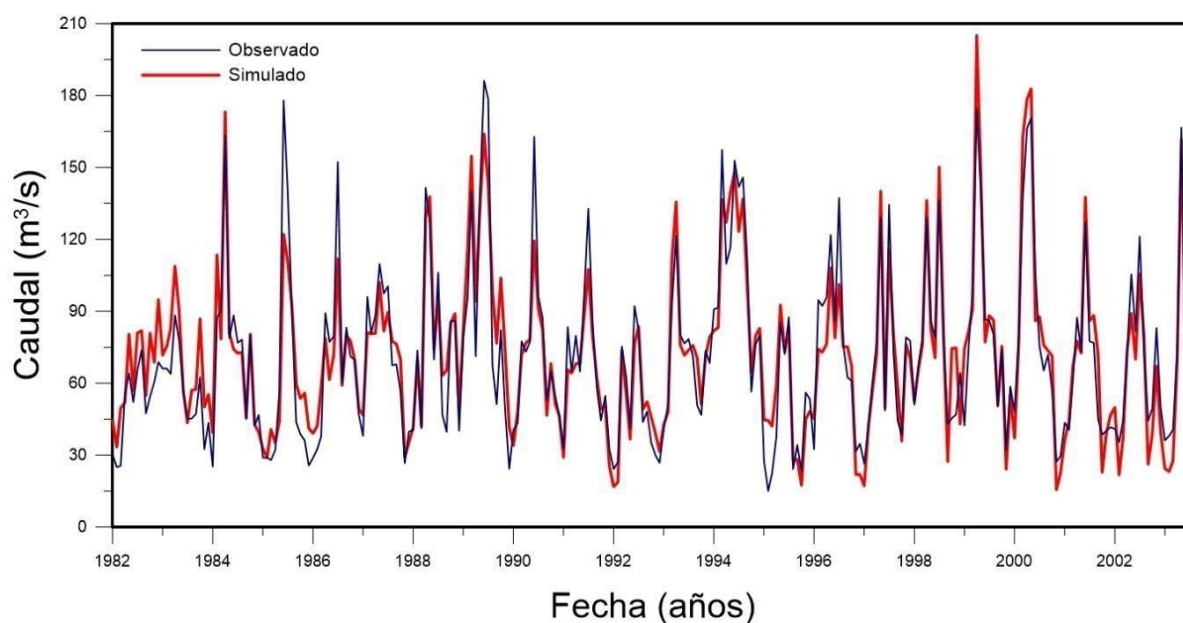


Figura 10. Serie de Tiempo Caudal - Calibración (80%)

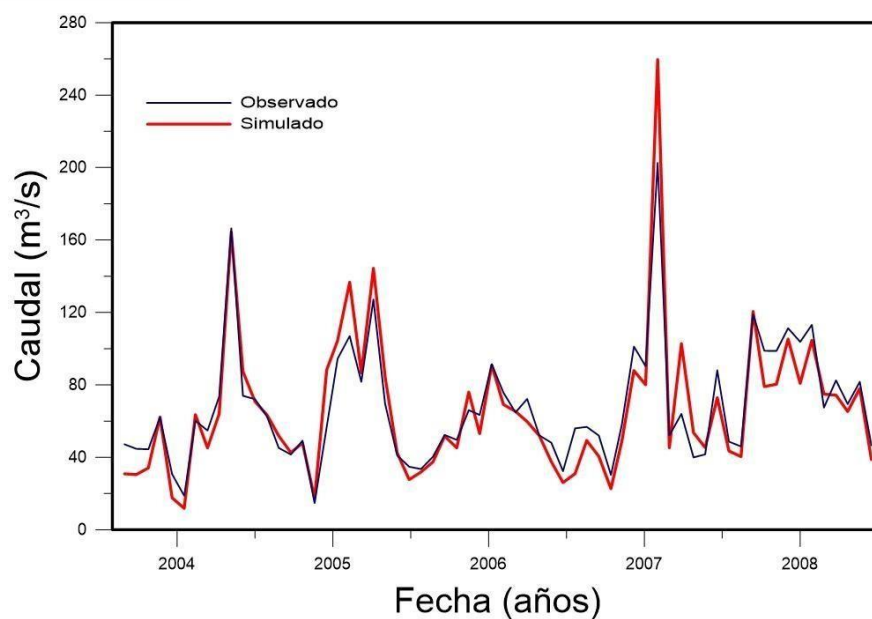


Figura 11. Serie de Tiempo – Validación (20%)

En la Figura 12 y 13, se puede observar que existe una buena correlación entre las variables debido a la buena distribución de datos y sobre todo la cercanía que existe hacia la línea de tendencia por lo que se considera que los datos son bastante realistas en este modelo reafirmando la validez de los valores obtenidos en el coeficiente de determinación siendo de 0.87.

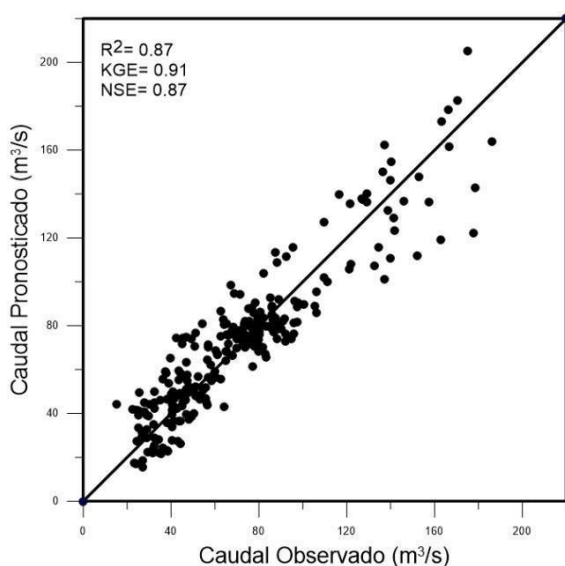


Figura 12. Dispersión 80% Caudal

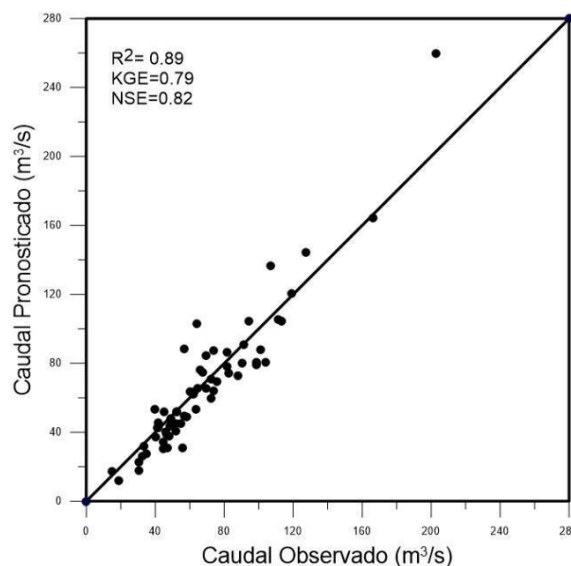


Figura 13. Dispersión 20% Caudal

Como resultado de la modelación fue posible obtener la Ecuación 8 para determinar el caudal en la zona de estudio, específicamente en la estación de Paute AJ Dudas.

$$y = -4.04311 + (1.57702 * G) + (0.96563 * M) + (0.41102 * P) \quad (8)$$

Donde G, M, P correspondes a cada estación Gualaceo, Matadero, Paute en Paute respectivamente.

4.3 Modelación de caudal actual con datos de precipitación

Para evaluar las 18 estaciones de precipitación de una forma más específica se realizaron tres métodos diferentes. El primer método utiliza las 18 estaciones en el mismo análisis, donde se realizaron cuatro modelos, los que se pueden observar en la Tabla 18.

Tabla 18. Modelos Precipitación Primer Método

	Método 1	R ²	KGE	NSE
Modelo 1	Palmas, Peñas, Río Mazar, Sevilla, Sayausí, Paute, Gualaceo, Cumbe, Cuenca Aeropuerto, Biblián, Piscicola, Surucucho, Chanin, Sigsig	0.65	0.72	0.65
Modelo 2	Palmas, Peñas, Río Mazar, Sevilla, Sayausí, Paute, Gualaceo, Cumbe, Cuenca Aeropuerto, Biblián, Chanin, Sigsig	0.63	0.71	0.63
Modelo 3	Río Mazar, Sevilla, Sayausí, Paute, Gualaceo, Cumbe, Cuenca	0.54	0.63	0.54

	Aeropuerto, Biblián, Chanin, Sigsig			
Modelo 4	Chanin, Sigsig, Sevilla de Oro	0.47	0.55	0.47

El modelo 4 es la mejor opción, debido a que al tener menos estaciones es más probable que los resultados sean más realistas, a diferencia de los otros modelos que a pesar de sus buenos resultados el aplicar un modelo con muchas estaciones podría aumentar el índice de error. El factor de inflación de varianza de este método se presenta en el Anexo 3

El segundo método considera las estaciones más cercanas que se encuentran dentro de un radio de 20 km aproximadamente a la estación de estudio, se consideró que esta sería una distancia prudente debido a que las demás estaciones sobrepasan los 30 km, además con esta distancia se incluyeron seis estaciones con las cuales es posible realizar diferentes modelos bajo el criterio de backward elimination que sean significativos, en este caso se realizaron tres modelos en total para las estaciones de precipitación, los cuales se los puede ver en la Tabla 19.

Tabla 19. Modelo Precipitación Segundo Método

	Método 2	R²	KGE	NSE
Modelo 1	Palmas, Peñas, Río Mazar, Sevilla, Paute, Chanin	0.63	0.71	0.63
Modelo 2	Río Mazar, Sevilla de Oro, Paute, Chanin	0.53	0.62	0.53
Modelo 3	Río Mazar, Sevilla de Oro y Chanin	0.53	0.62	0.53

De igual manera se usaron los mismos criterios usados anteriormente, por esa razón se escogió el modelo tres el cual contiene una menor cantidad de estaciones, en cuanto a métricas no tiene una diferencia relevante a comparación con los otros dos modelos y como se mencionó anteriormente al tener un menor número de variables dentro del modelo, el error disminuye. De igual forma los resultados del VIF de este método se observa en el Anexo 4

Finalmente, el tercer modelo considera las estaciones según sus regímenes BM1, BM2, UM2, como se había explicado en la sección 3.2.1. Para cada uno de estos regímenes se desarrollaron diferentes modelos, para el régimen BM1 se desarrollaron cuatro modelos, para el régimen BM2 se aplicaron cinco modelos y para el régimen UM2 dos modelos, los cuales se muestran en el Anexo 5, 7 y 9, de cada uno de estos regímenes se escogió el mejor modelo, para finalmente realizar un último modelamiento en conjunto con las estaciones de cada uno de los modelos elegidos dentro de cada régimen. Para este modelo final se contaron con tres estaciones pertenecientes al régimen BM1, dos estaciones del régimen BM2 y dos del régimen UM2, con un total de seis estaciones. De este conjunto de estaciones se realizaron dos modelos que se observan en la Tabla 20.

Tabla 20. Modelos Precipitación Tercer Modelo

	Método 3	R²	KGE	NSE
Modelo 1	Palmas, Peñas Coloradas, Paute, Cumbe, Cuenca Aeropuerto, Chanin, Sigsig	0.63	0.71	0.63
Modelo 2	Palmas, Peñas Coloradas, Chanin	0.62	0.70	0.62

Para el tercer método se escogió el modelo número dos el cual tiene un menor número de estaciones, pero sin embargo los valores de sus métricas son bastante acertados. Los resultados del factor de inflación de varianza de cada modelo del tercer método se observan en el Anexo 6, 8, 10.

Como último paso se eligió el mejor modelo de cada uno de los métodos realizados, los cuales se observan en la Tabla 21.

Tabla 21. Mejores modelos de precipitación de cada método.

	Estaciones Seleccionadas Precipitación	R²	KGE	NSE
Método 1	Chanin, Sigsig, Sevilla de Oro	0.47	0.55	0.47
Método 2	Río Mazar, Sevilla de Oro, Chanin	0.55	0.63	0.55
Método 3	Palmas, Peñas Coloradas, Chanin	0.62	0.70	0.62

El Factor de Inflación de Varianza de cada modelo se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22. VIF de los modelos finales de Precipitación

Factor de Inflación de Varianza			
Método 1	Chanin	Sigsig	Sevilla de Oro
	1.68	1.64	1.23
Método 2	Río Mazar	Sevilla de Oro	Chanin
	1.94	1.71	1.36
Método 3	Palmas	Peñas Coloradas	Chanin
	4.40	3.70	1.42

De esta manera se puede decir que el método tres es el que tiene una mejor eficacia para la modelación de caudales en el sitio de estudio, por lo que finalmente se escogieron las tres estaciones que aparecen en el modelo las cuales se pueden observar en la Figura 14.

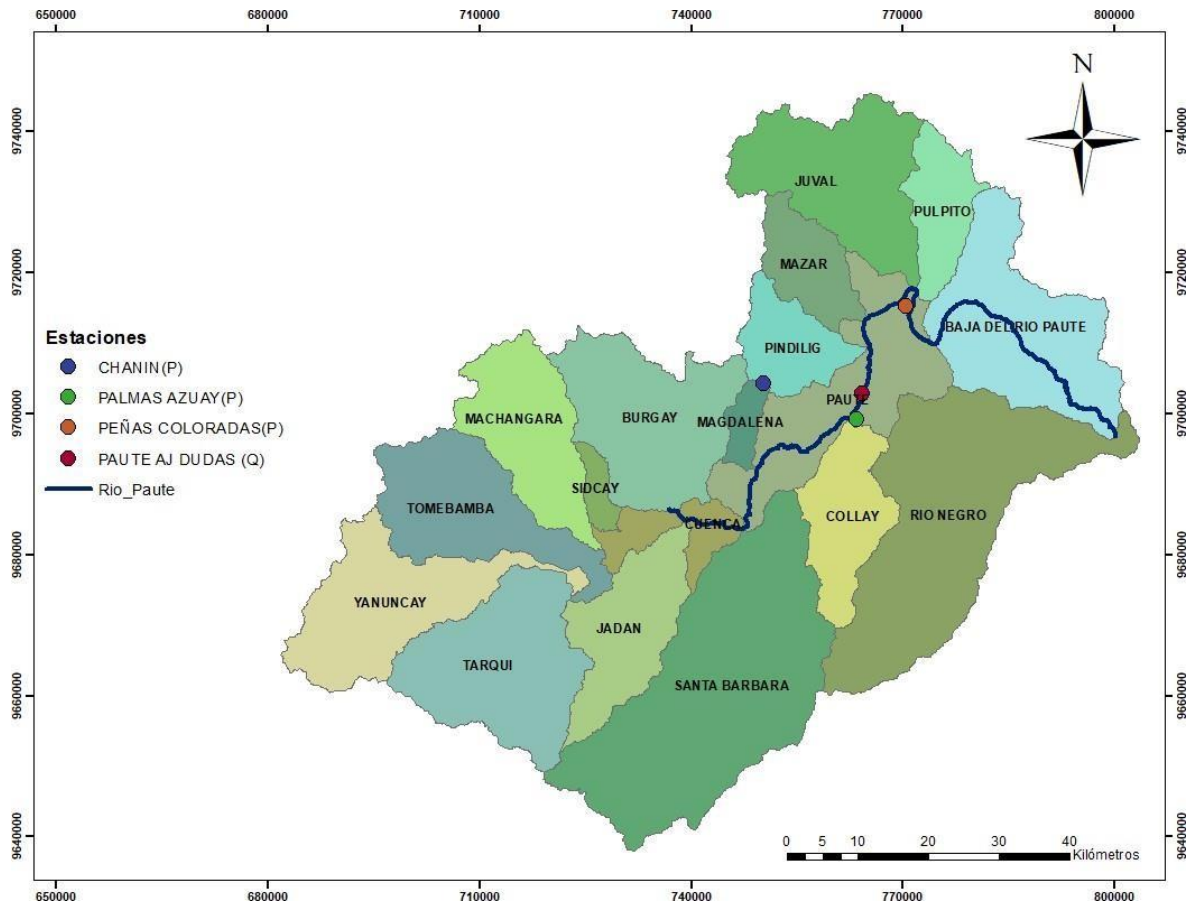


Figura 14. Estaciones seleccionadas para el modelo de caudal con datos de precipitación.

Los resultados de la calibración y modelación de las estaciones de precipitación se presentan en la Tabla 23:

Tabla 23. Resultados del Modelo de Precipitación

Métricas	Calibración	Validación
R²	0.62	0.75
KGE	0.70	0.78
NSE	0.62	0.73

Los resultados del modelo de precipitación es de 0.62 por lo que cumple con lo mencionado anteriormente ya que sus valores están por encima de 0.5, considerándolo un

modelo aceptable de acuerdo a la literatura (Moriassi et al., 2007). Las Figuras 15 y 16 mostradas a continuación son gráficas de serie de tiempo, las cuales representan la simulación de datos de precipitación. En las líneas que se muestran en la figura se puede observar cómo los picos entre los datos observados y simulados no coinciden completamente, sin embargo, el comportamiento se mantiene, pocos son los casos en que el comportamiento de los datos cambie. Los resultados de validación para este análisis son mayores que los de calibración, eso según la literatura sucede en los casos donde los datos simulados sobrestiman a los valores observados por lo que genera un error en los resultados de validación, sin embargo, no se considera que el modelo no sea válido (Knoche et al., 2014). Como se observa en la Figura 15 la cual presenta la calibración del modelo, ciertos picos de la simulación sobrestiman los valores observados.

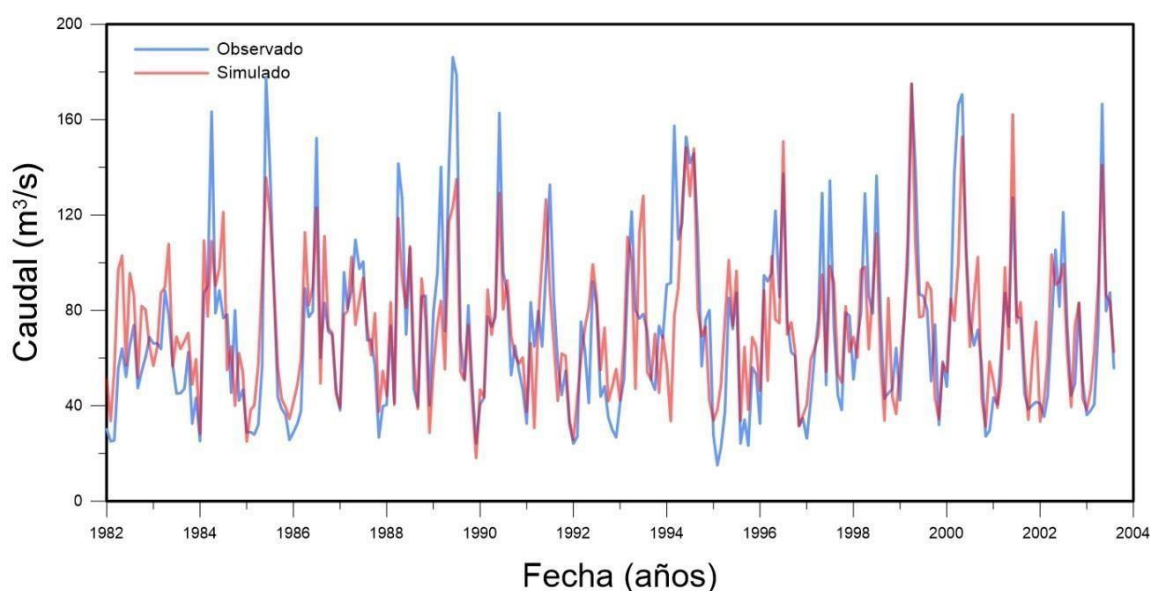


Figura 15. Serie de tiempo de caudal utilizando datos de precipitación - Calibración (80%)

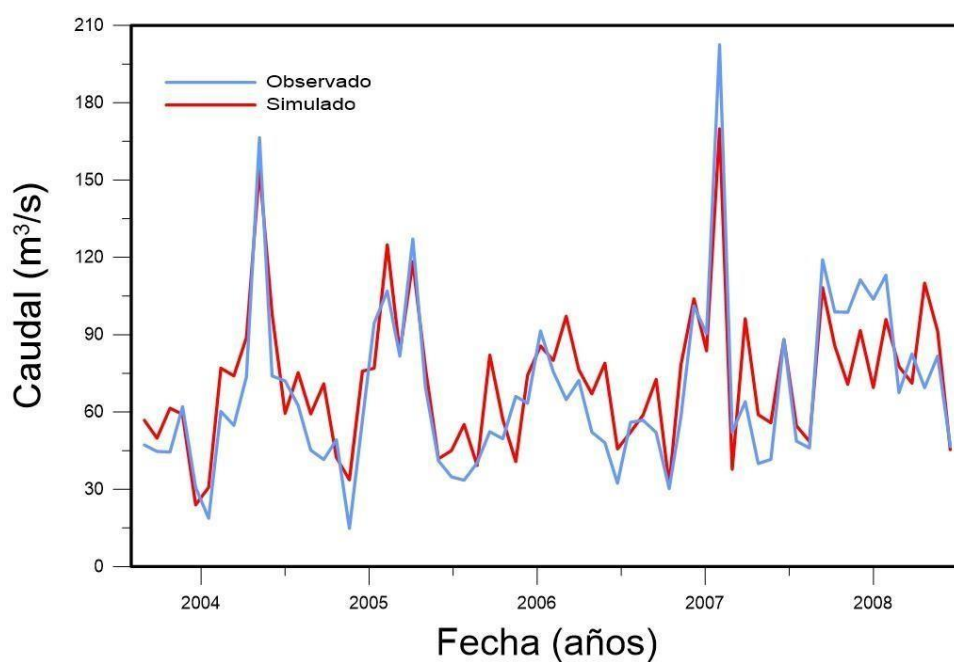


Figura 16. Serie de tiempo de caudal utilizando datos de precipitación - Validación (20%)

La dispersión en el caso de los datos de precipitación es un poco menos certera, que la que observamos con los datos de caudal, como se observa en la Figura 16 y 17, sin embargo, para el modelo que se está ejecutando la correlación que existe entre estos datos es favorable, coincidiendo con el valor obtenido en el coeficiente de determinación que es de 0.62

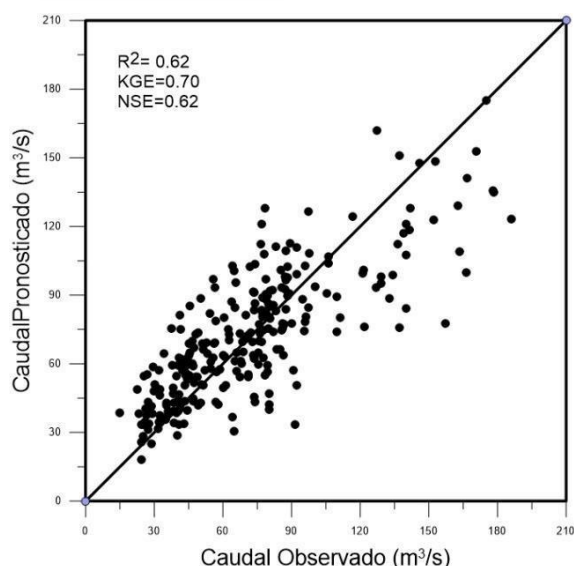


Figura 17. Gráfico de dispersión para el periodo de calibración.

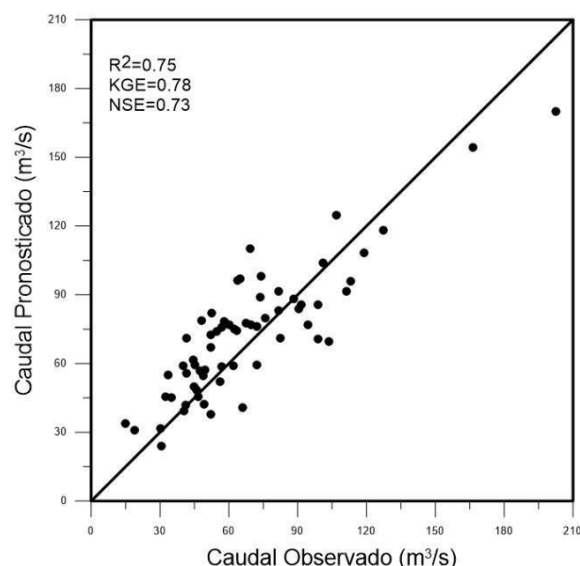


Figura 18. Gráfico de dispersión para el período de validación.

La ecuación final del modelo de caudal vs precipitación se presenta en la Ecuación 11:

$$y = 9.43505 + (0.27826 * P) + (0.05679 * Pe) + (0.17600 * C) \quad (11)$$

Donde las iniciales P, Pe y C, corresponden a cada estación Palmas, Peñas Coloradas y Chanin, respectivamente.

4.4 Modelación de caudal actual con datos de evapotranspiración

Los datos de evapotranspiración fueron obtenidos a partir de la temperatura utilizando el sistema NASA-POWER como se mencionó en la sección de materiales y métodos. NASA-POWER ha sido utilizado por varios autores para estudios meteorológicos. Para comprobar la fiabilidad del Sistema NASA-POWER un estudio tenía como objetivo evaluar la veracidad de la temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento provenientes de este sistema, comparando esta información con datos obtenidos de 14 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el mundo, dando como resultado que la información obtenida de NASA-POWER y la información de las estaciones meteorológicas son muy similares en todas las variables, con un coeficiente de determinación de 0.82, por lo que se concluye que NASA-POWER es un sistema apto para ser utilizado en la generación de datos meteorológicos que no estén disponibles

(Rodrigues & Braga, 2021). En un estudio realizado en Argentina, una de las variables a analizar con este sistema fue la radiación solar, la cual es considerada una de las principales fuentes de energía renovable, en el estudio se pretende analizar y comparar los datos de radiación solar de la base de datos NASA-POWER con datos registrados por estaciones meteorológicas. Dando como resultado que los valores del coeficiente de determinación entre la radiación solar de NASA-POWER como la radiación de las estaciones meteorológicas supera el 0.90 lo que indica una buena simulación por parte del sistema (S. Sayago, G. Ovando, 2018). Otro estudio que pretende determinar la distribución de CO₂ en una zona de México, utiliza el mismo sistema NASA-POWER para obtener los datos de temperatura, velocidad del viento y presión y con esto se realizó una estimación de los niveles de contaminación para los años 2019 y 2020 (Aguilera Pizano et al., 2021). Por lo que este método fue utilizado para rellenar y corregir datos de temperatura los cuales se utilizaron para finalmente obtener datos de evapotranspiración usados en los siguientes modelos.

Se realizaron cinco modelos en total de evapotranspiración con las 8 estaciones, como se mencionó en la sección 3.4, estos modelos fueron realizados por regresión lineal múltiple bajo criterios de backward elimination. Los resultados de estos modelos se observan en la Tabla 24.

Tabla 24. Modelos Caudal vs Evapotranspiración

	Modelos	R²	KGE	NSE
Modelo 1	Biblián, Cuenca Aeropuerto, El Labrado, Jacarin, Palmas, Paute, Peñas	0.30	0.36	0.30
Modelo 2	Biblián, El labrado, Jacarin, Palmas, Peñas	0.20	0.22	0.20
Modelo 3	Biblián, El labrado, Jacarin, Palmas	0.09	0.07	0.09
Modelo 4	Biblián, Cuenca Aeropuerto, Palmas	0.27	0.33	0.27
Modelo 5	Biblián, Cuenca Aeropuerto, Labrado	0.26	0.3	0.26

El Factor de Inflación de Varianza de cada una de las estaciones se presenta en la Tabla 25:

Tabla 25. Factor de Inflación de Varianza Modelos Evapotranspiración

Factor de Inflación de Varianza							
	Biblián	Cuenca Aer	El Labrado	Jacarin	Palmas	Paute	Peñas
Modelo 1	6.30	21.39	2.23	3.88	4.02	35.78	22.84
Modelo 2	5.90	---	1.76	3.01	3.43	---	7.29
Modelo 3	1.78	---	1.75	2.84	2.06	---	---
Modelo 4	4.82	4.05	1.43	---	---	---	---
Modelo 5	3.92	4.51	---	---	1.60	---	---

Finalmente se escogió el cuarto modelo por ser el de mejor resultados, las estaciones escogidas fueron Biblián, Cuenca Aeropuerto, Palmas, las que se muestran en la Figura 19.

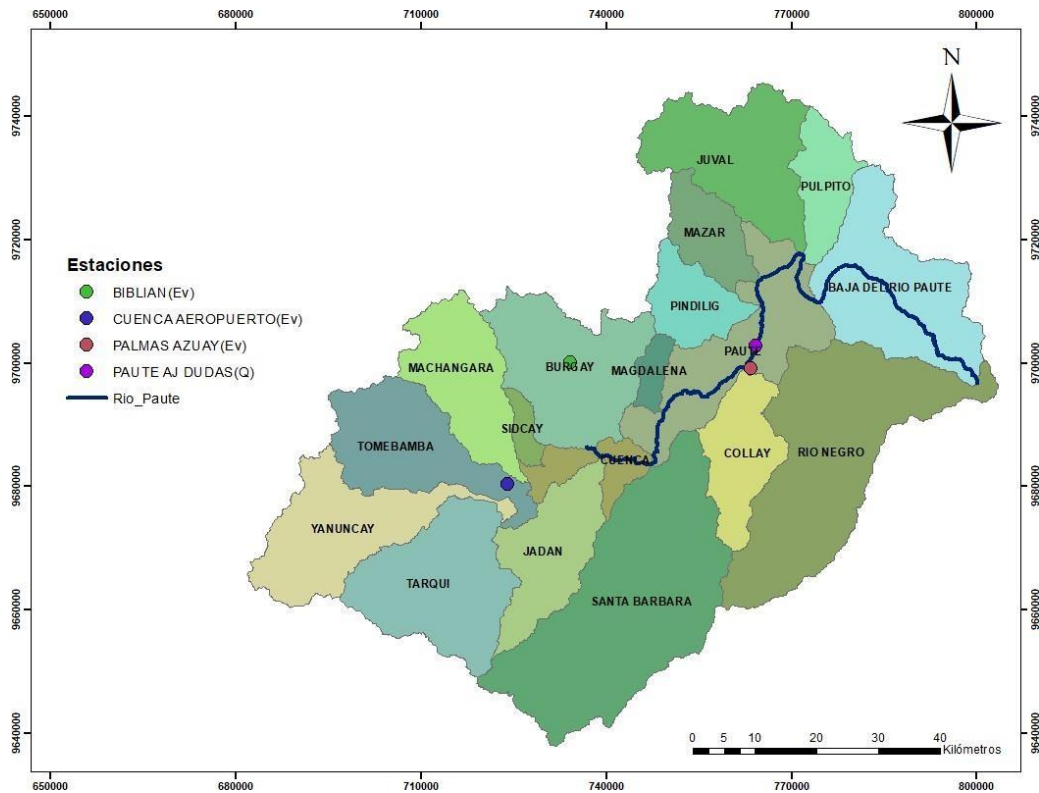


Figura 19. Estaciones seleccionadas para el modelo de caudal con datos de evapotranspiración.

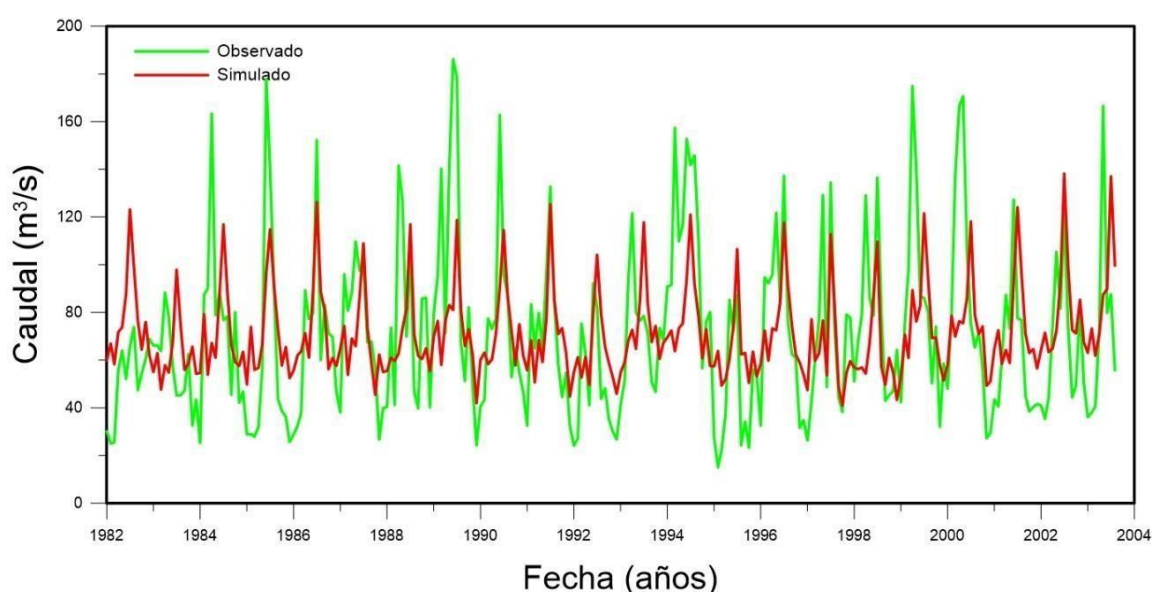
Los resultados de la calibración y validación del modelo de evapotranspiración se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Resultados del Modelo de Caudal vs Evapotranspiración

Métricas	Calibración	Validación
R²	0.27	0.06
KGE	0.33	0.15
NSE	0.27	-0.07

En el caso de la evapotranspiración las gráficas de serie de tiempo tienen una diferencia bastante notoria, pues los datos simulados casi que no se acercan a los datos observados,

esto puede darse debido a que la evapotranspiración es una variable conformada por una serie de factores climáticos que intervienen en ella, para nuestro caso, la evapotranspiración es estimada únicamente con una variable (temperatura) mediante el método de Thornthwaite. Además, la evapotranspiración es capaz de explicar únicamente el 27% de la varianza en la serie de caudal, por lo que al utilizar en combinación con otras variables podría dar una explicación más alta. Dicho esto, la predicción en este caso no puede ser óptima, de todas maneras, los datos tienen un comportamiento similar y es aplicable al modelo, tal como se observa en la Figura 20 y 21.



*Figura 20. Serie de tiempo de caudal utilizando datos de evapotranspiración -
Calibración (80%)*

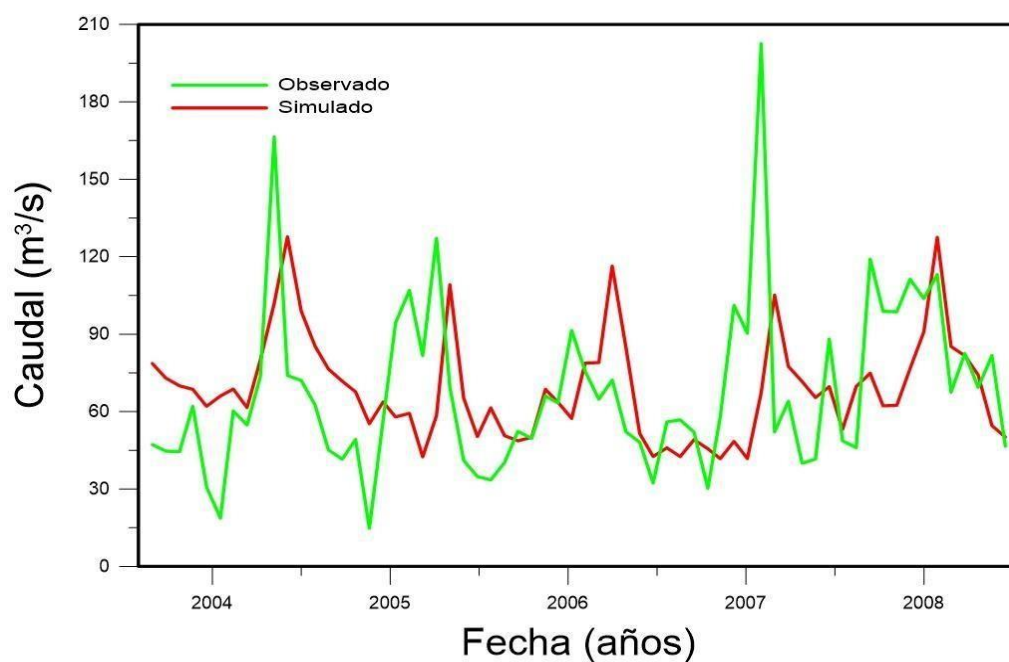


Figura 21 Serie de tiempo de caudal utilizando datos de evapotranspiración - Validación (20%)

Como se mencionó anteriormente en las gráficas de serie de tiempo, la evapotranspiración es una variable en la que influyen diferentes factores, por esto los resultados en las Figuras 22 y 23 se expresan de esta manera, en donde los datos se encuentran alejados de la línea de tendencia.

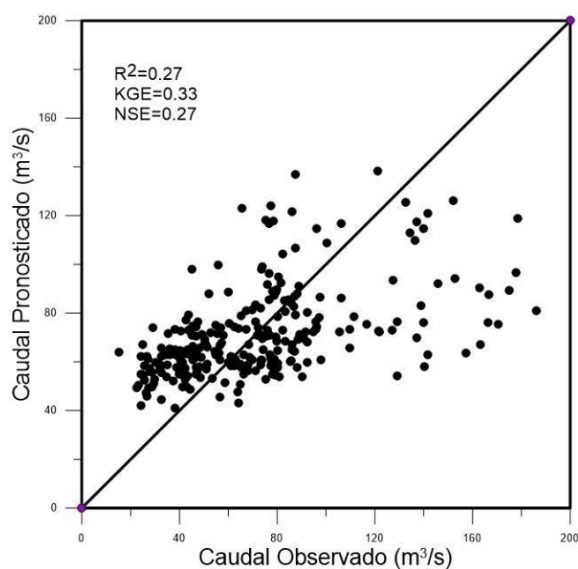


Figura 22. Gráfico de dispersión para el periodo de calibración

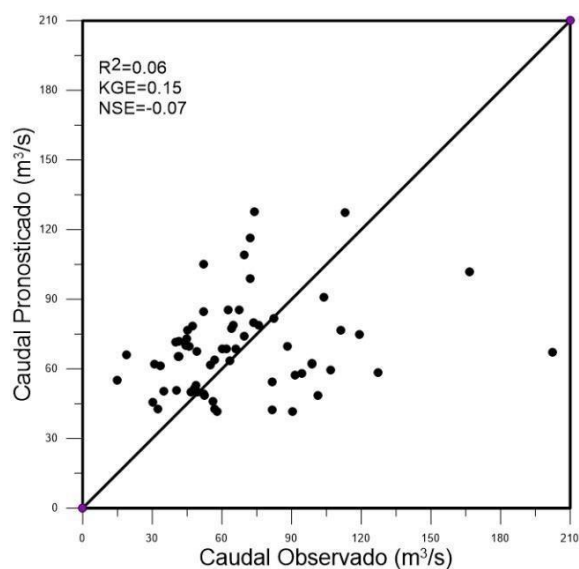


Figura 23. Gráfico de dispersión para el periodo de validación.

La Ecuación 12 del modelo de evapotranspiración es la siguiente:

$$y = 125.9356 + B1(3.7282) + C2(-5.7101) + P3(1.1725) \quad (12)$$

Donde B, C y P corresponden a las estaciones elegidas Biblián, Cuenca y Palmas respectivamente.

El estudio realizado por Ruíz Alvarez et al. (2018), en España, realizó proyecciones de evapotranspiración en diferentes escenarios RCP con diferentes modelos climáticos, dando como resultado que la evapotranspiración en cada uno de los escenarios estudiados aumentara en diferente magnitud, esto afectando a la temperatura y precipitación de la zona, por lo que un cambio en esta variable meteorológica causa una alteración en muchas otras variables incluyendo el caudal. Si bien los resultados obtenidos son bajos en comparación con otros estudios en los que utilizan evapotranspiración como el estudio realizado en Australia por Zhang et al. (2020), el cual buscó analizar el potencial en el uso de modelos hidrológicos (Xinjiang y SIMHYD) usando como variable independiente la evapotranspiración con la ayuda de sensores remotos, esta aplicación es de suma importancia para las cuencas que contienen poca a nula información. Dicho modelo se realizó en 222 cuencas en distintas partes del país. Los resultados del modelo son alentadores, particularmente en la modelación de escorrentía a escalas mensuales para cuencas más húmedas. Sin embargo, para el periodo diario y para cuencas más secas se consideró que el modelo fue relativamente pobre. Esto se da principalmente por la forma en la que se obtienen los datos de evapotranspiración, por lo que, para futuras modelaciones si es posible obtener estos datos incluyendo todas las variables que intervienen en ella, el modelo podría mejorar significativamente.

4.5 Modelación de caudal actual con datos de caudal, precipitación y evapotranspiración

Por medio de las métricas establecidas anteriormente en la sección 3.2.1.4 y bajo las condiciones mencionadas en la sección 3.4 en la que se establece que valores mayores a 0.5 son considerados aceptables se logró definir las estaciones para cada variable de caudal, precipitación y evapotranspiración. El último paso de esta etapa es conseguir un

modelo en conjunto con todas las variables. Para asegurarnos de tener un modelo adecuado, se realizaron 5 modelos en total, utilizando las variables de precipitación, caudal y evapotranspiración, con regresión lineal múltiple bajo el criterio de backward elimination (Wang et al., 2013), mencionado en la sección 3.4, de esta forma se eligió el mejor modelo, el cual será utilizado en la siguiente etapa de la investigación.

La Tabla 27 presenta las estaciones que entran en el modelo final de cada variable: Precipitación (P), Caudal (C), Evapotranspiración (E).

Tabla 27. Estaciones pre-seleccionadas

Precipitación (P)	Peñas Coloradas
	Palmas
	Chanin
Caudal (C)	Gualaceo
	Matadero
	Paute en paute
Evapotranspiración (E)	Biblián
	Cuenca Aeropuerto
	Palmas

Así mismo, para obtener los modelos finales se aplicó el mismo procedimiento detallado en la sección 3.4, una regresión lineal múltiple bajo el criterio de backward elimination. Los mejores modelos se pueden observar en la Tabla 28:

Tabla 28. Modelos Finales de caudal.

Modelo	Estaciones	R ²	KGE	NSE
1	Palmas (P) Gualaceo (C) Matadero (C) Paute en Paute (C) Biblián (E) Cuenca (E)	0.90	0.93	0.90
2	Palmas (P) Matadero (C) Paute en Paute (C) Biblián (E) Cuenca (E)	0.86	0.90	0.86
3	Palmas (P) Matadero (C) Gualaceo (C) Biblián (E) Cuenca (E)	0.88	0.91	0.88
4	Palmas (P) Gualaceo (C) Matadero (C)	0.87	0.91	0.87
5	Palmas (P) Matadero (C) Cuenca (E)	0.72	0.79	0.72

Estos cinco modelos fueron analizados, llegando a la conclusión de que el cuarto modelo es el mejor para estimar valores actuales de caudal, a pesar de que este no cuenta con ninguna variable de evapotranspiración. Esto debido a que como se observó anteriormente, esta variable no aportaba una predicción de varianza alta, por lo que no influye significativamente en el análisis. Las estaciones finales se muestran en la Figura 24.

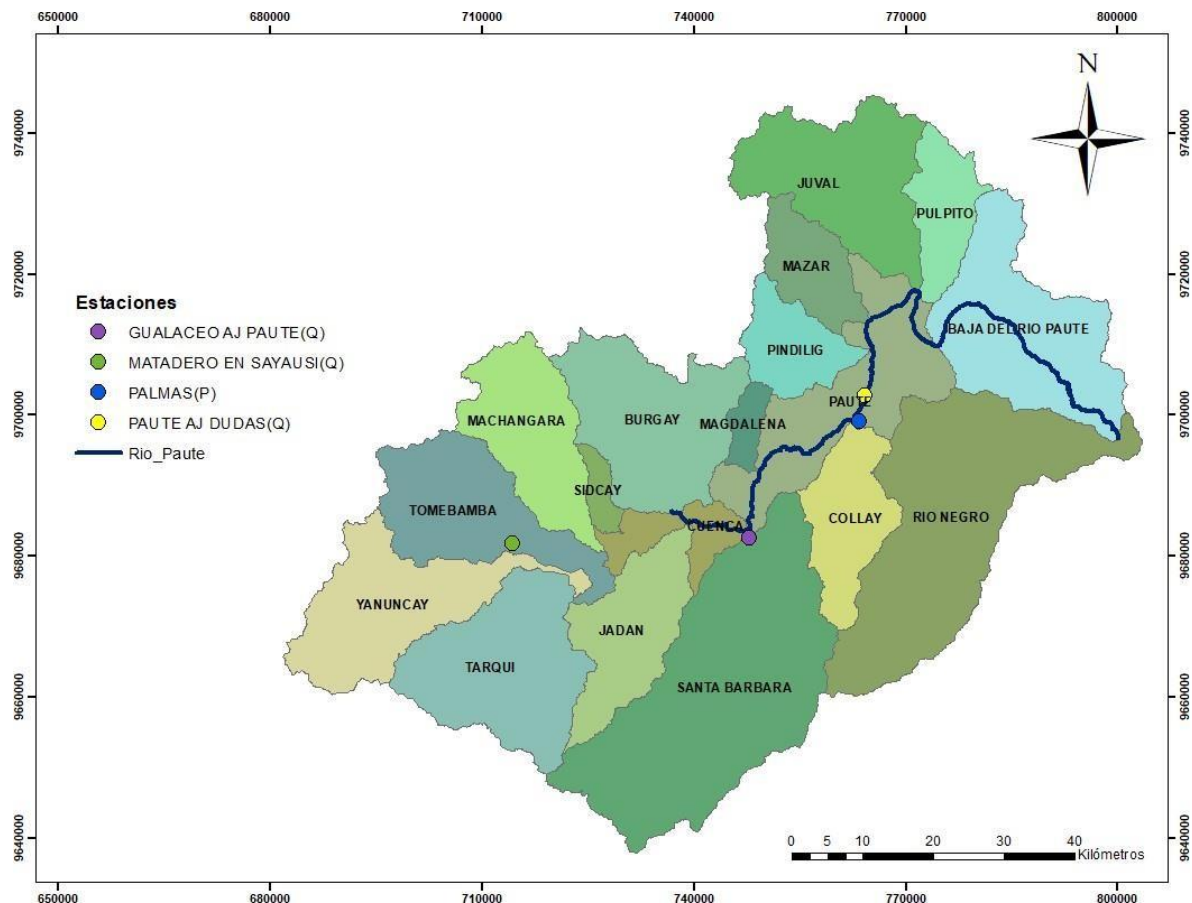


Figura 24. Estaciones seleccionadas para el modelo actual.

El resultado del modelo final se muestra en la Tabla 29 siendo entonces un modelo con un alto nivel de eficacia.

Tabla 29. Resultados Modelo Final

Métricas	Calibración	Validación
R^2	0.87	0.82

KGE	0.91	0.70
NSE	0.87	0.67

La Ecuación 13 es el resultado final:

$$y = -9.79248 + (0.14654 * P) + (1.94607 * G) + (1.38261 * M) \quad (13)$$

Los resultados de este modelo muestran un coeficiente de correlación de 0.87, cumpliendo con lo que indica la literatura (Moriasi et al., 2007), que ha valores mayores a 0.5 el modelo es considerado aceptable un modelo, en este caso el modelo podría considerarse bastante satisfactorio.

En el modelo actual las Figuras 25 y 26, muestran que los datos simulados muchas de las veces coinciden con los valores máximos de los datos observados, sin embargo en algunos casos estos no llegan a alcanzar o al contrario sobreestiman el valor original, cabe mencionar que en este modelo se están evaluando tres variables en función del caudal. Sin embargo, los datos presentan una correlación aceptable, coincidiendo con los resultados del coeficiente de determinación, por lo que los resultados son válidos para el modelo.

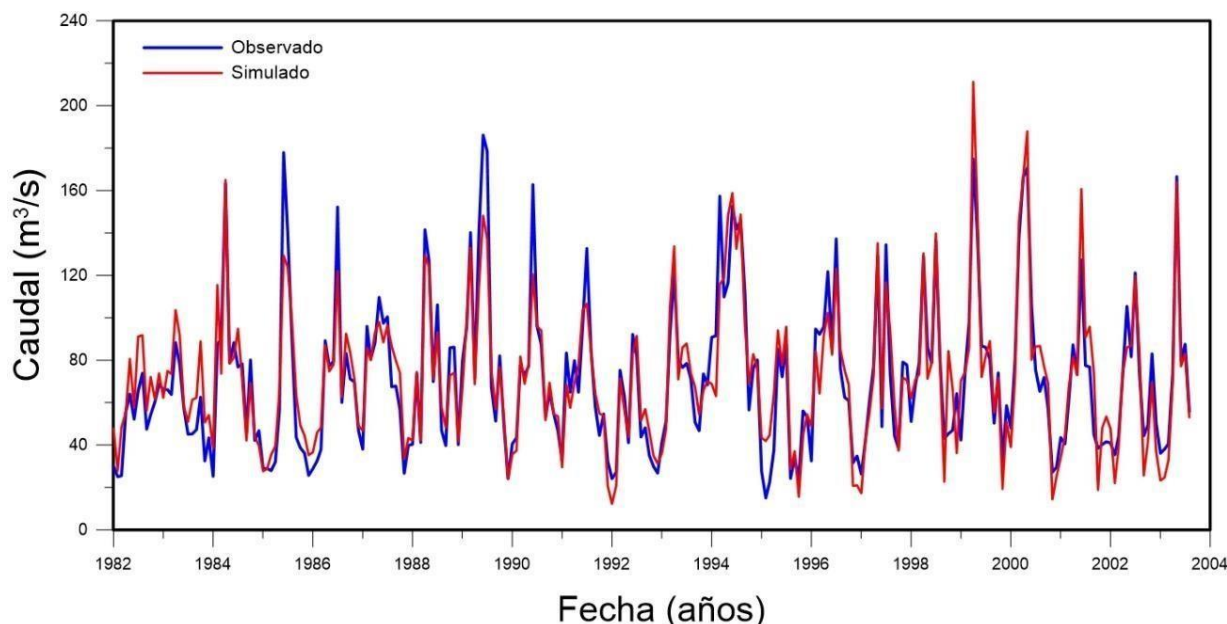


Figura 25. Serie de tiempo utilizando el modelo actual 80%

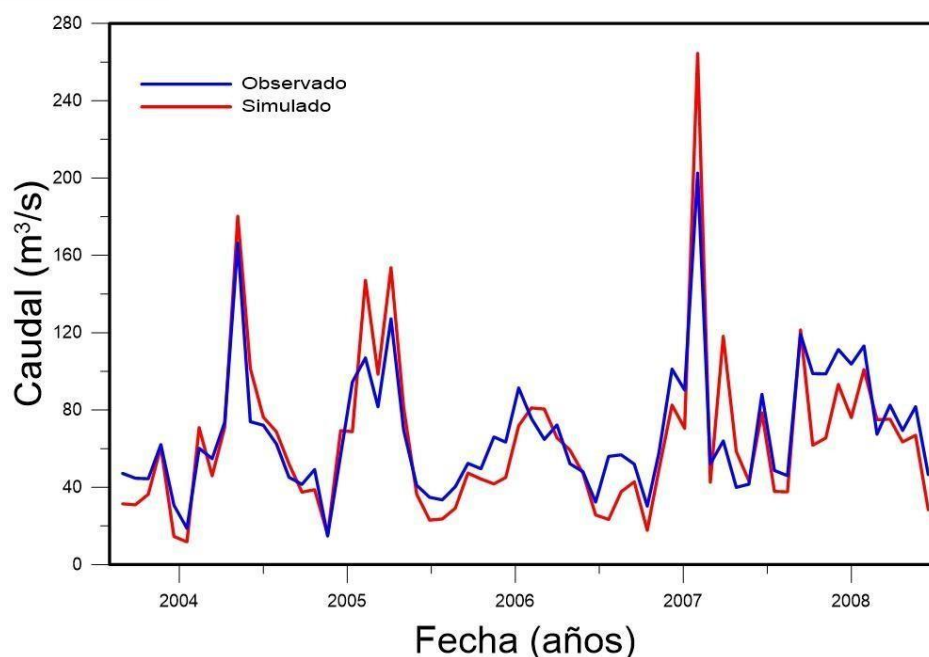


Figura 26. Serie de tiempo utilizando el modelo actual 20%

En las gráficas de dispersión presentadas a continuación se puede tener una mejor interpretación de resultados del modelo actual ya que se presentan valores cercanos a la línea de tendencia, lo que genera credibilidad en el uso de este modelo ya que coincide también con los resultados impartido por las métricas expuestas anteriormente.

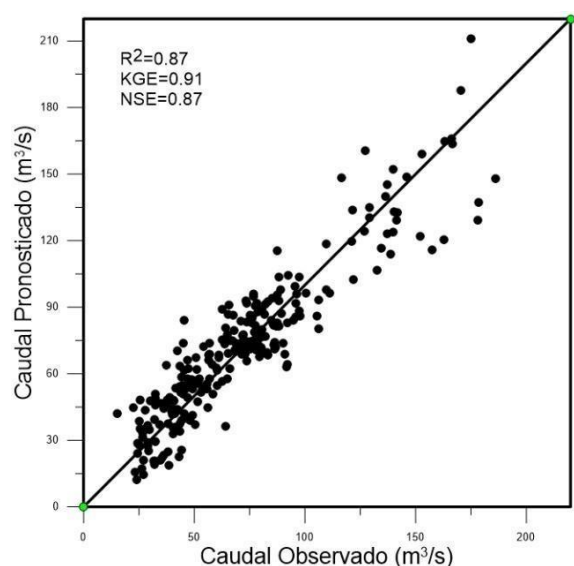


Figura 28. Gráfica de dispersión para el periodo de calibración

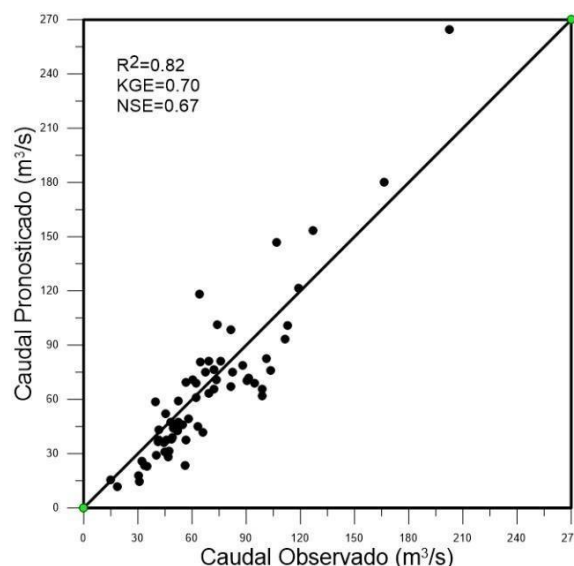


Figura 27. Gráfica de dispersión para el periodo de validación

4.6 Modelación de caudal futuro

Se realizó también un modelo para analizar el caudal futuro como se indicó en la sección de materiales y métodos, para lo cual se utilizaron dos variables para este análisis, precipitación proyectada y evapotranspiración (derivada de la temperatura proyectada) para el período futuro (2011-2050). Estas variables fueron entradas para el modelo de regresión lineal con la finalidad de evaluar los caudales futuros (la variable de caudal no fue incluida en el modelo de regresión debido que no se cuenta con ninguna información futura sobre esta variable). Para pronosticar el caudal futuro en función de nuestras variables, se realizaron modelos de regresión lineal múltiple bajo los mismos criterios mencionados anteriormente en la sección 3.4, con respecto a las estaciones seleccionadas de precipitación y evapotranspiración, las cuales fueron analizadas por las métricas R^2 , KGE y NSE. En la Tabla 30 se muestran la configuración de los modelos realizados:

Tabla 30. Modelos Futuros

Modelo	Estaciones	R^2	KGE	NSE
1	Palmas (P)	0.63	0.71	0.63
	Chanin (P)			
	Biblián (E)			
	Cuenca (E)			
2	Palmas (P)	0.61	0.69	0.61
	Chanin (P)			
	Biblián (E)			
3	Palmas (P)	0.61	0.69	0.61
	Chanin (P)			
	Biblián (E)			
	Palmas (E)			

4	Palmas (P)	0.62	0.70	0.62
	Chanin (P)			
	Cuenca (E)			
5	Palmas (P)	0.61	0.69	0.61
	Chanin (P)			

El quinto modelo fue el que brindaba un mejor resultado, a pesar de que este solo cuenta con estaciones de precipitación, relegando la variable de evapotranspiración fuera del análisis de caudal futuro. Además, se puede observar que tres de los modelos realizados tienen valores similares en sus métricas; sin embargo se considera al quinto modelo como la mejor alternativa.

Se conoce que la evapotranspiración es un factor climático importante el cual tiene una gran influencia en el caudal que existe en una cuenca, variables como la precipitación y evapotranspiración presentan una gran influencia sobre los niveles de esorrentía, el mismo que se conoce como el flujo de agua el cual no se infiltra formando cursos de agua superficial la cual contribuye en los niveles de caudal (Liñan & Panez, 2020).

A pesar de la importancia que tiene la evapotranspiración en el cálculo del caudal, en el presente estudio estadísticamente está variable no presento resultados satisfactorios, así como se observa en la Figura 20 la cual expresa la relación que existe entre caudal y evapotranspiración, en donde se puede observar que se tiene una dinámica similar sin embargo, se puede percibir que los datos de caudal simulados presentan un retraso (lag) de aproximadamente un mes.

Dicho esto, se considera que al aplicar un retraso en los datos de evapotranspiración con respecto al caudal, esto mejore significativamente los resultados de esta variable. Se optó por utilizar el modelo que contiene solo la variable de precipitación, la cual influye de una manera más significativa. Las estaciones seleccionadas se muestran en la Figura 29.

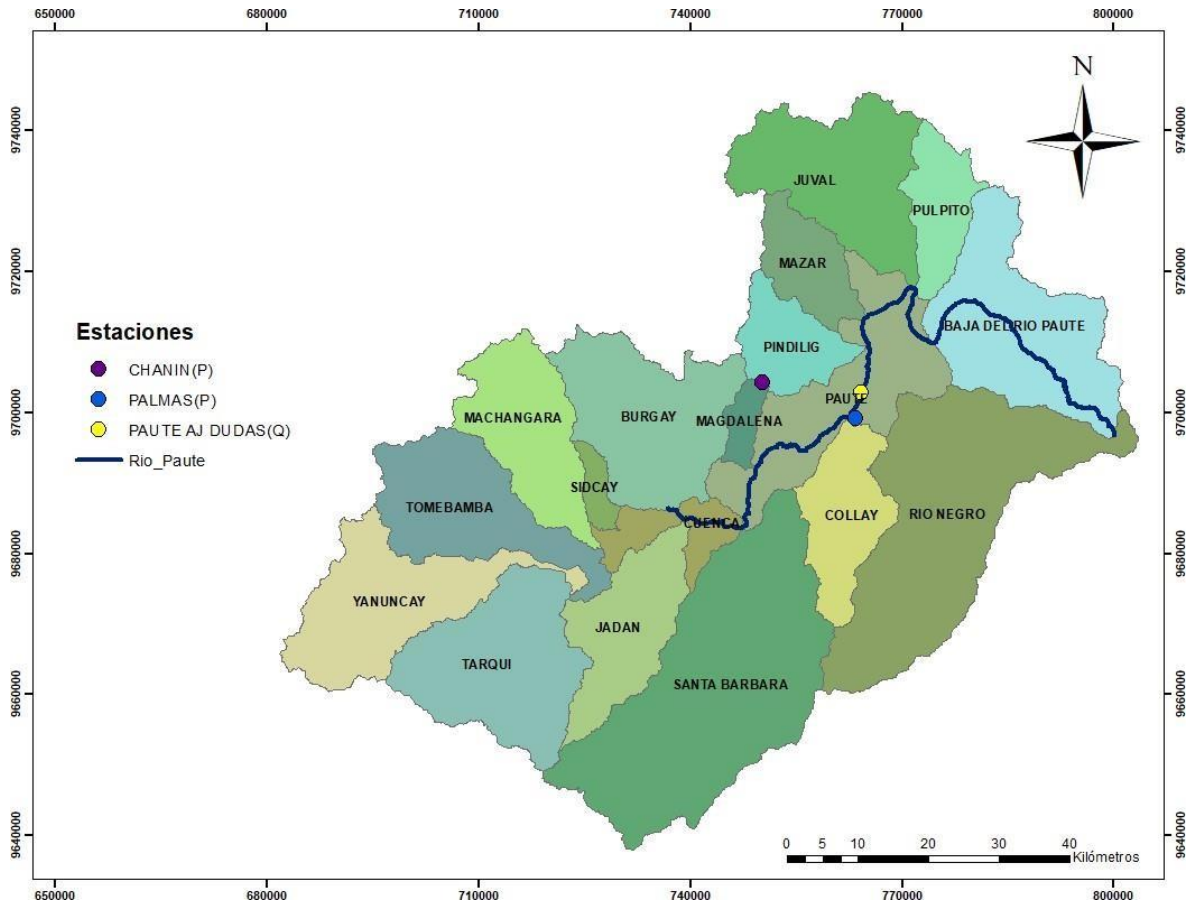


Figura 29. Estaciones seleccionadas para el modelo futuro.

La calibración y validación del modelo se presenta en la Tabla 31:

Tabla 31. Resultado Modelo Futuro

Métricas	Calibración	Validación
R²	0.61	0.70
KGE	0.69	0.77
NSE	0.61	0.69

La Ecuación 14 será utilizada para las proyecciones futuras de caudal:

$$y = 11.50867 + P(0.39507) + C(0.16119) \quad (14)$$

Donde P y C representan las estaciones de Palmas y Chanin respectivamente.

Las Figuras 30 y 31 muestran la serie de tiempo de calibración y validación del modelo el cual será utilizado para la predicción de caudal futuro bajo las condiciones de cambio climático, estas gráficas muestran que los resultados de la simulación tienen un comportamiento similar a los datos observados de caudal, sin embargo, en algunos periodos de tiempo se puede observar que el modelo subestima los valores reales y en otros casos los resultados son sobreestimados. A pesar de estas observaciones, los valores obtenidos de calibración y validación ($R^2=0.61$ y 0.70) y lo que se puede observar en el gráfico de dispersión, indican que el modelo seleccionado es adecuado para ser usado en la predicción futura, ya que su coeficiente de determinación cumple con lo que indica la literatura, teniendo un valor mayor a 0.5 por lo que se lo considera aceptable (Moriassi et al., 2007) y a pesar de la diferencia que existe entre los valores de calibración y validación el modelo no es desestimado ya que no es un error significativo (Knoche et al., 2014) Así como se mencionó en la sección 4.3 con respecto a la precipitación, la validación de datos en el modelo a utilizar es mayor a los valores de calibración, al ser un modelo el cual involucra solo estaciones de precipitación, se presentó el mismo resultado que observamos anteriormente, sin embargo, al incluir la variable de evapotranspiración no hubo un cambio significativo por lo que se decidió trabajar con solo dos estaciones de la variable precipitación.

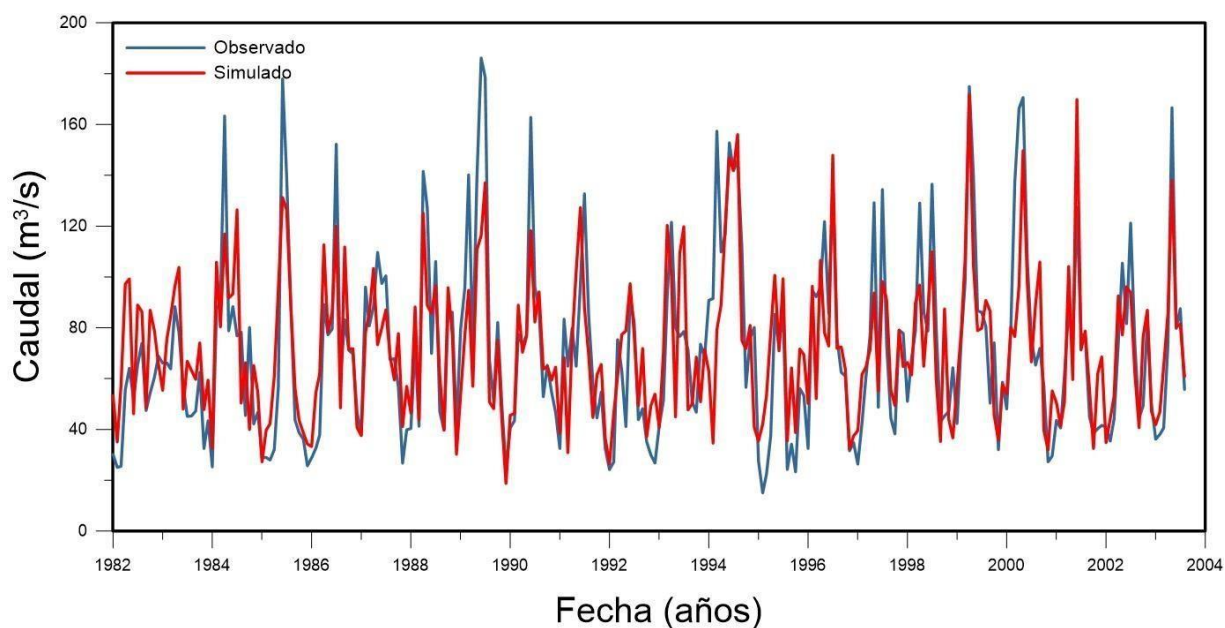


Figura 30. Serie de Tiempo Modelo Futuro 80%

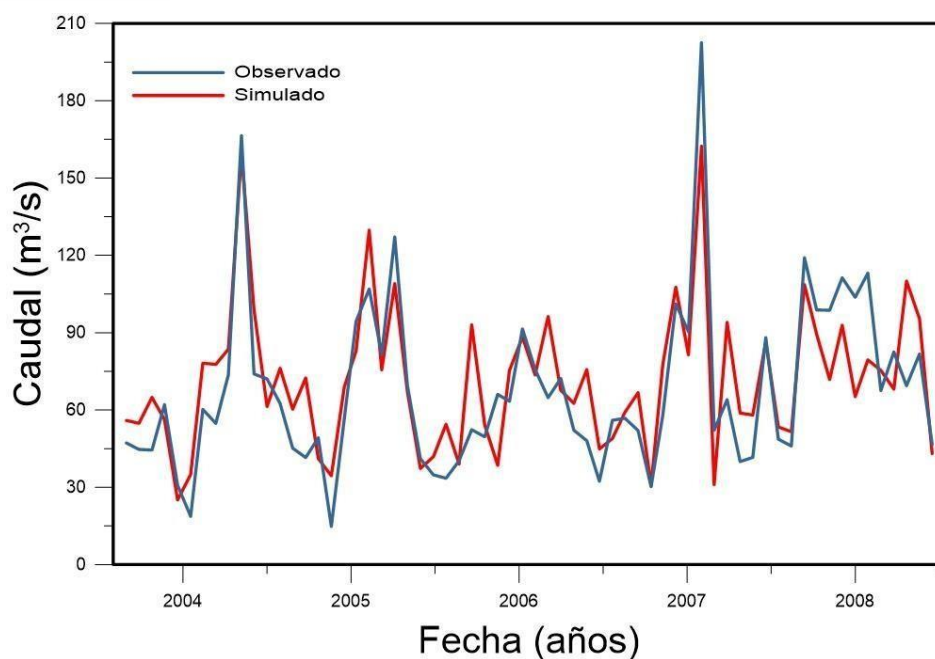


Figura 31. Serie de Tiempo Modelo Futuro 20%

A continuación, las Figuras 32 y 33 presentan las gráficas de dispersión del modelo descrito anteriormente, como se puede observar la mayoría de los valores obtenidos se encuentran considerablemente cerca de la línea de tendencia, tanto en la gráfica de calibración como en la de validación, en la figura 32 se puede observar que existe una sobrestimación de los caudales bajos y una subestimación de los caudales altos sin embargo, el modelo se considera adecuado, coincidiendo con su valor del coeficiente de determinación el cual es de 0.61

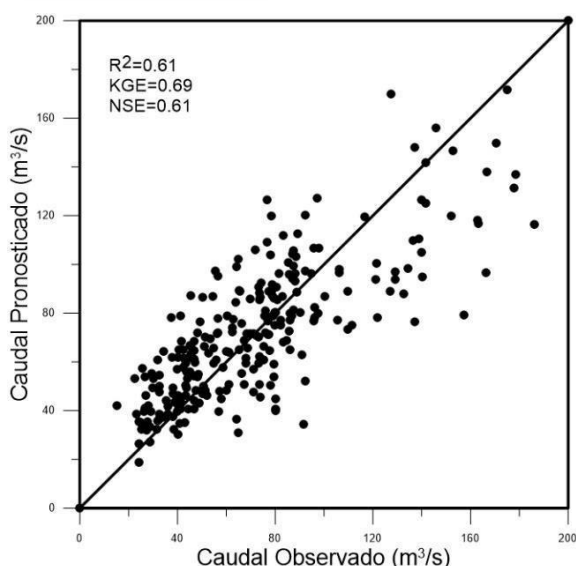


Figura 33. Gráfica de dispersión del periodo de Calibración

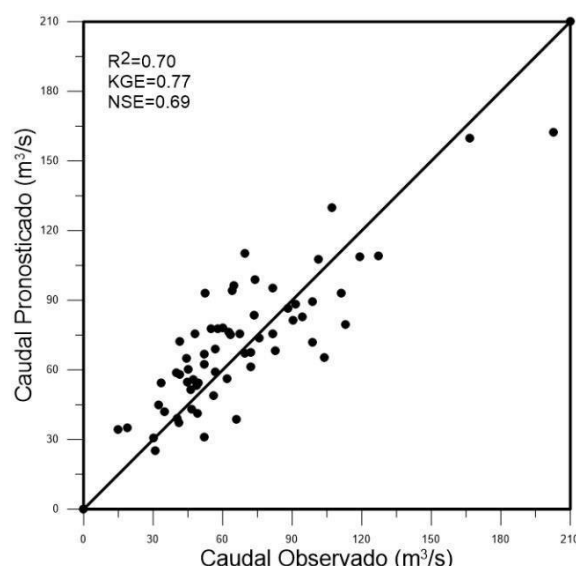


Figura 32. Gráfica de dispersión del periodo de Validación

Dados estos resultados, el siguiente paso es obtener las series de tiempo futuras desde el año 2011 al 2050 de las estaciones de precipitación seleccionadas dentro del modelo futuro para ambos escenarios RCP 4.5 y 8.5, a partir de los cuales se obtuvo las series de tiempo de caudal futuro. Las series de caudal se analizaron en periodos de 10 años. En la Figura 34 se muestra la diferencia de caudal que existe entre ambos escenarios, los cambios no son muy notorios sin embargo son muy significativos en ciertos periodos.

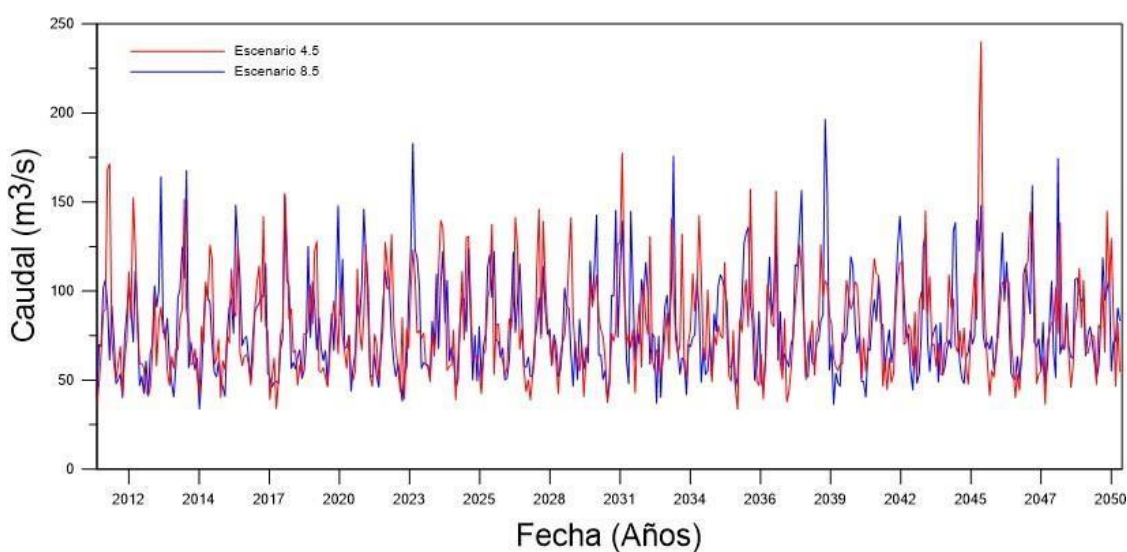


Figura 34. Series de tiempo futuras de caudal para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Como se puede observar en la Figura 35, los valores promedios máximos mensuales de caudal obtenidos en los escenarios 4.5 y 8.5 son de 124.01 m³/s y 125.21 m³/s respectivamente entre los meses de mayo, junio y julio. Según la literatura analizada en años futuros la precipitación y la temperatura en ambos escenarios están en continuo crecimiento, siendo el escenario 8.5 el que mostró valores más altos en temperatura y precipitación como lo indica la literatura (Zhiña et al., 2019). Por tal razón, se espera entonces que los valores de caudal futuro también se vean alterados. La diferencia de resultados entre los dos escenarios es mínima, sin embargo, el escenario 8.5 es el que tiene un caudal mayor, todo esto debido a las condiciones indicadas anteriormente. Además, según estudios realizados anteriormente con un periodo de tiempo futuro hasta el año 2100 se conoce que entre los años 2040 a 2050 los escenarios se encuentran en un estado de transición, por lo que en estos años no se observa una gran diferencia, después de estos años de transición las condiciones del escenario 4.5 comienzan a estabilizarse mientras que en el escenario 8.5 las variables siguen alterándose (Zuñiga, 2021)

Los escenarios de cambio climático presentan dos resultados diferentes con respecto al caudal futuro. En el escenario 4.5 no se esperan mayores cambios, mientras que en el escenario 8.5 se pueden llegar a observar cambios más bruscos en la estabilidad de variables que afectan al caudal de esta zona.

La Figura 35 representa el comportamiento de los valores de caudal, en condiciones del escenario 4.5. Cada línea muestra el promedio mensual del caudal durante un periodo de diez años, en la misma figura se observa el comportamiento en conjunto de los siete periodos utilizados, las líneas continuas son los datos históricos mientras que las líneas entrecortadas representan los resultados futuros de caudal. El comportamiento de los patrones de caudal es debido a las condiciones a las que el escenario 4.5 se encuentra expuesto, lo que desencadena una serie de efectos climáticos que altera las épocas secas y húmedas de la zona, dicho esto los niveles de caudal aumentan en la cuenca del río Paute porque la precipitación normal de la zona ha sido afectada por el cambio climático.

Como se puede observar las gráficas presentan picos más altos en los periodos futuros en las épocas de sequía, donde claramente los niveles de caudal serán más altos, esto puede estar ligado directamente con las condiciones de suelo en las cuales la evapotranspiración tiene una amplia participación, sin embargo, debido a su baja eficiencia estadística esta variable no fue incluida en el modelo.

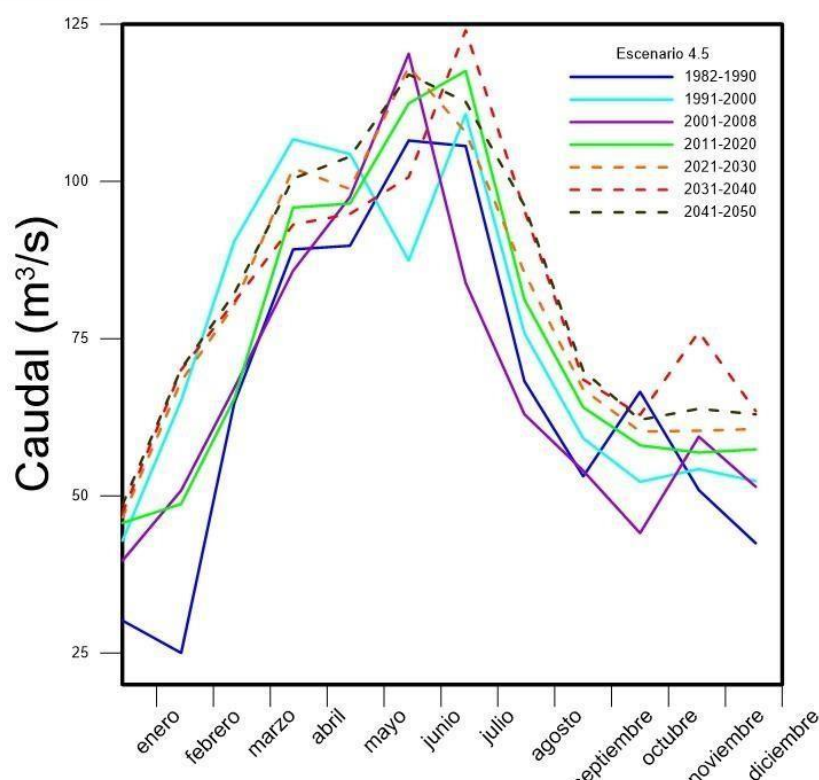
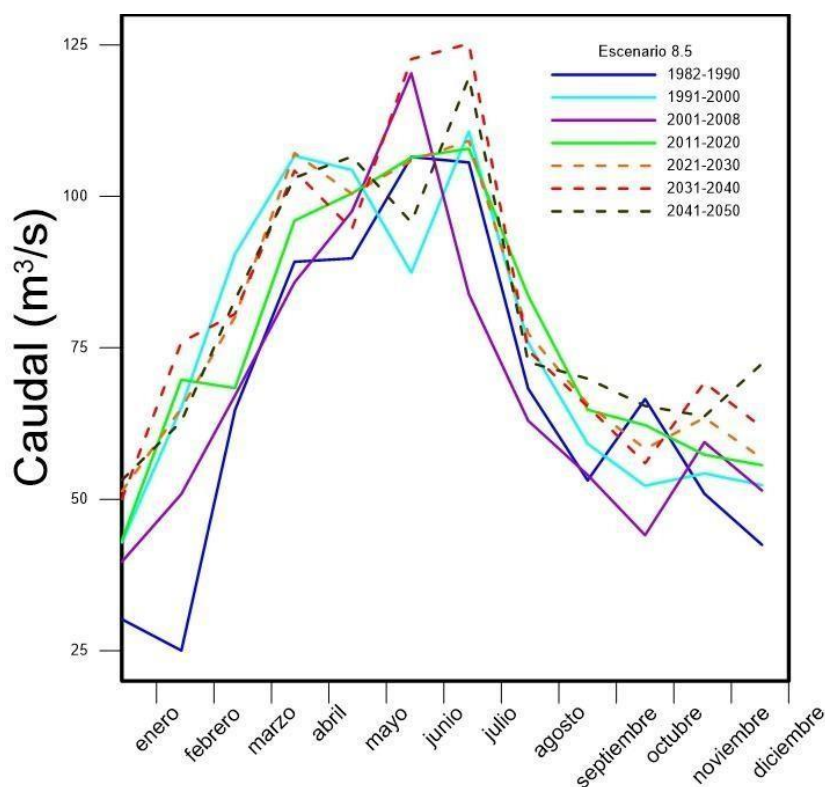


Figura 35. Análisis estacional de caudal para el escenario RCP 4.5.

En el escenario 4.5 se observa un comportamiento similar en todos los periodos tanto históricos como futuros, aquí se puede apreciar que el caudal aumenta periódicamente entre los meses de enero y abril hasta llegar a sus niveles máximos entre los meses de mayo a junio. El caudal máximo registrado en el escenario 4.5 es de $124.01 \text{ m}^3/\text{s}$ entre los años 2031 – 2040, sin embargo, al llegar a las épocas con menos precipitación entre los meses de julio a diciembre retoman un comportamiento similar donde el caudal disminuye. Como se había mencionado anteriormente en el escenario 4.5 las condiciones de cambio a futuro no son drásticas, en este caso se considera que a partir del año 2040 las condiciones climáticas se estabilizan.

La Figura 36 expone los resultados del escenario 8.5, donde su comportamiento es similar al escenario 4.5, de la misma forma las líneas continuas representan los datos históricos mientras que las líneas entrecortadas presentan los datos a futuro. En los meses de enero a abril el aumento de caudal se mantiene, con algunas variaciones entre los datos históricos y futuros; mientras que los valores más altos se presentan en los meses de mayo, junio y julio con un valor máximo de caudal de $125.21 \text{ m}^3/\text{s}$ entre los años 2031-2040. Luego de alcanzar el nivel máximo, se puede observar como el nivel de caudal disminuye

drásticamente hasta valores de $74.56 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de agosto. Para los últimos meses el comportamiento del caudal es irregular, con un aumento en el mes de noviembre y a partir de ahí un descenso hasta el mes de diciembre, mostrando un constante aumento del caudal en épocas secas.



Figura

Análisis estacional de caudal para el escenario 8.5.

36.

En este caso, el escenario 8.5 es en el que se considera una situación más pesimista con relación al cambio climático, los valores máximos en este escenario no varían mucho con relación al del escenario 4.5, esto es debido a que el periodo de transición se da entre los años 2040 y 2050, por lo que no se puede apreciar los efectos totales reales del escenario 8.5, sin embargo, el cambio en los niveles de caudal son en consecuencia más drásticos que en el 4.5.

En otro estudio realizado a nivel nacional (Carvajal et al., 2017), en el cual se analiza como la producción de energía en las hidroeléctricas del país se ve afectada por el cambio climático, se expone los resultados de caudal principalmente en el escenario 4.5 que es el que contiene más modelos climáticos, sin embargo, se comprobó que los resultados en

relación con los otros escenarios no varían mucho. En este caso los resultados del escenario 4.5 dieron a conocer que los valores de caudal aumentarán ligeramente a comparación de los registros históricos previamente analizados, lo que indica que en un futuro existirá una tendencia de épocas lluviosas más intensas (marzo – agosto) y épocas secas más calientes (Zhiña et al., 2019), en ambos casos los efectos generan impactos negativos teniendo como resultado que en épocas de lluvia los niveles de precipitación aumenten drásticamente provocando inundaciones, de igual manera en épocas secas el aumento de temperatura afecta los niveles de caudal produciendo una disminución en la producción de energía. Este ligero aumento de los caudales se da a causa del periodo de transición por lo que en el modelo no se observa cambios drásticos a comparación de otro estudio realizado por Zuñiga (2021) los cuales modelan escenarios futuros hasta el año 2100 los cuales muestran resultados más variados en ambos escenarios. Como se muestra en la Figura 37 los valores mínimos de caudal en ambos escenarios se incrementan notoriamente, mientras que los percentiles 25, 50 y 75 muestran como los valores de caudal en cada uno de los escenarios cambian, es decir que en el periodo base el 25% de los datos se encuentran por debajo de $44 \text{ m}^3/\text{s}$, en el escenario RCP 4.5 el 25% de datos está por debajo de $59.49 \text{ m}^3/\text{s}$ y el escenario RCP 8.5 con un 25% de datos por debajo de $58.63 \text{ m}^3/\text{s}$. De igual forma, se expresan los resultados para el percentil 50 para el periodo base y los escenarios RCP 4.5 y 8.5 con el 50% de datos por debajo de 71.7, 75.46, 72.87 m^3/s respectivamente. Finalmente, para el percentil 75 los valores obtenidos para el periodo base es por debajo de $86.77 \text{ m}^3/\text{s}$, para el escenario RCP 4.5 y el RCP 8.5 los valores se encuentran por debajo de 94.72 y 96.09 m^3/s . Los valores máximos no presentan una diferencia notable entre ellos, sin embargo, los resultados expuestos por los percentiles y los mínimos muestran como los valores en cada escenario van aumentando a comparación del periodo base.

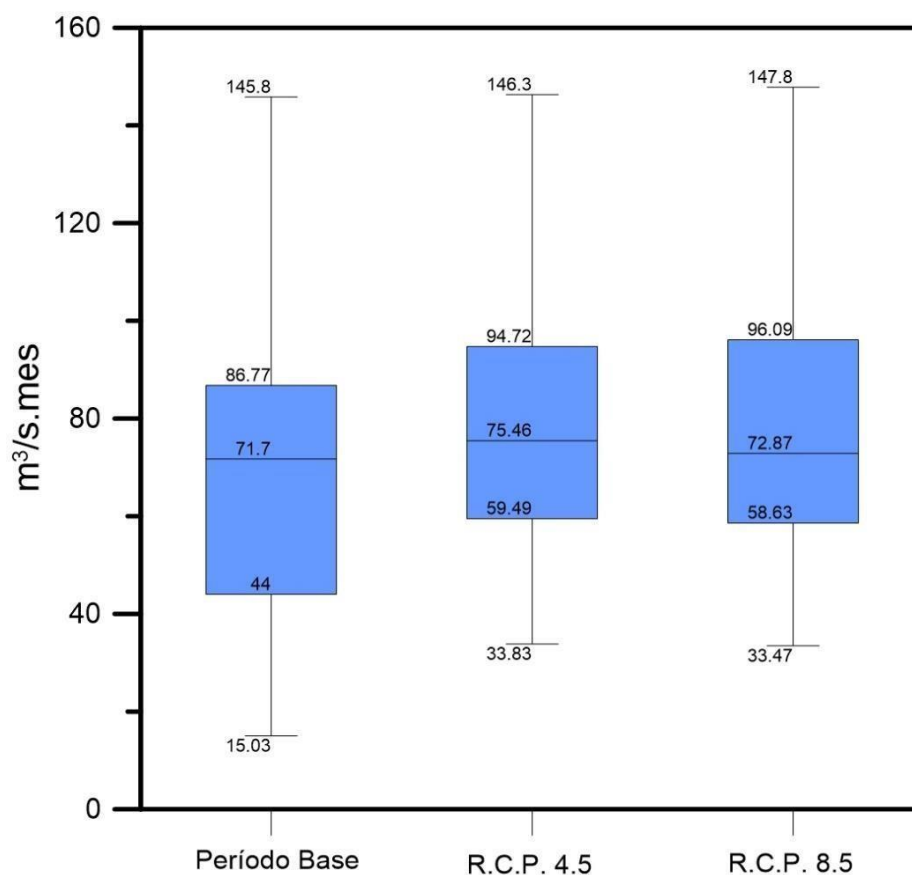


Figura 37. Boxplot - Período Base vs RCP 4.5 y RCP 8.5

La cuenca del río Paute al igual que otras cuencas abastecen a centrales hidroeléctricas las cuales son sensibles con respecto al cambio climático por lo que si cambia el caudal se da una alteración directa al potencial hidroeléctrico (Carvajal et al., 2017). Los resultados del modelo muestran un coeficiente de determinación de 0.61 en los resultados del pronóstico de caudal, en el cual se utilizaron dos estaciones de precipitación, siendo este un valor óptimo de acuerdo a la literatura en comparación de otros estudios los cuales han aplicado métodos más complejos con muchas más variables.

Como ejemplo tenemos el estudio realizado en Colombia por Labrador Cadena et al. (2016), donde se aplicó un modelo WEAP (*Water Evaluation and Planning System*) para evaluar el impacto que tendrá el cambio climático en la cuenca del río Aipe, bajo escenarios climáticos sobre la oferta hídrica. En este estudio los resultados demostraron que el modelo es apto para simular el comportamiento de la oferta hídrica a escala diaria dando como resultado un coeficiente de determinación de 0.75, el método utilizado en este estudio incluye varias variables y este a su vez utilizó para el análisis un total de 13

estaciones. El modelo WEAP tiene un nivel de complejidad más alta en comparación del uso de una regresión lineal múltiple, el cual es un modelo mucho más simple, sin embargo, a pesar de esta diferencia de aplicaciones, los resultados obtenidos por el modelo de regresión lineal múltiple son altamente satisfactorios. De igual manera, otro estudio realizado aplicó el modelo SWAT (*Soil and Water Tool*) para evaluar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas altas del río Piura, bajo escenarios de cambio climático 4.5 y 8.5 este análisis obtuvo un coeficiente de determinación de 0.90, por lo que se considera un modelo casi perfecto. El modelo SWAT es evaluado bajo varios criterios climáticos por lo que es considerado un método altamente complejo, a comparación del método utilizado en nuestro estudio, sin embargo, al ser un método que utiliza pocas variables se lo considera bastante aceptable.

En México, el estudio realizado por Velázquez Zapata et al.(2017), destinado a evaluar la influencia de los Modelos Climáticos Globales con respecto al cambio climático, utiliza el modelo SWAT (*Soil and Water Assesment Tool*) dando como resultado que tanto la temperatura como la precipitación aumentarían en un futuro, este estudio destaca que la aplicación de un modelo Ensamble es importante para analizar la variabilidad entre los resultados de cada variable. El modelo que fue aplicado en este estudio ha dado óptimos resultados en la predicción de caudales. Los resultados del estudio establecen que habrá un ligero aumento en los niveles de caudal en la zona causados principalmente por el cambio climático, lo que altera entre otras cosas el propio ecosistema creando una cadena de impactos ambientales. Además de que la alteración en los niveles de producción de energía afectará directamente las actividades económicas y productivas del país.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En resumen, el estudio llevo a cabo un análisis futuro de los niveles de caudal aguas arriba de la represa de Mazar, basándose en dos variables principales la precipitación y la temperatura; sin embargo, se analizó que la evapotranspiración tiene una influencia mayor sobre los caudales físicamente que la temperatura por si sola. Sin embargo, estadísticamente no se tuvo la misma respuesta con la evapotranspiración por lo que no contribuyó en el rendimiento de los modelos desarrollados, debido a que se demostró que no existían proyecciones de alta varianza, dicho esto el modelo futuro final estuvo compuesto por dos estaciones de una sola variable (precipitación), lo cual fue significativamente más influyente en la determinación de los caudales.

Los análisis realizados bajo escenarios 4.5 y 8.5 dieron como resultados una proyección de datos de caudal que se verán alterados en el futuro, cabe recalcar que cada uno de estos modelos representa una alternativa futura diferente ya que el escenario RCP 4.5 es visto como un escenario más optimista por lo que los valores a futuro no se verán tan alterados como en el escenario RCP 8.5 el cual es considerado un escenario pesimista. Dadas estas condiciones se puede decir que en un futuro la disponibilidad de agua destinada al funcionamiento de la central de Mazar no será un problema, sin embargo el hecho de que los niveles de caudal aumenten no siempre es bueno para el funcionamiento de las represas, ya que el aumento de la escorrentía trae consigo una serie de impactos negativos como inundaciones o arrastre de sedimentos que pueden causar daños dentro de las funciones normales de la central hidroeléctrica.

Los resultados obtenidos en el análisis muestran que los valores de caudal aumentarían en un futuro, como se observó en la Figura 37 Boxplot en la cual los valores mínimos y los percentiles de cada escenario aumentan en comparación al periodo base. Sin embargo estos resultados representan valores máximos no muy alterados a comparación con los datos históricos y actuales, a causa de la época de transición ya descrita anteriormente, así como también, el hecho de que la variable de evapotranspiración no haya podido ser incluida estadísticamente pudo afectar a los actuales resultados, sin embargo existen algunos estudios similares con un mayor periodo de modelación que indican una mayor presencia de épocas lluviosas y de sequía, concluyendo que las épocas de lluvia serán más

largas e intensas, repitiéndose de la misma manera para las épocas de sequía, estos impactos deben ser ampliamente considerados ya que el país busca ser un proveedor neto de energía para los países vecinos, por lo que estudios como la demanda energética interna debería ser monitoreado.

El pronóstico de caudales en Ecuador es de suma importancia, puesto que el país depende en un 90% de las hidroeléctricas para sus actividades productivas y para su población, sin embargo, las escorrentías superficiales se han visto afectadas por el cambio climático, el cual vuelve incierto al comportamiento del clima en un futuro, en donde bien los niveles de caudal pueden aumentar asegurando un buen funcionamiento de las hidroeléctricas por lo que la población y el sector productivo del país no se verán afectados con respecto a este recurso, o caso contrario los niveles de caudal pueden disminuir afectando a la normal producción de energía de las centrales por lo que el país se vería obligado a utilizar otras fuentes para poder abastecer la demanda energética.

El modelo aplicado para el análisis futuro de caudal, incluyó únicamente la variable de precipitación, sin embargo, se considera que, si se incluye más variables meteorológicas o si se incluyen también características del suelo como su capacidad de infiltración y porosidad el modelo podría mejorar y se lograría obtener mejores resultados.

Los resultados del modelo con los valores de evapotranspiración no fueron del todo satisfactorios, por lo que realizar un análisis de evapotranspiración con un mayor número de variables podría mejorar su rendimiento, en este sentido, se recomienda incluir variables como la radiación solar, la velocidad del viento, la humedad relativa, entre otros, en futuros estudios. Además se considera que aplicando un retraso en los datos de evapotranspiración de uno, dos y tres meses podría mejorar el rendimiento de este modelo.

Los datos obtenidos a partir del modelo ENSAMBLE utilizado para obtener los valores de caudal futuro, brindó información que responden adecuadamente a las circunstancias de cada escenario. El comportamiento de los datos futuros e históricos tiene un comportamiento similar, por lo que se considera que el modelo logró ajustarse de manera satisfactoria. El modelo de regresión múltiple que se utilizó en el estudio brinda buenos resultados, sin embargo, la aplicación de otros modelos físicos hidrológicos como SWAT o WEAP en futuros estudios podrían mejorar las estimaciones de caudal.

Los resultados obtenidos en el análisis muestran que los valores de caudal aumentarán en un futuro, como se observa en la Figura 37 en la cual los valores mínimos y los percentiles de cada escenario aumentan en comparación al periodo base. Sin embargo, estos resultados representan valores máximos no muy alterados a comparación con los datos históricos y actuales, a causa de la época de transición ya descrita anteriormente, no obstante, existen algunos estudios similares con un mayor periodo de modelación que indican una mayor presencia de épocas lluviosas y de sequía, concluyendo que las épocas de lluvia serán más largas e intensas, repitiéndose de la misma manera para las épocas de sequía generando diversos desastres naturales que perjudican directamente a la población.

La información obtenida en este estudio es una línea base que puede ser usada para la gestión y la operación futura del embalse de Mazar y el complejo hidroeléctrico Paute integral.

REFERENCIAS

- Agencia de Regulacion y control de Agua. (2018). *Plan Estratégico Institucional*.
- Aguilera Pizano, A., Cruz Aguilar, M., Hernández Bustos, D., Ojeda Paredes, A., & Ramírez Rangel, J. (2021). *Aplicación del modelo de dispersión gaussiano para estimar la distribución de contaminantes atmosféricos generados por fuentes antropogénicas fijas ubicadas en el sector industrial de puerto interior, Silao, Guanajuato y proponer medidas de control*. 10, 10.
<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3408>
- Alley, R. (2018). Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático pero no aprobado en detalles. *Cuarto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático (IPPC)* Editores: Kansri B., Filippo G., y Bubu J, 77. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf
- Apolo, B. (2021). *Modelo numérico de flujo y transporte de un acuífero costero, basado en la importancia hidráulica del diseño de un dique (tape) y su incidencia en la calidad del agua. Manglaralto–Ecuador. September*.
- Armenta Porras, G. E., Villa Cedeño, J. L., & Jácome, P. S. (2016). *PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PARA ECUADOR, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*.pdf (p. 122).
- Blanco, A., Alonso, F., & Gomariz, F. (2014). Elaboración de un mapa de carbono orgánico del suelo en la Región de Murcia. *XVI Congreso de Tecnologías de La Información Geográfica*, June, 9.
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/46466/1/2014_Bernardeau_etal_Congreso_TIG.pdf
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos distribuidos. *Rhama*, 8.
http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Cadenas Anaya, C., & Guaita, W. (2021). Análisis de Regresión Múltiple. *Catálogo Editorial*, 96-101. <https://doi.org/10.15765/poli.v1i695.2371>
- Campozano, L., Sánchez, E., Avilés, Á., & Samaniego, E. (2014). Evaluation of infilling methods for time series of daily precipitation and temperature: The case of the Ecuadorian Andes. *Maskana*, 5(1), 99-115.

- Carrasquilla-Batista, A., Chacón-Rodríguez, A., Núñez-Montero, K., Gómez-Espinoza, O., Valverde, J., Guerrero-Barrantes, M., -Batista, C., Chacón-Rodríguez, A. ;, Núñez-Montero, A. ;, Gómez-Espinoza, ;, Valverde, O. ;, & Guerrero, J. ; (2016). *Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal Simple and multiple regression: application in the prediction of natural variables related to microalgae growing process*. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2983>
- Carvajal, P. E., Anandarajah, G., Mulugetta, Y., & Dessens, O. (2017). Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble—the case of Ecuador. *Climatic Change*, 144(4), 611-624. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2055-4>
- Castillo, E. (2022). *Evaluación de una modelación hidrológica implementada en WEAP como herramienta para el desarrollo de un futuro modelo operacional de la cuenca del río Itata*. 8.5.2017, 2003-2005.
- Castillo, R., & Montero, R. (2017). Proyecciones de cambio climático del Sistema Ártico basado en el análisis de multi-modelos de los escenarios de emisiones de CO2. *Revista de Climatología*, 17(1578-8768), 29-39. https://www.researchgate.net/profile/Rodrigo_Castillo4/publication/322835618_Proyecciones_de_cambio_climatico_del_Sistema_Artico_basado_en_el_analisis_de_multi-modelos_de_los_escenarios_de_emisiones_de_CO2/links/5a7215d90f7e9b20d48e02a8/Proyecciones-de-ca
- CELEC. (2021). *CELEC EP genera y transmite más del 90 por ciento de la energía eléctrica limpia que consume el país y exporta a los países vecinos* (p. 1'21). <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/sala-de-prensa/noticias/722-celec-ep-genera-y-transmite-mas-del-90-por-ciento-de-la-energia-electrica-limpia-que-consume-el-pais-y-exporta-a-los-paises-vecinos>
- CELEC EP. (2022). *Sistema Nacional de Transmisión (SNT)*. <https://www.celec.gob.ec/transelectric/index.php/18-institucional/contenido-documentos/357-sistema-nacional-de-transmision-snt>
- Celleri, R., Willems, P., & Buytaert, W. (2007). Space- time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Okt 2005 Abrufbar Uber Httpwww Tldp OrgLDPabsabsguide Pdf Zugriff 1112 2005*. <https://doi.org/10.1002/hyp>

- Chen, D., Gao, G., Xu, C. Y., Guo, J., & Ren, G. (2005). Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, 28(2), 123-132. <https://doi.org/10.3354/cr028123>
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 72-76.
- Cislaghi, A., Masseroni, D., Massari, C., Camici, S., & Brocca, L. (2020). Combining a rainfall-runoff model and a regionalization approach for flood and water resource assessment in the western Po Valley, Italy. *Hydrological Sciences Journal*, 65(3), 348-370. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1690656>
- Coa Clemente, R. (2019). *Consecuencias de alta multicolinealidad en un modelo de regresión lineal*. c, 22-27.
- Daoud, J. I. (2018). Multicollinearity and Regression Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 949(1), 0-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/949/1/012009>
- Del Cioppo Morstadt, F. J. (2019). Inserción de Dióxido de Carbono (CO₂) con base al crecimiento económico y la población en Ecuador (2000 - 2050). *Económicas Cuc*, 40(2), 183-194. <https://doi.org/10.17981/econcuc.40.2.2019.11>
- Del Valle, G. (2014). El cambio de uso de suelo: consecuencias en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua. *AZ Revista de Educación y Cultura*, 82(June 2014), 15-18.
- Dietz, T., Shwom, R. L., & Whitley, C. T. (2020). *Annual Review of Sociology Climate Change and Society*. 1-24. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-121919->
- Estrada, V. (2012). *Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba*.
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). CAR - An R Companion to Applied Regression. In *Thousand Oaks CA: Sage*. (Issue September 2012). <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>
- Gu, C. (2019). *THE IMPORTANCE OF GLOBAL WATER RESOURCES IN THE SURVIVAL OF MANKIND*. 277-281.
- Hadi H. Jaafar, F. A. A. & N. E. B. (2019). *GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design*.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Informe de síntesis Resumen para responsables*

- Jorquera, E. et al. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *1° Encuentro de Investigadores En Formación En Recursos Hídricos, October 2014*, 18.
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Knoche, M., Fischer, C., Pohl, E., Krause, P., & Merz, R. (2014). Combined uncertainty of hydrological model complexity and satellite-based forcing data evaluated in two data-scarce semi-arid catchments in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 519(PB), 2049-2066. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.003>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Labrador Cadena, A. F., Zúñiga L., J. M., & Romero C., J. (2016). Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia. *Ingeniería y Región*, 15, 23. <https://doi.org/10.25054/22161325.1176>
- Lavado, W., Llauca, H., Enrique, C., Arancibia, M., & Yali, R. (2020). *Estudios Hidrológicos* (Issue September).
- León Baque, E. E., Vásquez Granda, V. D., & Valderrama Chávez, M. D. (2021). Cambios en patrones de precipitación y temperatura en el Ecuador: regiones sierra y oriente. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 1-22. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2608>
- Liñan, A., & Panez, J. (2020). FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA 01 Facultad de Ingeniería y Arquitectura. In *Universidad Andina del Cusco*. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Madsen, T., Franz, K., & Hogue, T. (2020). Evaluation of a distributed streamflow forecast model at multiple watershed scales. *Water (Switzerland)*, 12(5), 1-18. <https://doi.org/10.3390/W12051279>
- Magaña, V., (Mendez, B., Caetano, E., Mendez, J., Perez, E., & Graizbord, B., (Nava,

- E., Martinez, A., Ramirez, J., & Lemus, R. (2009). Escenarios de cambio climático para México. *Adaptacion a Los Impactos Del Cambio Climático En Los Humedales Costeros Del Golfo de México*, 571.
http://awsassets.panda.org/downloads/humedales_vol_2.pdf
- Manzano-Agugliaro, F., Taher, M., Zapata-Sierra, A., Juaidi, A., & Montoya, F. G. (2017). An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(October), 476-489.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.013>
- Ministerio de Energía. (2021). Energía, sociedad y ambiente. *Balance Energético*, 18-46.
- Montenegro-Murillo, D. D., Pérez-Ortiz, M. A., & Vargas-Franco, V. (2019). Using artificial neural networks to predict monthly precipitation for the Cali river basin, Colombia. *DYNA (Colombia)*, 86(211), 122-130.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.76079>
- Montero, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. *Documentos de Trabajo En Economía Aplicada*, 60.
https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *M e g s q a w s*. 50(3), 885-900.
- Pozo, A. (2018). *Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca del Río Paute (Ecuador)*. 126.
- Quevedo, H., Garcia, H., Salas, J., Domínguez, A., & Esquivel, V. (2007). Análisis Estadístico de Ozono a Nivel del Suelo. *Cultura Científica y Tecnológica*, 21, 35-43.
- Ramirez, G., Vasquez, M., Camardiel, A., Perez, B., & Galindo-Villardón, M. (2005). Detección gráfica de la multicolinealidad mediante el h-plot de la inversa de la matriz de correlaciones. *Revista Colombiana de Estadística* 28, 28(2), 1-13.
- Rey Valencia, D. M., & Zambrano Nájera, J. D. C. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 115-126. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011>
- Rodrigues, G., & Braga, R. (2021). *Evaluation of NASA POWER Reanalysis Products to Estimate Daily Weather Variables in a Hot Summer Mediterranean Climate*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy11061207>

- Ruíz Álvarez, M., Gomariz-Castillo, F., & Alonso-Sarría, F. (2018). Análisis espacio-temporal de los cambios previstos en la evapotranspiración de referencia durante el siglo XXI en la demarcación hidrográfica del seguro (España) a partir de los modelos climáticos globales MPEH5 y MPEH5C. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2018(71), 35-58. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022018000300035>
- S. Sayago, G. Ovando, M. B. (2018). *ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR DIARIA A PARTIR DE IMÁGENES NASAPOWER CON DISTINTOS ÍNDICES DE CLARIDAD*. 1(6), 11-21.
- Sanabria, J., & García, J. (2006). *ECIPERU*. 38.
- Stekhoven, D. J. (2012). Using the missForest Package. *MissForest: Nonparametric Missing Value Imputation Using Random Forest. R Package Version 1.2*, 1-11. https://stat.ethz.ch/education/semesters/ss2013/ams/paper/missForest_1.2.pdf
- Stekhoven, D. J., & Bühlmann, P. (2011). *MissForest-nonparametric missing value imputation for mixed-type data*. <http://stat.ethz>.
- Sucozhañay, A., & Céleri, R. (2018). Impact of Rain Gauges distribution on the runoff simulation of a small mountain catchment in Southern Ecuador. *Water (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/w10091169>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Unidas, N. (2013). United Nations Climate Change Portal. *Choice Reviews Online*, 50(07), 50-3868-50-3868. <https://doi.org/10.5860/choice.50-3868>
- Vargas, N. O., & Giraldo, M. V. (2018). IDEAM, Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica. In *Minambiente Colombia*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf
- Velázquez Zapata, J. A., Troin, M., & Dávila Ortiz, R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería, Investigación y Tecnología, ISSN 1405-7743, ISSN-e 2594-0732, Vol. 18, N°. 3, 2017, 18(3), 10*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8353471&info=resumen&idioma=ENG>
- Vicente, J. (2021). *Evaluación general de la matriz energética ecuatoriana y el aporte*

- Vicuña, S., Coello, C., & Cisneros, F. (2009). *Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos de la cuenca del Río Paute*. 1-14.
- Vuille, M. (2013). El cambio climático y los recursos hídricos en los andes tropicales. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 21.
http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5826/SR2012_VUILLE_FINAL_ESP.pdf?sequence=1
- Wanders, N., Thober, S., Kumar, R., Pan, M., Sheffield, J., Samaniego, L., & Wood, E. F. (2019). Development and evaluation of a pan-European multimodel seasonal hydrological forecasting system. *Journal of Hydrometeorology*, 20(1), 99-115.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0040.1>
- Wang, M., Wright, J., Buswell, R., & Brownlee, A. (2013). A comparison of approaches to stepwise regression for global sensitivity analysis used with evolutionary optimization. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 2551-2558.
- Zalamea, J. (2021). Despacho Hidrotérmico de Mediano Plazo aplicado al Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. *Revista Técnica "Energía,"* 18(1), 95-105.
<https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n1.2021.465>
- Zhang, Y., Chiew, F. H. S., Liu, C., Tang, Q., Xia, J., Tian, J., Kong, D., & Li, C. (2020). Can Remotely Sensed Actual Evapotranspiration Facilitate Hydrological Prediction in Ungauged Regions Without Runoff Calibration? *Water Resources Research*, 56(1). <https://doi.org/10.1029/2019WR026236>
- Zhiña, D., Montenegro, M., Montalván, L., Mendoza, D., Contreras, J., Campozano, L., & Avilés, A. (2019). Climate change influences of temporal and spatial drought variation in the andean high mountain basin. *Atmosphere*, 10(9), 1-17.
<https://doi.org/10.3390/ATMOS10090558>
- Zuñiga, S. (2021). *Impactos del cambio climático sobre las sequías en la cuenca río Tambo-Perú, bajo los escenarios rcp 4.5 y 8.5*. 164.
<http://hdl.handle.net/20.500.12773/13356>

ANEXOS

Anexo 1. Modelos de las estaciones de Caudal

	Estaciones	R2	KGE	NSE
Modelo 1	Dudas, Gualaceo, Jadán, Matadero, Mazar, Surucucho, Tarqui, Paute en Paute, Tomebamba, Yanuncay	0.89	0.92	0.89
Modelo 2	Dudas, Gualaceo, Jadán, Matadero, Mazar, Surucucho, Tarqui, Paute en Paute	0.89	0.92	0.89
Modelo 3	Dudas, Gualaceo, Jadán, Matadero, Mazar, Surucucho, Paute en Paute	0.89	0.92	0.89
Modelo 4	Gualaceo, Jadán, Mazar, Surucucho, Paute en Paute	0.89	0.92	0.89
Modelo 5	Gualaceo, Jadán, Matadero, Surucucho, Paute en Paute	0.88	0.91	0.88
Modelo 6	Gualaceo, Jadán, Surucucho	0.84	0.88	0.84
Modelo 7	Gualaceo, Jadán, Matadero, Paute en Paute	0.88	0.91	0.88
Modelo 8	Gualaceo, Matadero, Paute en Paute	0.87	0.91	0.87

Anexo 2. VIF de las Estaciones de Caudal

	Factor de Inflación de Varianza									
	Dudas	Gualaceo	Jadán	Matadero	Mazar	Surucucho	Tarqui	Paute Paute	en a	Tomebamb Yanuncay
Modelo 1	4.26	9.66	6.40	5.12	1.03	3.08	8.41	5.96	9.94	11.21
Modelo 2	3.56	7.46	4.77	4.29	1.025	3.06	8.31	4.95	---	---
Modelo 3	3.32	7.34	2.077	3.84	1.01	3.02	---	4.60	---	---
Modelo 4	---	4.01	1.78	---	1.01	2.32	---	4.56	---	---
Modelo 5	---	4.27	2.01	3.81	---	2.97	---	4.57	---	---
Modelo 6	---	1.77	1.61	---	---	2.26	---	---	---	---
Modelo 7	---	4.24	1.95	2.97	---	---	---	4.52	---	---
Modelo 8	---	3.99	---	2.29	---	---	---	4.14	---	---

Anexo 3. VIF de las Estaciones de Precipitación primer método

	Factor de Inflación de Varianza													
	Palmas	Peñas Coloradas	Río Mazar	Sevilla de Oro	Sayausí	Paute	Gualaceo	Cumbe	Cuenca Aer	Biblián	Piscicola	Surucucho	Chanin	Sigsig
Modelo 1	6.64	5.52	4.30	2.27	1.09	3.56	4.04	2.89	2.59	3.44	2.73	1.74	2.84	2.21
Modelo 2	6.58	5.45	4.27	2.23	1.05	3.51	4.01	2.77	2.57	3.39	---	---	2.74	2.09
Modelo 3	---	---	2.31	1.78	1.03	3.45	3.97	2.71	2.52	3.32	---	---	2.65	2.03
Modelo 4	---	---	---	1.23	---	---	---	---	---	---	---	---	1.68	1.64

Anexo 4. VIF de las estaciones de Precipitación segundo método.

	Factor de Inflación de Varianza					
	Palmas	Peñas Coloradas	Río Mazar	Sevilla de Oro	Paute	Chanin
Modelo 1	6.31	5.08	4.09	2.17	1.86	2.23
Modelo 2	---	---	2.01	1.71	1.62	2.16
Modelo 3	---	---	1.94	1.71	---	1.36

Anexo 5. Modelos de Precipitación Régimen BM1

	BM1	R²	KGE	NSE
Modelo 1	Sayausí, Ricaurte, Paute, Gualaceo, Jacarin, Cumbe, Cuenca Aeropuerto, Biblián	0.11	0.06	0.11
Modelo 2	Sayausí, Paute, Gualaceo, Jacarin, Cumbe, Cuenca, Biblián	0.11	0.06	0.11
Modelo 3	Sayausí, Paute, Cumbe, Cuenca Aeropuerto, Biblián	0.09	0.02	0.09
Modelo 4	Paute, Cumbe, Cuenca Aeropuerto	0.09	0.01	0.09

Anexo 6. VIF del régimen BM1

Factor de Inflación de Varianza BM1								
	Sayausí	Ricaurte	Paute	Gualaceo	Jacarin	Cumbe	Cuenca Aeropuerto	Biblián
Modelo 1	1.02	6.86	3.26	4.33	7.15	2.74	3.71	3.46
Modelo 2	1.01	---	3.26	4.20	4.72	2.62	2.74	3.46
Modelo 3	1.01	---	2.62	---	---	2.42	2.41	2.81
Modelo 4	---	---	2.05	---	---	2.28	2.26	---

Anexo 7. Modelos de Precipitación Régimen BM2

	BM2	R ²	KGE	NSE
Modelo 1	Chanlud, Labrado, Piscicola, Surucucho, Chanin, Sigsig.	0.38	0.45	0.38
Modelo 2	Chanlud, Labrado, Surucucho, Chanin, Sigsig	0.37	0.45	0.37
Modelo 3	Labrado, Surucucho, Chanin, Sigsig	0.35	0.42	0.35
Modelo 4	Labrado, Chanin, Sigsig	0.35	0.42	0.35
Modelo 5	Chanin, Sigsig	0.35	0.42	0.35

Anexo 8. VIF del régimen BM2

Factor de Inflación de Varianza

	Chanlud	Labrado	Piscicola	Surucucho	Chanin	Sigsig
Modelo 1	8.04	4.54	3.13	1.99	2.34	1.88
Modelo 2	7.14	4.51	---	1.95	2.33	1.83
Modelo 3	---	2.23	---	1.48	2.15	1.74
Modelo 4	---	1.98	---	---	2.14	1..71
Modelo 5	---	---	---	---	1.59	1.59

Anexo 9. Modelo de Precipitación Régimen UM2

	UM2	R ²	KGE	NSE
Modelo 1	Palmas, Peñas Coloradas, Río Mazar, Sevilla de Oro	0.58	0.67	0.58
Modelo 2	Palmas, Peñas Coloradas	0.58	0.67	0.58

Anexo 10. VIF del régimen UM2

	Factor de Inflación de Varianza			
	Palmas	Peñas Coloradas	Río Mazar	Sevilla de Oro
Modelo 1	5.65	4.19	3.90	2.17
Modelo 2	3.61	3.61	---	---