UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental

"Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Llaucano, periodo 2030-2060"

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL

Autor:

Bach. Aldomiro Saavedra Díaz

Asesor:

Dr. Alejandro Seminario Cunya

Coasesor:

Ing. Dennis Alvarino Cieza Tarrillo

Chota - Perú

2026

“AÑO DE LA ESPERANZA Y FORTALECIMIENTO DE LA DEMOCRACIA”

CONSTANCIA N° 01-2026-ASC

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD Y USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Lo que suscribe, en calidad de asesor de tesis, dejan constancia que el informe final de tesis titulado: “Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Llaucano, Periodo 2030-2060”.

Elaborado por: Aldomiro Saavedra Díaz, BACHILLER en Ingeniería Forestal y Ambiental de la Facultad de Ciencias Agrarias, fue sometido a la evaluación mediante el **software de similitud**, considerando el contenido comprendido desde el resumen hasta las referencias bibliográficas.

El resultado obtenido es:

Porcentaje de similitud	Porcentaje de uso de Inteligencia Artificial	Criterio de originalidad
13%	00%	Si cumple
Literal **e)** del artículo **27** del **Reglamento de Grados y Títulos**, aprobado mediante **Resolución de Comisión Organizadora N.º 770-2025-UNACH**.		

Se adjunta el reporte de evaluación de originalidad emitido por el software de similitud.

Chota, 27 de octubre de 2026

Dr. Alejandro Seminario Cunya
Asesor

Alejandro Seminario Cunya

INFORME DE TESIS -ALDOMIRO SAAVEDRA DÍAZ

ALdo

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:643135088

Fecha de entrega
22 oct 2026, 22:58 GMT-5

Fecha de descarga
22 oct 2026, 23:31 GMT-5

Nombre del archivo
INFORME DE TESIS -ALDOMIRO SAAVEDRA DÍAZ.pdf

Tamaño del archivo
4.0 MB

108 páginas

24.035 palabras

134.134 caracteres

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

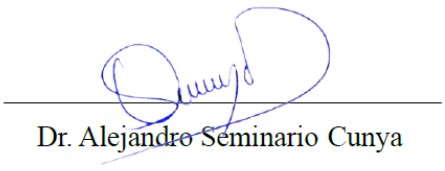
11% Fuentes de Internet
4% Publicaciones
10% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Fuentes principales

11% Fuentes de Internet
4% Publicaciones
10% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Internet
repositorio.unsaac.edu.pe 1%

2 Internet
ri.uaemex.mx <1%

3 Internet
repositorio.unc.edu.pe <1%

4 Internet
hdl.handle.net <1%

5 Internet
repositorio.continental.edu.pe <1%

6 Internet
repositorio.unap.edu.pe <1%

7 Internet
repositorio.unsch.edu.pe <1%

8 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Juliaca on 2026-07-18 <1%

9 Internet
repositorio.uchile.cl <1%

10 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Ingenieria on 2026-09-05 <1%

11 Internet
tesis.unap.edu.pe <1%

Dr. Alejandro Seminario Cunya

12 Trabajos del estudiante
Pontificia Universidad Católica de Chile on 2025-12-01 <1%

13 Internet
dspace.unl.edu.ec <1%

14 Internet
repositorio.utea.edu.pe <1%

15 Trabajos del estudiante
Universidad Tecnologica de los Andes on 2026-07-11 <1%

16 Internet
repositorio.uancv.edu.pe <1%

17 Trabajos del estudiante
Colegio de Postgraduados on 2025-10-13 <1%

18 Internet
www.repositorio.usac.edu.gt <1%

19 Internet
api-repositorio.unapiquitos.edu.pe <1%

20 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional Agraria La Molina on 2026-03-13 <1%

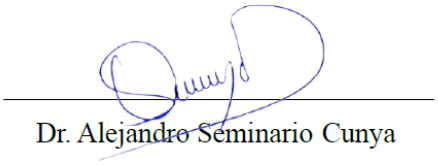
21 Internet
alicia.concytec.gob.pe <1%

22 Publicación
Jonny Fernando Rivadeneira Vera. "Impacto del cambio climático en la seguridad ... <1%

23 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2024-07-04 <1%

24 Trabajos del estudiante
Universidad Cesar Vallejo on 2024-07-24 <1%

25 Internet
apirepositorio.unu.edu.pe <1%



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE INFORME FINAL DE TESIS

El jurado evaluador designado con RESOLUCIÓN DE COORDINACIÓN DE FACULTAD N.° 353.-2026-FCA/UNACH:

Nombres y apellidos	Cargo
Dra. Yuli Anabel Chávez Juanito	Presidente
Dr. Pedro Javier Mansilla Córdova	Secretario
M.Sc. José Magno Quiróz Gonzáles	Vocal

De la tesis titulada:

"Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Llaucano, Periodo 2030-2060"

Que ha sustentado el(los) Bachiller (es):

Nombres y apellidos	DNI
Aldomiro Saavedra Díaz	76068990

Para obtener el título profesional de:

Ingeniero Forestal y Ambiental

Acuerdan por:

X	Unanimidad		Mayoría

X	Aprobar		Desaprobar

Otorgando la calificación de:

X	Aprobado	
	X	**Excelente**
		Bueno
		Regular

	Desaprobado

Colpa Matara, 27 de octubre del 2026

Dra. Yuli Anabel Chávez Juanito
Presidente

Dr. Pedro Javier Mansilla Córdova
Secretario

M.Sc. José Magno Quiróz Gonzáles
Vocal

Dr. Alejandro Seminario Cunya
Asesor

Ing. Dennis Alvarino Cieza Tarrillo
Coasesor

Dedicatoria

A mi madre, por ser el pilar fundamental durante mi formación universitaria y en cada etapa de mi vida, brindándome siempre su amor, esfuerzo y apoyo incondicional. A mi padre, por su sacrificio y apoyo constante durante este camino académico. A mis hermanos, familiares y a todas las personas que me acompañaron durante este camino, contribuyendo no solo a mi formación profesional, sino también a mi crecimiento como ser humano.

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios, por concederme la salud, fortaleza y sabiduría necesarias para afrontar cada desafío presentado durante esta etapa de formación profesional.

A mis padres, por su constante apoyo, cariño y por ser mi fuente de motivación en cada momento. A mi asesor y coasesor, por su orientación, guía y valioso aporte en el desarrollo de la presente investigación. A mis amigos y familiares, por sus palabras de aliento, buenos deseos y por acompañarme en este camino de superación.

Finalmente, a mis docentes, por impartir sus conocimientos y experiencias que han contribuido a mi formación integral, y a mis compañeros, por el intercambio de ideas, el trabajo en equipo y el compañerismo compartido durante nuestra vida universitaria.

Índice de contenidos

Dedicatoria 2

Agradecimiento 3

Índice de tablas 6

Índice de figuras 7

Resumen 9

Abstract 10

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 11

1.1. Planteamiento del problema 11

1.2. Justificación 14

1.3. Formulación del problema 15

1.4. Objetivos 16

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 17

2.1. Antecedentes 17

2.2. Bases teóricas 20

2.3. Definiciones conceptuales 39

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA 41

3.1. Tipo, diseño, nivel y enfoque de investigación 41

3.2. Ubicación, población, muestra, muestreo y unidad de análisis 42

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 44

3.4. Hipótesis 47

3.5. Operacionalización de variables 47

3.6. Procedimientos de recolección de datos 48

3.7. Procedimientos de análisis de datos..... 54

3.8. Materiales y equipos 55

3.9. Aspectos éticos..... 56

CAPÍTULO IV. RESULTADOS..... 57

4.1. Descripción de los resultados..... 57

4.2. Contrastación de hipótesis 82

4.3. Discusiones 85

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 88

5.1. Conclusiones..... 88

5.2. Recomendaciones 89

CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 90

CAPITULO VIII. ANEXOS..... 103

Índice de tablas

Tabla 1. Principales Modelos Climáticos Globales del CMIP6 26

Tabla 2. Escenarios de emisión de GEI del CMIP6 29

Tabla 3. Rangos de evaluación del coeficiente de determinación R^2……..34

Tabla 4. Rangos de evaluación del Nash-Sutcliffe (NSE) 35

Tabla 5. Operacionalización de variables de la investigación 48

Tabla 6. Modelos Climáticos Globales utilizados 52

Tabla 7. Estadísticos descriptivos para las variables observadas (1981-2016) 57

Tabla 8. Prueba de normalidad para los datos históricos (1981-2016)..... 58

Tabla 9. Mann Kendall para los datos observados (1981-2016) 60

Tabla 10. Fechas del calentamiento, calibración y validación del modelo hidrológico GR4J 61

Tabla 11. Datos de tasa de cambio porcentual (%) de la precipitación futura (2030-2060) respecto al periodo observado (1981-2016……69

Tabla 12. Datos del cambio porcentual (%) de la evapotranspiración futura (2030-2060) respecto al periodo observado (1981-2016)..... ……73

Tabla 13. Variación de la temperatura media (°C) futura (2030-2060) respecto al periodo observado (1981-2016)……..77

Tabla 14. Variación de caudal para la época de estiaje y avenida, en el periodo 2030-2060 79

Tabla 15. Datos de tasa de cambio del caudal simulado (2030-2060) 82

Tabla 16. Matriz de consistencia de la investigación 103

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del modelo lluvia escorrentía GR4J 37

Figura 2. Ubicación de la cuenca del río Llaucano..... 42

Figura 3. Delimitación de la cuenca del río Llaucano 49

Figura 4. Variables de entrada para la calibración y validación del modelo hidrológico GR4J . 51

Figura 5. Flujograma de la investigación..... 54

Figura 6. Pruebas de normalidad para la evapotranspiración, temperatura media, caudal y precipitación observada (1981-2016) 59

Figura 7. Calibración del modelo hidrológico GR4J 62

Figura 8. Correlación lineal entre los caudales simulados y los observados en la calibración del GR4J 63

Figura 9. Validación del modelo hidrológico GR4J 64

Figura 10. Correlación lineal entre los caudales simulados y los observados en la validación del GR4J 65

Figura 11. Comportamiento de la precipitación media mensual (2030-2060) 66

Figura 12. Tasa de cambio de la precipitación futura (2030-2060)..... 68

Figura 13. Comportamiento de la evapotranspiración media mensual (2030-2060)..... 70

Figura 14. Tasa de cambio de la evapotranspiración potencial media (2030-2060) 71

Figura 15. Comportamiento de la temperatura media mensual (2030-2060) 74

Figura 16. Variaciones de la temperatura media futura (2030-2060)..... 75

Figura 17. Comportamiento del caudal medio simulado para el periodo 2030–2060..... 78

Figura 18. Tasa de cambio del caudal simulado (2030-2060)..... 80

Figura 19. Código de análisis estadístico inferencial en RStudio..... 104

Figura 20. Código de la extracción de datos de PISCO..... 104

Figura 21. Código de extracción de datos de PISCO - ARNOVIC..... 105

Figura 22. Código de extracción de datos de los Modelos Climáticos Globales (GCM)..... 105

Figura 23. Punto de salida de la cuenca del río Llaucano……...106

Figura 24. Agricultura en cuenca media del río Llaucano…….....…106

Figura 25. Actividades recreativas en la cuenca del río Llaucano……..……...…….107

Figura 26. Captaciones en la cuenca media del río Llaucano……..……..107

Figura 27. Extracción de carbon a orillas del río Llaucano……..…….108

Resumen

La presente investigación determina los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Llaucano, en la región de Cajamarca, para el periodo 2030-2060, empleando el modelo hidrológico GR4J de lluvia-escorrentía y proyecciones climáticas de tres Modelos Climáticos Globales (GCM) del CMIP6, bajo escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Se utilizaron series observadas de precipitación, temperatura y caudal de PISCO del SENAMHI, del periodo 1981-2016, para la calibración y validación del modelo hidrológico, obteniendo desempeños clasificados como "Bueno" y "Muy bueno" respectivamente. Se empleó la técnica de downscaling a los GCM (ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1 y MPI-ESM1-2-HR) para ajustarlo al área de estudio. Los resultados muestran un incremento del caudal promedio mensual de 13,57% y 10,63% en la época de estiaje, en el modelo ACCESS-CM2 en los escenarios SSP2-4.5 y 8.5 respectivamente. Asimismo, el modelo CNRM-CM6-1 estima incrementos de 10,14% y 12,67% en SSP2-4.5 y 8.5; y el modelo MPI-ESM1-2-HR proyecta un aumento de 28,79% y 22,57%, bajo el SSP2-4.5 y 8.5. En la época de avenida, el caudal promedio mensual en el modelo ACCESS-CM2 disminuye hasta 24,42% y 26,02% en los escenarios SSP2-4.5 y 8.5, respectivamente; el modelo CNRM-CM6-1 estima reducciones de 22,57% y 28,79% en SSP2-4.5 y 8.5; y para el modelo MPI-ESM1-2-HR en su SSP2-4.5 y 8.5 se espera reducciones de 30,45% y 31,30%, respectivamente. Se concluye que el cambio climático generará efectos significativos en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Llaucano.

Palabras clave: Cambio climático, disponibilidad hídrica**,** GR4J, GCM, CMPI6, escenarios climáticos.

Abstract

This research determines the effects of climate change on water availability in the Llaucano River basin, in the Cajamarca region, for the 2030–2060 period. It employs the GR4J rainfall-runoff hydrological model alongside climate projections from three Global Climate Models (GCMs) from the CMIP6 ensemble, under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios. Observed precipitation, temperature, and streamflow data from SENAMHI's PISCO dataset (covering the 1981–2016 period) were used to calibrate and validate the hydrological model, yielding performance ratings of "Good" and "Very good," respectively. A downscaling technique was applied to the GCMs (ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1, and MPI-ESM1-2-HR) to tailor them to the study area. The results indicate an increase in average monthly streamflow during the dry season: 13,57% and 10,63% for the ACCESS-CM2 model under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. Similarly, the CNRM-CM6-1 model estimates increases of 10,14% and 12,67% under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, while the MPI-ESM1-2-HR model projects increases of 28,79% and 22,57% under the same scenarios. During the high-flow (wet) season, the average monthly streamflow in the ACCESS-CM2 model decreases by up to 24,42% and 26,02% under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. The CNRM-CM6-1 model estimates reductions of 22,57% and 28,79% under scenarios SSP2-4.5 and SSP2-8.5, respectively; for the MPI-ESM1-2-HR model, reductions of 30,45% and 31,30% are expected under the same scenarios. It is concluded that climate change will have significant effects on water availability in the Llaucano River basin.

Keywords: Climate change, water availability, GR4J, GCM, CMPI6, climate scenario.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1.Planteamiento del problema

El cambio climático presenta una de las primeras amenazas para la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos, comprender su influencia es fundamental para la toma de decisiones en gestión ambiental, que garantice la estabilidad y sostenibilidad del agua (Monterroso y Gómez, 2021).

A nivel mundial, se prevé que el cambio climático altera los regímenes de precipitación y temperatura, generando modificaciones en la frecuencia, intensidad y distribución de eventos extremos, como sequías e inundaciones, en diversas regiones del planeta (Lozano y Monsalve, 2021). Se estima que, en el siglo XXI, la temperatura media global se ha incrementado en 4,8 °C respecto al siglo anterior(Correa et al., 2020). Además, las proyecciones futuras indican que muchas regiones podrían enfrentar una afectación en la disponibilidad y calidad del agua, como consecuencia compromete la seguridad alimentaria, energética y sanitaria a escala global (Martel, 2024). Esta situación ha marcado preocupación en América Latina y el Caribe, donde aproximadamente 17 800 000 entre niños y adolescentes viven en zonas vulnerables, que carecen de suficiencia hídrica para satisfacer sus necesidades básicas diarias (Rojas, 2024).

El Perú es el tercer país más vulnerable frente a cambios climáticos, situación que se manifiesta en eventos extremos como sequias, inundaciones que afectan a los recursos naturales y agravan la pobreza, considerando que más del 20 % de población viven en pobreza extrema(Organización de las Naciones Unidas para la Educación [UNESCO], 2021). En los últimos años, las emergencias asociadas a los peligros naturales han aumentado más de seis veces, siendo el 72% por el cambio climático, también se ha perdido un aproximado del 22% de la superficie de sus glaciares

(Ministerio del Ambiente [MINAM], 2024). Estas situaciones climáticas extremas son respuesta de los cambios de precipitación y el incremento de la temperatura.

El efecto del cambio climático se refleja en pérdidas económicas, que pueden agravarse por factores que impactan negativamente en el crecimiento económico, tal es el caso de la disminución en la disponibilidad del recurso hídrico para las actividades productivas (Martínez et al., 2023). Las condiciones climáticas futuras que se ven influenciadas por las variaciones de precipitación tienen relación en los cambios en los caudales de las aguas superficiales (Mena et al., 2020). Por ello, evaluar estas alteraciones en zonas con recursos limitados y de alta vulnerabilidad climática, permite enfrentar severos impactos en la disponibilidad hídrica.

En la región de Cajamarca, existe variaciones temporales de precipitación y temperatura, en el año 2024 se presentó un déficit de precipitaciones entre -30% y -60%, llegando hasta -100% en estaciones secas y un incremento de la temperatura a más de 4 °C, condiciones que evidencian un desequilibrio climático significativo, con repercusión en el régimen hidrológico de la cuenca del río Llaucano, ya que incide directamente sobre las fuentes de agua que la abastecen ((Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú [SENAMHI], 2024)

En este contexto, el agua que provee esta cuenca es un recurso fundamental para el desarrollo ambiental y socioeconómico de la población, al sustentar diversas actividades como las agrícolas, energéticas y el suministro de agua para la población local. Sin embargo, estos recursos se encuentran en dependencia por alteraciones en las condiciones climáticas, especialmente en la precipitación y la temperatura, que pueden generar impactos negativos en la oferta y gestión hídrica, reduciendo la sostenibilidad ambiental (Terán, 2021).

Ante esta realidad, resulta esencial estudiar los efectos del cambio climático sobre el comportamiento hidrológico en las cuencas, con el fin de orientar la planificación y la puesta en

marcha de acciones de adaptación al cambio climático. En ese sentido, los modelos hidrológicos son herramientas de aplicación para este tipo de análisis, facilitando representar escenarios futuros del clima considerando diferentes trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero (Méndez et al.,2022). Por tal motivo, en el presente estudio se empleó el modelo lluvia escorrentía GR4J para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030–2060, en respuesta a los efectos del cambio climático.

Los recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano son utilizados para diversas actividades que contribuyen a la economía local. No obstante, la disponibilidad de agua depende en gran medida de las precipitaciones, las cuales están fuertemente condicionadas por la variabilidad climática. Los cuerpos de agua superficiales, como manantiales, quebradas, ríos, bofedales y lagunas, que se alimentan de estas precipitaciones, presentan una notable reducción de caudales durante la época de estiaje, debido tanto al incremento de la demanda como a la limitada infraestructura destinada al almacenamiento del recurso hídrico. Ante este contexto, es fundamental analizar cómo el cambio climático afecta la disponibilidad de agua para cada uso y proyectar estos impactos a futuro, con el fin de orientar acciones de mitigación y diseñar estrategias de adaptación adecuadas (Terán, 2021).

1.2. Justificación

La disponibilidad de los recursos hídricos en la actualidad tiene gran relación con el cambio climático, lo que genera variabilidad y alteración de los flujos de agua superficiales, así como las inundaciones y sequías, incrementando los riesgos en el ambiente y el hombre (Babker et al., 2025). El presente estudio tiene como propósito determinar los efectos del cambio climático en relación con la respuesta hidrológica de la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060, mediante la simulación de caudales, bajo escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) moderados y muy altos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente y el análisis de las variables hidrometeorológicas históricas. Esta información permite entender el comportamiento de la precipitación y temperatura a una escala temporal mensual, anual y estacional, que podrían alterar la disponibilidad hídrica, por lo que servirá como base para la planificación y gestión de los recursos hídricos, así como también para la implementación de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad, con el propósito de equilibrar la oferta y la demanda hídrica (Mena et al., 2020).

La cantidad y calidad de agua aprovechable en la cuenca es uno de los componentes esenciales para el desarrollo de la agricultura, la ganadería e industria, que son las principales fuentes económicas. Según Terán (2021) el río Llaucano es considerado el más caudaloso de la provincia de Hualgayoc, donde se pueden implementar diversos proyectos hidráulicos, para el abastecimiento poblacional y para fortalecer la resiliencia frente a eventos climáticos extremos, como épocas de sequías o inundaciones por las lluvias intensas.

Además, el modelo hidrológico GR4J de lluvia-escorrentía es una herramienta valiosa para evaluar el impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Llaucano, que podría ser utilizados a futuro para proyectos hidrológicos e hidráulicos, puesto que permite simular el comportamiento del caudal bajo escenarios climáticos proyectados, en base a los registros de

precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (Andrea et al., 2023). Este enfoque sustenta las fases del ciclo hidrológico en contextos de carencia de abastecimiento de agua, así como también genera información base que permite tomar decisiones en la gestión de los recursos hídricos y adaptación al cambio climático, estableciendo una base sólida para futuras investigaciones aplicadas a la hidrología, climatología y ordenamiento territorial.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál son los efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030–2060, a partir de la simulación hidrológica bajo escenarios climáticos?

1.3.2. Problemas específicos

¿Cuál es la eficiencia del modelo hidrológico GR4J en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano en el periodo observado 1981 - 2016?

¿Cuáles son las variaciones de la precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectadas respecto al periodo histórico 1981–2016, en la cuenca del río Llaucano bajo los escenarios SSP2-4?5 y SSP5-8.5.?

¿Cuál es la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060, bajo los escenarios climáticos SSP2-4?5 y SSP5-8.5?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030–2060, a partir de la simulación hidrológica bajo escenarios climáticos.

1.4.2. Objetivos específicos

Evaluar la eficiencia del modelo hidrológico GR4J en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano en el periodo observado 1981-2016.

Determinar las variaciones de la precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectadas respecto al periodo histórico 1981–2016, en la cuenca del río Llaucano bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Evaluar la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060, bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Montenegro y Fernando (2025) evaluaron el impacto que tiene el cambio climático en la cuenca del río Guayllabamba, en Ecuador, empleando el modelo hidrológico GR4J, con proyecciones climáticas generadas por los modelos climáticos globales, bajo los escenarios de emisión SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-6.0 y SSP5-8.5. Los resultados mostraron que el desempeño en la calibración es bueno (NSE =0,45) y en la validación el desempeño es muy bueno (NSE=0,60), en la simulación de caudales futuros, el escenario SSP2-4.5 es el que presenta mayor incremento de caudal con un 62,72%y en el SSP5-8.5 se proyecta una diminución de 63,46%. Se concluye que la reducción en la disponibilidad hídrica en el futuro está comprometida con la implementación de medidas de mitigación frente al cambio climático.

Kassaye et al. (2024) estudiaron el comportamiento hidrológico en respuesta al cambio climático en la cuenca del río Baro, Etiopía, empleando el modelo hidrológico SWAT, utilizando proyecciones climáticas de 6 GCM del CMPI6, bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Los resultados en la etapa de calibración del modelo alcanzaron un desempeño satisfactorio (R^2 = 0,88, NSE =0,83 y PBIAS =0,39) y de manera similar en la validación (R^2 = 0,83, NSE = 0,74, y PBIAS =8,87), en la simulación hidrológica se muestran incrementos del caudal de 4,8% y 12,4% durante los periodos a corto y largo plazo, bajo el SSP2-4.5 y de 15,7% y 35,6% en el escenario SSP5-8.5. Se concluye que el cambio climático podría generar una mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Baro en las próximas décadas.

Zheng et al. (2024)evaluaron las proyecciones futuras del caudal en Australia en 780 cuencas hidrográficas, bajo escenarios de cambio climático SSP5-8.5 y RCP8.5 provenientes de modelos climáticos globales (GCM) de las fases CMIP5 y CMIP6 respectivamente, empleando el modelo

hidrológico GR4J. Los resultados obtenidos durante la calibración del modelo evidenciaron un desempeño satisfactorio, reflejado en valores del coeficiente NSE superiores a 0,6. Del mismo modo, las proyecciones futuras basadas en el escenario CMIP6 indican una tendencia a la disminución de la escorrentía, con reducciones aproximadas del 50% en la zona suroeste y del 20% en el extremo sureste para el periodo 2046-2075. En consecuencia, se concluye que el cambio climático podría afectar la disponibilidad futura de los recursos hídricos.

Martínez et al. (2023) evaluaron los posibles cambios en la evapotranspiración y el caudal en la cuenca del río Sardinas en México, utilizando el modelo hidrológico GR4J, considerando cuatro escenarios de emisión: SSP1-2.6, 4.5, 7.0 y SSP5-8.5. Los resultados en la calibración del modelo obtuvieron desempeño satisfactorio (R^2 = 0,72, NSE =0,78 y PBIAS =0,36), al igual que en la validación (R^2 = 0,68, NSE = 0,75, y PBIAS =2,93), en la simulación hidrológica se espera una disminución del caudal hasta 1,10% en el SSP2-4.5 y 2,53% en el SSP5-8.5 durante los horizontes evaluados, la precipitación proyecta incrementos hasta 4,53% y 4,39% en SS2-4,5 y 8.5, la temperatura media de 0,36 °C y 0,48 °C y la evapotranspiración aumentos de 12,12% y 17,79%, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Se concluye que el caudal está disminuyendo y las variables climáticas muestran una tendencia de aumento con el tiempo.

Condori y Ticona (2025) determinaron el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la represa Condorama, en la región de Arequipa. La metodología consistió en implementar el modelo hidrológico GR4J para analizar los escenarios climáticos SS1-2.6 y SSP5-8.5, ajustados mediante técnicas de downscaling. Los resultados durante la calibración del modelo alcanzaron un desempeño “Muy bueno” (R^2 = 0,79, NSE =0,79, KGE=0,75 y PBIAS =14,20%), al igual que en la validación (R^2 = 0,79, NSE = 0,79, KGE=0,67 y PBIAS =30%); en la simulación futura, el caudal incrementa en 192% en un periodo a corto plazo, la precipitación en 65 %, la temperatura

hasta 1,09 °C, bajo el escenario SSP5-8.5; concluyendo que las variaciones de estas variables climáticas influyen en los cambios del caudal futuro.

Pachac (2025) evaluó el impacto del cambio climático bajo escenarios SS2-4.5 y SSP5-8.5 en la cuenca del río Pativilca, ubicado en la región de Ancash y Lima. La metodología consistió en utilizar el modelo hidrológico SWAT y proyecciones climáticas del CMIP6 en los escenarios SS2-4.5 y 8.5. Los resultados obtenidos en la etapa de calibración y validación del modelo son satisfactorios de NSE de 0,69 y 0,72 en ese orden, en la simulación futura, en el escenario SSP2-4.5, la temperatura oscila entre 1,3 °C y 2,7 °C, y en el SSP5-8.5 de 1,5 °C y 4,8 °C, para la precipitación se espera un aumento entre 7,8% y 34,4% (SSP2-4.5), y de 16,8% y 106% (SSP5-8.5), y para el caudal incrementos de 22% y 64% bajo los escenarios SS2-4.5 y SSP5-8.5, concluyendo que el cambio climático podría impactos importantes en el régimen hidrológico.

Flores (2023) analizó los impactos del cambio climático en la escorrentía superficial de cuenca del río Chacco, en Ayacucho, utilizando del modelo hidrológico SWAT, empleando 10 GCM del proyecto CMIP6, considerando los escenarios SS2-4.5 y SSP5-8.5, en tres horizontes de tiempo, a corto, mediano y largo plazo. Los resultados muestran un desempeño del modelo aceptable de NSE igual 0,4 y 0,11 en la calibración y validación respectivamente; la precipitación incrementa hasta 44,61%(SS2-4.5) y hasta 77,33% (SSP5-8.5) durante sus tres horizontes; la temperatura incrementa hasta 6,42 °C (SS2-4.5) y 6,45 °C(SSP5-8.5) y el caudal que la aumentaría hasta 27,90% (SS2-4.5) y 47,95% (SS2-4.5), concluyendo que a futuro se espera variaciones importantes de las variables climáticas y el caudal de la cuenca.

Arias & Delgado (2023) estimaron los caudales diarios en la cuenca del río Zaña, de la región de Lambayeque, mediante el modelo hidrológico GR4J. La metodología consistió en recopilar información de la estación hidrométrica Batan, e información climática de los datos grillados

ERA5, que se ha utilizado para la calibración y validación del modelo. Los resultados muestran un desempeño “bueno” (NSE=0,48, R2=0,65) en la calibración y “muy bueno” (NSE=0,64, R2=0,70) en la validación, concluyendo que el modelo es eficiente para aplicaciones hidrológicas en cuencas con características parecidas.

Rojas (2024) evaluó el impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Chotano, utilizando el modelo hidrológico GR2M, el cual fue calibrado y validado empleando los datos del producto PISCO junto con los registros de la estación hidrométrica Chotano Lajas, y los 2 GCM bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Los resultados mostraron que, en la estación seca (junio-agosto), el caudal disminuiría entre 20,66% y 36,68%, mientras que en la temporada húmeda (diciembre-abril) se incrementa de 3,44% a 19,39%, que va a depender del modelo y escenario. Se concluye que el cambio climático reducirá la disponibilidad de agua en la estación seca e incrementará los caudales en la húmeda, manifestando la necesidad de implementar estrategias sostenibles de gestión hídrica para la cuenca del río Chotano.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cambio climático

Son las variaciones en los patrones promedio del clima o cambios que se prolongan durante períodos largos, generalmente décadas, que puede estar relacionado con procesos naturales internos, como el forzamiento externo, el impacto de las actividades humanas a largo plazo en la atmósfera o en el uso de la tierra(Galindo et al, 2022). Por lo tanto, el cambio climático son cambios a largo plazo que sufren los componentes climáticos, tales como temperatura, lluvia, humedad, viento y la ocurrencia de eventos extremos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2014).

Este fenómeno puede manifestarse en una región particular o abarcar toda la superficie de la tierra, y generalmente sucede cuando es de origen antrópico, a diferencia de los cambios de origen por los procesos naturales en el suelo y el sistema solar, por ende, en la política ambiental, el concepto de cambio climático se utiliza para referirse al calentamiento global generado por las actividades humanas, siendo un problema que trasciende lo ambiental y que implica decisiones de gobernanza, justicia y protección frente al cambio climático(Lanegra, 2021). Sin embargo, en la literatura científica se distingue que el calentamiento global se centra en el incremento de la temperatura de la superficie terrestre, el cambio climático comprende este aumento junto con otros impactos asociados a los gases de efecto invernadero(Torres y Gamero, 2021).

En el cambio climático es muy importante poder diferenciar los efectos naturales y los causados por la actividad humana, ya que permite entender con mayor precisión el impacto que el ser humano crea al influir en el sistema climático y en sus distintos componentes (Abdulla y Al-Shurafat, 2020).

2.2.1.1. Tasa de cambio. Para evaluar el cambio climático, se determina los cambios cuantitativamente futuros en función del período de referencia, estos se realizan en ciertos períodos y en una escala específica, en los que las modificaciones en la precipitación se expresan en porcentaje (%), mientras que las variaciones de temperatura se indican en grados Celsius (°C) (SENAMHI, 2020). Es recomendable mostrar resultados de tasas de cambios de las variables climáticas basados en valores promedio y agregando un mínimo y máximo para lograr el área indefinida asociada (Abdulla y Al-Shurafat, 2020).

2.2.1.2. Causas del Cambio Climático. Durante las últimas tres décadas, la temperatura media global se ha incrementado entre 0,95 °C y 1,20 °C, principalmente como consecuencia del aumento de gases de efecto invernadero (GEI) tales como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido

nitroso (N_2O) (IPCC, 2023). Entre las actividades humanas que contribuyen al cambio climático se incluyen el crecimiento poblacional, el uso intensivo de combustibles fósiles, la deforestación, la transformación del uso del suelo, los incendios forestales y las prácticas agrícolas y ganaderas de gran escala (Galindo et al., 2022).

- **El efecto invernadero antrópico.** La actividad humana libera gases de efecto invernadero en la atmósfera, los cuales absorben la radiación infrarroja emitida por la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta radiación se dispersa en distintas direcciones, incluida la superficie terrestre, favoreciendo la retención de calor en la troposfera, conocido como efecto invernadero natural, que permite mantener condiciones térmicas adecuadas para la vida en el planeta. (Martín et al., 2023).

A medida que se asciende en la troposfera, la temperatura tiende a bajar, lo que genera que la emisión media desde las capas altas de la atmósfera, en equilibrio con la radiación solar neta, sea cercana a -19 °C, en cambio la superficie del suelo tiene una temperatura cercana a +14 °C (IPCC, 2023). El incremento de la concentración de gases de efecto invernadero reduce la eficiencia con la que la Tierra libera energía al espacio, puesto que la radiación infrarroja se emite desde niveles atmosféricos altos y fríos, lo cual genera un desequilibrio energético que genera el calentamiento del sistema climático hasta recuperar el balance, lo que intensifica el efecto invernadero y se incremente el calentamiento global (Martín et al., 2023).

- **Calentamiento Global.** La actividad humana ha aumentado la concentración de gases de efecto invernadero, lo que ha provocado un ascenso de las temperaturas tanto terrestres como oceánicas, conocido como calentamiento global, este proceso modifica el climático natural y acelera cambios que en épocas atrás ocurrían de manera temporal, contribuyendo a experimentar cambios extremos en el sistema climático global (Adamo et al., 2021).

- **Efectos adversos del cambio climático.** Los cambios en las variables climáticas promedio alteran el medio físico o biológico del planeta, impactando directamente en los ecosistemas, la disponibilidad de recursos y el bienestar humano (IPCC, 2014). Este fenómeno genera efectos significativos sobre la composición y el funcionamiento de los ecosistemas naturales, al disminuir su capacidad de recuperación frente a alteraciones ambientales, y al afectar la productividad de los sistemas bajo manejo y ocasiona impactos en el ámbito socioeconómico, la salud humana y el bienestar de la población (Adamo et al., 2021).

En la economía, se estiman que, bajo escenarios de altas emisiones y sin la implementación de estrategias de adaptación al cambio climático, el PBI global podría tener una disminución de un 24% hacia el año 2100 (Mohaddes y Raissi, 2025).

- **Efectos secundarios del cambio climático.** El aumento de la temperatura global ha provocado el derretimiento de los glaciares y las capas polares, liberando una gran cantidad de agua dulce, que equivale aproximadamente al 70% de su volumen de agua dulce, este proceso contribuye a incrementar el nivel del mar, ocasionando inundaciones en zonas costeras y afectación a áreas de producción (Lanegra, 2021).

Asimismo, las grandes cantidades de agua dulce producto del deshielo alteran los océanos y modifican el balance del sistema climático, intensificando la variabilidad de fenómenos como El Niño, en el agua subterránea el cambio climático incide en los procesos de recarga de fuentes naturales y artificiales (Reintería et al., 2020). Por otro lado, el ciclo hidrológico también es un factor determinante, y los cambios en la precipitación no son uniformes, por lo tanto, en algunas regiones aumentan la precipitación, mientras que en otras disminuyen, generando desequilibrio en la disponibilidad del recurso hídrico (IPCC, 2014).

Los cambios en el equilibrio del agua son indicadores del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en una región particular, manifestándose en cuerpos de agua superficiales, como ríos, lagos y embalses, que cambian en el volumen del agua. Sin embargo, para las fuentes de agua subterránea, el cambio climático puede verse significativamente afectado por varios mecanismos, que tiene más relación con la geomorfología (Jesús et al., 2020).

- **Adaptación y mitigación ante la escasez de agua.** Ante el contexto actual del cambio climático, se reconoce que el sistema de gestión del recurso hídrico no es suficiente para enfrentar el desafío de suministrar agua en cantidades y calidad necesarias(Jesus et al., 2020). Por lo tanto, es indispensable evaluar en qué medida, la política de la gestión del agua facilita agravar la crisis y las estrategias que permitan enfrentar las consecuencias futuras del cambio climático (Saravia y Gil, 2021).

En los últimos 40 años, la sequía ha sido uno de los problemas por el déficit de precipitaciones, siendo inducida por el cambio climático y por la sobreexplotación de fuentes hídricas o por la contaminación de fuentes subterráneas o superficiales, y se asociado con afectado aproximadamente 60% de muertes de eventos extremos meteorológicos (Berman et al., 2024). Ante esta situación, los países han comenzado a considerar la posibilidad de desastres climáticos y a preparar a la población ante posibles situaciones extremas imprevistas derivados del cambio climático (Martel, 2024).

A nivel mundial, no solo se promueve la difusión de información, a través de videos, dimensiones, imágenes, reliquias, documentos y fotos, sino que también se proporciona las diversas herramientas disponibles a los ciudadanos para fortalecer su educación y capacidad de adaptación de los ciudadanos, que en el futuro estas acciones podrían consolidarse una cultura de resiliencia

frente a la sequía, respaldada por la cooperación entre políticas nacionales e internacionales, como también entre ciudades y regiones (Martel, 2024).

2.2.1.4. Modelos Climáticos Globales (GCM). En los últimos años los GCM se han considerado una de las herramientas de mayor utilidad para comprender las variaciones del clima y proporcionar proyecciones de escenarios futuros, lo que puede ser útil para aquellos que estudian sus posibles consecuencias (IPCC, 2023). Los GCM son herramientas matemáticas que se utilizan para representar el funcionamiento del sistema climático, incluyendo la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y la criosfera, cuya finalidad es estimar la variación del clima bajo distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), cuyo fin es estudiar el cambio climático a largo plazo, sosteniendo una base que permite generar proyecciones climáticas a escala regional y local (Jayo, 2024).

Estos modelos tienen limitaciones relacionadas a su baja resolución espacial, cuyos valores fluctúan entre 1 y 3 grados de arco, generando incertidumbre en la representación de las variables del clima a una región particular, sin embargo, dada la baja resolución espacial de los GCMs, es necesario aplicar técnicas de reducción de escala o downscaling para obtener proyecciones climáticas que sean útiles a nivel local (Cruz, 2021).

En la Tabla 1 se muestra los principales Modelos Climáticos Globales del CMIP6, indicando su resolución espacial de longitud y latitud, además de su respectivo centro u origen de desarrollo.

Tabla 1

Principales Modelos Climáticos Globales del CMIP6

Modelo Climático	País	Resolución(°lon*°lat)
ACCESS-CM2	Australia	1,875 × 1,25
BCC-CSM2-MR	China	1,13 x 1,13
CMCC-CM2-HR4	Italia	1,25 x 0,94
CNRM-CM6-1	Francia	1,4 x 1,4
CNRM-CM6-1-HR	Francia	0,5 x 0,5
GFDL-ESM4	EE. UU	1,25 x 1,00
HadGEM3-GC31-MM	Reino Unido	0,8 x 0,56
IITM-ESM	India	1,9 x 1,9
INM-CM5-0	Rusia	2,0 x 1,5
MIROC-ES2L	Japón	2,81 x 2,79
MPI-ESM1-2-HR	Alemania	0.94 × 0.94
MRI-ESM2-0	Japón	1,13 x 1,13
NorESM2-MM	Noruega	1,25 x 0,94
TaiESM1	Taiwán	1,25 x 0,94

Fuente: Tomado de Ayele (2025).

2.2.1.6. Escalamiento espacial (Downscaling). Ante la necesidad de ajustar la información de los modelos climáticos globales a escalas locales, se han desarrollado diferentes métodos. Este proceso se conoce como **escalamiento o downscaling,** cuyo propósito es transformar las series de tiempo simuladas por los modelos en datos que sean útiles para la modelación a nivel de cuencas hidrográficas o en estaciones (Tabari et al., 2021).

Existen dos tipos de escalamiento: el dinámico y estadístico. El dinámico está basado en el uso de los modelos climáticos regionales que modela de forma completa los procesos físicos de la atmósfera, sin embargo, se requiere de una gran capacidad de procesamiento y el uso de supercomputadoras que implica un alto costo computacional (Gibson et al., 2024). El escalamiento

estadístico consiste en adecuar la información de los modelos climáticos globales mediante el uso de datos observados de estaciones hidrometeorológicas, ajustando las distribuciones estadísticas para mejorar el reflejo de la realidad local(Flores, 2023).

El escalamiento estadístico se basa en dos etapas: La primera es encontrar una relación estadística entre la variable climática observada y la simulada por los modelos climáticos globales, se debe realizar en el mismo periodo de tiempo; la segunda etapa consiste en aplicar la relación encontrada a las proyecciones futuras, permitiendo así ajustar los datos simulados (Keller et al., 2022). En un estudio enfocado en los recursos hídricos, donde se consideran como variables de interés la precipitación y la temperatura, para lo cual existen diversos métodos de corrección de sesgo en estas variables(Tabari et al., 2021). Para la variable de precipitación se emplearon diversas técnicas, como el escalamiento lineal (LS), el escalamiento de intensidad local (LOCI), la transformación de potencia (PT), el mapeo de distribución mediante funciones gamma o gaussianas (DM) y, finalmente, el mapeo de cuantiles (QM)(Yersaw y Chane, 2024). Por otro lado, en el caso de la temperatura, los métodos de corrección estadística más empleados son el escalamiento lineal (LS), el escalamiento de la varianza (VARI) y el mapeo de distribución basado en una función de distribución gaussiana (DM), debido a su capacidad para reducir sesgos y mejorar la representación de las variables climáticas proyectadas(Cannon et al., 2015).

2.2.1.5. Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados - Fase 6 (CMIP6). El CMIP inició sus actividades en el año 1995 por medio de la coordinación de experimentos basados en modelos climáticos, donde fueron participantes diversos grupos de investigación a nivel internacional para el modelamiento del clima global. En la actualidad, este proyecto se desarrolla en su sexta fase, denominada CMIP6, que incorpora variables socioeconómicas y diferentes

escenarios de concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (GEI) (Eyring et al., 2016).

A lo largo del tiempo, diversas instituciones de investigación (Universidades, centros meteorológicos, comunidades científicas, etc.) han desarrollado proyecciones climáticas globales a partir de modelos climáticos y escenarios de emisión, que describen posibles condiciones futuras del clima (Morán y Novillo, 2022). En ese contexto, el CMIP6 emplea las trayectorias SSP, que representan distintas trayectorias de desarrollo socioeconómico, considerando factores como el crecimiento económico, los cambios demográficos y tecnológicos, así como los niveles de desigualdad, que permiten evaluar los desafíos y capacidades de mitigación y adaptación frente al cambio climático en diversos contextos futuros (IPCC, 2023).

2.2.1.6. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)

Son los escenarios que describen trayectorias futuras posibles del desarrollo socioeconómico, que se representan a partir de una narrativa y variables cuantitativas, de cómo podría evolucionar las sociedades en las próximas décadas y que desafíos implicarían estos cambios para la mitigación y adaptación al cambio climático. Entre los aspectos considerados se encuentra la evolución de las economías, la distribución de la riqueza, el crecimiento demográfico y el avance tecnológico, elementos que influyen en la emisión de GEI y en las diferentes alternativas de adaptación al impacto derivados del cambio climático (Escoto et al., 2021).

Los escenarios climáticos del CMIP6 se basan en las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP), que describen la evolución de la sociedad, combinadas con el nivel de forzamiento radiativo alcanzado hacia el 2100 (W/m2), que indica la cantidad de energía que se retiene en el sistema climáticos por el incremento de GEI (IPCC (2023).

En la Tabla 2 se describen cada uno de los escenarios climáticos de CMIP6, siendo el escenario con mayor grado de severidad el SSP5-8.5, que representa un futuro sin políticas de mitigación, con alta dependencia de combustibles fósiles y aumento continuo de emisiones; mientras que SSP1-2.6 describe una trayectoria de desarrollo sostenible con reducciones significativas que limitan el calentamiento global a aproximadamente 1.5 °C (Jayo, 2024).

Tabla 2

Escenarios climáticos del CMIP6

Escenario	**Descripción**	**Temperatura Global al 2100**
SSP1-1.9	Sostenibilidad con muy bajas emisiones	+1,3°C a +1,4°C
SSP1-2.6	Sostenibilidad con bajas emisiones, implementación de medidas de mitigación.	+1,5°C a +1,7°C
SSP2-4.5	Desarrollo intermedio, con tendencias socioeconómicas y medidas de mitigación moderadas	+2,0°C a +2,7°C
SSP3-7.0	Desarrollo regionalizado, con altas emisiones con fragmentación global	+3,0°C a +3,5°C
SSP5-8.5	Muy altas emisiones basado en combustibles fósiles.	+4,0°C a +4,5°C

Fuente: Adaptado del IPCC (2023).

2.2.2. Disponibilidad de agua

En nuestro planeta el 75% es agua, pero únicamente el 2,5% es agua dulce, siendo un recurso natural vital para la existencia de los seres vivos, además de constituir un recurso vulnerable y estratégico para el desarrollo sustentable, esencial para mantener los sistemas y ciclos naturales que sustentan el equilibrio ambiental y la seguridad nacional (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2024). La disponibilidad hídrica refleja la cantidad total de agua que puede usarse para diversas aplicaciones, como uso humano, agricultura, producción de electricidad, etc. (Hofer y Warren, 2020).

En el Perú, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) es la institución responsable de la determinación cuantitativa de la disponibilidad de agua para el otorgamiento del derecho de agua. Por ello, en muchos estudios hidrológicos en los ríos, la disponibilidad de agua se tiene en cuenta como la variable más importante para determinar el flujo de superficie(Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2025).

2.2.2.1. Ciclo Hidrológico. Se trata de un proceso básico que tiene origen natural, a través del cual se suministra agua a los organismos vivos en diversas cuencas hidrográficas, lo cual se presenta en sus tres condiciones de estado: líquido, gas y sólido (ANA, 2021).

El ciclo hidrológico constituye un proceso dinámico y continuo mediante el cual el agua circula y cambia entre sus estados líquido, sólido y gaseoso, mecanismo que inicia principalmente con la evaporación del agua proveniente del suelo, los cuerpos de agua continentales y los océanos, así como con la evapotranspiración generada por la cobertura vegetal (Rentería et al., 2020). El vapor de agua que se ha generado asciende hacia la atmósfera dando origen a la condensación, formando nubes que posteriormente se transforman en precipitación, en sus diferentes formas, y en la superficie terrestre se acumula la precipitación, dando lugar a procesos de escorrentía superficial y subterránea, restituyendo el recurso a los cuerpos de agua originales (Rodas, 2022). También es conocido como ciclo del agua, al movimiento continuo de las moléculas de agua entre la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera, proceso impulsado principalmente por la energía solar, que permite la circulación permanente del agua a través de diferentes procesos físicos dentro del sistema terrestre (Martínez et al., 2023).

Los principales procesos dinámicos del ciclo hidrológico incluyen la evaporación, el de más influencia ya que proporciona un 90% de humedad atmosférica, principalmente desde los océanos y otras masas de agua, el otro 10% proviene de procesos como la transpiración de los seres vivos

y la sublimación (Hofer y Warren, 2020). Además, las emisiones volcánicas también contribuyen al contenido de vapores atmosféricos, pero en menor cantidad (Rentería et al., 2020).

2.2.2.2. Seguridad hídrica. Implica la aptitud de una sociedad para asegurar de manera sostenible la disponibilidad de agua en cantidades y condiciones que satisfagan sus necesidades, de manera que satisfagan las necesidades humanas y se promueva el desarrollo socioeconómico, para garantizar el poder de protección frente a la contaminación, los desastres relacionados con el clima y estabilidad política asociados con los ecosistemas(Izaguirre et al., 2024).

2.2.2.3. Disponibilidad de aguas superficiales. La cantidad de agua es considerada como una dimensión de la seguridad hídrica, siendo el principal propósito de análisis para el presente estudio (Rentería et al., 2020). La disponibilidad de aguas superficiales alude a la cantidad de este recurso que se distribuye dentro de una cuenca hidrográfica producto de la precipitación, incluyendo el agua de los ríos, lagos y otras fuentes superficiales, que se aprovechan en diversas actividades, tales como la producción, abastecimiento de agua potable y agricultura (Hofer & Warren, 2020).

2.2.3. Modelación Hidrológica

En la simulación de caudales se utiliza esquemas conceptuales y fórmulas matemáticas para describir los procesos del ciclo hídrico, cuyo desempeño depende del grado de validación y calibración para la cantidad de datos disponibles (Méndez et al., 2022).

Un modelo hidrológico es una representación de un fenómeno real mediante herramientas conceptuales, ecuaciones físicas, estadísticas o matemática (Osorio et al., 2022). En ingeniería, los modelos son fundamentales, especialmente en áreas como el análisis estructural y la hidrología, las cuales son empleadas para simular procesos de acumulación y transporte de agua en una cuenca, basándose en ecuaciones físicas o relaciones empíricas. (Sofía et al., 2022).

2.2.3.1. Clasificación de los modelos hidrológicos. En el ámbito de la modelación hidrológica, comprender las distintas clasificaciones de modelos existentes, permite seleccionar adecuadamente el tipo de modelo más apropiado según los objetivos del estudio, la información disponible y los procesos hidrológicos que se desean representar (Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica [INSH], 2022).

- **El nivel de descripción de los procesos**. Los modelos pueden clasificarse en tres tipos: empíricos, aquellos que se construyen a partir de relaciones estadísticas entre variables de entrada y salida, sin tener en consideración los procesos físicos involucrados. Los conceptuales, que simulan los procesos hidrológicos mediante esquemas simplificados como reservorios conectados por flujos; por último, los modelos de base física que representan los procesos mediante leyes fundamentales como la conservación de masa, energía y cantidad de movimiento (Sidle, 2021).
- **La discretización espacial**. Los modelos hidrológicos se clasifican en agregados, semidistribuidos y distribuidos, los agregados consideran a la cuenca como una unidad homogénea, empleando valores promedio para representar las variables hidrológicas y climáticas; los semidistribuidos dividen la cuenca en subunidades (como subcuencas o unidades hidrológicas homogéneas), permitiendo un mayor detalle espacial; mientras que los distribuidos emplean una malla o rejilla para representar espacialmente cada punto de la cuenca, siendo los más precisos pero también los más exigentes en cuanto a datos y recursos computacionales (Cherif et al., 2023).
- **Aleatoriedad en la modelación.** Según esta clasificación los modelos pueden ser determinísticos y estocásticos. Determinístico, produce los mismos resultados siempre que se usen los mismos datos de entrada y parámetros, ignorando cualquier tipo de incertidumbre;

mientras que los modelos estocásticos introducen aleatoriedad en sus componentes, permitiendo representar fenómenos inciertos o impredecibles, como la ocurrencia de lluvias intensas o las proyecciones climáticas futuras (INSH, 2022).

2.2.3.2. Calibración y validación de modelos hidrológicos. La calibración del modelo hidrológico se integra con la etapa de validación para garantizar la precisión de sus resultados; la calibración consiste en ajustar los parámetros del modelo con el fin de optimizar su correcto funcionamiento conforme a un conjunto de criterios predefinidos; mientras que la validación es un proceso que demuestra la capacidad del modelo para realizar pronósticos en las condiciones hidrológicas en un período distinto al empleado para la calibración (Sofía et al., 2022)

En la validación que se realiza posterior a la calibración, se evalúa el potencial del modelo para predecir con precisión los resultados en un intervalo de tiempo independiente, lo cual permite verificar su capacidad predictiva y su aplicación en otras condiciones. Por lo tanto, se dice que el modelo está validado si, durante este proceso, presenta errores o restricciones aceptables (López, 2022).

2.2.3.3. Sesgos de los modelos hidrológicos. Existen cuatro fuentes principales tipos de error en el modelamiento hidrológico. Primero, errores aleatorios o sistemáticos en los datos de entrada, que son la precipitación y la evapotranspiración, se presenta cuando hay pocas estaciones o se calculan mediante fórmulas matemáticas. Segundo, errores en los valores registrados, debido a la limitada cantidad de estaciones automáticas y la dependencia de mediciones manuales. Tercero, errores debido a parámetros no óptimos, dado que los valores ajustados durante la calibración de modelos conceptuales son completamente precisos. Finalmente, errores estructurales del modelo, derivados de la simplificación matemática de procesos complejos, lo que limita la representación completa del sistema (Rojas, 2024).

2.2.3.4. Indicadores de precisión y rendimiento de datos

En la presente investigación se han empleado diversos índices para evaluar el desempeño del modelo hidrológico GR4J, mediante una comparación de datos simulados con los observados (PISCO).

- **Coeficiente de determinación (R^2).** Indicador que cuantificar la proporción de la variabilidad de los datos observados que es explicada por el modelo, permitiendo evaluar la correlación de los datos ajustados con los observados (Chávez, 2025) .

Tabla 3

Rangos de evaluación del coeficiente de determinación R^2

Coeficiente de determinación R^2	Ajuste
< 0,25	Inadecuado
0,25 - 0,50	Deficiente
0,50 - 0,60	Satisfactorio
0,60 - 0,75	Bueno
0,75 - 0,100	Muy bueno

Nota. Tomado de Mendoza et al. (2021).

- **Índices de eficiencia de modelos.** En la modelación hidrológica, los índices de eficiencia permiten reproducir una serie de datos observados de una variable de interés, que permite determinar la calidad de ajuste entre los resultados simulados y los valores reales, siendo fundamental en el proceso de calibración y validación de los parámetros de los modelos (Segarra, 2022).

Uno de los índices ampliamente utilizados en este proceso de la eficiencia de los modelos hidrológicos es el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), que mide la diferencia entre

los caudales simulados y observados, considerando el valor de 1 como un ajuste perfecto. No obstante, existe excepciones del índice que puede presentar limitaciones en el ajuste del modelo en condiciones de caudales bajos, y para reducir este sesgo se emplea una transformación logarítmica de este índice (Knoben et al., 2019).

En la Tabla 4 se muestra las categorías de clasificación del NSE en la evaluación del modelo hidrológico GR4J, que se utilizado para el presente estudio.

Tabla 4

Rangos de evaluación del Nash-Sutcliffe (NSE)

Coeficientes de eficiencia del NSE	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2 - 0,4	Satisfactorio
0,4 - 0,6	Bueno
0,6 - 0,8	Muy Bueno
>0,8	Excelente

Nota. Tomado del SENAMHI (2016).

Por otro lado, tenemos el índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) que constituye una métrica de evaluación hidrológica que integra tres componentes fundamentales del ajuste del modelo: la correlación temporal (r), que representa la relación de los valores observados y simulados; la variación con respecto a flujos medios (α), que contrasta la dispersión de los datos, y por último la variación con respecto a la dispersión (β), que analiza la relación entre los caudales medios simulados y observados (Mathevet et al., 2023). Los indicadores del Coeficiente KGE es del -∞ a 1, siendo el mejor ajuste entre las series observadas y simuladas los valores cercanos a 1 (SENAMHI, 2019).

Asimismo, el Porcentaje de desviación respecto de caudales observados (PBIAS) permite evaluar la relación de los caudales simulados con los observados. Un valor cercano a 0 indica óptimo desempeño, mientras que los valores negativos indican sobreestimación y los positivos reflejan subestimación, se considera un ajuste "bueno" si es menor al 20%, entre 20 % al 40 % es "satisfactorio "y no satisfactorio cuando supera el 40 % (SENAMHI,2016).

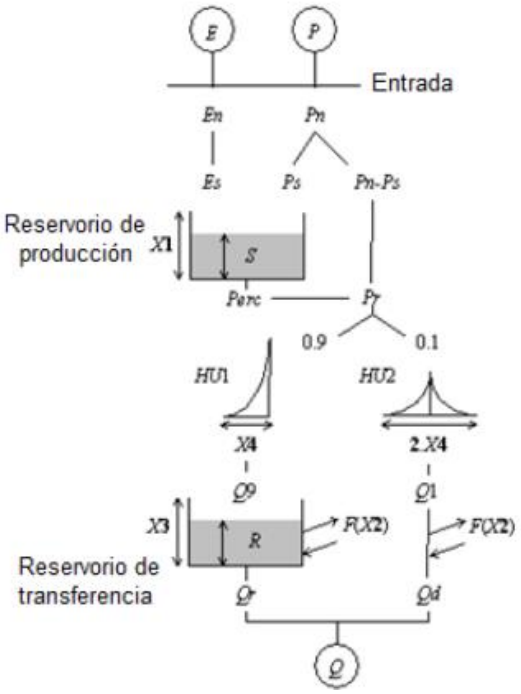
2.2.3.5. Modelo hidrológico GR4J. Es un modelo conceptual y concentrado que permite simular, a escala diaria, los procesos de precipitación y escorrentía en cuencas con régimen pluvial, para implementarlo se utiliza cuatro parámetros principales y requiere como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial (Ochoa et al., 2023). A partir de esos insumos, el modelo GR4J estima los caudales medios diarios, basándose en una representación simplificada del sistema hidrológico conceptualizando los procesos como la infiltración, evaporación, flujo superficial y subterráneo (Montenegro y Fernando, 2025).

Los parámetros que se necesita para ejecutar el modelo son cuatro. Faty et al. (2023) nos mencionan el significado: X1, capacidad máxima del almacenamiento (mm); X2, coeficiente de transferencia subterránea (mm/día); X3, capacidad de almacenamiento de enrutamiento (mm) y X4, Tiempo del hidrograma unitario (días). El rango de estos parámetros considerando un intervalo de confianza del 80 %, los rangos de variación de los parámetros del modelo son los siguientes: X1 entre 100 y 1200, X2 entre −5 y 3, X3 entre 20 y 300 y X4 entre 1,1 y 2,9 (Perrin, 2003).

En la Figura 1 se presenta el esquema de ejecución del modelo, siendo la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (E) las variables de entrada, y la temperatura media se considera para estimar la evapotranspiración. A partir de estas variables, el modelo simula los procesos hidrológicos relacionados con la generación de escorrentía en la cuenca.

Figura 1

Diagrama de flujo del modelo lluvia escorrentía GR4J



Fuente: Tomado de Perrin et al. (2003).

2.2.3.6. Cuenca Hidrográfica. Es un territorio compuesto por elementos interconectados, cuyo límite está determinado por una divisoria de aguas. La unidad hidrográfica incluye un sistema hídrico que capta, conduce y drena el agua hacia un cuerpo receptor, tales como un río, lago, laguna o el mar (Meierdiercks et al., 2024). En ese sentido, se define como un espacio tridimensional que abarca tanto la superficie del terreno como las capas subterráneas del suelo, donde se desarrollan diversas interacciones (Velázquez et al., 2020).

Asimismo, las cuencas hidrográficas nos proveen diversos servicios ecosistémicos, como la provisión de agua para abastecimiento poblacional y las actividades productivas, servicios de regulación, como hábitat de seres vivos y servicios culturales que tiene relación con el ecoturismo (Martínez & Villalejo, 2018).

2.2.4. Evapotranspiración potencial (ETP)

Se refiere al efecto combinado de la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas, siendo introducido por Thornthwaite y Penman en 1948. El método propuesto por Thornthwaite, la ETP se calcula a partir de la temperatura media, siendo esta el promedio de la temperatura máxima y mínima (Monterroso y Gómez, 2021).

Thornthwaite utilizó datos de evaporación obtenidos en distintas regiones de Estados Unidos, donde existía suficiente agua de humedad para mantener activa la transpiración, con ello, desarrolló una ecuación empírica que relaciona la evaporación y la precipitación mediante valores mensuales de temperatura y precipitación (Aschonitis et al., 2022).

El método de Oudin es una formula empírica desarrollada para estimar la Evapotranspiración potencial (ETP) en estudios hidrológicos, agrícolas y ambientales, propuesta por Ludovic Oudin y colaboradores en el 2005, caracterizándose como un método simple, eficiente y aplicable en zonas con poca información meteorológica, para lo cual se utiliza la temperatura media y la radiación extraterrestre, que depende de la latitud y del día juliano del año (Oudin et al., 2005).

2.2.5. Sistemas de información geográfica (SIG) aplicados en los recursos hídricos

Estas herramientas de cartografía se emplean en estudios hidrológicos, que permite la gestión de unidades hidrográficas, estos integran herramientas que permiten realizar un análisis completo de la dinámica del agua, y su aplicación ayuda a comprender los diferentes procesos que regulan la disponibilidad hídrica y las interacciones dentro del territorio (Meierdiercks et al., 2024). Entre estas herramientas, los sistemas de información geográfica (SIG) destacan por su capacidad de analizar y gestionar información espacial para una planificación y optimización de intervenciones en cuencas, integrando información como uso de suelo, pendientes, erosión, sedimentación y áreas de vulnerabilidad (Kumar et al., 2021).

2.3. Definiciones conceptuales

2.3.1. Cambio climático

Se define como la alteración directa o indirecta en el régimen climático producto del desarrollo de actividades antrópicas, que modifica la composición de la atmósfera y se combina con la variabilidad climática natural, estas alteraciones en los patrones de precipitación, da lugar a las sequías más frecuentes o lluvias intensas, que afecta considerablemente el ciclo hidrológico (IPCC, 2023).

2.3.2. Variables climáticas

Son aquellas que permiten representar y analizar las fluctuaciones climáticas de un determinado territorio; entre las principales se incluyen la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración potencial, el balance hídrico, entre otras, debido a que estas influyen directamente en el comportamiento climático e hidrológico de una región (Jesús et al., 2020).

2.3.3. Escenarios de emisión

Se denominan escenario de emisión a los que agrupan proyecciones sobre la emisión y concentraciones de gases de efecto invernadero, gases químicamente activos, así como cambios en el uso del suelo y la cobertura terrestre, representando las diferentes formas que el ser humano se desarrolla y su relación con la afectación a las emisiones y el clima global, estimándose mediante la aplicación de modelos climáticos bajo diferentes condiciones socioeconómicas (IPPC, 2014).

2.3.4. Recursos hídricos

Se refiere a todas las aguas superficiales, subterráneas, continentales y los bienes asociados a este, que deben ser gestionadas de manera integrada, sostenible y multisectorial, con el propósito de garantizar su conservación, protección y aprovechamiento eficiente para satisfacer las necesidades

actuales y futuras de la población, así como para la preservación de los ecosistemas acuáticos (ANA, 2021).

2.3.5. Variación del caudal

Esta variable describe el comportamiento del flujo del agua en función al tiempo y en una sección específica del cauce, representándose a través de hidrogramas o gráficas que permiten observar las variaciones del flujo de agua a lo largo del tiempo (Tebar, 2017).

2.3.6. Precipitación

Es la fase fundamental del ciclo hidrológico, mediante la cual el agua es transferida desde la atmósfera hacia la superficie terrestre, que ocurre cuando el vapor de agua presente en la atmósfera se condensa y forma gotas dentro de las nubes; posteriormente, al aumentar su tamaño y peso, estas superan la capacidad de suspensión de la nube y caen hacia la superficie en forma de lluvia, nieve o granizo (Pérez et al., 2020).

2.3.7. Temperatura

La temperatura es una magnitud física que representa el grado de calor o frío de un cuerpo o del entorno, utilizada para determinar la energía térmica de las partículas, cuya unidad utilizada en el presente estudio es en grados Celsius (°C) (Real Academia Española, 2023).

2.3.8. Evapotranspiración

Es el proceso mediante el cual el agua se pierde tanto por transpiración de las plantas como por evaporación directa desde el suelo, pasando de estado líquido a gaseoso bajo condiciones naturales y depende de la disponibilidad de agua para la vegetación y de la energía necesaria para que ocurra, la unidad de medida es en milímetros (mm) durante un periodo determinado, ya sea mensual o anual (Shi et al., 2020).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo, diseño, nivel y enfoque de investigación

El tipo de investigación es aplicada, porque busca generar conocimiento para un uso inmediato(Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023). En ese sentido, la investigación busca generar conocimientos científicos sobre la respuesta hidrológica de la cuenca del río Llaucano frente a distintas condiciones climáticas, para planificar decisiones para la gestión de los recursos hídricos y la implementación de medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

El diseño es no experimental de corte longitudinal, que se define como el tipo de estudio en el que las variables no se modifican y los fenómenos se registran y analizan tal y como se presenta en la naturaleza a lo largo del tiempo (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023). No experimental porque las variables climáticas e hidrológicas no fueron modificadas. Asimismo, es de corte longitudinal porque se analizaron series temporales hidrometeorológicas históricas (1981-2016) y series climáticas futuras bajo escenarios de emisión SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2030–2060.

El nivel de investigación es descriptivo porque describir el comportamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano en relación causal con variables climáticas forzantes (Precipitación, Evapotranspiración y Temperatura), en el periodo 2030-2060 (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023).

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, que se caracteriza por la recolección y análisis de datos numéricos y medibles para describir los fenómenos de la naturaleza (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023). Por lo anterior, el presente estudio se emplearon modelos hidrológicos, análisis estadístico y simulaciones climáticas e hidrológicas para el periodo 2030–2060, para evaluar el comportamiento de los recursos hídricos en la cuenca del río Llaucano bajo condiciones de cambio climático.

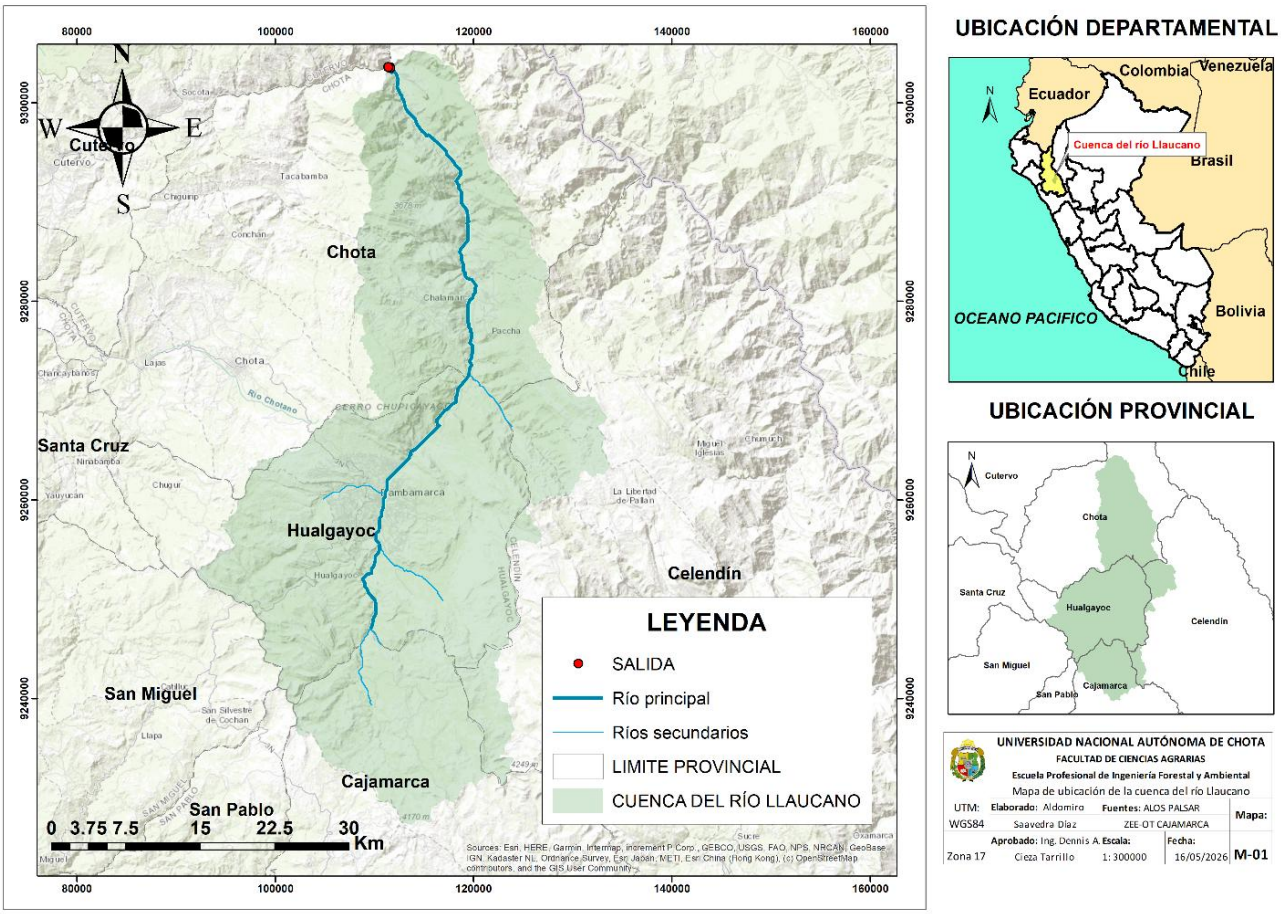
3.2. Ubicación, población, muestra, muestreo y unidad de análisis

3.2.1. Ubicación del área de estudio

La cuenca del río Llaucano se ubica en la vertiente del Atlántico, formando parte de la Inter cuenca Alto Marañón IV, con coordenadas UTM 755468,70 y 797250,68 Este y 9227920,15 y 9305919,42 Norte. Políticamente, comprende sectores de las provincias de Hualgayoc, Cajamarca, Celendín y Chota del departamento de Cajamarca. Asimismo, el área de estudio presenta una extensión de 1557,96 $km^{2.}$ y un perímetro 255,35 km, evidenciándose en la Figura 2.

Figura 2

Ubicación de la cuenca del río Llaucano



3.2.2. Población

Toda el área de la cuenca del río Llaucano, con una extensión aproximada de 1557,96 km², donde se analizaron las variables climáticas (precipitación, temperatura, evapotranspiración), así como variables hidrológicas relacionadas con el caudal correspondientes a los periodos 1981–2016 y 2030–2060, representativos de la dinámica hidrológica de la cuenca.

3.2.3. Muestra

En esta investigación, la muestra coincide con la población, conformada por la totalidad del área de la cuenca del río Llaucano, cuya área es de 1557,96 km². En este ámbito se analizaron los datos climáticos e hidrológicos representativos de la dinámica hidrológica de la cuenca, correspondientes al periodo histórico 1981–2016 y periodo fututo 2030–2060.

3.2.4. Muestreo

En el presente estudio no se aplica un muestreo tradicional, debido a que se utilizaron la totalidad de los datos disponibles que representan el área total de la cuenca del río Llaucano, que abarca aproximadamente 1557,96 km^2, considerando el periodo de análisis 1981-2016 y 2030-2060. Estos datos fueron obtenidos de fuentes secundarias oficiales como los productos PISCO y PISCO_HyD_ARNOVIC del SENAMHI para el periodo histórico, y los Modelos Climáticos Globales (GCM) del proyecto CMIP6 para las variables climáticas futuras, debido a su representatividad, confiabilidad y a las diversas aplicaciones en estudios de modelamiento hidrológico y evaluación de escenarios de cambio climático.

3.2.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis comprende el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano, evaluando su punto de salida de la cuenca utilizando el modelo hidrológico GR4J en respuesta a

las variables de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el periodo 2030-2060. Para evaluar los cambios en la disponibilidad hídrica, se utilizaron los siguientes indicadores:

- Caudal medio (m^3/s), que representa la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Llaucano
- Variación mensual del caudal (%), que cuantifica el cambio del periodo futuro (2030-2060) respecto al histórico (1981-2016).

Estos indicadores se estimaron mediante el forzamiento del modelo hidrológico GR4J, utilizando variables climáticas futuras (precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial), obtenidas de los Modelos Climáticos Globales: ACCESS CM2, CNRM-CM6-1, MPI-ESM1-2-HR, del proyecto CMIP6 bajo los escenarios SSP2-4.5, asociado con mitigación intermedia de gases de efecto invernadero (GEI) y SSP5-8.5, caracterizado por una alta emisión de GEI.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.3.1. Técnicas de recolección de datos

Para la ejecución del modelo hidrológico lluvia escorrentía GR4J en la cuenca del río Llaucano, se emplearon cuatro componentes principales: información cartográfica para la delimitación de la cuenca, series históricas de datos climáticos e hidrológicos destinadas a la calibración y validación del modelo, proyecciones de variables climáticas futuras para el forzamiento hidrológico y se realizaron visitas de campo con la finalidad de validar el comportamiento del modelo.

- **Datos hidrometereológicos históricos (1981-2016).** Las variables climáticas de precipitación y temperatura (máxima y mínima) fueron obtenidas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), mediante el producto grillado PISCO v2.1 para la precipitación, con una base de datos estable, y con una resolución temporal diaria y espacial de 0,1°x 0,1°, y para la temperatura de PISCO v1.2, con una resolución espacial de 0,01° x 0,01° desarrolladas en el periodo 1981-2016. Este producto grillado integra información de

estaciones terrestres validadas y técnicas de interpolación espacial. (https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/?Set-Language=es).

La evapotranspiración potencial (ETP) fue estimada mediante el método propuesto por Oudin et al. (2005), debido a su compatibilidad con el modelo hidrológico GR4J, se emplearon como variables de entrada la temperatura media diaria y la latitud de la cuenca.

Para el caudal histórico se utilizaron datos del producto PISCO_HyD_ARNOVIC (v1.0) del SENAMHI, correspondientes al periodo 1981-2016, que genera series de escorrentía mediante el modelo ARNOVIC forzado con PISCO. Disponible en el siguiente enlace: /http://www.hydroshare.org/resource/f723d6c762ca45b6936dd9489bc44842)

- **Datos climáticos futuros (2030-2060)**. Para el análisis climático futuro para el periodo 2030-2060 se obtuvieron de los Modelos Climáticos Globales del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6), bajo los escenarios de intensidad moderada y muy alta de emisiones de gases de efecto invernadero (SSP2-4.5 y SSP5-8.5 W/m2 respectivamente). Data disponible en la plataforma (https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=download).

- **Datos cartográficos.** Esta técnica nos permite representar, caracterizar e interpretar la información espacial contenida en la cuenca del río Llaucano**,** para la cual se realizó la delimitación del área de la cuenca, utilizando el Modelo de Elevación Digital (DEM) con una resolución espacial de 12,5 m, obtenido del Satélite ALOS PALSAR-ASF (https://search.asf.alaska.edu/#/). También se obtuvieron datos adicionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN)(https://www.idep.gob.pe/geovisor/VisorDeMapas-3D/), y de Mapoteca Virtual-Gobierno Regional de Cajamarca

(https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/node/588), referentes a los límites administrativos de la cuenca.

- **Observación.** Se realizó el reconocimiento de la cuenca del río Llaucano, mediante visitas de campo y registro fotográfico del reconocimiento del área de estudio y de intervenciones antrópicas sobre el uso del recurso hídrico. Esta actividad tuvo la finalidad de validar información que pudiese alterar el comportamiento hidrológico natural de la cuenca y, en consecuencia, afectar el desempeño del modelo GR4J durante la etapa de calibración y validación.

3.3.2. Instrumentos para la recolección de datos

- Repositorios institucionales, con el fin de obtener información sobre hidrología, cambio climático y modelamiento.

- Base de datos hidrológico, series de datos del caudal para el periodo histórico (1981-2016) obtenidos de PISCO_HyD_ARNOVIC del SENAMHI, con la finalidad de validar y calibrar el modelo hidrológico GR4J.

- Base de datos climáticos históricos, información de precipitación, temperatura (máxima y mínima) histórica (1981-2016) obtenidas del producto PISCO del SENAMHI, en formato NetCDF.

- Base de datos climáticos futuros, simulaciones de precipitación, temperatura (máxima y mínima) futura (2030-2060), utilizando salidas de Modelos Climáticos Globales del proyecto CMIP6, específicamente de los modelos CNRM-CM6-1, ACCESS-CM2 y MPI-ESM1-2-HR, bajo los escenarios de emisión SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

- Base de datos cartográficos, mediante mapas temáticos de ubicación **y** hipsométricos creadas en el software ArcGIS Desktop 10.8, que permitió integrar y analizar la información espacial del área de estudio.

- Cuaderno de campo**, s**e utilizó como instrumento para el registro de observaciones realizadas durante las actividades de reconocimiento y verificación en la cuenca del río Llaucano, permitiendo identificar las condiciones de cuerpos de agua superficiales existentes, así como también infraestructura hidráulica existente.

3.4. Hipótesis

3.4.1. Hipótesis general

El cambio climático influye significativamente en la disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030-2060, respecto a los datos históricos 1981-2016.

3.4.2. Hipótesis especificas

H1: El modelo hidrológico GR4J presenta un desempeño eficiente con valores de NSE y KGE ≥ 0,70 en la simulación hidrológica de la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060.

H2: La disponibilidad hídrica simulada bajo el escenario SSP5-8.5 presenta diferencias significativas respecto al escenario SSP2-4.5, en la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060.

H3: La precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial futura influyen de manera significativa en el régimen hidrológico de la cuenca del río Llaucano, periodo 2030-2060

3.5. Operacionalización de variables

En la presente investigación se consideraron dos variables: La disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano como la variable dependiente, y como variable independiente el cambio climático, ambas analizadas en el periodo 2030-2060. La primera busca estimar la cantidad

de agua superficial disponible en la cuenca, la segunda se refiere a las variaciones en las condiciones climáticas futuras que influyen en la oferta hídrica. En la Tabla 5 se presentan la definición operacional, dimensiones, indicadores e instrumentos que se emplean para medir las variables mencionadas.

Tabla 5

Operacionalización de variables de la investigación

Variables	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano (Variable dependiente)	Estimación de la cantidad de agua superficial disponible en la cuenca del río Llaucano, periodo 2030-2060.	- Recurso hídrico superficial	- Caudal medio (m^3/s) - Variación mensual del caudal (%)	Base de datos hidrológicos de PISCO de SENAMHI
Cambio climático (Variable Independiente)	Cambios en las condiciones climáticas en la cuenca del río Llaucano, periodo 2030-2060.	-Variables climáticas proyectadas	-Precipitación mensual (mm) -Temperatura media (°C) Evapotranspiración potencial (mm)	Base de datos Climáticos Globales (GCM) del proyecto CMIP6

3.6. Procedimientos de recolección de datos

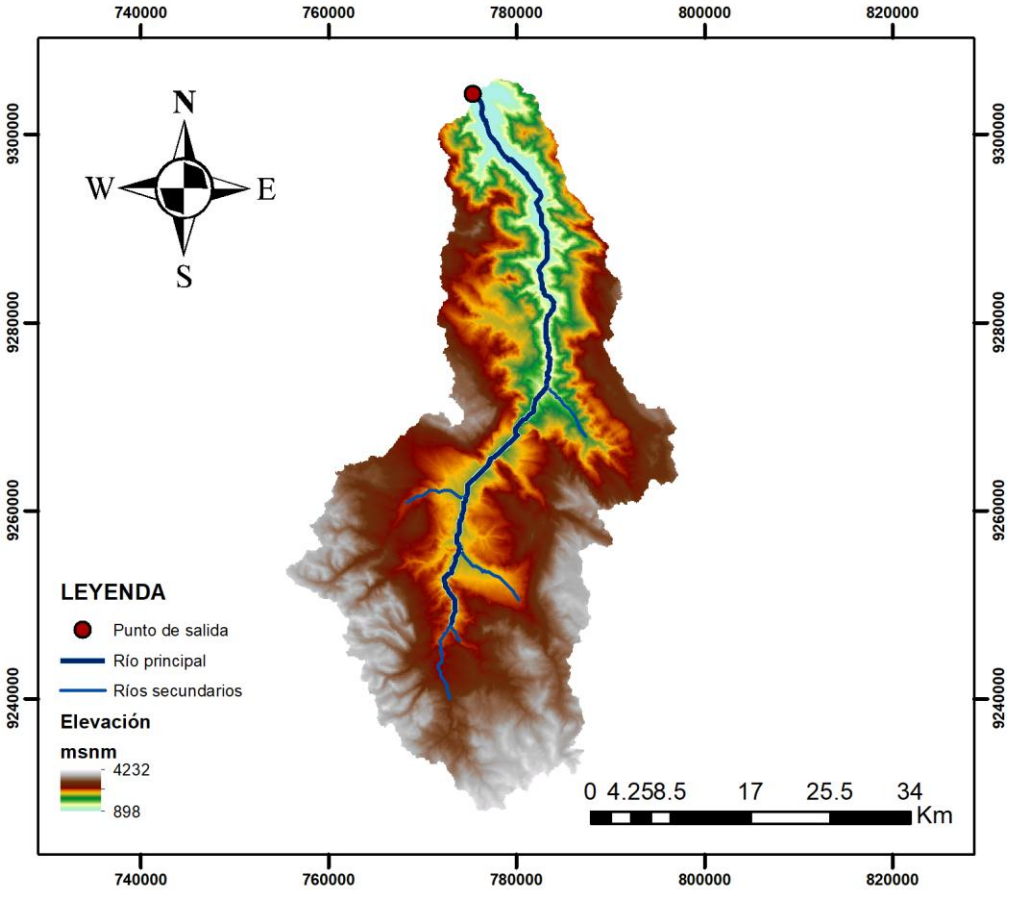
3.6.1. Delimitación y caracterización de la cuenca del río Llaucano

En la presente investigación iniciamos con la descarga del Modelo de Elevación Digital de la plataforma de ALOS PALSAR, que se utilizó para delimitar la cuenca en el Software ArcGIS 10.8, así como también para representar la variación de la altitud de la cuenca.

En la Figura 3 se muestra un mapa hipsométrico de la cuenca del río Llaucano delimitada, a una escala numérica 1:800 000 cm, que evidencia la topografía, que varía de 898 a 4232 m.s.n.m. Además, se cuenta con un orden 2 referente a la red hídrica de la cuenca.

Figura 3

Delimitación de la cuenca del río Llaucano



3.6.2. Descarga de datos hidrometereológicos históricos

Las variables de precipitación y temperatura (máxima y mínima) se obtuvieron del producto grillado PISCO del SENAMHI, para el periodo 1981-2016 en formato NetCDF. Asimismo, el

caudal histórico se obtuvo de PISCO-ARNOVIC, mediante el COMID asociado al tramo de la red hídrica correspondiente a la cuenca del río Llaucano. Llauca et al. (2023), nos menciona que este producto presenta caudales diarios simulados para todo el Perú utilizando series de PISCO de precipitación y evapotranspiración, junto con el modelo hidrológico ARNO/VIC y el esquema de enrutamiento RAPID, además fue calibrado y validado con series observadas de 43 estaciones hidrométricas durante el periodo 1981–2020.

Para extraer los datos, se utilizó el RStudio Desktop 2025.09.2 (Build 418), con los paquetes: *airGR, ncdf4, raster, writexl, ggplot2.* Sin embargo, la variable de evapotranspiración se estimó mediante el método de Oudin en hoja de Excel, utilizando la temperatura media y la latitud de la cuenca como variables de entrada.

3.6.3. Calibración y validación del modelo hidrológico GR4J

Para la validación y calibración del modelo se utilizaron como variables de entrada la precipitación, evapotranspiración y caudal del periodo histórico (1981-2016), a escala temporal diaria. Esta información permitió evaluar el desempeño del modelo para simular caudales, mediante métricas de rendimiento hidrológico, siendo las siguientes:

-Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

-Kling-Gupta Efficiency (KGE).

- Coeficiente de determinación R^2.

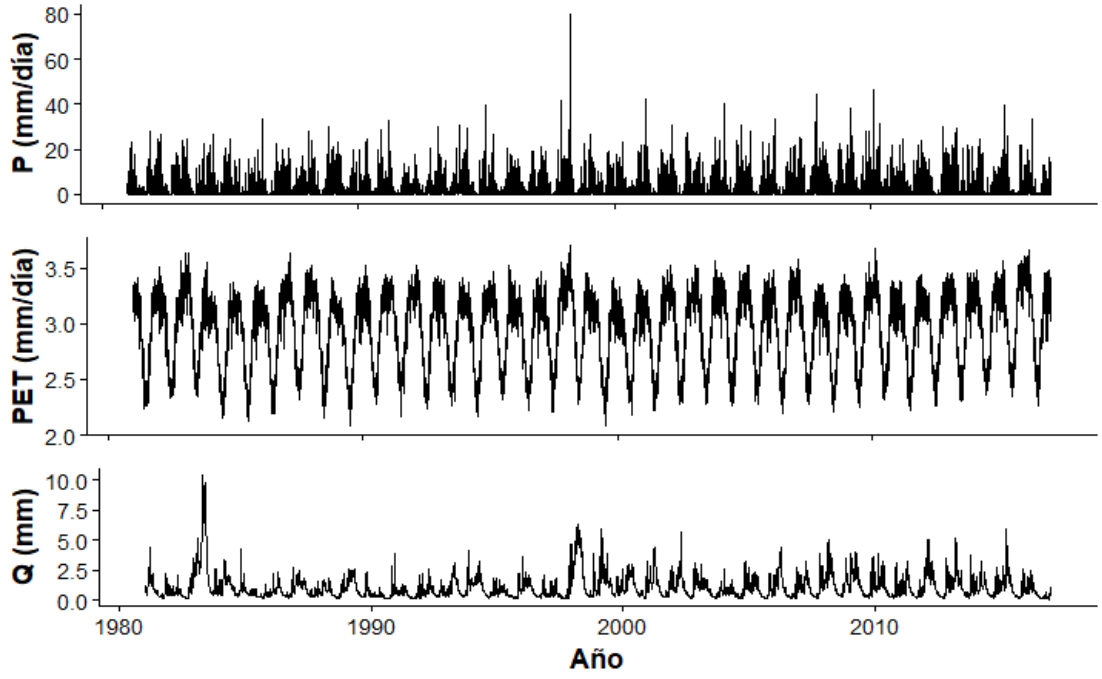
- Porcentaje Bias (PBIAS).

El procedimiento consistió en ajustar los parámetros del modelo GR4J adaptado en Hoja de Excel, obtenido de la página del Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Medio Ambiente (INRAE) (Perrin et al., 2003). Asimismo, se utilizó RStudio para reforzar y validar el modelo, con los paquetes: *airGR, hydroPSO, hydroGOF*.

En la Figura 4 se muestran las series de precipitación, evapotranspiración potencial y caudal a escala diaria, utilizadas como variables de entrada en el modelo hidrológico GR4J comprendidas en el periodo 1981 - 2016.

Figura 4

Variables de entrada para la calibración y validación del modelo hidrológico GR4J



Serie temporal diaria de la precipitación (P), evapotranspiración (PET) y caudal Q) en la cuenca del río Llaucano, durante el periodo 1981-2016.

3.6.4. Modelos Climáticos Globales (GCM)

Las variables de precipitación, temperatura (máxima y mínima) para el periodo 2030-2060, a nivel temporal diario, se obtuvieron de los Modelos Climáticos Globales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6), bajo los escenarios de trayectoria socioeconómica SSP2-4.5, caracterizado por mitigación intermedia de gases de efecto invernadero

y SSP5-8.5, con alta emisión de GEI, en la Tabla 6 se muestra los GCM empleados en el presente estudio.

Tabla 6

Modelos Climáticos Globales utilizados

Modelo	País	Resolución (°lon*°lat)
CNRM-CM6-1	Francia	1,4 x 1,4
ACCESS-CM2	Australia	1,875 × 1,25
MPI-ESM1-2-HR	Alemania	0,94 × 0,94

Fuente: Adaptado de Ayele (2025).

Para extraer las series de datos de las variables de temperatura y precipitación para los periodos 1981 - 2016 y 2030 - 2060, se utilizó el RStudio, información climática requerida para la etapa de downscaling. Asimismo, la evapotranspiración se estimó mediante el método de Oudin, utilizando la temperatura media y la latitud de la cuenca como datos de entrada en hoja de Excel adaptada.

3.6.1. Downscaling

En esta investigación se aplicó el escalamiento de tipo estadístico a los Modelos Climáticos Globales (GCM) mediante el método de corrección lineal de sesgo, con una finalidad de ajustar las variables climáticas y obtener valores más representativos específicos para la cuenca del rio Llaucano. Este procedimiento se aplicó para las variables de precipitación y temperatura (máxima, mínima) en función a la data histórica observada del periodo 1981-2016.

Estos procedimientos se realizaron utilizando hoja de Excel, donde se ejecutó el escalamiento de la temperatura y precipitación a los modelos climáticos CNRM-CM6-1, ACCESS CM2, MPI-ESM1-2-HR en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, siendo los que se ajusta a las condiciones del área de estudio.

3.6.2. Simulación de caudales futuros bajo escenarios climáticos

Las variables climáticas de precipitación y evapotranspiración futuras obtenidas posterior al proceso de downscaling fueron utilizadas como variables de entrada en el modelo hidrológico GR4J para la simulación de caudales futuros en la cuenca del río Llaucano. Para ello, se consideraron los cuatro parámetros determinados en la etapa de calibración y validación, garantizando representar el comportamiento hidrológico de la cuenca frente a escenarios climáticos.

3.6.3. Evaluación del cambio climático en la disponibilidad hídrica

Se realizó comparando los resultados obtenidos de la simulación bajo escenarios climáticos con los históricos. Para ello, se procedieron a determinar la Tasa de Cambio de las variables de precipitación, evapotranspiración, temperatura y caudal en comparación con los registros observados. La precipitación, evapotranspiración y al caudal se expresaron en términos porcentuales (%), mientras que la de la temperatura en grados Celsius (°C).

La fórmula que se empleó para calcular la Tasa de Cambio de las variables de precipitación, evapotranspiración y caudal es la siguiente:

$$\text{Tasa de cambio (\%)} = \frac{Xsim - Xobs}{Xobs} * 100$$

Donde: Xsim es la variable simulada, Xobs es el valor obervado.

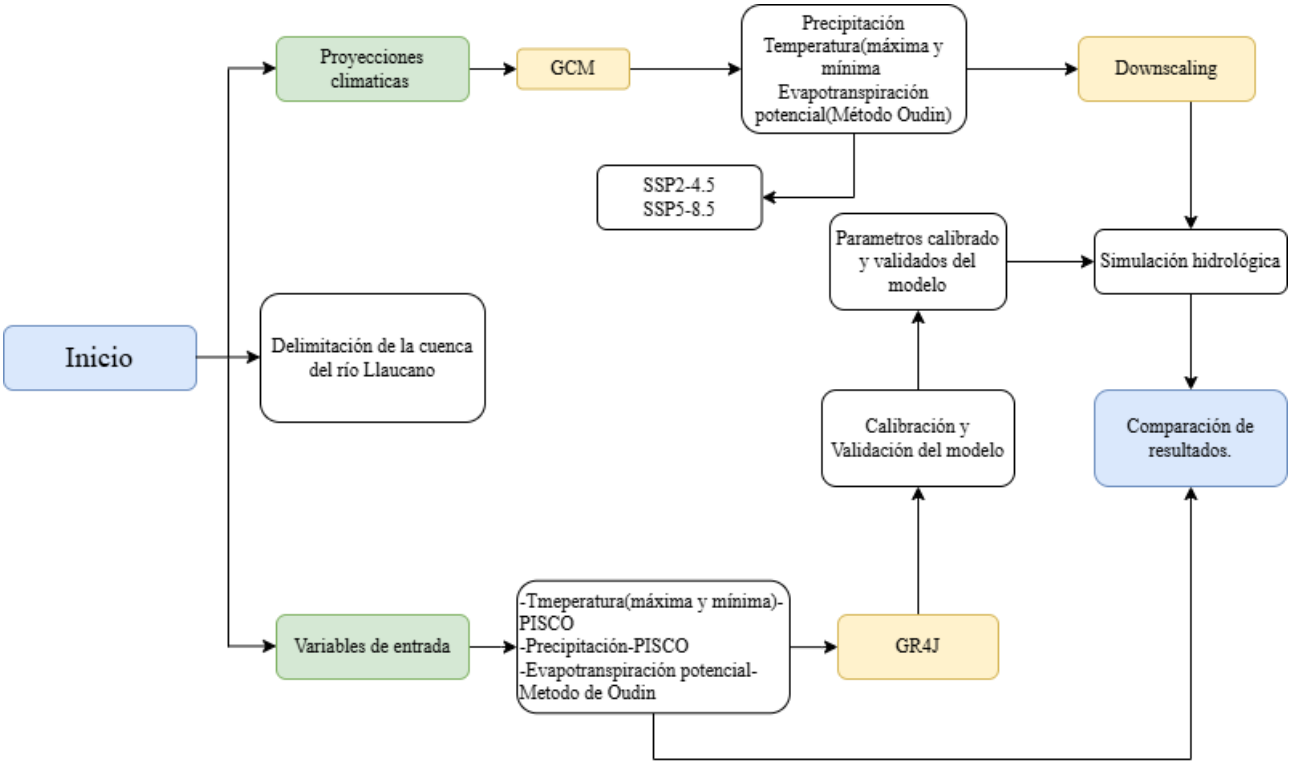
Para la temperatura la Tasa de cambio se estimó en °C

Tasa de cambio (°C) = Xsim-Xobs; donde: Xsim es la temperatura simulada y Xobs es la temperatura observada/histórica.

En la Figura 5 se muestra el Flujograma de la metodología simplificada del presente estudio, indicando los pasos desde la delimitación de la cuenca hasta la comparación de caudales simulados, que nos permite determinar los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica de la cuenca.

Figura 5

Flujograma de la investigación



3.7. Procedimientos de análisis de datos

La presente investigación comprende un análisis descriptivo e inferencial, desarrollado mediante el uso del software RStudio, utilizado para el procesamiento y análisis de los datos, empleando funciones estadísticas de los paquetes base *stats, dplyr, nortest y Kendall*.

Análisis descriptivo. Se centra en describir los estadísticos básicos para las variables climáticas observadas (precipitación, temperatura máxima y mínima, caudal) en el periodo 1981- 2016, se

calcularon medidas de tendencia central, como la media y la mediana, valores máximos y mínimos, desviación estándar y el coeficiente de variación.

Análisis inferencial. Se aplicaron pruebas de normalidad a los datos de las variables climáticas observadas (precipitación, evapotranspiración y temperatura media) y a los caudales históricos observados (1981-2016) como información adicional al estudio, posteriormente se evaluó la tendencia temporal mediante regresión lineal, con la finalidad de evaluar el comportamiento de estas variables a lo largo del tiempo, permitiendo establecer una base como referencia para la evaluación de las proyecciones climáticas e hidrológicas del periodo 2030-2060.

- **Prueba de normalidad - kolmorov smirnov**

En la presente investigación las series históricas observadas (precipitación, evapotranspiración y temperatura media) presentan una cantidad de datos mayores a 50, siendo del periodo 1981-2016, motivo de ejecución de la prueba de kolmorov.

- **Prueba de Mann Kendall**

La prueba de Mann-Kendall es un método no paramétrico ampliamente utilizado para identificar tendencias en series temporales, motivo por la que se utilizó en la presente investigación para obtener información de referencia de la data histórica para la posterior evaluación de las proyecciones futuras. Martínez et al. (2023) utilizo esta prueba para analizar tendencias de caudal y evapotranspiración a lo largo del tiempo.

3.8. Materiales y equipos

Los materiales y equipos empleados en la presente investigación incluyen principalmente una laptop destinada a la revisión de literatura científica y procesamiento de información. Los programas RStudio, ArcGIS y el modelo hidrológico GR4J para el análisis de datos y espacial del

área de estudio. Asimismo, se emplearon Modelos Climáticos Globales y de la base de datos PISCO del SENAMHI, siendo las principales fuentes de información para la modelación y evaluación hidrológica. Adicionalmente, se utilizaron materiales de campo como cuaderno de campo, lapiceros para el reconocimiento de la cuenca del río Llaucano.

3.9. Aspectos éticos

El presente trabajo se desarrolló de acuerdo con lo reglamentado por la Universidad Nacional Autónoma de Chota. En este sentido, el investigador asumió el compromiso de respetar y cumplir, en primer lugar, la normativa institucional vigente que regula la investigación y los derechos de autor; en segundo lugar, garantizar la transparencia en la presentación de las fuentes consultadas y de los hallazgos obtenidos; en tercer lugar, ofrecer información completa y accesible para que pueda ser utilizada y difundida por la comunidad científica en investigaciones futuras; y en cuarto lugar, asegurar que el contenido presentado sea claro, coherente y veraz, destacando la metodología, el análisis y la interpretación de los resultados. Finalmente, se cumplió con la correcta citación y referenciación de acuerdo con las normas APA, séptima edición.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1. Descripción de los resultados

4.1.1. Estadísticos descriptivos e inferencial al periodo histórico (1981-2016)

Para el periodo histórico observado (1981-2016) se calculado los estadísticos descriptivos para las variables climáticas analizadas (Precipitación, evapotranspiración potencial, temperatura máxima y mínima) y para el caudal observado(Tabla 7).

Tabla 7

Estadísticos descriptivos para las variables observadas (1981-2016)

Estadísticos descriptivos							
	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desv. Estándar	C. Varianza
Precipitación (mm/día)	13149	0,00	79,87	2,24	0,48	4,12	17,00
Evapotranspiración(mm/día)	13149	2,08	3,70	2,96	3,06	0,33	0,11
T. máxima (C °)	13149	14,42	24,38	20,04	20,06	1,30	1,68
T. mínima (C °)	13149	2,76	13,83	9,55	9,88	1,78	3,15
Caudal (m3/s)	13149	1,30	188,40	19,35	13,70	18,28	334,28

Según las variables climáticas históricas observadas, la precipitación y el caudal presentan mayor variación en sistema hidrológico de la cuenca del río Llaucano. La precipitación registró una media de 2,24 mm/día, un valor máximo de 79,87 mm/día, y un mínimo de 0,00 m/día, indicando la ocurrencia de eventos extremos de lluvia y días secos. De manera similar, la caudal muestra alta

dispersión, con valores que oscila entre 1,30 y 188,40 m^3/s, una media de 19,35 m^3/s y una DE = 18,28 m^3/s, reflejando una fuerte respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos de precipitación. Por otro lado, en la evapotranspiración y la temperatura (máxima y mínima) se observa menor variabilidad, la evapotranspiración tiene una media de 2,96 mm/día y una DE = 0,33, indicando una estabilidad en la demanda atmosférica de agua. A su vez, la temperatura máxima oscila de 14,42 °C y 24,38 °C y la mínima de 2,76 °C y 13,83 °C, mostrando variaciones moderadas, lo que indica un comportamiento estable.

- **Prueba de normalidad - kolmorov smirnov**

En la Tabla 8 y la Figura 6 se presenta la distribución de los datos analizados, considerando un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 8

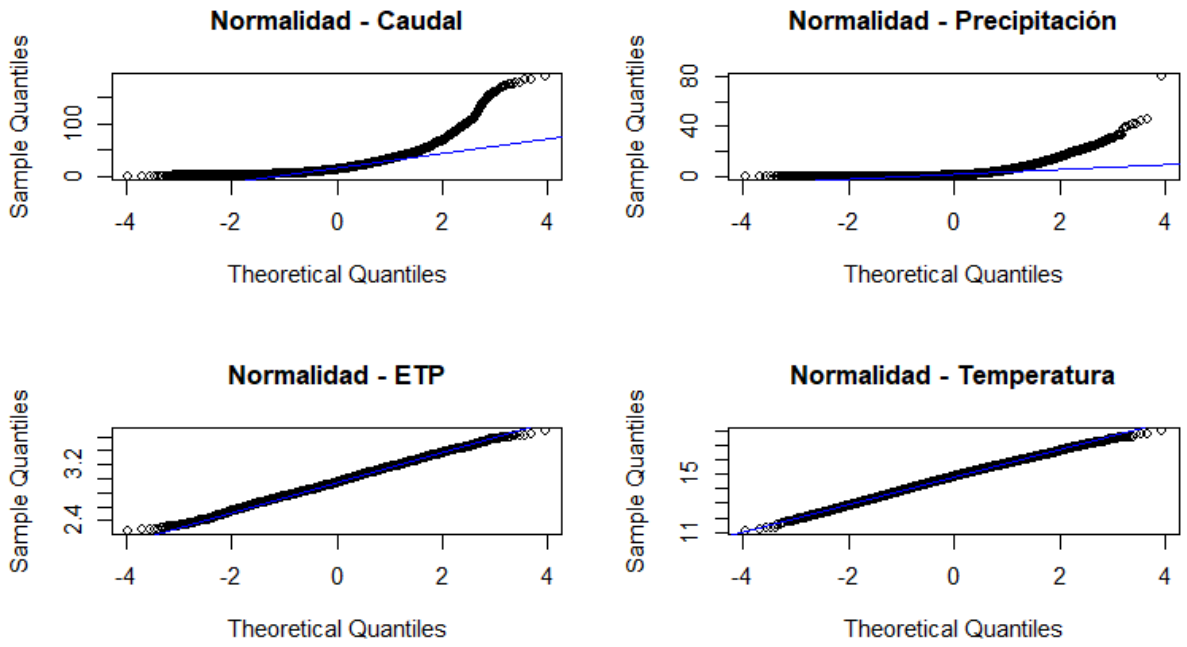
Prueba de normalidad para los datos históricos (1981-2016)

Variable	D	p-value
Precipitación	0,29	2,2e-16
Evapotranspiración	0,02	3,059e-16
Temperatura media	0,02	9,03e-13
Caudal	0,17	2,2e-16

Los resultados muestran que todas las variables evaluadas presentaron valores de p-value menores a 0,05; por tanto, se rechaza la hipótesis nula de normalidad, evidenciando que las series no siguen una distribución normal.

Figura 6

Pruebas de normalidad para la evapotranspiración, temperatura media, caudal y precipitación observada (1981-2016)



Se observa que, en todas las variables analizadas, la línea de tendencia presenta un ajuste deficiente respecto a la distribución de los datos, indicando que estas no siguen una distribución normal; comportamiento que sugiere la presencia de asimetrías o variaciones que se apartan de los supuestos de normalidad estadística.

❖ Prueba de Mann Kendall

En la Tabla 9 se muestra los resultados de la prueba de Mann-Kendall para el periodo histórico observado (1981-2016) considerando un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 9

Mann Kendall para los datos observados (1981-2016)

Variable	Tau (τ)	p-value
Precipitación	0,14	0,23
Evapotranspiración	0,02	0,90
Temperatura media	0,28	0,02
Caudal	0,29	0,01

Para las variables de evapotranspiración y temperatura media, el valor p es menor a 0,05, lo que indica la presencia de tendencias estadísticamente significativas, indicando incremento progresivo de ambas variables a lo largo del periodo de tiempo. No obstante, la precipitación y el caudal el p-value es superior a 0,05, lo que evidencia la ausencia de tendencias significativas, es decir, el comportamiento de estas variables responde variabilidad entre los años, más no una tendencia definida en el tiempo.

4.1.2. Eficiencia del modelo hidrológico GR4J en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano en el periodo observado 1981-2016.

El modelo hidrológico GR4J se estructura en tres etapas, la primera corresponde al periodo de calentamiento, donde se asignaron valores iniciales con el fin de estabilizar el modelo y este pueda converger los resultados en las simulaciones posteriores. En el segundo periodo se realizó la calibración con la finalidad de optimizar el desempeño del modelo mediante el ajuste de parámetros, utilizando el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), índice de Kling-Gupta Efficiency (KGE), PBIAS y R^2 como criterios de eficiencia. El último periodo es la etapa de validación, donde se evalúa el desempeño del modelo realizando una comparación del caudal simulado con el

observado aplicando el NSE, KGE, PBIAS y R^2. En la Tabla 10 se presenta los periodos para cada etapa del modelo.

Tabla 10

Fechas del calentamiento, calibración y validación del modelo hidrológico GR4J

Etapa	Fecha de inicio	Fecha final	Cantidad de días	% de datos
Calentamiento	1981-01-01	1981-12-31	365	3%
Calibración	1982-01-01	2006-12-31	9131	67%
Calentamiento	2007-01-01	2007-12-31	365	3%
Validación	2008-01-01	2016-12-31	3288	27%

Se muestra los periodos definidos para las etapas de calibración y validación, considerando una distribución de 70% y 30% de los datos, respectivamente. Además, se incluye el periodo de calentamiento que se aplicado en cada etapa.

Calibración del modelo

En la etapa de calibración que corresponde al periodo 1983-2006, el ajuste del modelo GR4J estimó los siguientes valores para los parámetros reales hidrológicos: X1 (capacidad máxima del almacenamiento) = 573,10 mm; X2 (coeficiente de transferencia subterránea) = 2,47 mm/día; X3 (capacidad de almacenamiento de enrutamiento) = 23,00 mm; y X4 (Tiempo del hidrograma unitario) = 2,19 días.

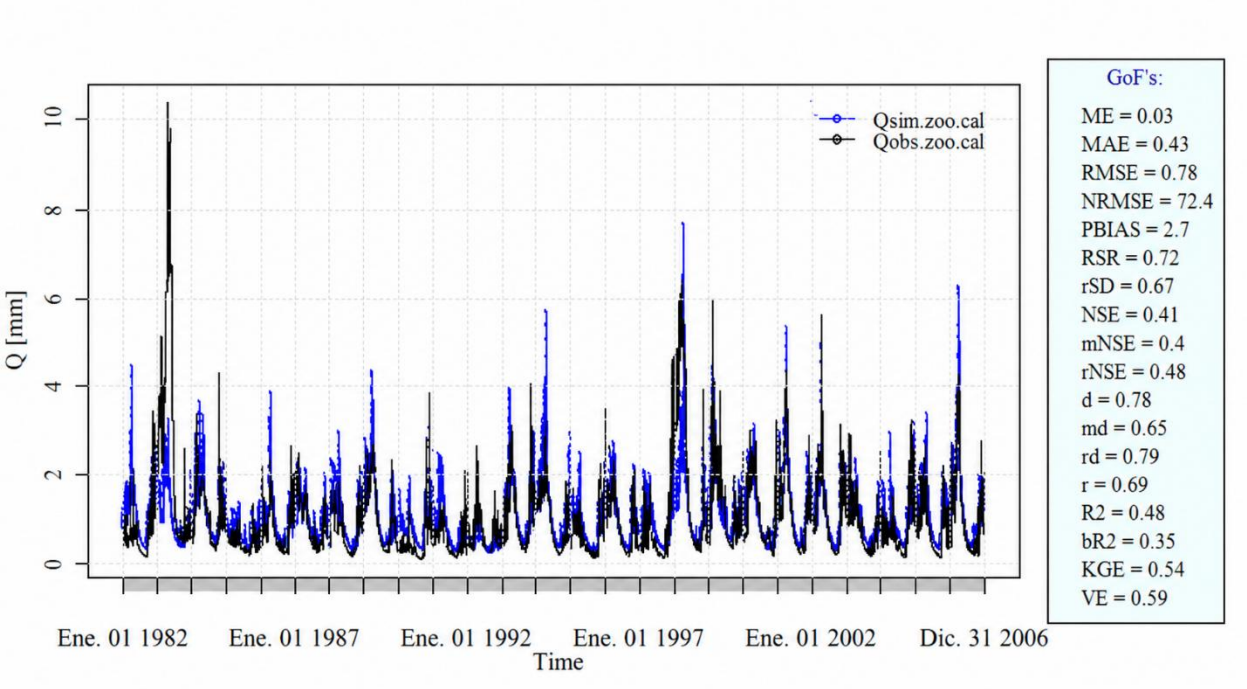
Además, el índice de eficiencia obtenido en Nash-Sutcliffe (NSE = 0,41), según SENAMHI (2016) valores entre 0,40 y 0,60 corresponde a una categoría de “Bueno”, de su parte, el porcentaje de sesgo (PBIAS = 2,7%) según el mismo autor, cuando es menor a 20% se clasifica como “Bueno”. Por otro lado, el índice de Kling-Gupta Efficiency (KGE = 0,54), según SENAMHI (2019) son valores medios a 1, por lo tanto, refleja un desempeño aceptable del modelo, con una

representación moderada de la variabilidad y correlación entre los caudales simulados (Qsim) y observados (Qobs).

En la Figura 7 se muestra la correlación de caudal simulado y observado, que evidencian una concordancia media de los caudales, logrando reproducir moderadamente la dinámica hidrológica de la cuenca del río Llaucano. Sin embargo, se evidencian sobreestimaciones en algunos eventos extremos, identificadas en la serie de caudales simulados (Qsim), donde los valores superan a los observados (Qobs), lo que sugiere una sobrerrepresentación de la escorrentía generada. Este comportamiento puede atribuirse tanto a la configuración de los parámetros del modelo como a la presencia de intervenciones antrópicas en la cuenca, que alteran el régimen natural de flujo y no son completamente capturadas por el modelo.

Figura 7

Calibración del modelo hidrológico GR4J

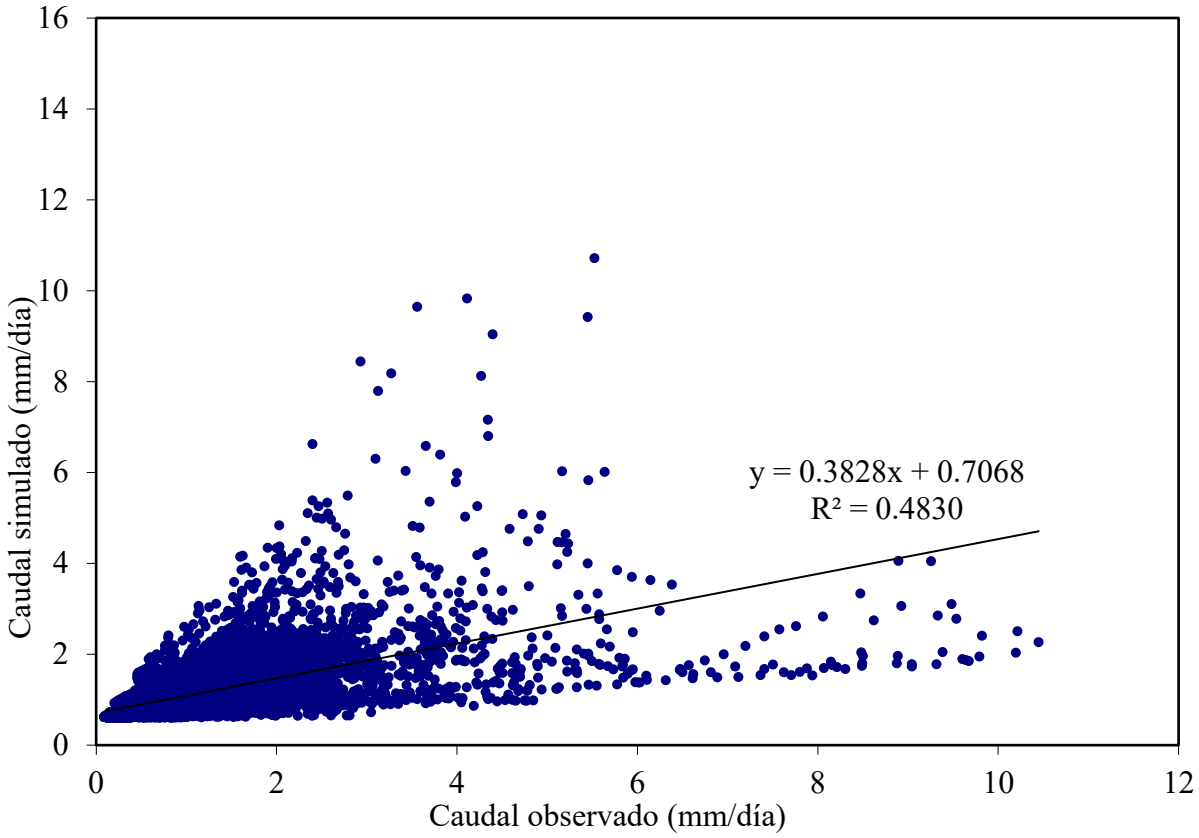


La Figura 8 muestra la relación lineal entre los caudales observados y los caudales promedio mensuales simulados durante la fase de calibración del modelo, obteniendo un coeficiente de

correlación de 0,48, según Mendoza et al. (2021) valores entre 0,25 y 0,50 es categorizado como un ajuste “deficiente”. Asimismo, se evidencia una tendencia lineal que permite visualizar el comportamiento general de los datos simulados respecto a los observados.

Figura 8

Correlación lineal entre los caudales simulados y los observados en la calibración del GR4J



Validación del modelo

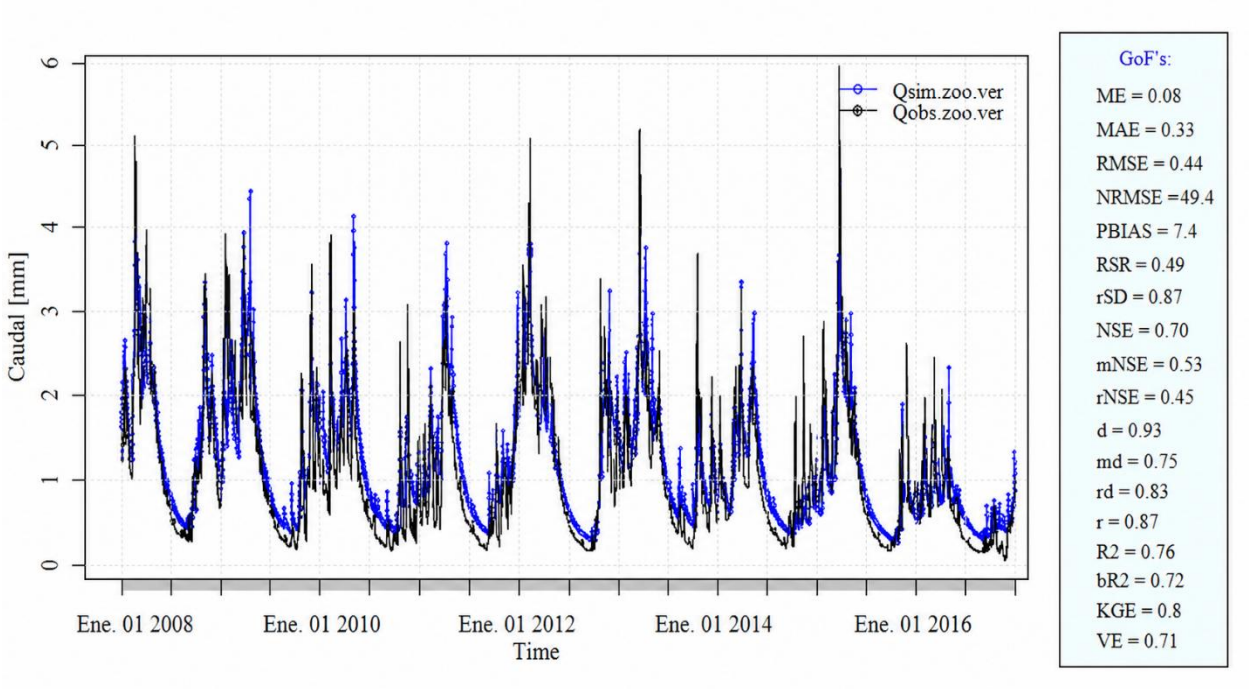
Durante la fase de validación, que corresponde al periodo 2007-2016, el modelo GR4J alcanzó un valor de NSE = 0,70, según SENAMHI (2016) valores entre 0,60 y 0,80 corresponde a una categoría de “Muy bueno”, de su parte, el porcentaje de sesgo (PBIAS = 7,4%) según el mismo autor, cuando es menor a 20% se clasifica como “Bueno”, indicando un desempeño consistente y

estable. Asimismo, el KGE = 0,80, según SENAMHI (2019) es un ajuste cercano a 1, indicando una buena representación de la variabilidad y magnitud de los caudales.

En la Figura 9 se muestra el comportamiento del modelo hidrológico, representado por métricas de rendimiento durante la etapa de validación, indicando resultados satisfactorios en la representación del comportamiento hidrológico en esta etapa, dado a que los caudales simulados se ajustan a los observados durante la mayor parte del periodo analizado, como también la atenuación de los picos, que indica una respuesta adecuada del modelo.

Figura 9

Validación del modelo hidrológico GR4J

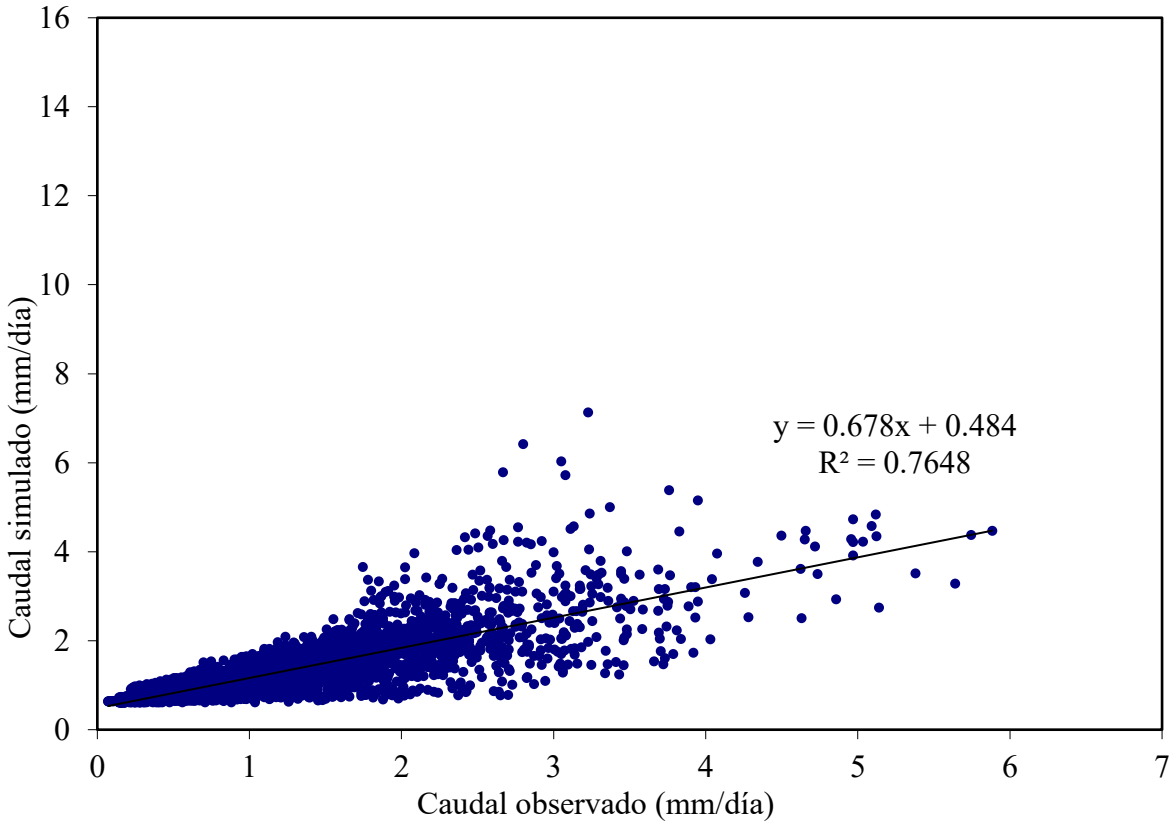


En la Figura 10 se presenta la correlación lineal entre los caudales simulados y observados durante la etapa de validación del modelo. Los resultados evidencian un coeficiente de determinación de 0,76, según Mendoza et al. (2021) el valor se ubica entre 0,75 – 1,00, indicando un nivel de ajuste

"Muy bueno" y una adecuada capacidad del modelo para simular el comportamiento hidrológico de los caudales frente a escenarios asociados al cambio climático.

Figura 10

Correlación lineal entre los caudales simulados y los observados en la validación del GR4J



4.1.3. Variaciones de la precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectadas respecto al periodo histórico 1981–2016 en la cuenca del río Llaucano, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Para las variables de precipitación y temperatura de los Modelos Climáticos Globales CNRM-CM6-1, ACCESS CM2 y MPI-ESM1-2-HR en los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se realizó primero el escalamiento estadístico(downscaling) que permite ajustar a escala espacial local, para una mejor representación hidrológica. Posteriormente se realizaron las comparaciones

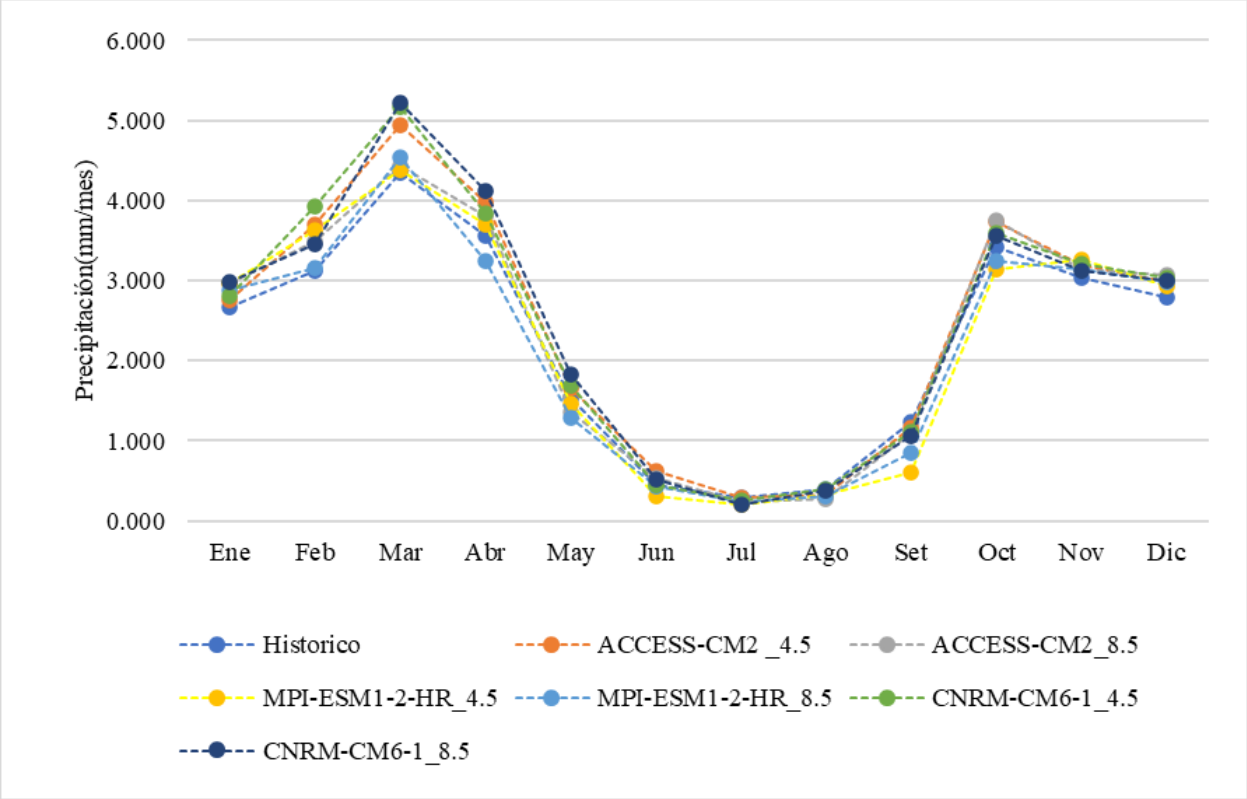
de cada variable proyectada con respecto al periodo observado, permitiendo estimar la tasa de cambio.

Cambios de la precipitación media mensual

En la Figura 11 se presenta el comportamiento de la precipitación para el periodo 2030–2060 en la cuenca del río Llaucano, en comparación con el periodo histórico (1981-2016), estimaciones futuras que han sido obtenidas a partir de los Modelos Climáticos Globales CNRM-CM6-1, ACCESS-CM2 y MPI-ESM1-2-HR, bajo los escenarios socioeconómicos compartidos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Asimismo, la precipitación es la primera variable de entrada empleada para la simulación de los caudales futuros en la cuenca del rio Llaucano.

Figura 11

Comportamiento de la precipitación media mensual (2030-2060)



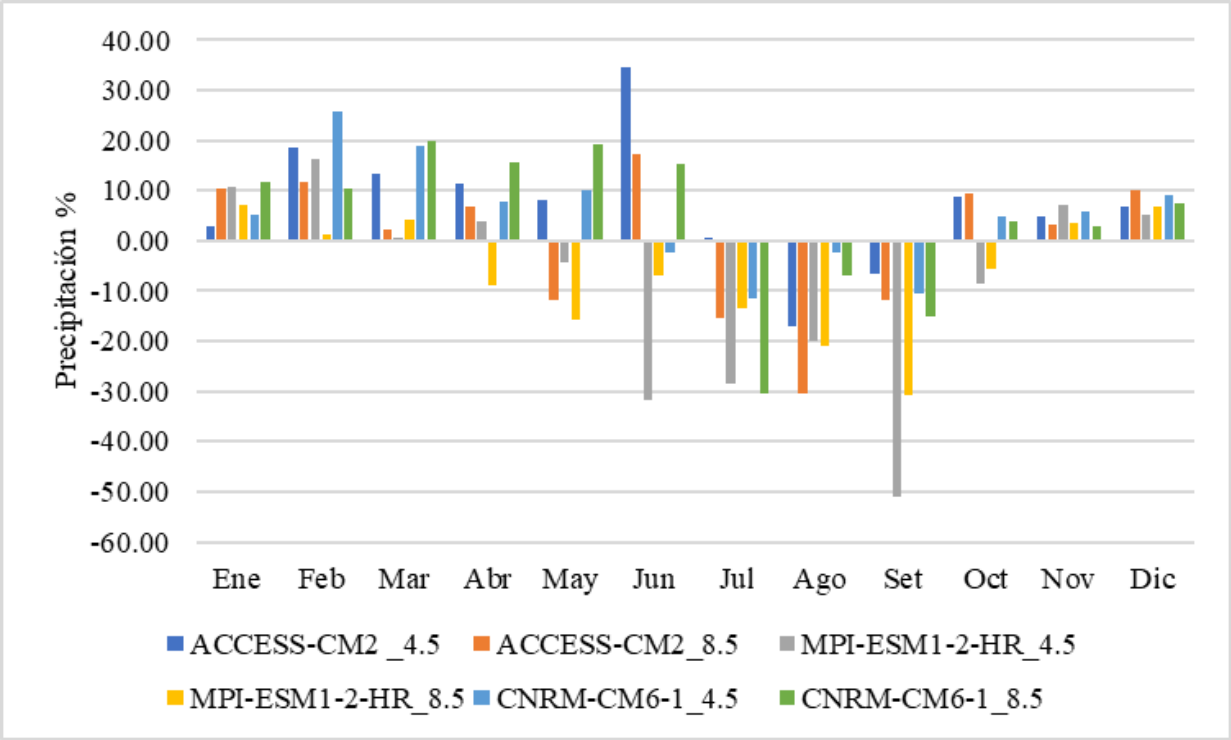
En la Figura 11 se observa el comportamiento multianual (2030-2060) de la variación de la precipitación proyectada por los modelos climáticos ACCESS-CM2, MPI-ESM1-2-HR y CNRM-CM6-1, en sus escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, en comparación con la precipitación promedio histórica. En la época de estiaje (junio-agosto), el modelo climático ACCESS-CM2, proyecta un incremento de precipitación de 6,06%, y una disminución de 9,49% en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. Asimismo, en el modelo MPI-ESM1-2-HR, la precipitación presenta reducciones significantes de 26,78% y 13, 87% en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, en ese orden. Por otro lado, el modelo CNRM-CM6-1, la precipitación espera una diminución moderada de 5, 35% en el escenario SSP2-4.5 y de 7,30% para el escenario SSP5-8.5.

En la época húmeda (diciembre-abril), el modelo ACCESS-CM2 espera incrementos moderados de 10,61% y 8,28% en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. Por otra parte, el modelo MPI-ESM1-2-HR proyecta ligeros incrementos, con valores de 7,31% en el escenario SSP2-4.5 y de 2,18% en el SSP5-8.5. Asimismo, el CNRM-CM6-1 proyecta los mayores incrementos de 13,29 % y 13,06 % en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, en ese orden.

La Figura 12 y la Tabla 11 presentan la tasa de cambio de la precipitación futura para el periodo 2030-2060 en comparación con el periodo observado 1981-2016, comportamiento que permite analizar la influencia de las variaciones de precipitación sobre el régimen hidrológico de la cuenca del río Llaucano.

Figura 12

Tasa de cambio de la precipitación futura (2030-2060)



Durante la época seca (junio-agosto), el modelo ACCESS-CM2 en el escenario SSP2-4.5 espera un incremento de la precipitación que podría alcanzar hasta 34,52% en junio, sin embargo, en el mes de agosto se prevé una reducción de hasta 16,96%. De manera similar, en el escenario SSP5-8.5 también se estima un aumento de la precipitación en junio hasta en un 17,11%, por el contrario, en agosto se muestran una disminución más significante, llegando hasta 30,32%.

Por otro lado, el modelo MPI-ESM1-2-HR presenta una tendencia hacia condiciones más secas. En el escenario SSP2-4.5, se estiman reducciones significativas de la precipitación, alcanzando disminuciones de hasta 31,71% durante el mes de junio. De manera similar, bajo el escenario SSP5-8.5, se prevén descensos de hasta 21,06% en agosto. De igual modo, el modelo CNRM-CM6-1 evidencia reducciones en las precipitaciones, para el escenario SSP5-8.5, se proyecta una disminución de hasta 30,44% en julio, mientras que en junio podría registrarse un incremento de

hasta 15,29%. Asimismo, en el escenario SSP2-4.5 se estiman reducciones que podrían alcanzar el 11,48 %.

En la época húmeda(diciembre-abril), el modelo ACCESS-CM2 estima, bajo el escenario SSP2-4.5, incrementos de precipitación que alcanzarían hasta 18,51% en febrero, en el escenario SSP5-8.5 se prevé un aumento de hasta 11,65% en el mismo mes. De manera similar, el modelo MPI-ESM1-2-HR, en ambos escenarios climáticos se muestran incrementos, con valores que podrían alcanzar hasta 16,21% en febrero y 7,28% en enero en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. No obstante, para abril la precipitación disminuye hasta 8,74% en el escenario SSP5-8.5. Asimismo, el modelo CNRM-CM6-1 presenta comportamientos similares, bajo el escenario SSP2-8.5 se estiman incrementos hasta 19,84% en marzo, en el escenario SSP5-4.5 se esperan aumentos más notorios en febrero y marzo, meses en los que la precipitación podría incrementarse hasta en 25,85% y 18,92%, respectivamente.

Tabla 11

Datos de tasa de cambio porcentual (%) de la precipitación futura (2030-2060) respecto al periodo observado (1981-2016)

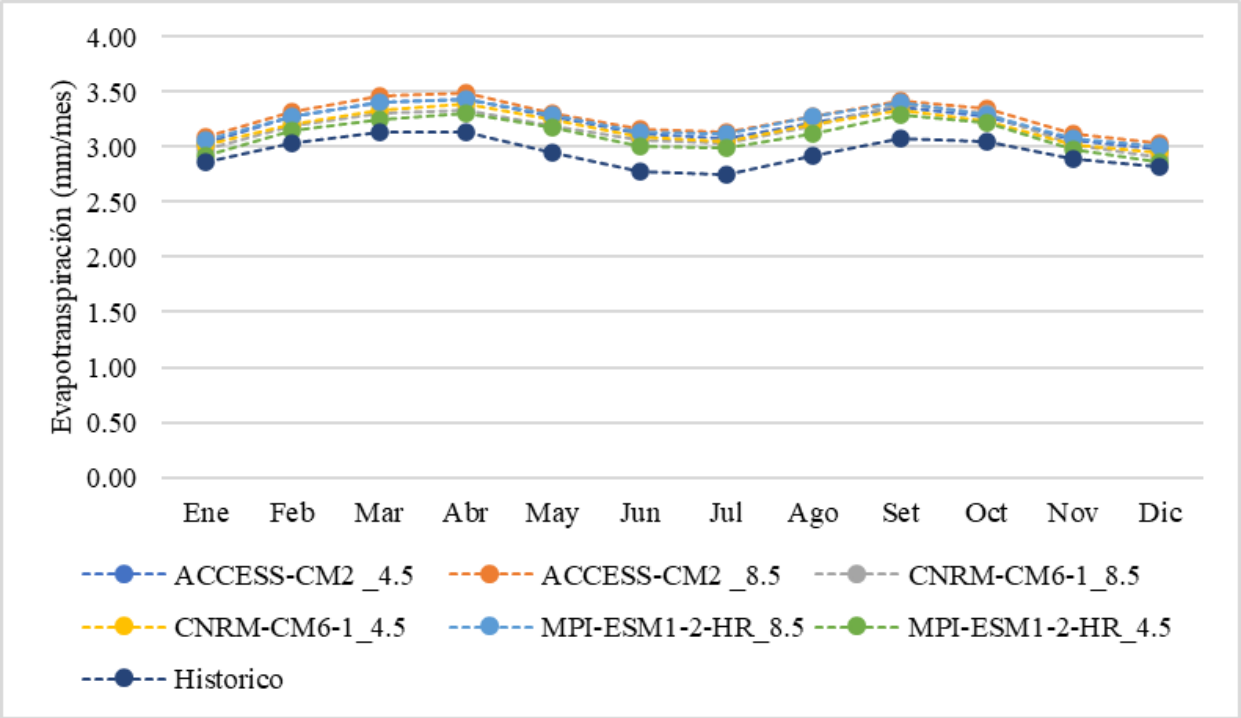
Fecha	ACCESS-CM2 _4.5	ACCESS-CM2_8.5	MPI-ESM1-2-HR_4.5	MPI-ESM1-2-HR_8.5	CNRM-CM6-1_4.5	CNRM-CM6-1_8.5
Enero	2,84	10,54	10,79	7,28	5,09	11,71
Febrero	18,51	11,65	16,21	1,31	25,85	10,57
Marzo	13,43	2,11	0,62	4,19	18,92	19,84
Abril	11,49	6,96	3,72	-8,74	7,66	15,63
Mayo	8,02	-11,74	-4,38	-15,68	10,07	19,38
Junio	34,52	17,11	-31,71	-7,02	-2,27	15,29
Julio	0,62	-15,26	-28,57	-13,52	-11,48	-30,44
Agosto	-16,96	-30,32	-20,06	-21,06	-2,29	-6,74
Septiembre	-6,66	-11,77	-50,94	-30,88	-10,43	-15,04
Octubre	8,92	9,43	-8,41	-5,47	4,84	3,96
Noviembre	4,95	3,20	7,27	3,61	5,88	2,77
Diciembre	6,78	10,14	5,23	6,87	8,94	7,52

Cambios de la evapotranspiración media mensual

La Figura 13 muestra el comportamiento multianual de la evapotranspiración potencial en la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030-2060, en comparación con el periodo histórico observado 1981-2016. Estimada mediante el método de Oudin y empleada como segunda variable de entrada en el modelo hidrológico GR4J para la simulación de caudales futuros en la cuenca.

Figura 13

Comportamiento de la evapotranspiración media mensual (2030-2060)



Las variaciones de la evapotranspiración mensual durante los 30 años de estudio, en comparacion con los registros observados para el periodo 1981-2016. En la época seca(junio-agosto), el modelo ACCESS-CM2 estima los mayores incrementos de 11,65% y 13, 48% en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. Asimismo, el modelo MPI-ESM1-2-HR espera incrementos moderados de 12,80% en el escenario SSP5-8.5 y 8,03% en el SSP2-4.5. Del mismo modo, el

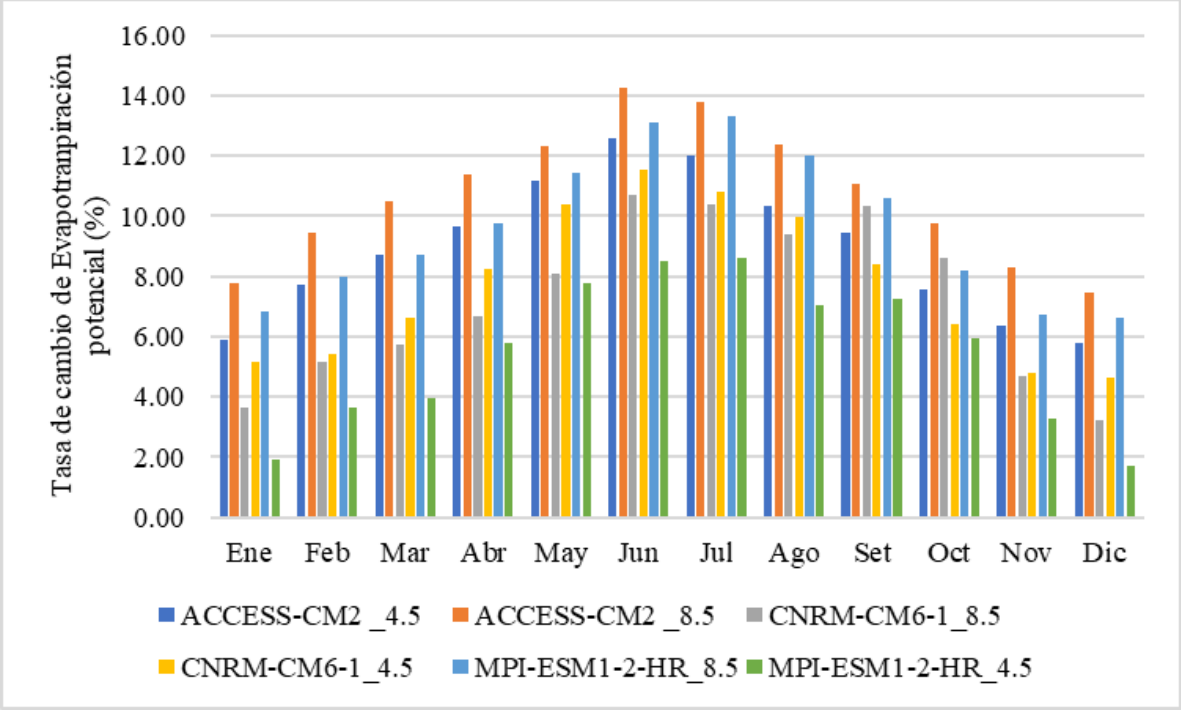
modelo CNRM-CM6-1 proyecta aumentos moderados, con valores de 10,77% en el escenario SSP5-4.5 y 10,16% en el SSP2-8.5.

En relación con la época húmeda(diciembre-abril), el modelo ACCESS-CM2 espera incrementos en la evapotranspiración potencial media, valores de 7,55% en el escenario SSP2-4.5 y 9,32% bajo el escenario SSP5-8.5. De manera similar, el modelo MPI-ESM1-2-HR proyecta aumentos de 3,40% en el escenario SSP2-4.5 y 7,99% en el SSP5-8.5. Por su parte, el modelo CNRM-CM6-1 presenta incrementos más moderados de 6,00% y 4,88% en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente.

En la Figura 14 y la Tabla 12 se presenta la tasa de cambio de la evapotranspiración potencial estimada para el periodo 2030-2060, en comparación con los registros observados del periodo histórico 1981-2016, expresados en porcentaje(%).

Figura 14

Tasa de cambio de la evapotranspiración potencial media (2030-2060)



En la evapotranspiración potencial media durante el periodo (2030-2060) evidencia incrementos en todos los modelos climáticos evaluados, tanto para el escenario SSP2-4.5 como para el SSP5-8.5. En la epoca seca(junio-agosto) el modelo ACCESS-CM2 espera mayores incrementos, con valores hasta 12,57% en el escenario SSP2-4.5 y hasta 14,28% en el escenario SSP2-4.5 en el mes de junio. Asimismo, el MPI-ESM1-2-HR estima incrementos de hasta 10,68% bajo el escenario SSP2-4.5 y 11,53% en el SSP5-8.5, también durante junio. Del mismo modo, CNRM-CM6-1 proyecta aumentos de 13,30% y 8, 59% en los escenarios SSP2-4.5 y SSP2-8.5 respectivamnete, del mes de julio.

Por otro lado, durante la epoca húmeda(diciembre-abril) el modelo ACCESS-CM2 presenta los mayores aumentos, con valores que llegan hasta 11,19% en el escenario SSP2-4.5, y 12,33% en el SSP5-8.5, durante el mes de mayo. De manera similar, el modelo MPI-ESM1-2-HR espera incrementos progresivos, alcanzando valores de hasta 8,09% para el SSP2-4.5 y 11,53% en el SSP5-8.5, en el mes de mayo. Por otro lado, el modelo CNRM-CM6-1 evidencia aumentos moderados, con valores que llegan hasta 11,43% bajo el escenario SSP2-4.5, mientras que en el SSP5-8.5 hasta 7,75% en el mes de mayo(Tabla 12).

Tabla 12

Datos del cambio porcentual (%) de la evapotranspiración futura (2030-2060) respecto al periodo observado (1981-2016)

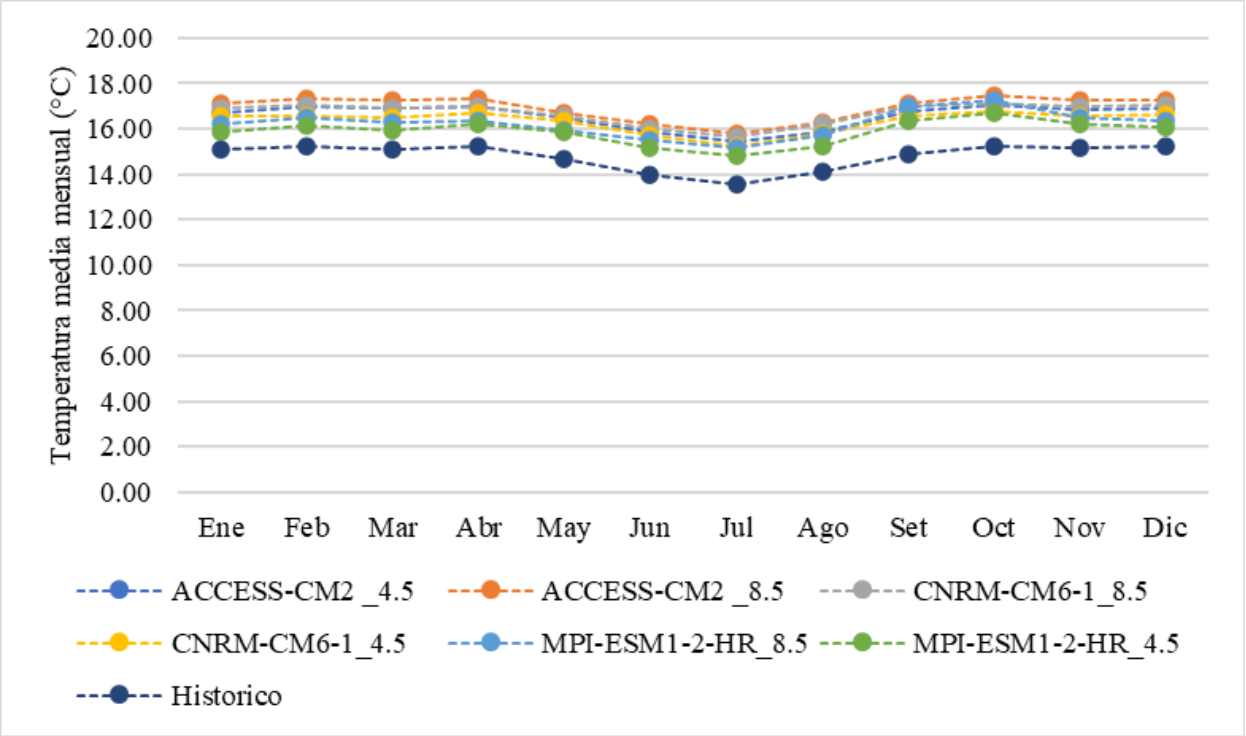
	ACCESS-CM2		MPI-ESM1-2-HR		CNRM-CM6-1	
Meses	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**
Enero	5,89	7,76	3,63	5,14	6,85	1,94
Febrero	7,73	9,44	5,17	5,40	7,96	3,64
Marzo	8,71	10,51	5,75	6,62	8,74	3,96
Abril	9,64	11,40	6,65	8,23	9,76	5,79
Mayo	11,19	12,33	8,09	10,37	11,43	7,75
Junio	12,57	14,28	10,68	11,53	13,08	8,48
Julio	12,03	13,79	10,40	10,78	13,30	8,59
Agosto	10,34	12,37	9,40	9,98	12,01	7,02
Septiembre	9,47	11,07	10,36	8,41	10,61	7,23
Octubre	7,57	9,74	8,62	6,42	8,19	5,94
Noviembre	6,36	8,29	4,67	4,79	6,72	3,27
Diciembre	5,78	7,47	3,21	4,62	6,63	1,70

Cambios de la temperatura media mensual

La temperatura media se ha estimado a partir del promedio entre la temperatura máxima y mínima obtenida de los modelos climáticos CNRM-CM6-1, ACCESS-CM2 y MPI-ESM1-2-HR, bajo los escenarios socioeconómicos compartidos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En la Figura 15 se presentan las variaciones de la temperatura media para el periodo 2030–2060 en comparación con el periodo histórico 1981-2016, lo que permite evaluar el comportamiento en los 30 años estudiados y su influencia en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Llaucano.

Figura 15

Comportamiento de la temperatura media mensual (2030-2060)



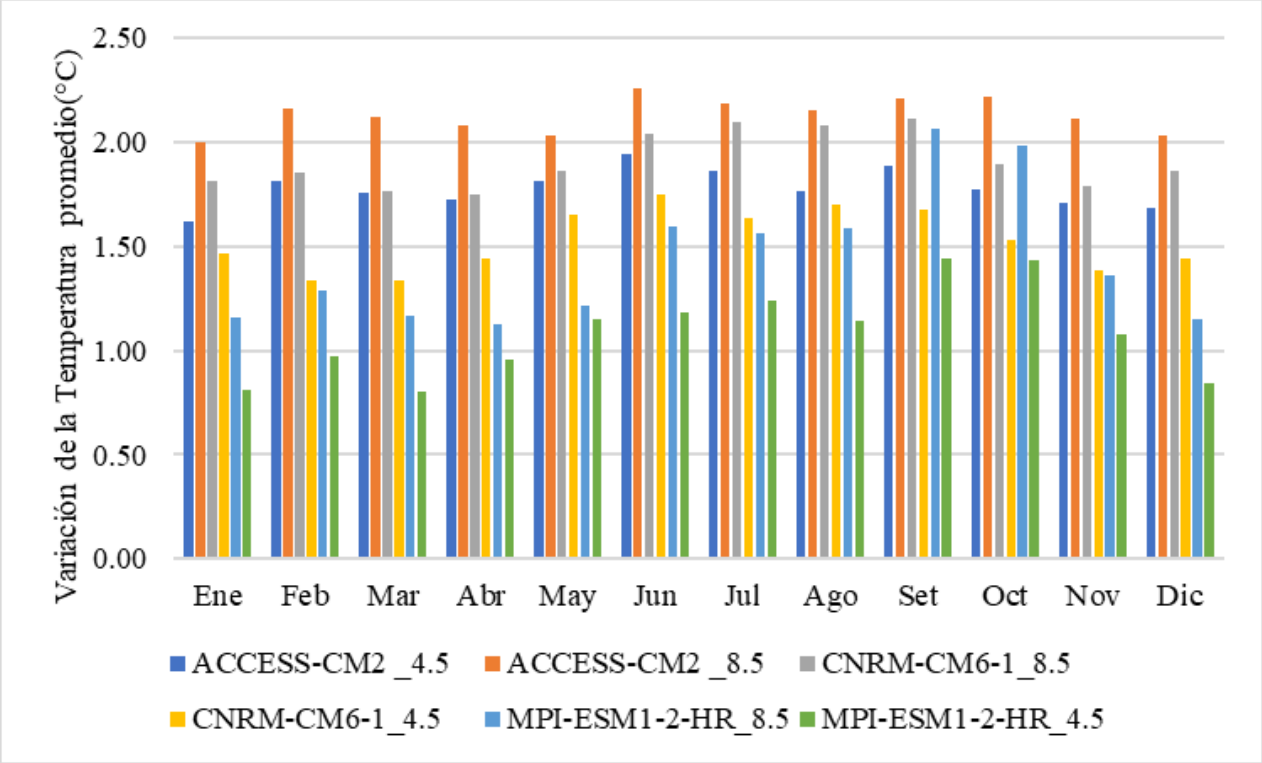
Durante la época seca (junio–agosto), la temperatura media en la cuenca del río Llaucano evidencia un incremento bajo todos los modelos climáticos y escenarios evaluados. El modelo climático ACCESS-CM2 espera incrementos de temperatura de 1,86 °C y 2, 20 °C bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP2-8.5; por otra parte, el modelo CNRM-CM6-1, en el escenario SSP2-4.5 y 8.5 estima aumentos de 1,69 °C y 2,07 °C; de manera semejante, el MPI-ESM1-2-HR proyecta un incremento de 1,19 °C en el escenario SSP2-4.5 y de 1,58 °C en el SSP2-8.5.

Para la época húmeda(diciembre-abril) se evidencia similar comportamiento, el modelo climático ACCESS-CM2 estima incrementos de 1,72 °C y 2,08 °C en los escenarios SSP2-4.5 y SSP2-8.5 respectivamente. Asimismo, para el modelo CNRM-CM6-1 se espera un incremento de 1,40 °C en el escenario SSP2-4.5 y 1,81°C en el SSP2-8.5. Del mismo modo, el MPI-ESM1-2-HR, en el escenario SSP2-4.5 y 8.5, la temperatura aumenta en 1,18 °C y 0,88 °C.

En la Figura 16 y Tabla 13 se presenta las variaciones de la temperatura promedio del periodo de estudio (2030-2060) respecto a los registros históricos observados, comprendidos en el periodo (1981-2016)

Figura 16

Variaciones de la temperatura media futura (2030-2060)



La temperatura, tanto en la época seca como en la húmeda, presenta una tendencia creciente para el periodo 2030-2060 en comparación con el periodo histórico observado 1981–2016, comportamiento que se evidencia en la Figura 16. Durante la época seca (junio-agosto), el modelo climático global ACCESS-CM2 espera los mayores incrementos de temperatura, alcanzando hasta 1,94 °C bajo el escenario SSP2-4.5 y hasta 2,26 °C en el escenario SSP5-8.5, durante el mes de junio. Asimismo, el modelo MPI-ESM1-2-HR estima aumentos de temperatura de hasta 2,10 °C en el escenario SSP2-4.5 en julio, mientras que para el escenario SSP5-8.5 se proyectan

incrementos de hasta 1,75 °C en junio. De manera similar, el modelo CNRM-CM6-1 proyecta aumentos moderados, con valores máximos de 1,59 °C y 1,18 °C en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente, durante el mes de junio.

De manera similar, en la época húmeda (diciembre-abril) se proyectan incrementos de temperatura en todos los modelos climáticos evaluados. El modelo ACCESS-CM2 presenta los mayores aumentos térmicos, llegando hasta 1,81 °C bajo el escenario SSP2-4.5 y 2,16 °C en el escenario SSP5-8.5, durante el mes de febrero. Asimismo, el modelo MPI-ESM1-2-HR proyecta incrementos de hasta 1,86 °C en el escenario SSP2-4.5, en los meses de febrero y diciembre, mientras que para el escenario SSP5-8.5 se estiman aumentos de hasta 1,46 °C durante enero. Por su parte, el modelo CNRM-CM6-1 evidencia incrementos más moderados, alcanzando valores hasta 1,29 °C en el escenario SSP2-4.5 y 0,97 °C en el SSP5-8.5, ambos registrados durante el mes de febrero.

Estos resultados evidencian una tendencia general de incremento de la temperatura en la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060, registrándose variaciones en la tasa de cambio que oscilan entre 0,81 °C y 2,26 °C respecto al periodo histórico 1981-2016. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Galindo et al. (2022), quienes sostienen que el aumento de la temperatura está asociado a los efectos del cambio climático, como consecuencia del incremento de emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de las actividades humana.

Tabla 13

Variación de la temperatura media (°C) futura (2030-2060) respecto al periodo observado (1981-2016)

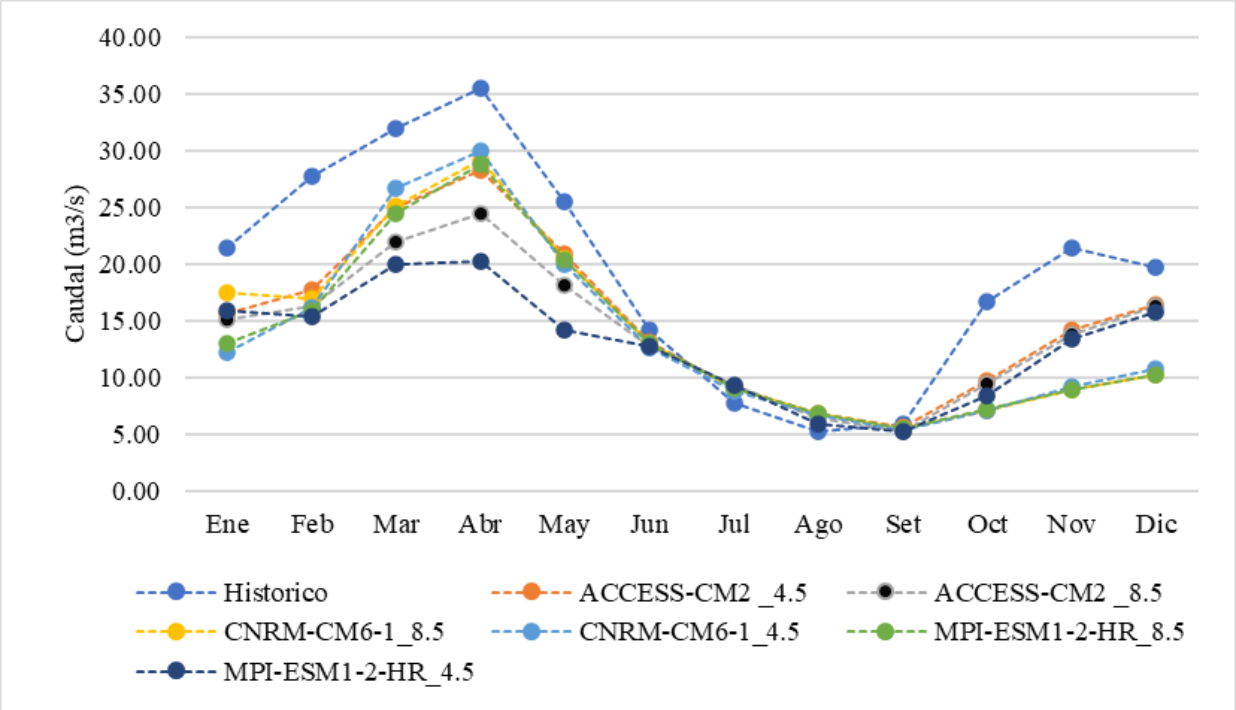
	ACCESS-CM2		MPI-ESM1-2-HR		CNRM-CM6-1	
Meses	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**
Enero	1,62	2,00	1,81	1,46	1,15	0,81
Febrero	1,81	2,16	1,86	1,34	1,29	0,97
Marzo	1,76	2,12	1,76	1,34	1,16	0,80
Abril	1,72	2,08	1,75	1,44	1,13	0,95
Mayo	1,81	2,03	1,86	1,66	1,22	1,15
Junio	1,94	2,26	2,04	1,75	1,59	1,18
Julio	1,86	2,19	2,10	1,64	1,57	1,24
Agosto	1,77	2,15	2,08	1,70	1,59	1,14
Setiembre	1,89	2,21	2,11	1,68	2,06	1,44
Octubre	1,77	2,22	1,90	1,53	1,98	1,43
Noviembre	1,71	2,11	1,79	1,39	1,36	1,08
Diciembre	1,69	2,03	1,86	1,44	1,15	0,84

4.1.4. Disponibilidad hídrica en la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060 bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 proyectados.

La disponibilidad hídrica simulada con el modelo GR4J responde al balance entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP), que regula las pérdidas por evaporación; además, de la temperatura que incide indirectamente en la ETP. Para evaluar los efectos del cambio climático, se compararon los caudales simulados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (2030-2060) con el periodo histórico observado (1981-2016). Esta comparación permite cuantificar las variaciones en el caudal medio, así como en los eventos de estiaje y de avenida. En la Figura 17 se muestra el comportamiento de la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Llaucano.

Figura 17

Comportamiento del caudal medio simulado para el periodo 2030–2060



Los caudales medios multianuales simulados por los modelos ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1 y MPI-ESM1-2-HR, en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2030-2060, no mantiene la estacionalidad histórica observada, presentando menores caudales durante los meses lluviosos y ligeros incrementos en la época seca. El modelo ACCESS-CM2 muestra una disminución de caudal en la época húmeda (diciembre -abril) y una ligera variación en la época seca(junio-agosto) para ambos escenarios climáticos. Asimismo, el CNRM-CM6-1 presentan un comportamiento más cercano a los registros históricos, sin embargo, se espera una disminución de los caudales en los meses húmedos y variaciones poco significantes durante el periodo seco. No obstante, el modelo MPI-ESM1-2-HR muestra diferencias muy notorias, disminuyendo el caudal en la temporada húmeda en ambos escenarios, con mayor significancia en el SSP2-4.5.

La Tabla 14 muestra la variación estacional del caudal promedio mensual, obtenida a partir de la comparación entre los datos observados del producto grillado PISCO del SENAMHI y las proyecciones de los modelos climáticos globales ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1 y MPI-ESM1-2-HR, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Tabla 14

Variación de caudal para la época de estiaje y avenida, en el periodo 2030-2060

Fecha	Caudal observado	ACCES CM2_4.5	ACCES CM2_8.5	CNRM-CM6_8.5	CNRM-CM6_4.5	MPI-ESM1-2-HR_8.5	MPI-ESM1-2-HR_4.5
Ene	21,40	15,65	15,10	17,52	12,21	12,96	15,94
Feb	27,69	17,70	16,31	16,94	16,22	15,87	15,36
Mar	31,89	24,95	21,90	25,16	26,65	24,48	19,93
Abr	35,49	28,19	24,49	29,14	29,95	28,82	20,21
May	25,56	20,83	18,13	20,45	19,93	20,43	14,22
Jun	**14,13**	**13,10**	**12,71**	**13,02**	**12,66**	**13,02**	**12,79**
Jul	**7,79**	**9,13**	**9,37**	**9,05**	**8,84**	**9,05**	**9,38**
Ago	**5,25**	**6,88**	**6,40**	**6,81**	**6,69**	**6,81**	**5,94**
Set	5,96	5,66	5,31	5,47	5,37	5,46	5,20
Oct	16,63	9,79	9,48	7,14	7,12	7,17	8,36
Nov	21,39	14,26	13,74	8,96	9,14	8,91	13,41
Dic	19,77	16,45	16,25	10,30	10,79	10,29	15,73
época de estiaje (GCM/Qobs)	Δ m3/s	0,64	0,43	0,57	0,34	0,57	0,31
	Δ %	13,57	10,63	12,67	10,14	12,61	7,99
época de avenida (GCM/Qobs)	Δ m3/s	-6,66	-6,98	-6,81	-5,23	-7,66	-8,48
	Δ %	-24,42	-26,02	-22,57	-28,79	-31,30	-30,45

En la Tabla 14 se aprecia las variaciones multianuales del caudal promedio mensual en la época de estiaje y avenida. En la época de estiaje, el modelo ACCESS-CM2 en sus escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, estima un incremento promedio del caudal de a 0,64m3/s, equivalente al 13,57% y 0,43 m3/s (10.63%) respectivamente. De manera similar, el CNRM-CM6-1 espera un incremento de 0,57 m3/s (12,67%) bajo el escenario SSP5-8.5 y 0,34 m3/s (10,14%) en el SSP2-4.5. Del

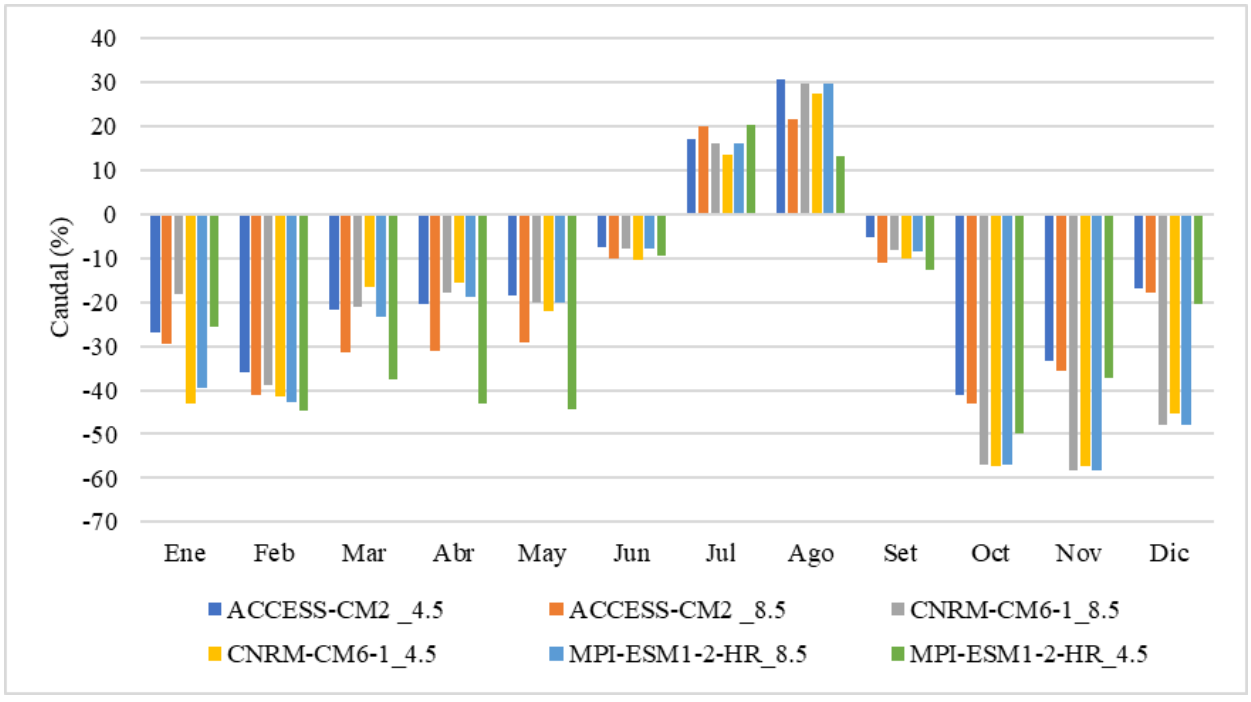
mismo modo, el MPI-ESM1-2-HR, en los escenarios SSP2-4.5 y 8.5 proyecta aumentos de caudal de 0,31 m3/s (7,99%) y 0,57 m3/s (12,61%), en ese orden, indicando una leve sobreestimación del caudal durante los periodos de menor disponibilidad hídrica.

No obstante, en la a época de avenida en el modelo climático ACCESS-CM2, en sus escenarios SSP2-4.5 y 8.5, se espera que el caudal promedio disminuya en 6,66 m3/s (24,42%) y 6,98 m3/s (26,02%) respectivamente. Por su parte, el CNRM-CM6-1 estima reducciones de 5,23 m3/s (22,57%) bajo el escenario SSP2-4.5 y 6,81 m3/s (28,79%) en el SSP5-8.5. De igual modo, el MPI-ESM1-2-HR proyecta descenso de caudal de 8,48 m3/s (30,45%) y 7,66 m3/s (31,30%) bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente, reflejando una subestimación del caudal en los periodos de mayor aporte hídrico.

En la Figura 18 se presenta la tasa de cambio del caudal simulado en porcentaje (%) para el periodo 2030-2060, en relación con el periodo histórico observado 1981-2016.

Figura 18

Tasa de cambio del caudal simulado (2030-2060)



Durante la época seca (junio-agosto) el modelo ACCESS-CM2 en el escenario SSP2-4.5 se espera un incremento del caudal medio mensual hasta 30,87% en agosto; sin embargo, en el mes de junio se prevé una reducción de hasta 7,35%. De igual manera, en el escenario SSP5-8.5 se estima un aumento del caudal 21,78% en el mes de agosto; por lo contrario, en el mes de junio se proyecta reducciones hasta 10,09%. Por otro lado, el modelo CNRM-CM6-1, en sus escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 estiman aumentos hasta 27,37% y 29,70% respectivamente, durante el mes de agosto. No obstante, en el mes de junio el caudal reduce hasta 10,41% y 7,87% en SSP2-4.5 y 8.5. De igual modo, el modelo MPI-ESM1-2-HR evidencia incrementos de caudal medio hasta 13,12% en el escenario SSP2-4.5, y hasta 29,61% en SSP5-8.5, para ambos durante el mes de agosto. En cambio, para el mes de junio se espera que el caudal disminuya hasta 9,50% y 7,88% en los escenarios SSP2-4.5 y 8.5 respectivamente.

En la época húmeda, el modelo ACCESS-CM2 estima, bajo el escenario SSP2-4.5, reducciones del caudal medio que alcanzarían hasta 36,08% en febrero, y bajo el escenario SSP5-8.5 hasta 41,09% en el mismo mes. De manera similar, el modelo CNRM-CM6-1, en ambos escenarios climáticos se muestran descensos del caudal, con valores que podrían alcanzar hasta 42,96% en enero y 38,80% en febrero en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente. Por su parte, el modelo MPI-ESM1-2-HR presenta un comportamiento semejante, bajo el escenario SSP2-4.5 se estiman disminuciones hasta 44,51% en febrero, en el escenario SSP5-8.5 se esperan que el caudal disminuya hasta 42,69% del mismo mes. En la Tabla 15 se presentan estos comportamientos para todos los GCM en los escenarios evaluados.

Tabla 15

Datos de tasa de cambio del caudal simulado (2030-2060)

	ACCESS-CM2		CNRM-CM6-1		MPI-ESM1-2-HR	
Meses	**SSP5-8.5**	**SSP2-4.5**	**SSP2-8.5**	**SSP5-4.5**	**SSP2-8.5**	**SSP5-4.5**
Enero	-29,46	-26,89	-18,15	-42,96	-39,42	-25,51
Febrero	-41,09	-36,08	-38,80	-41,41	-42,69	-44,51
Marzo	-31,33	-21,75	-21,09	-16,41	-23,24	-37,51
Abril	-30,98	-20,56	-17,89	-15,59	-18,80	-43,05
Mayo	-29,05	-18,48	-19,98	-22,01	-20,08	-44,36
Junio	**-10,09**	**-7,35**	**-7,87**	**-10,41**	**-7,88**	**-9,50**
Julio	**20,20**	**17,19**	**16,19**	**13,45**	**16,10**	**20,35**
Agosto	**21,78**	**30,87**	**29,70**	**27,37**	**29,61**	**13,12**
Setiembre	-10,96	-5,08	-8,25	-9,99	-8,37	-12,75
Octubre	-43,01	-41,13	-57,05	-57,22	-56,88	-49,76
Noviembre	-35,76	-33,36	-58,14	-57,28	-58,34	-37,34
Diciembre	-17,81	-16,81	-47,88	-45,44	-47,95	-20,46

De acuerdo con la Tabla 15, el caudal medio mensual multianual para ambos escenarios y en los tres modelos climáticos globales analizados, se espera para el periodo 2030-2060 una disminución del caudal en la época de avenida hasta un 44,51%, equivalente a 12,33 m^3/s. En cambio, durante la época seca se estima un incremento del caudal de hasta un 30,87%, equivalente a 1,63 m^3/s.

4.2. Contrastación de hipótesis

Los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico con GR4J, bajo proyecciones de precipitación, evapotranspiración y temperatura, simuladas mediante los Modelos Climáticos Globales (GCM) ACCESS-CM2, MPI-ESM1-2-HR y CNRM-CM6-1 del CMIP6, pertenecientes al CMIP6, bajo los escenarios de cambio climático SSP2-4.5(mitigación intermedia de GEI) y SSP5-8.5(altas emisiones de GEI), permitieron contrastar la hipótesis general de la investigación.

Durante el periodo de estudio (2030-2060) el comportamiento hidrológico en la cuenca del río Llaucano presentó variaciones respecto al periodo histórico observado (1981-2016), en la época de avenida, en el modelo climático MPI-ESM1-2-HR se obtuvieron las mayores disminuciones de caudal promedio, con reducciones de 30,45% y 31,30% bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente; en la época de estiaje, el modelo ACCESS-CM2 en sus escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, estima los mayores incrementos promedio de 13,57% y 10.63% respectivamente. Estos resultados son consistentes con estudios reportados, donde se muestran comportamiento hidrológico similares en la época de avenida en la cuenca del río Llaucano(Rojas 2025). Estos cambios de caudal medio esperados permitieron confirmar el efecto **significativo** del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano.

Sin embargo, el término "**significativamente**", mencionado en la hipótesis general interpreta la existencia de un cambio relevante o con alta magnitud del efecto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica de la cuenca, y no hace referencia a una significancia estadística. Meenu et al. (2013) utiliza el termino, mencionado que el "cambio climático afecta **significativamente** a sistemas hidrológicos", evaluando el impacto mediante una comparación del caudal futuro con el actual, sin emplear la significancia estadística. De manera similar, Kourtis et al. (2025) en su estudio con GR2M, concluye que existen cambios **significativos** en los flujos anuales y estacionales al identificar reducciones proyectadas de entre 13% y 23% en la precipitación y entre 32% y 47% en el caudal, sustentando dicha afirmación en la magnitud de las variaciones obtenidas mediante simulación hidrológica y no en pruebas de significancia estadística aplicadas a los caudales proyectados. De su parte Salgado (2011) en su estudio en Chile, utiliza el termino en sus resultados, indicando que "para el período 2011-2040, no existirá una variación **significativa** en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico, en comparación al período de calibración".

En el caso de la H1, los indicadores NSE y KGE se utilizan para evaluar qué tan bien representa el modelo los caudales observados durante las etapas de calibración y validación. Por esta razón, no es correcto afirmar que el modelo alcanzará valores iguales o superiores a 0,70 durante el periodo 2030-2060, debido a que para esos años no existen caudales observados con los cuales comparar las simulaciones. El desempeño del modelo debe comprobarse utilizando información histórica. Además, establecer valores mínimos de NSE y KGE corresponde más a un criterio técnico para aceptar el modelo que a una hipótesis de investigación.

Respecto a la H2, es razonable esperar que los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 produzcan resultados diferentes, ya que cada uno representa una trayectoria distinta de emisiones y condiciones climáticas futuras. Sin embargo, hay que señalar que existen diferencias significativas requiere definir con precisión qué se entiende por disponibilidad hídrica, qué escala temporal se analizará y qué prueba estadística se utilizará. También debe considerarse que los datos mensuales o anuales de caudal están relacionados entre sí, por lo que no siempre pueden tratarse como observaciones independientes. Si este aspecto no se considera, podría obtenerse una significancia estadística que no represente una diferencia real desde el punto de vista hidrológico.

En cuanto a la H3, la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial forman parte de las variables de entrada del modelo GR4J. Por lo tanto, es esperable que cualquier modificación en estas variables produzca cambios en el caudal simulado y en el balance hídrico de la cuenca. En ese sentido, hay que afirmar únicamente que influyen de manera significativa resulta demasiado general y, en cierta forma, describe el funcionamiento propio del modelo. Para conocer con mayor precisión el efecto de cada variable sería necesario realizar un análisis de sensibilidad, modificando una variable a la vez o aplicando métodos que permitan separar su influencia individual.

4.3. Discusiones

4.3.1. Eficiencia del modelo GR4J frente a otras cuencas andinas

El modelo hidrológico GR4J presentó un desempeño aceptable en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano. En la etapa de calibración, el modelo alcanzó un desempeño clasificado como "bueno" según el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE=0,41). Asimismo, las métricas complementarias evidenciaron resultados categorizados como "buenos", con valores de KGE = 0,54, PBIAS = 2,7%, lo que indica una adecuada representación de la dinámica hidrológica de la cuenca. En la etapa de validación, el modelo mejora su capacidad, alcanzando un desempeño "muy bueno" con un NSE de 0,70. Del mismo modo, los indicadores KGE = 0,70, PBIAS = 7,4% presentando una mayor estabilidad y confiabilidad en la simulación de caudales. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Montenegro y Fernando (2025), quienes reportaron valores de NSE de 0,45 y 0,60 durante la calibración y validación del modelo GR4J en la cuenca del río Guayllabamba (Ecuador). Del mismo modo, Zheng et al. (2024) obtuvieron valores de NSE superiores a 0,60 en cuencas australianas, mientras que Pachac (2025) registró coeficientes de 0,69 y 0,72 en las regiones de Áncash y Lima. Asimismo, Arias y Delgado (2023) reportaron valores de NSE de 0,48 y 0,64 y coeficientes R^2 de 0,65 y 0,70 en la cuenca del río Zaña, resultados comparables con los obtenidos en la presente investigación. En la cuenca del río Chotano, Rojas (2024) también obtuvo desempeños similares, con valores de NSE de 0,74 durante la calibración y 0,59 en la validación.

No obstante, el desempeño obtenido del modelo hidrológico difiere por lo reportado por Kassaye et al. (2024), quienes alcanzaron valores de NSE de 0,83 y 0,74 en Etiopía, así como al de Martínez et al. (2023), quienes obtuvieron coeficientes de 0,78 y 0,75. Estas diferencias pueden atribuirse a

factores, como las características fisiográficas de las cuencas, la disponibilidad de la información hidrometeorológica utilizada y el tamaño y complejidad de las cuencas.

4.3.2. Dinámica de la precipitación, temperatura y Evapotranspiración futura (2030-2060)

Las variables climáticas de precipitación, temperatura media y evapotranspiración proyectadas (2030-2060) bajo escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 presentan variaciones significantes respecto al periodo histórico observado (1981-2016). La precipitación muestra los incrementos más altos en la época húmeda de 13,29% en el escenario SSP2-4.5 y de 13,06% bajo el SSP5-8.5 para todos los GCM (ACCESS-CM2, MPI-ESM1-2-HR, CNRM-CM6-1). No obstante, en la época seca la precipitación disminuye hasta 26,78% (SSP2-4.5) y 13, 87% (SSP2-4.5). La temperatura media muestra incrementos hasta 1,86°C (SSP2-4.5) y 2,20°C (SSP5-8.5) en la época seca y hasta 1,72°C (SSP2-4.5) y 2,08°C (SSP2-4.5). Por su parte, la evapotranspiración, presenta incrementos en ambas épocas, hasta 12,80%(SSP2-4.5) y 13,48% (SSP5-8.5) de todos los GCM durante la época húmeda. Estos resultados son similares con lo reportado por Martínez et al. (2023), quienes observaron incrementos tanto de la temperatura como de la evapotranspiración bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en México. Asimismo, Flores (2023) identificó aumentos de temperatura entre 1,03 y 6,45 °C y un incremento superior al 10% en la precipitación para la región de Ayacucho. En la cuenca del río Chotano, Rojas (2024) estimó incrementos de 7,49% en la precipitación y aproximadamente 1,05 °C en la temperatura media, resultados que muestran una tendencia regional similar a la encontrada en la cuenca del río Llaucano. Estas concordancias indican que el incremento de la temperatura es una tendencia consistente en cuencas andinas, mientras que las variaciones de precipitación y evapotranspiración dependen de la incertidumbre de los Modelos Climáticos Globales (GCM) y las características fisiográficas de la cuenca de estudio.

4.3.3. Dinámica del balance hídrico futuro (2030-2060)

La disponibilidad hídrica estimada en la cuenca del río Llaucano, bajo escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2030-2060, muestra variabilidad estacional del caudal para ambas épocas evaluadas. En la época seca, los caudales proyectados presentan los incrementos más altos de 13,57% bajo el escenario SSP2-4.5 en el modelo climático ACCESS-CM2 y 12,61% bajo SSP5-8.5, en ESM1-2-HR. No obstante, durante la época húmeda se estiman reducciones máximas de hasta 30,45% y 31,30% bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente, en el modelo ESM1-2-HR. Las reducciones del caudal estimadas son parcialmente concordantes con lo reportado por Montenegro y Fernando (2025), quienes también identificaron modificaciones significativas de la disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en cuencas andinas, aunque se estimaron incrementos de caudal bajo el escenario SSP2-4.5 y reducciones en el SSP5-8.5. De manera similar, Martínez et al. (2023) proyectaron disminuciones del caudal en ambos escenarios climáticos, mientras que Zheng et al. (2024) registraron reducciones de la escorrentía de hasta el 50% en cuencas del sur de Australia. Sin embargo, los resultados difieren con lo reportado por Kassaye et al. (2024) en Etiopía, estiman incrementos del caudal hasta 12,4% (SSP2-4.5) y 35,6% (SSP5-8.5). Del mismo modo, investigaciones desarrolladas en Arequipa y Ayacucho registraron incrementos proyectados del caudal de hasta 192% y 47,95%, respectivamente (Condori & Ticona, 2025; Flores, 2023). Por su parte, Pachac (2025) espera incrementos para ambos escenarios, que alcanzan valores hasta el 64%. Estas diferencias responden a la incertidumbre asociada a los escenarios de emisión y a los modelos climáticos globales (GCM), así como a procesos antropogénicos que modifican la respuesta hidrológica de la cuenca.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El modelo hidrológico GR4J presentó un desempeño eficiente en el modelamiento hidrológico, los parámetros reales obtenidos fueron: X1 = 573,10 mm; X2 = 2,47 mm/día; X3 = 23,00 mm y X4 = 3,29 días. Estos parámetros permitieron medir el rendimiento del modelo con las métricas obtenidas (NSE=0,41, KGE=0,54, PBIAS=2,7% y R^2=0,48) clasificándose el NSE como "Bueno", para la fase de calibración. En la validación se obtuvo una capacidad de mejora (NSE=0,70, KGE = 0,80, PBIAS = 7,4% y R^2 = 0,76) categorizándose el NSE como "Muy bueno".
- Las variables de precipitación, temperatura media y evapotranspiración proyectadas bajo escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para el periodo (2030-2060) mostraron variaciones importantes respecto al periodo observado (1981-2016). Los modelos ACCESS-CM2, MPI-ESM1-2-HR y CNRM-CM6-1 estiman incrementos de precipitación hasta 13,29%(SSP2-4.5) y reducciones hasta 9,49%(SSP5-8.5), aumentos de temperatura hasta 1,86°C(SSP2-4.5) y 2,20°C(SSP5-8.5) y de la evapotranspiración incrementos hasta 12,80%(SSP2-4.5) y 13,48% (SSP5-8.5).
- El caudal en la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060, bajo escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, muestra disminuciones en la época de lluvia y ligeros incrementos en la época de estiaje respecto al periodo observado de (1981-2016). Los modelos ACCESS-CM2, MPI-ESM1-2-HR y CNRM-CM6-1 estiman incrementos hasta 13,57%(SSP2-4.5) y 12,61%(SSP5-8.5) durante el estiaje; mientras que en la época de avenida se proyectan disminuciones de 30,45%(SSP2-4.5) y 31,30%(SSP5-8.5), indicando que la disponibilidad

hídrica podría verse afectada bajo escenarios de cambio climático durante el periodo 2030-2060.

5.2. Recomendaciones

- Utilizar información de diferentes estaciones hidrométricas para el periodo observado, con la finalidad de obtener resultados más eficientes en las métricas de evaluación del desempeño del modelo GR4J en la fase de calibración y validación, para tener una representación más precisa del comportamiento hidrológico de la cuenca en respuesta a escenarios de cambio climático. Asimismo, se sugiere emplear dos a más modelos hidrológicos para comparar resultados y reducir la incertidumbre en la simulación de caudales futuros.
- Utilizar Modelos Climáticos Globales (GCM) previamente validadas en investigaciones desarrolladas en la región o en zonas con condiciones meteorológicas similares, para obtener proyecciones climáticas más representativas para el área de estudio. Asimismo, es sugiere aplicar y comparar diferentes métodos de corrección de sesgo en las variables climáticas proyectadas, con el fin de reducir incertidumbres y tener resultados más confiables en las simulaciones hidrológicas bajo escenarios de cambio climático.
- Continuar y ampliar la investigación sobre cambio climático y recursos hídricos, debido a que sus efectos en la disponibilidad hídrica cada día son más críticos, por ende, se sugiere la implementación de políticas públicas orientadas a la adaptación y mitigación al cambio climático y a fortalecer la gestión sostenible de los recursos hídricos.

CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulla, F., & Al-Shurafat, A. W. (2020). Assessment of the Impact of Potential Climate Change on the Surface Water of a Trans-boundary Basin: Case Study Yarmouk River. *Procedia Manufacturing*, *44*, 172-179. https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.02.219

Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Adamo, N., Al-Ansari, N., & Sissakian, V. (2021). Review of Climate Change Impacts on Human Environment: Past, Present and Future Projections. *Engineering*, *13*(11), 605-630. https://doi.org/10.4236/ENG.2021.1311044

Andrea, F.-A., David, H.-V. M., Abel, C.-A., Hídricos, R., Edmundo, V.-M., & De Empresas, A. (2023). *Flow generation at daily level using the GR4j Method and gridded climate information in the Huayabamba river basin*. https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.403

Arias Reategui, G. A., & Bazalar Delgado, A. J. (2023). *Aplicación del modelo hidrológico GR4j para la estimación de caudales diarios utilizando conjunto de datos grillados ERA5 en la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batan*.

Aschonitis, V., Touloumidis, D., Ten Veldhuis, M. C., & Coenders-Gerrits, M. (2022). Correcting Thornthwaite potential evapotranspiration using a global grid of local coefficients to support temperature-based estimations of reference evapotranspiration and aridity indices. *Earth System Science Data*, *14*(1), 163-177. https://doi.org/10.5194/ESSD-14-163-2022

Autoridad Nacional del Agua-ANA. (2021). *Cultura del agua. Experiencias exitosas que fortalecen la seguridad hídrica del Perú*. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/ana0003254.pdf

Autoridad Nacional del Agua-ANA. (2025). *Memoria Anual 2025*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/file_content/MEMORIA%20ANUAL%202025.pdf

Ayele, A. G. (2025). Evaluation and Selection of the CMIP6 Climate Model over Ethiopia. *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences 2025, Volume 9, Page 90*, *9*(2), 90-98. https://doi.org/10.11648/J.IJAOS.20250902.12

Babker, Z., G. Reichenau, T., Zagar, M., & Schneider, K. (2025). *Evaluating climate change impacts on the hydrology of Kamp catchment, Austria, under different shared social pathways (SSPs)*. https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU24-4454

Berman, J. D., Abadi, A. M., & Bell, J. E. (2024). Existing Challenges and Opportunities for Advancing Drought and Health Research. *Current Environmental Health Reports*, *11*(2), 255-265. https://doi.org/10.1007/S40572-024-00440-Z/METRICS

Campos, G. G. (2021). *Aplicación de los modelos hidrológicos GR2M y SMAP para la generación de caudales medios mensuales en subcuencas no aforadas. caso de estudio: Cuencas Jequetepeque, Chancay - Lambayeque y Piura* [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola]. https://hdl.handle.net/20.500.14005/11637

Cannon, A. J., Sobie, S. R., Murdock, T. Q., Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, *28*(17), 6938-6959. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1

Chávez, O. (2025). Validación y corrección de la precipitación mensual generada con el producto PISCO (SENAMHI) del período de 1981 al 2023, de la región Cajamarca

. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. https://repositorio.unc.edu.pe/items/68b3bb57-ba67-41af-ab6b-d8c491621cf8

Cherif, R., Bouteffeha, M., Gargouri-Ellouze, E., & Eslamian, S. (2023). Hydrologic models classification, calibration, and validation. *Handbook of HydroInformatics: Volume II: Advanced Machine Learning Techniques*, 155-168. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821961-4.00023-3

Condori Holgado, F. Z., & Ticona Marin, J. N. (2025). *Estimación del impacto del cambio climático mediante las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) en la disponibilidad hídrica en represas - Caso de estudio peruano* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. https://hdl.handle.net/20.500.12920/15466

Cruz, S. S. (2021). Estrategias para la seguridad hídrica ante los cambios de precipitación por efectos del cambio climático. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, *12*(23), 275. https://doi.org/10.23913/RIDE.V12I23.1039

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, *9*(5), 1937-1958. https://doi.org/10.5194/GMD-9-1937-2016

Faty, B., Sterk, G., Ali, A., Sy, S., Dacosta, H., Diop, S., & Descroix, L. (2023). Satellite-based rainfall estimates to simulate daily streamflow using a hydrological model over Gambia watershed. *Water Science*, *37*(1), 1-18. https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2225898

Flores, J. M. (2023). *Impacto del cambio climático en la escorrentía superficial en la Cuenca del Río Chacco* [Pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].

https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/7e4795fd-779e-410a-bc39-8d5cf5e2c7f2/content

Galindo, L. M., Hoffman, B., & Vogt-Schild, A. (2022). *¿Cuánto costará lograr los objetivos del cambio climático en América Latina y el Caribe? | Publicaciones*. https://publications.iadb.org/en/publications/spanish/viewer/Cuanto-costara-lograr-los-objetivos--del-cambio-climatico--en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf

Gibson, P. B., Stuart, S., Sood, A., Stone, D., Rampal, N., Lewis, H., Broadbent, A., Thatcher, M., & Morgenstern, O. (2024). Dynamical downscaling CMIP6 models over New Zealand: added value of climatology and extremes. *Climate Dynamics 2024 62:8*, *62*(8), 8255-8281. https://doi.org/10.1007/S00382-024-07337-5

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). *Anexo II: Glosario. Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II y III Al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*. 4-12. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/AR5_SYR_Glossary_es.pdf

Hernández Sampieri, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana Editores. https://books.google.com.pe/books?id=aq8y0AEACAAJ&hl=es&source=gbs_navlinks_s

Hofer, T., & Warren, P. (2020). *La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos*. (FAO 333.73 H697), 1-40. http://www.fao.org/docrep/012/a1295s/a1295s00.htm

Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica – INSH. (2022). *Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural - CONDESAN*. https://condesan.org/recursos/guia-de-modelacion-hidrologica-para-la-infraestructura-natural/

Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. (2023). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Izaguirre Liviac, M. F., Drenkhan, F., & Timaná, M. E. (2024). Actual y futura disponibilidad del agua en un contexto de inseguridad hídrica en la subcuenca de Parón, cuenca del río Santa, Perú. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, *0*(13), A-001. https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202401.A001

Jayo Ancco, A. F. (2024). *Evaluación del comportamiento de la disponibilidad hídrica futura, bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Acarí - 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. https://repositorio.unsch.edu.pe/items/6611adda-b843-43a6-a7f0-41e2dac9297c

Jesus, M. del, Paz, J., Navas, S., Turienzo, E., Diez-Sierra, J., & Peña, N. (2020). Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de los países andinos. *Ingeniería del Agua*, *24*(4), 219-233. https://doi.org/10.4995/IA.2020.12135

Kassaye, S. M., Tadesse, T., Tegegne, G., & Hordofa, A. T. (2024). Quantifying the climate change impacts on the magnitude and timing of hydrological extremes in the Baro River Basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, *13*(1). https://doi.org/10.1186/S40068-023-00328-1

Keller, A. A., Garner, K. L., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2022). Downscaling approaches of climate change projections for watershed modeling: Review of theoretical and practical considerations. *PLOS Water*, *1*(9), e0000046. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PWAT.0000046

Kourtis, I. M., Papadopoulou, C. A., Trabucco, A., Peano, D., Sangelantoni, L., Mellios, N., Laspidou, C., Papadopoulou, M. P. & Tsihirintzis, V. A.. (2025). *Methodological framework for the evaluation of climate change impacts on rural basins using the GR2M model*. Environmental Processes, 12, 13. https://doi.org/10.1007/s40710-025-00755-5

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

Kumar, D., Dhaloiya, A., Nain, A. S., Sharma, M. P., & Singh, A. (2021). Prioritization of Watershed Using Remote Sensing and Geographic Information System. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9456*, *13*(16), 9456. https://doi.org/10.3390/SU13169456

Lanegra, I. (2021). Política ambiental y del cambio climático 4.2. *Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES)*, 10-15. https://cies.org.pe/wp-content/uploads/2021/04/18._dp_medio_ambiente.pdf

Lema González, F. P. (2021). *Análisis del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos de cuencas en régimen natural ubicadas en la zona alta del río Mataquito: comparación entre los escenarios RCP 8.5 y RCP 4.5* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. https://doi.org/10.58011/JHFN-8N66

Llauca, H., Leon, K., & Lavado-Casimiro, W. (2023). Construction of a daily streamflow dataset for Peru using a similarity-based regionalization approach and a hybrid hydrological modeling framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *47*, 101381. https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2023.101381

López Cabello, J. E. (2022). Efectos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica para fines de abastecimiento poblacional de la ciudad de Huánuco [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. En *Universidad Nacional de Ingeniería*. https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/24559

Lozano, G., & Monsalve, A. (2021). *Análisis de la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca alta y media del río La vieja bajo escenarios de cambio climático* [Tesis de pregrado, Universidad del Quindo]. https://fileserver-az.core.ac.uk/download/482717951.pdf

Martel Tucto, J. J. (2024b). *Efecto del cambio climático en el recurso hídrico para el cultivo de arroz en el sector agrícola del Río Azul, la Morada, Marañón, Huánuco, 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. https://hdl.handle.net/20.500.14292/2839

Martín, R. S., Quiñonez, W., LoPrete, D. V., & Rossi, P. V. (2023). Radiación infrarroja y efecto invernadero. *Terrae Didáctica*, *19*, e023004. https://doi.org/10.20396/TD.V19I00.8671534

Martínez, Y., & Villalejo, V. M. (2018). *La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos The integrated water resources management: a nowadays need*. *39*(1), 58-72.

Martínez-Sifuentes, A. R., Trucíos-Caciano, R., Rodríguez-Moreno, V. M., Villanueva-Díaz, J., & Estrada-Ávalos, J. (2023). The Impact of Climate Change on Evapotranspiration and Flow in a Major Basin in Northern Mexico. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 847*, *15*(1), 847. https://doi.org/10.3390/SU15010847

Mathevet, T., Le Moine, N., Andréassian, V., Gupta, H., & Oudin, L. (2023). Multi-objective assessment of hydrological model performances using Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiencies on a worldwide large sample of watersheds. *Comptes Rendus - Geoscience*, *355*(S1), 117-141. https://doi.org/10.5802/CRGEOS.189/

Meierdiercks, K. L., Finewood, M. H., & Bennett, C. (2024). Defining the term watershed to reflect modern uses and functions as inter- and intra-connected socio-hydrologic systems. *Journal of Environmental Studies and Sciences 2024 14:2*, *14*(2), 236-255. https://doi.org/10.1007/S13412-024-00891-8

Mena, D., Ramos, M. A. C., & Rodríguez, A. M. S. (2020). Modelación de los impactos de los escenarios de cambio climático en la cuenca del Río Pamplonita en Norte de Santander. *Revista EIA*, *17*(33), 33015 pp. 1-12. https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1265

Méndez, M., Calvo, L.A., Imbach, P., Maathuis, B., Hein-Grigg, D., Hidalgo, J.A., Alvarado, L.F. (2022). Hydrological Response of Tropical Catchments to Climate Change as Modeled by the GR2M Model: A Case Study in Costa Rica. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 16938*, *14*(24), 16938. https://doi.org/10.3390/SU142416938

Mendoza, J. A., Chavez Alcazar, T. A., & Zuñiga Medina, S. A. (2021). Calibration and Uncertainty Analysis for Modelling Runoff in the Tambo River Basin, Peru, Using Sequential Uncertainty Fitting Ver-2 (SUFI-2) Algorithm. Air, Soil and Water Research, 14. https://doi.org/10.1177/1178622120988707

Meenu, R., Rehana, S. y Mujumdar, PP (2013), Evaluación de los impactos hidrológicos del cambio climático en la cuenca del río Tunga-Bhadra, India, con HEC-HMS y SDSM. Hydrol. Process., 27: 1572-1589. https://doi.org/10.1002/hyp.9220

Ministerio del Ambiente-MINAM. (2024). *Informe Nacional Sobre el estado del ambiente en el Perú*. www.gob.pe/minam

Mohaddes, K., & Raissi, M. (2025). Rising temperatures, melting incomes: Country-specific macroeconomic effects of climate scenarios. *PLOS Climate*, *4*(9), e0000621. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PCLM.0000621

Montenegro, E., & Fernando, W. (2025). *Evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca alta del río Guayllabamba bajo el efecto de escenarios de Cambio Climático: simulación de caudales en la cuenca alta del río Guayllabamba bajo cinco escenarios de cambio climático y condiciones hidrométricas* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26368

Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impact of climate change on potential evapotranspiration and growing season in Mexico: Climate change and PET in Mexico. *Revista Terra Latinoamericana*, *39*. https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.774.https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.774

Morán, J. R., & Novillo, J. M. (2022). *Selección de los Modelos de Proyección para el Cambio Climático del CMIP6 con mejor desempeño para el territorio ecuatorial.* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Del Litoral].

Ochoa, C. G., Villarreal-Guerrero, F., Prieto-Amparán, J. A., Garduño, H. R., Huang, F., & Ortega-Ochoa, C. (2023). Precipitation, Vegetation, and Groundwater Relationships in a Rangeland Ecosystem in the Chihuahuan Desert, Northern Mexico. *Hydrology 2023, Vol. 10, Page 41*, *10*(2), 41. https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY10020041

Organización de las Naciones Unidas-ONU. (2024). *Estrategia del Sistema de las Naciones Unidas para el Agua y el Saneamiento | ONU-Agua*. https://www.unwater.org/publications/united-nations-system-wide-strategy-water-and-sanitation

Osorio, K. J., Ramos, L., Velásquez, T., Osorio, K. J., Ramos, L., & Velásquez, T. (2022). Projection of the impacts of climate change on the flow of the Lurín river basin-Peru, under CMIP5-RCP scenarios. *Idesia (Arica)*, *40*(1), 101-114. https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000100101

Pachac, Y. C. (2025). *Impactos del cambio climático bajo escenarios CMIP6 en el potencial hidroenergético de la cuenca del río Pativilca* [Pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/c8a30b34-fa67-4781-9e43-fda6d5be4b2d

Pérez, P., Pérez, A., & Gil, S. (2020). Repercusiones de las condiciones ambientales altitudinales en la variabilidad de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Ródano en escenarios de cambio climático. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, *40*(1), 159-182. https://doi.org/10.5209/AGUC.69337

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, *279*(1-4), 275-289. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7

Real Academia Española. (2023). *temperatura | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE*. https://dle.rae.es/temperatura

Rentería, D. M., Ramos, M. Á. C & Rodríguez, A. M. S. (2020). Modelación de los impactos de los escenarios de cambio climático en la cuenca del río Pamplonita en Norte de Santander. *Revista EIA*, *17*(33), 182-193. https://doi.org/10.24050/REIA.V17I33.1265

Rodas, F. (2022). *Evaluación del cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina - Tacna* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/22538

Rojas, B. D. (2024). *Efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río chotano.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7089

Saravia Matus, A. J., & Gil Sevilla, M. (2021). *Reflexiones sobre la gestión del agua en América Latina y el Caribe. Textos seleccionados 2002-2020 | CEPAL*. https://www.cepal.org/es/publicaciones/46792-reflexiones-la-gestion-agua-america-latina-caribe-textos-seleccionados-2002-2020

Selgado, B. A. (2011). *Disponibilidad y demanda futura del recurso hídrico. Análisis del escenario A2 en una cuenca agrícola de la VI Región*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104077

Segarra, V. G. (2022). *Evaluación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático en la microcuenca del río Colonso, Ecuador* [Tesis de pregrado, Universidad Regional Amazónica Ikiam]. https://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/bitstream/RD_IKIAM/627/1/TT-H-IKIAM-000011.pdf

Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú-SENAMHI. (2024). *Informe Técnico de Condiciones climáticas e hidrológicas actuales y perspectivas a octubre – diciembre 2024, en el departamento de Cajamarca | SIAR Cajamarca | Sistema de Información Ambiental Regional de Cajamarca*. https://siar.regioncajamarca.gob.pe/documentos/it-condiciones-climaticas-hidrologicas-2024-cajamarca

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Del Perú-SENAMHI. (2020). *Orientaciones para el análisis del clima y determinación de los peligros asociados al cambio climático*.

https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/nota_tecncica_001-2019.pdf

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI. (2019). Modelamiento hidrológico a paso mensual para el monitoreo de sequías hidrológicos en cuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca. Repositorio Institucional - SENAMHI https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-82.pdf

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI. (2016). Oferta Hídrica superficial del río Coata-Puno bajo escenarios de cambio climático. Repositorio Institucional - SENAMHI. http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/267

Shi, L., Feng, P., Wang, B., Li Liu, D., Cleverly, J., Fang, Q., & Yu, Q. (2020). Projecting potential evapotranspiration change and quantifying its uncertainty under future climate scenarios: A case study in southeastern Australia. *Journal of Hydrology*, *584*, 124756. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.124756

Sidle, R. C. (2021). Strategies for smarter catchment hydrology models: incorporating scaling and better process representation. *Geoscience Letters 2021 8:1*, *8*(1), 24-. https://doi.org/10.1186/S40562-021-00193-9

Sofía, O., Rodríguez, T., & Rivas, R. M. (2022). Aplicación de modelos hidrológicos. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, *12*(2), 59-80. https://doi.org/10.5377/ELHIGO.V12I2.15228

Tabari, H., Paz, S. M., Buekenhout, D., & Willems, P. (2021). Comparison of statistical downscaling methods for climate change impact analysis on precipitation-driven drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(6), 3493-3517. https://doi.org/10.5194/HESS-25-3493-2021

Tebar, E. (2017). *Evaluación de la seguridad de una presa de materiales sueltos en el río San Juan, en la provincia de San Juan (República Dominicana)* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena]. http://hdl.handle.net/10317/8438

Terán, W. S. (2021). Confiabilidad de la escorrentía generada con el Modelo Lutz Scholz para la microcuenca del río Llaucano. [Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca]. http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4242

Torres, M., & Gamero, D. P. (2021). Percepción del cambio climático y respuesta de los turistas sobre los recursos hídricos: el caso de la cuenca del río Muga. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (89). https://doi.org/10.21138/bage.3114

Velázquez, J. A., Dávila, R., & Algara, M. (2020). Variabilidad del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas de la región Huasteca. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, *21*(3), 1-12. https://doi.org/10.22201/FI.25940732E.2020.21.3.021

Yersaw, B. T., & Chane, M. B. (2024). Regional climate models and bias correction methods for rainfall-runoff modeling in Katar watershed, Ethiopia. *Environmental Systems Research 2024 13:1*, *13*(1), 10-. https://doi.org/10.1186/S40068-024-00340-Z

Zheng, H., Chiew, F. H. S., Post, D. A., Robertson, D. E., Charles, S. P., Grose, M. R., & Potter, N. J. (2024). Projections of future streamflow for Australia informed by CMIP6 and previous generations of global climate models. *Journal of Hydrology*, *636*, 131286. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.13128

CAPITULO VIII. ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia

Tabla 16

Matriz de consistencia de la investigación

Interrogantes	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
¿Cuál son los efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030–2060, a partir de la simulación hidrológica bajo escenarios climáticos proyectados?	Determinar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030–2060, a partir de la simulación hidrológica bajo escenarios climáticos proyectados		Disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano (**Variable dependiente)**	**Tipo de investigación** (Aplicada) **Nivel de investigación** (Descriptiva) **Diseño de la investigación** (No experimental de corte longitudinal)
Interrogantes específicas	**Objetivos específicos**			**Población** Es toda el área de la cuenca del río Llaucano, que abarca aproximadamente 1 558,09 km², donde se analizaron datos climáticos e hidrológicos correspondientes a los periodos 1981–2016 y 2030–2060
¿Cuál es la eficiencia del modelo hidrológico GR4J en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano en el periodo observado 1981–2016	Evaluar la eficiencia del modelo hidrológico GR4J en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Llaucano en el periodo observado 1981–2016	El cambio climático influye significativamente en la disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca del río Llaucano durante el periodo 2030–2060, respecto a los datos históricos 1981–2016		
¿Cuáles son las variaciones de la precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada respecto al periodo observado 1981–2016 en la cuenca del río Llaucano bajo los escenarios SSP2-4?5 y SSP5-8.5.?	Determinar las variaciones de la precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada respecto al periodo observado 1981–2016 en la cuenca del río Llaucano bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5		Cambio climático (**Variable Independiente)**	**Muestra** La muestra es la misma que la población, conformada por el área de la cuenca del río Llaucano, cuya extensión es 1 558,09 km²
¿Cuál es la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060, bajo los escenarios climáticos SSP2-4?5 y SSP5-8.5?	Evaluar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Llaucano para el periodo 2030-2060, bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5.			

Anexo 02. Códigos de procesamiento de datos

Figura 19

Código de análisis estadístico inferencial en RStudio

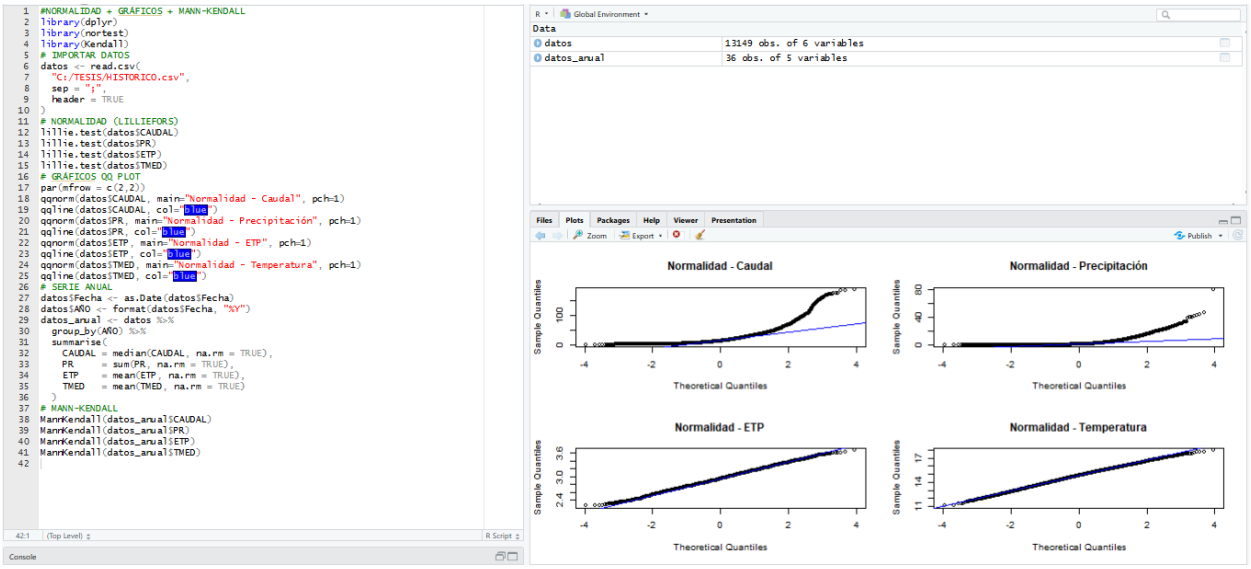


Figura 20

Código de la extracción de datos de PISCO

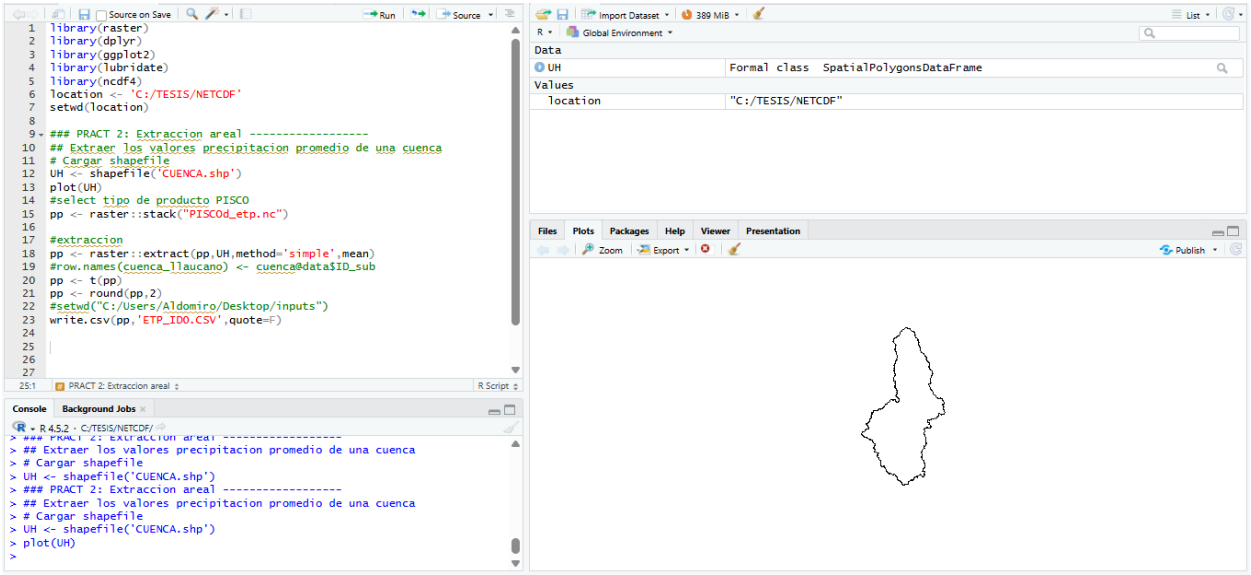
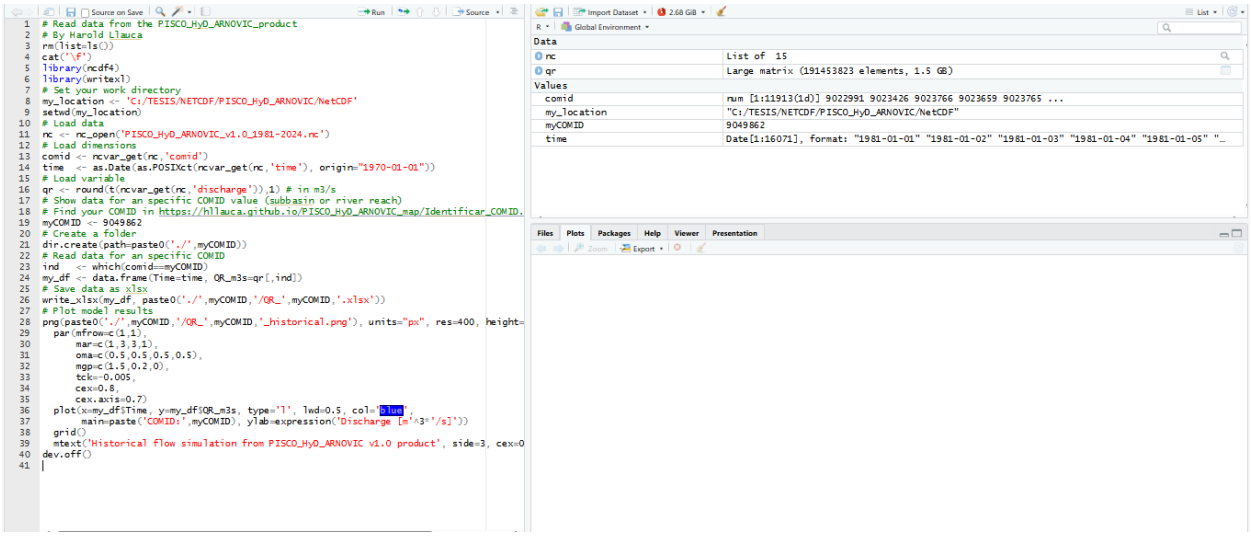


Figura 21

Código de extracción de datos de PISCO - ARNOVIC

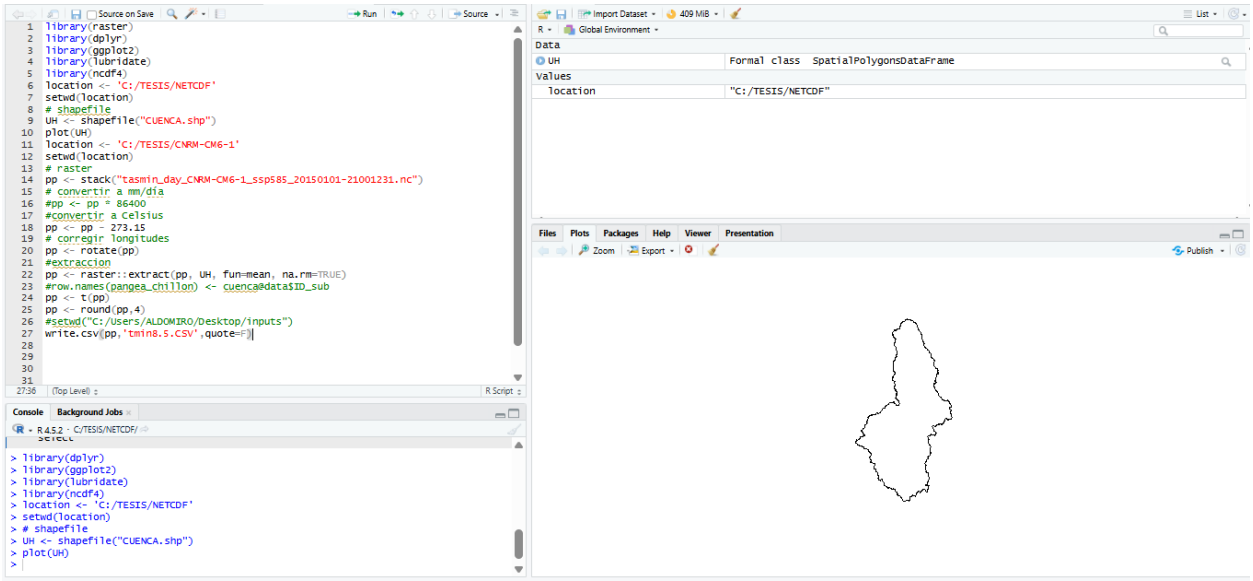


```
# Read data from the PISCO_HyD_ARNOVIC_product
# By Harold Llauca
rm(list=ls())
cat('\f')
library(ncdf4)
library(writexl)
# Set your work directory
my_location <- 'C:/TESIS/NETCDF/PISCO_HyD_ARNOVIC/NetCDF'
setwd(my_location)
# Load data
nc <- nc_open('PISCO_HyD_ARNOVIC_v1.0_1981-2024.nc')
# Load dimensions
comid <- ncvar_get(nc,'comid')
time  <- as.Date(as.POSIXct(ncvar_get(nc,'time'), origin="1970-01-01"))
# Load variable
qr <- round(t(ncvar_get(nc,'discharge')),1) # in m3/s
# Show data for an specific COMID value (subbasin or river reach)
# Find your COMID in https://hllauca.github.io/PISCO_HyD_ARNOVIC_map/Identificar_COMID.
myCOMID <- 9049862
# Create a folder
dir.create(path=paste0('./',myCOMID))
# Read data for an specific COMID
ind  <- which(comid==myCOMID)
my_df <- data.frame(Time=time, QR_m3s=qr[,ind])
# Save data as xlsx
write_xlsx(my_df, paste0('./',myCOMID,'/QR_',myCOMID,'.xlsx'))
# Plot model results
png(paste0('./',myCOMID,'/QR_',myCOMID,'_historical.png'), units="px", res=400, height=
  par(mfrow=c(1,1),
      mar=c(1,3,3,1),
      oma=c(0.5,0.5,0.5,0.5),
      mgp=c(1.5,0.2,0),
      tck=-0.005,
      cex=0.8,
      cex.axis=0.7)
  plot(x=my_df$Time, y=my_df$QR_m3s, type='l', lwd=0.5, col='blue',
       main=paste('COMID:',myCOMID), ylab=expression('Discharge [m'^3*'/s]'))
  grid()
  mtext('Historical flow simulation from PISCO_HyD_ARNOVIC v1.0 product', side=3, cex=0
dev.off()
```

```
Data
nc      List of 15
qr      Large matrix (191453823 elements, 1.5 GB)
Values
comid       num [1:11913(1d)] 9022991 9023426 9023766 9023659 9023765 ...
my_location "C:/TESIS/NETCDF/PISCO_HyD_ARNOVIC/NetCDF"
myCOMID     9049862
time        Date[1:16071], format: "1981-01-01" "1981-01-02" "1981-01-03" "1981-01-04" "1981-01-05" "...
```

Figura 22

Código de extracción de datos de los Modelos Climáticos Globales (GCM)



```
library(raster)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(lubridate)
library(ncdf4)
location <- 'C:/TESIS/NETCDF'
setwd(location)
# shapefile
UH <- shapefile("CUENCA.shp")
plot(UH)
location <- 'C:/TESIS/CNRM-CM6-1'
setwd(location)
# raster
pp <- stack("tasmin_day_CNRM-CM6-1_ssp585_20150101-21001231.nc")
# convertir a mm/dia
#pp <- pp * 86400
#convertir a Celsius
pp <- pp - 273.15
# corregir longitudes
pp <- rotate(pp)
#extraccion
pp <- raster::extract(pp, UH, fun=mean, na.rm=TRUE)
#row.names(pangea_chillon) <- cuenca@data$ID_sub
pp <- t(pp)
pp <- round(pp,4)
#setwd("C:/Users/ALDOMIRO/Desktop/inputs")
write.csv(pp,'tmin8.5.CSV',quote=F)
```

```
> library(dplyr)
> library(ggplot2)
> library(lubridate)
> library(ncdf4)
> location <- 'C:/TESIS/NETCDF'
> setwd(location)
> # shapefile
> UH <- shapefile("CUENCA.shp")
> plot(UH)
>
```

```
Data
UH          Formal class  SpatialPolygonsDataFrame
Values
location    "C:/TESIS/NETCDF"
```

1

Anexo 03. Reconocimiento de la cuenca media del rio Llaucano

Figura 23

Punto de salida de la cuenca del río Llaucano



Figura 24

Agricultura en cuenca media del río Llaucano



Figura 25

Actividades recreativas en la cuenca del río Llaucano



Figura 26

Captaciones en cuenca media del río Llaucano



Figura 27

Extracción de carbón a orillas del río Llaucano

