



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL BAJO  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL  
RÍO HUANCANÉ**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**EDWIN ADDERLY ANAHUA BALCON**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO – PERÚ**

**2023**



## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO HUANCANÉ**

AUTOR

**EDWIN ADDERLY ANAHUA BALCON**

RECuento DE PALABRAS

**43460 Words**

RECuento DE CARACTERES

**192630 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**158 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**7.1MB**

FECHA DE ENTREGA

**Dec 11, 2023 12:37 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Dec 11, 2023 12:39 PM GMT-5**

### ● 5% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 5% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)

Ciencia Tecnología y Medio Ambiente  
  
Dr. Edilberto Huaquisto Ramos  
CIP 55474

  
  
Dr. Edilberto Huaquisto Ramos  
DIRECTOR UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Resumen



## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, por su apoyo incondicional y por ser mi fuente de inspiración constante. A mis amigos, por estar a mi lado durante este emocionante viaje académico y por alentarme en cada paso del camino. A mis profesores y mentores, por su guía experta y por brindarme las herramientas necesarias para desarrollarme en este campo de estudio. Por último, dedico este trabajo a las generaciones futuras, con la esperanza de que encuentren en él un mensaje de conciencia y acción frente al cambio climático.

*Edwin A. Anahua Balcon*



## AGRADECIMIENTOS

En este momento de culminación, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo.

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano y al cuerpo docente de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por impartir una educación de calidad y proporcionarme las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación. A lo largo de mi trayectoria académica, he recibido un apoyo incondicional por parte de mis profesores y compañeros, quienes han contribuido significativamente en mi formación profesional.

Quiero agradecer a mi asesor D.Sc. Edilberto Huaquisto Ramos, por su guía experta, paciencia y apoyo inquebrantable a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos y orientación fueron fundamentales para mi crecimiento académico y la para la culminación de este trabajo investigativo. De la misma forma mi más profundo agradecimiento a los distinguidos miembros del jurado de mi tesis por su tiempo, dedicación y valiosos aportes durante el proceso de evaluación. Agradezco sinceramente sus comentarios constructivos, sugerencias y críticas, las cuales me han permitido mejorar mi investigación y ampliar mi perspectiva académica.

Un agradecimiento especial a Save the Children, en alianza con INDECI, CENEPRED y gracias al financiamiento de BHA/USAID, quienes por medio de su generoso apoyo y compromiso fue posible llevar a cabo este estudio y su contribución desempeñó un papel fundamental en el logro de este estudio.

*Edwin A. Anahua Balcon*



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3. OBJETIVOS.....</b>	<b>22</b>
1.3.1. Objetivo general .....	22
1.3.2. Objetivos específicos .....	22
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
<b>2.1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>23</b>
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	23
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	25
2.1.3. Antecedentes locales .....	28
<b>2.2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>31</b>



2.2.1. Hidrología .....	31
2.2.2. Ciclo hidrológico.....	31
2.2.2.1. Condensación .....	32
2.2.2.2. Humedad relativa .....	32
2.2.2.3. Infiltración.....	33
2.2.2.4. Precipitación.....	33
2.2.2.5. Temperatura .....	33
2.2.2.6. Evaporación .....	34
2.2.2.7. Transpiración .....	34
2.2.2.8. Evapotranspiración.....	34
2.2.2.9. Caudal .....	35
2.2.3. Escorrentía.....	36
2.2.3.1. Escorrentía superficial.....	36
2.2.3.2. Escorrentía sub – superficial .....	36
2.2.3.3. Escorrentía subterránea .....	37
2.2.4. Oferta hídrica .....	37
2.2.5. Los modelos hidrológicos .....	38
2.2.5.1. Modelos distribuidos.....	39
2.2.5.2. Modelos semidistribuidos .....	39
2.2.5.3. Modelos agregados .....	40
2.2.6. Los modelos GR.....	40
2.2.7. Modelo GR2M .....	40
2.2.8. Calibración y validación del modelo GR2M .....	45
2.2.8.1. Calibración .....	45
2.2.8.2. Validación .....	45
2.2.9. Indicadores estadísticos de eficiencia del modelo GR2M .....	46



2.2.9.1. Eficiencia de Nash – Sutcliffe .....	46
2.2.10. Cambio climático .....	47
2.2.11. Modelos climáticos globales .....	48
2.2.12. Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP) .....	51
2.2.13. CMIP6 .....	52
2.2.14. Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP).....	52
2.2.15. Downscaling estadístico.....	55
2.2.16. Conjunto de datos meteorológicos de alta resolución PISCO .....	56
2.2.16.1.Producto PISCO – Precipitación V2.1 .....	59
2.2.16.2.Producto PISCO – Temperatura V1.1.....	60

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

<b>3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>61</b>
3.1.1. Ubicación geográfica .....	61
3.1.2. Ubicación hidrográfica.....	61
3.1.3. Ubicación política .....	62
<b>3.2. MATERIALES.....</b>	<b>63</b>
3.2.1. Hardware .....	63
3.2.2. Software .....	63
3.2.3. Cartografía, Imagen e Información .....	63
<b>3.3. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>64</b>
<b>3.4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>64</b>
3.4.1. Proceso de calibración y validación del modelo hidrológico GR2M.....	66
3.4.1.1. Delimitación de la cuenca del río Huancané.....	66
3.4.1.2. Procesamiento de la información hidrometeorológica.....	68



3.4.1.3. Análisis de consistencia de la información hidrometeorológica .....	70
3.4.1.4. Calibración y validación del modelo hidrológico GR2M.....	73
3.4.1.5. Análisis de sensibilidad de los parámetros $X_1$ y $X_2$ .....	75
3.4.2. Proceso de simulación y análisis de la variación de la oferta hídrica .....	76
3.4.2.1. Descarga de los modelos climáticos globales.....	76
3.4.2.2. Reducción de escala o downscaling.....	77
3.4.2.3. Selección de modelos climáticos globales.....	79
3.4.2.4. Cálculo de la evapotranspiración futura.....	81
3.4.2.5. Generación de caudales futuros para el horizonte 2025 – 2050 bajo escenarios de cambio climático.....	83
3.4.2.6. Análisis de tendencia a los caudales futuros de los GCMs.....	83
3.4.2.7. Análisis de variación de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático en el horizonte 2025 – 2050... ..	85

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO GR2M.....</b>	<b>88</b>
4.1.1. Características geomorfológicas de la cuenca del río Huancané .....	88
4.1.2. Análisis de consistencia en los datos de precipitación.....	88
4.1.3. Análisis de consistencia en los datos de caudal .....	90
4.1.3.1. Análisis visual.....	90
4.1.3.2. Análisis estadístico.....	92
4.1.4. Análisis visual de los datos hidrológicos .....	93
4.1.4.1. Precipitación.....	93
4.1.4.2. Evapotranspiración.....	94



4.1.5. Calibración del modelo hidrológico GR2M.....	94
4.1.6. Validación del modelo hidrológico GR2M.....	97
4.1.7. Caudal simulado para el periodo 1981 – 2016.....	100
4.1.8. Análisis de sensibilidad.....	102
<b>4.2. PROCESO DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA.....</b>	<b>103</b>
4.2.1. Descarga de los modelos climáticos globales .....	103
4.2.2. Reducción de escala o downscaling .....	103
4.2.3. Selección de los modelos climáticos globales .....	108
4.2.4. Caudal simulado para el periodo 2025 – 2050.....	110
4.2.4.1. Análisis de tendencia para los GCMs seleccionados .....	111
4.2.4.2. Caudal promedio mensual simulados para los 8 GCMs .....	113
4.2.5. Variación de la oferta hídrica bajo escenario del cambio climático periodo 2025 – 2050.....	114
4.2.5.1. Variación anual de los GCMs .....	114
4.2.5.2. Variación promedio mensual de los GCMs .....	117
<b>4.3. DISCUSIONES.....</b>	<b>120</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>125</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>127</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>136</b>

**Área:** Ingeniería y tecnología

**Línea:** Recursos hídricos

**Fecha de sustentación:** 15 de diciembre de 2023



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1	Criterios de eficiencia de Nash – Sutcliffe ..... 47
Tabla 2	Estaciones meteorológicas influyentes en la cuenca del río Huancané ..... 69
Tabla 3	Ubicación de la estación hidrométrica puente Huancané ..... 70
Tabla 4	Criterios de decisión para la prueba t de Student..... 72
Tabla 5	Descripción de los modelos climáticos globales seleccionados ..... 80
Tabla 6	Criterio de decisión de la significancia del test de Mann-Kendall ..... 85
Tabla 7	Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Huancané ..... 88
Tabla 8	Parámetros de análisis de homogeneidad ..... 90
Tabla 9	Prueba t de Student para los caudales ..... 92
Tabla 10	Prueba de tendencia para los caudales ..... 92
Tabla 11	Valores de los parámetros del modelo GR2M para la calibración ..... 95
Tabla 12	Resultados estadísticos en la calibración del modelo GR2M ..... 96
Tabla 13	Valores de los parámetros del modelo GR2M para la validación ..... 98
Tabla 14	Resultados estadísticos en la validación del modelo GR2M ..... 99
Tabla 15	Variación de los parámetros del modelo GR2M..... 102
Tabla 16	Valores estadísticos de la variable precipitación para los 8 GCMs ..... 109
Tabla 17	Valores estadísticos de la variable temperatura para los 8 GCMs..... 110
Tabla 18	Prueba de Mann-Kendall para los 8 GCMs ..... 112
Tabla 19	Caudal promedio mensual de los GCMs, periodo 2025 – 2050 ..... 113
Tabla 20	Variación promedio anual de caudales futuros en los GCMs..... 115
Tabla 21	Variación promedio de modelos para la cuenca del río Huancané..... 117
Tabla 22	Variación mensual de la oferta hídrica en los 8 GCMs ..... 117



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 El ciclo hidrológico del agua .....	32
Figura 2 Arquitectura del modelo GR2M .....	41
Figura 3 Efectos del cambio climático a nivel mundial .....	48
Figura 4 Evolución de los modelos climáticos globales .....	50
Figura 5 El panorama de los SSP en las cinco categorías .....	53
Figura 6 Trayectorias socioeconómicas y los GEI al 2100 .....	54
Figura 7 Rangos de temperatura para los SSP .....	55
Figura 8 Esquema general del desarrollo de PISCOp V2.1. ....	58
Figura 9 Mapa de ubicación del área de investigación .....	62
Figura 10 Esquema metodológico de la investigación .....	66
Figura 11 Delimitación de la cuenca del río Huancané.....	67
Figura 12 Descarga de GCMs del servidor Climate Explorer.....	77
Figura 13 Esquema de la reducción de escala .....	78
Figura 14 Reducción de escala de los GCMs en el software RStudio .....	79
Figura 15 Calculo de evapotranspiración en formato Excel .....	82
Figura 16 Análisis de tendencia a los caudales futuros.....	84
Figura 17 Índices anuales del MVR y las estaciones de la cuenca Huancané .....	89
Figura 18 Suma de índices del MVR y las estaciones de la cuenca Huancané.....	89
Figura 19 Caudal histórico de la cuenca del río Huancané .....	91
Figura 20 Caudal histórico mensual de la cuenca del río Huancané.....	91
Figura 21 Precipitación histórica de la cuenca del río Huancané.....	93
Figura 22 Evapotranspiración histórica de la cuenca del río Huancané.....	94
Figura 23 Hidrograma generado por el modelo GR2M en la calibración.....	96



Figura 24	Dispersión de datos en la calibración del modelo GR2M.....	97
Figura 25	Hidrograma generado por el modelo GR2M en la validación.....	98
Figura 26	Dispersión de datos en la validación del modelo GR2M.....	99
Figura 27	Caudal simulado por el modelo GR2M vs el caudal observado.....	100
Figura 28	Caudal simulado vs caudal observado a periodos mensuales.....	101
Figura 29	Dispersión de datos de caudales observados y simulados.....	101
Figura 30	Análisis de sensibilidad del modelo GR2M.....	103
Figura 31	Reducción de escala del modelo BCC-CSM2-MR.....	104
Figura 32	Reducción de escala del modelo ACCESS-ESM1-5.....	105
Figura 33	Reducción de escala del modelo CanESM5-CanOE.....	105
Figura 34	Reducción de escala del modelo CMCC-CM2-SR5.....	106
Figura 35	Reducción de escala del modelo MIROC-ES2L.....	106
Figura 36	Reducción de escala del modelo MRI-ESM2-0.....	107
Figura 37	Reducción de escala del modelo GFDL-ESM4.....	107
Figura 38	Reducción de escala del modelo NorESM2-MM.....	108
Figura 39	Caudales simulados por el modelo hidrológico GR2M, para los 8 GCMs, periodo 2025 – 2050 en la cuenca del río Huancané.....	111
Figura 40	Caudales promedio mensual simulados para los 8 GCMs en la cuenca del río Huancané.....	114
Figura 41	Variación promedio anual de caudales futuros para los 8 GCMs.....	116
Figura 42	Variación de caudal promedio mensual histórico y futuro en los 8 GCMs seleccionados.....	118
Figura 43	Variación promedio mensual del ensamble de modelos.....	119



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO 1 Matriz de consistencia .....	137
ANEXO 2 Datos de entrada al modelo hidrológico GR2M.....	138
ANEXO 3 Calibración y validación del modelo GR2M y caudales simulados .....	140
ANEXO 4 Proceso de Downscaling o reducción de escala de los GCMs .....	142
ANEXO 5 Evapotranspiración calculada para los 8 GCMs seleccionados, periodo (2025 – 2050) .....	145
ANEXO 6 Caudales simulados para los 8 GCMs seleccionados, periodo (2025 – 2050).....	149
ANEXO 7 Análisis de tendencia para los caudales de los 8 GCMs .....	153
ANEXO 8 Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	157
ANEXO 9 Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional....	158



## ACRÓNIMOS

<b>ANA:</b>	Autoridad Nacional del Agua
<b>CMIP6:</b>	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6
<b>DEM:</b>	Modelo de Elevación Digital
<b>GEI:</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>GCM:</b>	Modelo Climático Global
<b>GR2M:</b>	Modelo de Ingeniería Rural de dos parámetros a paso Mensual
<b>IDW:</b>	Ponderación de Distancia Inversa
<b>INDECI:</b>	Instituto Nacional de Defensa Civil
<b>IPCC:</b>	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<b>KED:</b>	Kriging con Deriva Externa
<b>MODIS:</b>	Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada
<b>PISCO:</b>	Datos Peruanos Interpolados de las Observaciones Climatológicas e Hidrológicas del SENAMHI
<b>RIDW:</b>	Regresión Distancia Inversa Ponderación
<b>SENAMHI:</b>	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
<b>SSP:</b>	Escenarios Socioeconómicos Compartidos



## RESUMEN

La precipitación es un componente importante del ciclo del agua y una entrada clave para las aplicaciones de modelado hidrológico; no obstante, el incremento de la temperatura global viene alterando el ciclo hidrológico y los efectos se reflejan en la variación de los componentes del balance hidrológico. La cuenca del río Huancané, es una zona de producción agrícola y ganadera por tal razón resulta necesario la protección y manejo de los recursos hídricos, en ese sentido el objetivo del presente trabajo de investigación es determinar la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Huancané bajo escenarios de cambio climático y para ello, se recopiló datos necesarios, como el modelo de elevación digital, los datos de la precipitación mensual y la evapotranspiración; información obtenida del conjunto de datos meteorológicos de alta resolución PISCO, con respecto a la hidrometría se utilizó los datos observados de la estación puente Huancané. Posteriormente se evaluó ocho modelos climáticos globales (GCMs) del CMIP6, estos modelos fueron corregidos para evitar el error sistemático por medio del downscaling y para ello se utilizó el software Rstudio. Finalmente se aplicó el modelo hidrológico GR2M, para obtener la proyección de los caudales en el periodo 2025 – 2050. Los resultados obtenidos para los GCMs, muestran que las proyecciones para el periodo en evaluación sufrirán una disminución general en los niveles de caudal, es decir que en el futuro se esperan caudales desde  $9.81 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $14.23 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que representa una variación de  $Q = -16.7 \%$  hasta  $Q = -42.6 \%$ . Consecuentemente, se afirma que según los modelos evaluados en el horizonte 2025 – 2050, presentarán una variación general promedio de  $Q = -30.3 \%$  en la cuenca del río Huancané.

**Palabras clave:** Cambio climático, Cuenca Huancané, GR2M, Oferta hídrica, PISCO



## ABSTRACT

Precipitation is an important component of the water cycle and a key input for hydrological modeling applications; however, the increase in global temperatures is altering the hydrological cycle, and the effects are reflected in the variation of hydrological balance components. The Huancané River basin is an area of agricultural and livestock production, making it necessary to protect and manage water resources. In this regard, the objective of this research is to determine the surface water supply of the Huancané River basin under climate change scenarios. To do this, necessary data was collected, such as digital elevation model, monthly precipitation data, and evapotranspiration, obtained from the high-resolution PISCO meteorological dataset. Hydrological data from the Huancané Bridge station were also utilized. Subsequently, eight global climate models (GCMs) from CMIP6 were evaluated, and these models were corrected to avoid systematic errors through downscaling using Rstudio software. Finally, the GR2M hydrological model was applied to obtain flow projections for the period 2025-2050. The results for the GCMs show that the projections for the evaluation period will experience a general decrease in flow levels. In other words, future flows are expected to range from  $9.81 \text{ m}^3/\text{s}$  to  $14.23 \text{ m}^3/\text{s}$ , representing a variation of  $Q = -16.7\%$  to  $Q = -42.6\%$ . Consequently, it is asserted that according to the models evaluated for the 2025-2050 horizon, there will be a general average variation of  $Q = -30.3\%$  in the Huancané River basin.

**Keywords:** Climate change, Huancané basin, GR2M, Water Supply, PISCO



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Debido a su trascendental necesidad para la vida, la escasez de agua en las cuencas de los ríos es una preocupación para el mundo entero y en el contexto de la investigación de los recursos hídricos a escala mundial se han desarrollado varios modelos de simulación para que estos puedan ayudar a una mejor comprensión sobre el comportamiento hidrológico (Llauca *et ál.*, 2021). Asimismo, el cambio climático representa uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad ya que pone en peligro la disponibilidad del recurso hídrico ya sea de manera directa o indirectamente afectando a múltiples sectores como la ganadería, agricultura, el abastecimiento de agua potable, biodiversidad entre otros (Pulido *et ál.*, 2021). De la misma forma el IPCC ha proporcionado evidencia concluyente de que el cambio climático está ocurriendo y con ello se han desarrollado a través del tiempo diferentes escenarios climáticos y en la actualidad se cuenta con el proyecto de intercomparación de modelos acoplados de sexta generación (CMIP6), en esta fase se han desarrollado nuevos modelos climáticos que tienen una mejor representación de los procesos atmosféricos, oceánicos, de la criósfera y de la superficie terrestre (Bajracharya *et ál.*, 2018).

En este contexto es fundamental indicar que la sensibilidad de los recursos hídricos es muy alta a las variaciones de precipitación y al aumento de temperatura y el Perú no es ajeno a estas variaciones ya que en nuestro país se han registrado eventos extremos de precipitación y temperatura durante los últimos años, especialmente a lo largo de la costa peruana en donde se presentó la mayor incidencia de estos eventos ocasionando pérdidas económicas y sociales (Llauca *et ál.*, 2021). Es por ello que se hace fundamental la realización de evaluaciones de los posibles cambios de las aportaciones



hídricas en las cuencas de nuestro país, puesto que las lluvias no comienzan en las fechas previstas originalmente; en algunas regiones se presentan exceso de precipitaciones, mientras que en otras no han caído nada, lo que ha provocado la presencia de sequías prolongadas. Por tal razón se hace imprescindibles estudios en las cuencas del altiplano y en especial en la cuenca del río Huancané ya que, esta cuenca y los ecosistemas asociados a ella, podrían verse afectados por el cambio climático. En ese sentido el objetivo de este trabajo de investigación es “Estimar la oferta hídrica superficial en la cuenca del río Huancané, en escenarios del cambio climático en el horizonte 2025 – 2050” y para lograr este objetivo se utilizó el modelo hidrológico GR2M, el cual es ampliamente reconocido en estudios hidrológicos debido a su capacidad para simular los procesos hidrológicos y generar estimaciones confiables de los caudales (Cabrera, 2013).

No obstante, es importante incidir en el uso de modelos hidrológicos simplificados o de pocas variables puesto que en el Perú se tiene insuficiente información hidrometeorológica especialmente en las cuencas alto andinas ya que aún se encuentran en desarrollo (Llauca y Montesinos, 2020). Los datos históricos de precipitación, temperatura y evapotranspiración del conjunto de datos meteorológicos de alta resolución PISCO sirvieron para simular el comportamiento hidrológico histórico de la cuenca y para abordar la evaluación de la oferta hídrica futura fue necesario basarse en los avances científicos más recientes del proyecto CMIP6, el cual ha proporcionado una valiosa colección de modelos climáticos globales (GCMs) que incluyen variables clave como precipitación y temperatura los cuales fueron de vital importancia para lograr comprender los cambios hidrológicos y sus posibles impactos en la oferta hídrica de la cuenca. Asimismo, el escenario evaluado fue el SSP5-8.5 ya que este escenario es considerado el futuro el cual se tiene que evitar porque este escenario asume un desarrollo basado en combustibles fósiles y las emisiones actuales de CO<sub>2</sub> se duplican aproximadamente en el



2050 es decir la trayectoria futura de este escenario es en donde no se implementan políticas significativas para la mitigación del cambio climático porque las preocupaciones ambientales se ven eclipsadas por las necesidades económicas y sociales inmediatas (AEMET y OECC, 2021).

En tal sentido; a pesar de los esfuerzos que se ha venido haciendo para abordar los desafíos ambientales en el país por medio de políticas y programas, para promover la conservación de los recursos naturales, estos no han tenido el efecto esperado. Es por eso; que mediante el análisis de los resultados obtenidos en esta investigación se proporciona información valiosa y actualizada sobre los posibles cambios en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Huancané el cual permitirá una mejor comprensión de los desafíos asociados al cambio climático en la región.

### **1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

El agua es un recurso natural muy importante y necesario para la satisfacción de las diversas necesidades cotidianas que tiene el ser humano y estas parten desde su uso para la producción, recreación, riego y consumo (Puertas *et ál.*, 2011). Es por eso que la cuenca del río Huancané enfrenta diversos desafíos con respecto a este recurso natural, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la cuenca del río Huancané cuenta con un área aproximada de 3631.19 km<sup>2</sup> y la longitud del río principal desde sus nacientes hasta su desembocadura llega a medir aproximadamente 125 km y su agua es útil para los diferentes usos tales como el abastecimiento de agua, agricultura, ganadería, etc., lo cual contribuye al desarrollo económico y social de las poblaciones aledañas. Sin embargo, el cambio climático representa una amenaza importante que puede llegar a alterar los patrones con respecto a la precipitación y temperatura, ocasionando eventos extremos como los ocurridos en los años de 1982 – 1983, fecha en la que la población de esta



cuenca sufrió por la falta de precipitaciones y caso contrario paso en las épocas de avenidas en donde las precipitaciones han sido intensas, provocando así la inundación de áreas agrícolas y de pastoreo en el 2020, año en el que el INDECI emitió el aviso hidrológico N° 114/14-02-2020, ubicando a esta cuenca en el umbral hidrológico naranja ya que el caudal se había incrementado a  $121.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , de la misma forma el SENAMHI anunció que, en lo que va el año hidrológico 2022 – 2023, la cuenca Huancané al igual que otras del altiplano presentan caudales que se encuentran muy por debajo del promedio histórico en los últimos 18 años y que estas deficiencias representan un 55% en promedio; esta disminución de caudales genera un impacto significativo a la población, su bienestar social y económico así como en las diversas actividades como la agricultura ya que debido a estas disminuciones los agricultores experimentan una reducción en la producción de cultivos lo que impacta negativamente en sus ingresos y la disponibilidad de alimentos en la región. Asimismo, la ganadería se ve afectada por la disminución en la cantidad y calidad de forraje lo que afecta la salud y productividad del ganado impactando directamente al comercio local, lo que tendrá repercusiones en la economía y la sociedad en su conjunto. En base a la problemática mencionada es que se plantea las siguientes interrogantes: ¿Es posible estimar la oferta hídrica superficial mensual de la cuenca del río Huancané bajo escenarios del cambio climático en el horizonte 2025 – 2050?, ¿Será posible calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M para la representación de los caudales de la cuenca Huancané?, ¿Es posible simular y analizar la variación de la oferta hídrica mensual bajo escenarios del cambio climático?, y en base a estas interrogantes se pudo obtener una sólida información del comportamiento de los caudales en el futuro; asimismo este horizonte evaluado se basa en el informe realizado por el panel de expertos del IPCC, en donde indica que en el escenario SSP5-8.5 es el futuro que hay que evitar y que los niveles actuales de emisiones de  $\text{CO}_2$  se duplican aproximadamente en el 2050.



Es por ello que se requieren estudios hidrológicos para poder determinar la oferta hídrica y saber si el abastecimiento de la fuente será suficiente en el tiempo o si es necesario implementar estructuras para corregir las deficiencias o en su defecto disponer los excedentes de agua. En ese sentido, es imperativo que los estudios hidrológicos realizados para la cuenca del río Huancané se realicen a través de métodos de simulación incluidos la incidencia del cambio climático para una mejor comprensión y análisis de la cuenca a fin de mejorar la toma de decisiones y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

La justificación de la presente investigación radica en la urgente necesidad de abordar y comprender los impactos del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca del Río Huancané, en donde la interacción entre las deficiencias hídricas y los efectos del cambio climático plantea una serie de desafíos que no pueden pasarse por alto. Las variaciones en los patrones de lluvia y temperatura están alterando drásticamente los flujos hídricos en la región, esta situación no solo pone en riesgo la seguridad alimentaria, sino que también amenaza la sustentabilidad de las actividades económicas que dependen del agua. Es por eso que este trabajo investigativo es de gran importancia porque la cuenca del río Huancané como en la mayoría de cuencas del altiplano no cuenta con información hidrológica bajo escenarios climáticos lo que implica que la información bajo este contexto es escasa para una adecuada prevención de inundaciones y/o sequías, por eso es necesario generar información actualizada que involucra la combinación de datos hidrológicos con los nuevos modelos climáticos globales del CMIP6 para realizar un análisis profundo y fundamentado en la problemática. Desde una perspectiva teórica, esta investigación contribuye al avance del conocimiento en las áreas interconectadas de la hidrología, la climatología y la gestión de recursos hídricos. Asimismo, desde un enfoque metodológico, esta investigación demostrará la utilidad y aplicabilidad de la calibración



y validación de modelos hidrológicos, como el modelo GR2M ya que, al utilizar una metodología rigurosa para ajustar y verificar el modelo, se establecerá una base sólida para las simulaciones futuras. Finalmente, desde una perspectiva práctica, los resultados de esta investigación sirven para proporcionar información relevante sobre los posibles cambios en la oferta hídrica superficial de la cuenca de río Huancané cuyos resultados a mediano plazo serán un complemento a los tomadores de decisiones en lo que respecta a la planificación de los recursos hídricos a futuro, beneficiando a los pobladores de los diferentes distritos de la cuenca y será también una guía para los futuros profesionales dedicados al ámbito. De la misma forma es importante mencionar que la presente investigación se centra en la evaluación de las precipitaciones y los caudales en la salida de la cuenca del río Huancané como elementos primarios para comprender la dinámica de la oferta hídrica superficial en respuesta al cambio climático. Esta selección metodológica obedece a una serie de razones fundamentales que resaltan la pertinencia y eficacia de este enfoque específico en el contexto de la investigación.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Estimar la oferta hídrica superficial mensual en la cuenca del río Huancané, en escenarios del cambio climático en el horizonte 2025 – 2050.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M para la representación de los caudales en la cuenca del río Huancané.
- Simular y analizar la variación de la oferta hídrica mensual bajo escenario del cambio climático en el horizonte 2025 – 2050.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

Estudios previos han demostrado que la cuenca del río Huancané es particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático debido a su ubicación y la dependencia de los caudales provenientes de la precipitación en ese contexto diversos estudios han abordado la evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos en diferentes cuencas a nivel mundial para ello se hicieron uso de posibles escenarios y modelos hidrológicos para proyectar los caudales futuros y en el caso específico de esta investigación se utilizó el modelo hidrológico GR2M el cual es un modelo agregado que simula caudales en intervalos mensuales y ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial y nacional; por lo tanto, como antecedentes más resaltantes relacionados a este tema y a la estimación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático con el modelo GR2M se tiene lo siguiente:

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Ilbay-Yupa *et ál.* (2021) en su trabajo de investigación: “Impactos del cambio climático en los regímenes de precipitación y caudales en las regiones ecuatoriales: Cuenca del río Guayas” utilizó el modelo GR2M para proyectar cambios en el caudal del río Daule, esta proyección se basó en cuatro modelos rigurosamente seleccionados para representar el clima del área de estudio. Los resultados de esta investigación muestran que la temperatura se incrementará ( $\sim 2^{\circ}\text{C}$ ) y las precipitaciones en ( $\sim 6\%$ ), estos resultados apuntan a problemas futuros como el déficit del agua en la estación seca, ya que una disminución del



8% en las precipitaciones representaría una reducción de hasta el 60% en el caudal, pero también el aumento del 7% de las precipitaciones representaría un incremento del caudal en 10%, durante la estación húmeda.

En el artículo “Evolución hidrológica basada en cuencas hidrográficas bajo el efecto del cambio climático: un ejemplo del noroeste de Argelia”, se tiene como propósito estudiar la sensibilidad de los parámetros hidrológicos al cambio climático futuro, con el modelo hidrológico GR2M y los datos del escenario climático del modelo CNRM-CM5. Los resultados mostraron que los caudales de invierno tienen una clara tendencia a la baja principalmente por la disminución de las precipitaciones y el aumento del PET para los escenarios RCP8.5 y RCP4.5; asimismo, los autores concluyen que la temperatura presentará un aumento de aproximadamente 2°C y que se presentará una disminución de caudal del 38% en promedio en todas las cuencas estudiadas para el 2039, para el año 2069 estos presentarán una disminución de 31%, mientras que para el periodo final se espera una disminución del 40% es decir hacia el año 2099 (Hadour *et ál.*, 2020).

En el estudio realizado por Allani *et ál.* (2020) en el “sistema de represas de Nebhana evalúa los impactos del cambio climático en el suministro y demanda de agua en donde los escenarios de cambio climático se obtuvieron de cinco modelos de circulación general (GCM) del CMIP5 bajo los escenarios de emisión RCP 4.5 y 8.5 para el periodo del 2021 – 2040, 2041 – 2060 y 2061 – 2080”. Los resultados mostraron un aumento promedio en la ETo anual del 6.1% y una disminución en la precipitación anual del 11.4% lo que lleva a una disminución del 24% en la afluencia.



En la España Peninsular se realizó una evaluación de modelos hidrológicos para la derivación de recursos hídricos, este estudio es de tipo comparativo de seis modelos de balance hidrológico (GR2M, AWBM, Témez, Thornthwaite – Mather y GUO-5p) en varias cuencas con diferentes condiciones climáticas en el periodo 1977 – 2010. Para ello fue necesario la aplicación de seis indicadores estadísticos para comparar los resultados de los modelos y los resultados mostraron que el modelo GR2M dio el mejor ajuste en España peninsular en un marco de índice de aridez del PNUMA por encima de 1 y valores de NSE por encima de 0,75 en un intervalo de confianza del 95% clasificando al modelo GR2M como muy bueno para cuencas húmedas (Pérez *et ál.*, 2019).

Del mismo modo se realizaron estudios en la cuenca de Essaouira – Marruecos en donde el objetivo fue simular caudales futuros para el 2050 utilizando el modelo hidrológico GR2M. Los resultados obtenidos por el modelo GR2M bajo los escenarios RCP 2.6 y 8.5 del CMIP 5, predicen que los flujos futuros mostrarán una tendencia alcista de 19 y 43%, respectivamente. Sin embargo, bajo el escenario RCP 4.5, los flujos futuros muestran una tendencia a la baja del 38% (Ouhamdouch *et ál.*, 2019).

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Según Rodas (2022) en su trabajo investigativo titulado “Evaluación del cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina – Tacna”, utilizó los modelos climáticos globales en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para estimar de cómo variarán los caudales en el futuro y los resultados revelaron cambios significativos en la cantidad de agua disponible durante diferentes momentos del año. Entre febrero y agosto, se observa una



disminución de hasta un 38,8% (RCP4.5) y un 41,3% (RCP8.5) en la oferta hídrica. Por otro lado, entre septiembre y enero, se registra un aumento de hasta un 91,5% (RCP4.5) y un 79,2% (RCP8.5). Sin embargo, en términos anuales, se identifica una reducción en el caudal promedio. En el futuro cercano (2020-2040), disminuye en un 5,3% (RCP4.5) y un 3,6% (RCP8.5). En el futuro medio (2041-2070), la disminución es del 6,3% (RCP4.5) y del 8,8% (RCP8.5). Finalmente, en el futuro lejano (2071-2100), disminuye un 6,7% (RCP4.5) y un 2,0% (RCP8.5).

Asimismo, López (2022) en su trabajo que lleva por título: “Efectos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica para fines de abastecimiento poblacional de la ciudad de Huánuco”, el proceso de investigación involucró el uso del modelo hidrológico GR2M, el cual fue previamente calibrado y validado, los resultados de este estudio evidenciaron que la precipitación mensual total futura, presenta variaciones con aumentos notables entre setiembre y abril con 25.06% para el RCP4.5 y 33.97% para el RCP 8.5, mientras que entre mayo y agosto se observaron disminuciones del 13.75% para el RCP4.5 y 18.66% para el RCP8.5, en términos de la disponibilidad hídrica, se concluyó que la oferta de agua del río disminuirá en los meses secos y aumentará en los meses húmedos debido a estos patrones variables de precipitación y al incremento de la temperatura.

De la misma forma Huamani (2022) realizó una investigación denominado: “Influencia del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas” en donde tuvo como propósito principal examinar cómo el cambio climático afecta la disponibilidad de agua en la cuenca para ello evaluó el comportamiento futuro de la precipitación y la temperatura utilizando información de modelos globales CMIP5 (HadGem2-AO, MPI-ESM-

MR) y modelos regionalizados CORDEX (HadGem2-ES - REMO y MPI-ESM-LR - REMO) bajo dos escenarios de emisiones: uno de bajas emisiones (RCP 2.6) y otro de altas emisiones (RCP 8.5). Los resultados indicaron que el cambio climático tiene un impacto en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Ica-Alto Pampas, con una disminución de los caudales en todos los escenarios y períodos analizados.

Por otro lado, Tello (2019), en su tesis titulado “Disponibilidad de agua de escorrentía en la captación del río ronquillo en base a información climática” obtiene resultados que indican que los meses de febrero, marzo y abril presentan la mayor disponibilidad de agua de escorrentía con 0.368, 0.512 y 0.352 m<sup>3</sup>/s, mientras que los meses de junio, julio, agosto y setiembre presentan la menor disponibilidad de agua de escorrentía con 0.071, 0.053, 0.050 y 0.077 m<sup>3</sup>/s, en la misma línea los hallazgos permiten concluir que la cantidad de agua disponible se reducirá en un 30.16% en el escenario futuro 2030 en comparación con el escenario actual.

Finalmente, León *et ál.* (2019) realizó una investigación titulado: “Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático”, en este estudio se enfocó en evaluar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua superficial en la parte media y alta de la cuenca del río Piura, ubicada en Perú. Para proyectar los posibles cambios futuros, se utilizaron datos climáticos de dos modelos climáticos globales (MCG): HADGEM2-ES y CSI-RO-Mk3-6-0, disponibles dentro del proyecto Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Estos datos se aplicaron a los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5. Se corrigieron los datos proyectados en el futuro, que abarcaron desde 2025 hasta 2054, los resultados



indican que la escorrentía mensual proyectada para el año 2050 en los cuatro escenarios evaluados, se prevé un aumento de alrededor del +71.8%, lo que equivale a aproximadamente 55.9 m<sup>3</sup>/s, durante los meses de octubre a abril, con el mayor aumento en noviembre. Por otro lado, entre los meses de mayo a setiembre, se anticipa una disminución de alrededor del -66.1%, aproximadamente 12 m<sup>3</sup>/s, con la mayor reducción en julio.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

En la región Puno se han realizado diversas investigaciones que han proporcionado información valiosa con respecto a la oferta hídrica superficial de las cuencas, sin embargo, es importante destacar que los avances recientes en los modelos climáticos proporcionan información más detallada y precisa sobre los posibles escenarios futuros por tal razón los estudios que más sobresalen y contemplan el efecto del cambio climático y el modelo GR2M son las siguientes:

Coaquira (2023) en su trabajo titulado: “Estimación de la oferta hídrica en la cuenca del río Ilave en condiciones de cambio climático”, tuvo por objetivo estimar la disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Ilave bajo condiciones de cambio climático, se evaluó el impacto del cambio climático utilizando el modelo hidrológico GR2M bajo dos trayectorias socioeconómicas compartidas: SSP2 4.5 y SSP5 8.5, para dos horizontes temporales: futuro cercano (2030-2060) y futuro lejano (2070-2100). Los resultados indican que la oferta hídrica anual presentaría una disminución en el rango de 9% a 10.3% en el escenario SSP2 4.5 y de 24% a 25.2% en el escenario SSP5 8.5 en comparación con el período histórico. Asimismo, las mayores variaciones se observarían en los meses de septiembre y octubre.



Huarahuara (2022) en su trabajo “Efectos del cambio climático sobre la temperatura y precipitación en la cuenca hidrográfica Huancané” analizó los datos históricos de las temperaturas y precipitaciones, después de realizar pruebas de tendencia y diversos análisis estadísticos los resultados mostraron que las temperaturas medias tienden a aumentar significativamente en toda la cuenca con proyecciones de  $1.1^{\circ}\text{C}$  y  $2.6^{\circ}\text{C}$  para el año 2050. Con respecto a las precipitaciones se proyectó una disminución en las estaciones de Moho, Putina y Muñani, además se encontró un descenso en los escurrimientos superficiales, finalmente el autor concluye que el cambio climático está generando un aumento acelerado en la temperatura y afectando negativamente las precipitaciones en la cuenca hidrográfica Huancané ya que los pronósticos al 2050 muestran un descenso de caudal de  $0.066\text{ m}^3/\text{año}$ .

Asimismo, Quispe y Huanca (2021), realizaron una investigación titulada “Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca Ilave bajo escenarios del cambio climático”, en esta investigación se empleó datos diarios de condiciones climáticas y caudales diarios. Para proyectar las condiciones futuras, se recurrió a los datos de dos modelos climáticos globales (MCG), MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR, provenientes del proyecto Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), y se consideraron dos escenarios de trayectoria: SSP4.5 y SSP8.5. Los datos proyectados a futuro (2025 - 2050) en lo que respecta a la precipitación, los escenarios de cambio climático indican una disminución que varía desde  $-38.08\text{ mm}$  hasta  $-0.29\text{ mm}$ . Esta disminución es más pronunciada durante la temporada de lluvias y se observa un incremento durante la temporada de estiaje. En términos de caudal, se prevé una reducción en el recurso hídrico durante la temporada de lluvias, con una variación que oscila entre  $-41.2\%$  y  $40.0\%$ . Para la temporada



seca, se anticipa un descenso en el caudal que varía desde -33.8% hasta -0.1%. En resumen, las alteraciones en la temperatura y la precipitación se reflejarán en una disminución del recurso hídrico, proyectándose una reducción de hasta -41.2% para el año 2050.

De la misma forma el artículo: “Análisis comparativo de los impactos del cambio climático en las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas en la cuenca del lago Titicaca”. Tuvo como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en las sequías y para ello se utilizó proyecciones climáticas mensuales del CMIP5 bajo los escenarios de emisión del RCP 8.5. Y de acuerdo a los hallazgos de esta investigación las sequías hidrológicas, las condiciones meteorológicas serán más severas y ocurrirán con mayor frecuencia y duraran más en la mayoría de los TDPS, también se anticipa que habrá un aumento considerable en el número de sequías que afectaran la agricultura e hidrología. Asimismo, se proyecta que el TDPS del sur experimente mayores aumentos en la frecuencia y severidad de las sequías agrícolas e hidrológicas como resultado de una combinación de factores, incluida la disminución anticipada en la precipitación anual y el mayor aumento en la evapotranspiración (Zubieta *et ál.*, 2021).

Finalmente, Lujano *et ál.* (2016) en su artículo denominado, “Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el altiplano peruano” tuvo como objetivo evaluar cómo cambiará la disponibilidad de recursos hídricos en respuesta a diferentes escenarios de emisiones de Modelos Climáticos Globales (MCG) pertenecientes al CMIP5, utilizando el modelo GR2M. Los resultados señalaron que bajo los diferentes escenarios (RCP4.5 y RCP8.5) hacia finales del

siglo XXI, se prevé un ligero aumento en la precipitación anual en la cuenca de Ramis, mientras que se espera una disminución en la cuenca de Ilave.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Hidrología**

Según Pulido *et ál.* (2021), la hidrología es la ciencia que se encarga sobre el estudio del agua, donde se estudia los procesos físicos que están involucrados en el ciclo global del agua, que comprende la mayoría de los subcampos que se encuentran en las ciencias de la tierra y del medio ambiente. Es un componente esencial de la ingeniería del agua, requerido para su aplicación por especialistas comprometidos con el desarrollo de proyectos de recursos hídricos y además, abarca una amplia variedad de temas científicos que en la actualidad son objeto de extensas investigaciones. Marín *et ál.* (2014), indica también que la hidrología de un lugar depende, en primer lugar, de su clima, por lo que es necesario conocer los procesos meteorológicos que gobiernan ese clima.

### **2.2.2. Ciclo hidrológico**

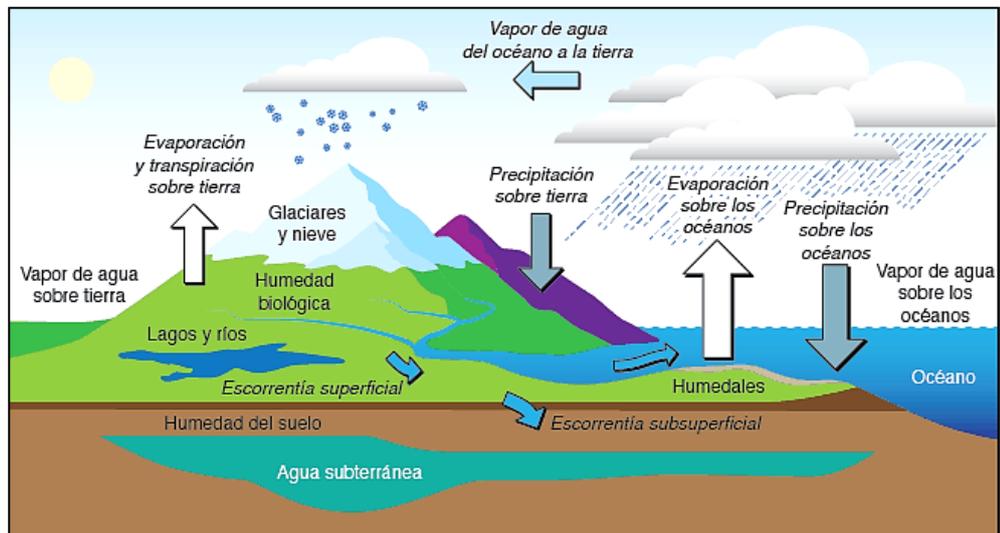
Según Mafilika (2021), “el ciclo hidrológico es un sistema que describe el movimiento del agua entre la atmósfera y la tierra, lo que implica que forma un sistema continuo de circulación, este movimiento de agua entre la atmósfera y la tierra se denomina ciclo hidrológico y este ciclo también puede analizarse desde una perspectiva global y terrestre”.

El ciclo hidrológico terrestre se centra en la producción o captación de recursos hídricos en una determinada región a la que se denomina cuenca fluvial;

por otro lado, el ciclo hidrológico global juega un papel más significativo en el clima del planeta (Cruz y Romero, 2018).

### Figura 1

#### *El ciclo hidrológico del agua*



Nota: Proceso del ciclo hidrológico del agua, por Mafilika (2021).

Como principales elementos del ciclo hidrológico podemos mencionar las siguientes:

#### **2.2.2.1. Condensación**

Es el proceso por el cual el agua pasa de ser un vapor a un líquido como resultado de ser enfriada, lo que también resulta en la liberación de energía de calor latente hacia el ambiente circundante (Easton, 2020).

#### **2.2.2.2. Humedad relativa**

La humedad relativa del aire se calcula tomando la mayor cantidad de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura determinada y expresándola en porcentaje. También es posible decir que es una frase que se usa para explicar el vínculo entre el contenido de vapor de agua del



aire y la capacidad de vapor de agua del aire, en pocas palabras, es una medida de la cantidad de vapor de agua que está presente en la atmósfera (Easton, 2020).

### **2.2.2.3. Infiltración**

Según Easton (2020), es el movimiento del agua a través del suelo; cuanto mayor es la cantidad de infiltración, más húmeda se vuelve la zona, la cantidad de este proceso se determina encontrando la diferencia entre la cantidad total de precipitación y la cantidad total de escorrentía superficial.

### **2.2.2.4. Precipitación**

La precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, lo que genera escorrentía e infiltración en el suelo (Easton, 2020). Para que la humedad se transforme en precipitación es necesario el cumplimiento de tres condiciones que se mencionan a continuación:

- Cambio de estado de vapor a líquido o sólido.
- Estado de saturación por enfriamiento debido al ascenso de las masas de aire.
- Crecimiento de las gotas o cristales de hielo que forman las nubes, aglomerándose y así permitiendo su caída por su propio peso.

### **2.2.2.5. Temperatura**

Easton (2020) indica que la temperatura es una cualidad que cuando está presente, permite llevar un sistema a un estado de equilibrio térmico. Esta es una sensación que se presenta cuando un cuerpo o sistema



gana o pierde calor y es una variable que se relaciona con el tiempo o el clima para caracterizar si es frío o caliente.

#### **2.2.2.6. Evaporación**

Según la investigación de Easton (2020), el proceso de evaporación es la transformación de un sólido o líquido en gas. En el contexto del ciclo hidrológico, la transformación de agua líquida en vapor de agua se denomina "conversión", esta transformación se produce cuando hay un aumento de la temperatura y la presencia de vientos constantes. La evaporación está directamente influenciada por una variedad de factores ambientales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación entrante, la heliofanía y otros (Marín *et ál.*, 2014).

#### **2.2.2.7. Transpiración**

Según Easton (2020), el proceso de transpiración es aquel que llevan a cabo las plantas, durante este proceso el agua se mueve del suelo a las hojas de la planta y luego se expulsa al aire circundante. Debido a que la mayor parte de la transpiración tiene lugar durante el día, esto puede verse influenciado por factores como la baja humedad del suelo, el número y tamaño de la vegetación, el viento y la heliofanía (Marín *et ál.*, 2014).

#### **2.2.2.8. Evapotranspiración**

El total de agua consumida por evaporación y transpiración es a lo que esto se refiere, todo este proceso, que se conoce como evapotranspiración, se refiere a la transformación del agua de su estado

líquido a gaseoso a medida que avanza desde la superficie del suelo hasta las hojas de las plantas (Easton, 2020).

Según Oudin *et ál.* (2005) recomienda la siguiente fórmula para calcular la evapotranspiración:

$$PE = \frac{R_e}{\lambda \rho_w} * \frac{T_\alpha}{100} * (m/s)$$

Dónde:

Re : Radiación extraterrestre, depende de la latitud y el día juliano (J/m<sup>2</sup>/s).

λ : Flujo de calor latente. (2.45\*10<sup>6</sup> J/kg)

ρ<sub>w</sub> : Densidad del agua. (1000 kg/m<sup>3</sup>)

T<sub>α</sub> : Temperatura media mensual. (°C)

#### 2.2.2.9. Caudal

Según Easton (2020) “define el caudal como el volumen de agua que recorre una superficie en un determinado tiempo” y la fórmula para hallar el caudal es la siguiente:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q : caudal (l/s)

V : volumen (litros)

T : tiempo (segundos)



### **2.2.3. Escorrentía**

Según Vásquez *et ál.* (2016) “la escorrentía es una parte del total de la precipitación sobre un área, que cuando los suelos se saturan se generan corrientes de agua que se desplazan por suelo y subsuelo hasta llegar a alimentar a un cauce” y está formada por varios tipos:

#### **2.2.3.1. Escorrentía superficial**

Como indica Vásquez *et ál.* (2016), cuando el suelo está saturado, se produce escorrentía superficial, a esto le sigue la formación de una fina capa de agua que viaja como resultado de la fuerza de la gravedad y puede ser frenada por imperfecciones en el suelo y las plantas. Cuando las lluvias se presentan con mayor intensidad las aguas se van acumulando sobre la superficie y posteriormente estas se escurrirán hacia las quebradas llegando a formar un cauce de río. Cabe mencionar que la geología y los páramos son algunos factores que producen la escorrentía dentro de los ecosistemas altoandinos (Borja *et ál.*, 2012).

#### **2.2.3.2. Escorrentía sub – superficial**

La escorrentía sub – superficial refiere al movimiento del agua que ocurre debajo de la superficie del suelo, esto ocurre en zonas que presentan suelos permeables, capaces de infiltrar mayor cantidad de agua en presencia de precipitaciones constantes y de baja intensidad, esto es un proceso muy importante en la recarga de acuíferos y en el suministro de agua ya que este se mueve horizontalmente por los horizontes superiores para reaparecer súbitamente al aire libre como manantial (Borja *et ál.*, 2012).



### 2.2.3.3. Escorrentía subterránea

Vásquez *et ál.* (2016) “menciona que esta escorrentía es la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático circulando hasta alcanzar la red de drenaje y fluye permanentemente desde acuíferos profundos hacia los ríos”.

Esta escorrentía es la más lenta de todas, mientras que la escorrentía superficial es la más rápida en términos de unidades: m/h. Además de las formas de escorrentía mencionadas, la precipitación que cae directamente sobre la superficie plana de un curso de agua también contribuye a la escorrentía de ese curso de agua. Sin embargo, esta contribución constituye una fracción muy pequeña de la escorrentía total y en la mayoría de los casos, es de muy poca importancia en comparación con las otras contribuciones (Borja *et ál.*, 2012).

### 2.2.4. Oferta hídrica

Juncosa y Padilla (2009) menciona que la oferta hídrica es la porción de agua que después de haber llovido sobre la cuenca, satisfaciendo los requerimientos de evapotranspiración, cobertura vegetal y la infiltración del sistema suelo, escurre por los cauces principales de los ríos y otras corrientes superficiales, alimentando lagos, lagunas y embalses, converge con otras corrientes y eventualmente llega al mar directa o indirectamente. Su fundamento principal es la ecuación del balance de agua, que emplea el principio de conservación de la masa.



### 2.2.5. Los modelos hidrológicos

Según Ocampo & Vélez (2014) “es una herramienta física o matemática que describe las fases del ciclo hidrológico y un sistema real complejo o cuenca hidrográfica. Representa la transición de la precipitación y la evapotranspiración en escurrimiento superficial y sub-superficial”. El modelo hidrológico es importante debido a las siguientes características:

- Requerimiento de entradas y salidas del sistema.
- Capacidad de simulación en función del tiempo y espacio.
- Aplicable en cuencas de cualquier tamaño.
- Relaciones causa – efecto, sin cambios en los sistemas físicos reales.
- Simulación y predicción de fenómenos físicos en corto, mediano y largo plazo.
- Variaciones espaciales temporales y variaciones espaciales de precipitación.
- El resultado es un hidrograma de escurrimiento.

Según Webera *et ál.* (2010), la distribución de la lluvia y la producción de flujo son el foco de los modelos hidrológicos, su propósito es llegar a una aproximación utilizando ecuaciones que modifican las entradas y salidas, haciendo posible representar un sistema real dentro de una cuenca. El objetivo principal es estudiar los recursos hídricos como un sistema continuo, lo que a su vez permite pronosticar su comportamiento mediante el uso de varios modelos que, dependiendo de los comportamientos a investigar, toman en consideración una variedad de diferentes condiciones.



Las clasificaciones de los modelos hidrológicos se dan según las representaciones espaciales y estas se describen a continuación:

#### **2.2.5.1. Modelos distribuidos**

Mediero (2007), menciona que los modelos distribuidos de procesos hidrológicos se basan en la representación de características de la superficie terrestre que afectan a los componentes del balance hídrico.

Un enfoque de modelado verdaderamente distribuido es aquel que representa procesos a través de elementos de modelo distintos de alta resolución. Esto se puede realizar de manera cuadrículada o mediante subcuencas más pequeñas, planos de flujo, redes irregulares trianguladas o unidades de respuesta hidrológica. Con este tipo de enfoque, cada celda tiene parámetros que permiten sus propias estimaciones de caudal, el flujo en cualquier punto de la cuadrícula se puede estimar matemáticamente. Un inconveniente del modelado distribuido son los datos de entrada adicionales necesarios para cada celda. Si estos datos no están disponibles, deben estimarse de alguna manera, introduciendo un factor de incertidumbre (Webera *et ál.*, 2010).

#### **2.2.5.2. Modelos semidistribuidos**

El modelado semidistribuido es una variación del método agrupado y en ocasiones, se denomina enfoque "pseudodistribuido". Con este enfoque, una cuenca se divide en subcuencas más pequeñas. Las cantidades de escorrentía de métodos como el hidrograma unitario se utilizan para estimar el caudal de cada una de estas subcuencas. Estos



volúmenes de escorrentía luego se enrutan río abajo para estimar la salida del caudal de la cuenca más grande en la salida. (Mediero, 2007).

### **2.2.5.3. Modelos agregados**

Es un modelo de distribución de precipitaciones espacialmente uniforme que representa una cuenca homogénea, este modelo imita el proceso hidrológico en todo el mundo y a lo largo de un evento, así como los parámetros de precipitación media y los submodelos que comprenden esos modelos, generalmente este modelo es utilizado para cuencas con un tamaño de áreas pequeñas (Mediero, 2007).

### **2.2.6. Los modelos GR**

Según Charles *et ál.* (2007), los modelos hidrológicos GR (Gridded Runoff) son un conjunto de modelos utilizados en hidrología para simular la generación de escorrentía en una cuenca hidrográfica. Estos modelos se basan en la utilización de datos de precipitación y temperatura como variables de entrada, y su objetivo es estimar los caudales generados por el escurrimiento superficial en diferentes escalas temporales, ya sea a nivel anual, mensual o diario. Los modelos GR son ampliamente utilizados en estudios hidrológicos y de recursos hídricos para comprender y predecir el comportamiento de las cuencas hidrográficas en términos de disponibilidad y gestión del agua (Cabrera, 2013).

### **2.2.7. Modelo GR2M**

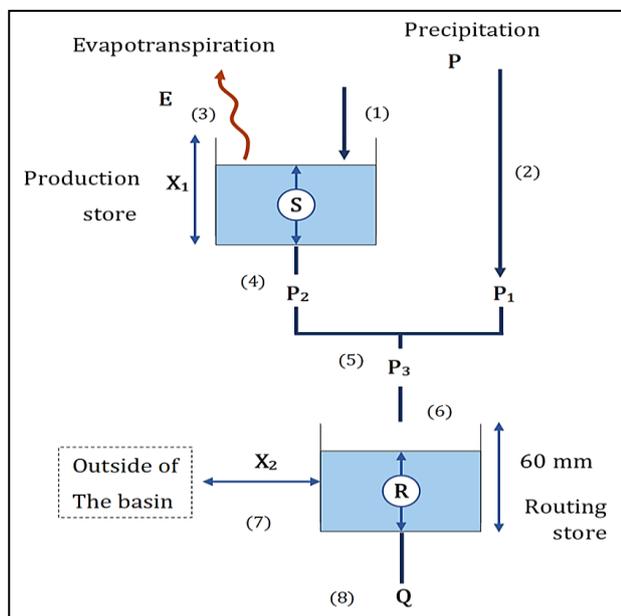
Según Cabrera (2013), el modelo GR2M se ha utilizado últimamente para simular las características hidrológicas de una cuenca debido a la variabilidad

climática en los regímenes hidrológicos y evaluar los efectos del cambio climático en la esorrentía.

En la figura 2 se presenta el esquema que representan los procesos hidrológicos para la transformación precipitación – esorrentía con las formulas correspondientes y la arquitectura del modelo GR2M.

**Figura 2**

*Arquitectura del modelo GR2M*



Nota: Esta figura muestra la arquitectura que tiene el modelo GR2M. Recuperado de modelos agrgados GR2M, por Cabrera (2013).

El modelo GR2M consta de dos parámetros la primera es la máxima capacidad de almacenamiento del reservorio en mm, que está representado por  $X_1$  y la segunda que es el coeficiente de intercambio de agua subterránea que está representado por  $X_2$  y sin unidades, con estos dos parámetros el modelo determina el caudal que puede liberarse utilizando la función de producción alrededor de un reservorio suelo y de transferencia regida por el reservorio de agua gravitacional (Cabrera, 2013).



Según Cabrera (2013) “parte de la precipitación es absorbida por el reservorio de producción y otra ( $P_1$ ) se dirige al reservorio o tanque de agua gravitacional y el nuevo volumen de agua en el reservorio suelo ( $S_1$ )” se calcula con el uso de la siguiente formula:

$$S_1 = \frac{s + X_1 \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)}$$

Ec.1. Representa el volumen de agua en el reservorio suelo.

Dónde:  $S_1$  es el nuevo volumen de agua en el reservorio suelo y  $X_1$  es la capacidad del reservorio suelo.

En ese mismo contexto, Cabrera (2013) indica que el volumen de agua antes de la infiltración debe ser el mismo después de esta cuando no existen perdidas; es decir:

$$P_1 = P + S + S_1$$

Ec.2. Representa el volumen de agua antes de la infiltración.

Asimismo, la evapotranspiración afecta el reservorio suelo lo cual hace que el volumen sea reducido a  $S_2$  y en para el cálculo de este nuevo volumen se utiliza la siguiente formula:

$$S_2 = \frac{S_1 + \left[1 - \operatorname{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right)\right]}{1 + \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right) \operatorname{Tan}\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

Ec.3. Representa el volumen reservorio.

Es por eso que la evaporación real estimada por el modelo puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$E_s = S_1 + S_2$$

Ec.4. Representa la evaporación real.

$$E_s = \frac{S_1 \left(2 - \frac{S_1}{X_1}\right) \operatorname{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right) \operatorname{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

Ec.5. Representa el despeje evaporación real.

Cabrera (2013) aclara que “una cantidad de agua  $P_2$  es liberada del tanque de producción como percolación. De esta manera  $S_2$ , toma un nuevo valor  $S$ , el cual representa el almacenamiento inicial en el siguiente mes”:

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2^3}{X_1}\right)\right]^{1/3}}$$

Ec.6. Representa el almacenamiento inicial.

Luego,  $P_2$ , que es el volumen de agua que percolación será estimada por medio de la diferencia entre  $S_2$  y  $S$ :

$$P_2 = S_2 - S$$

Ec.7. Representa el volumen de agua por percolación.

$$P_3 = P_1 - P_2$$

Ec.8. Representa la precipitación efectiva.

El nivel inicial en tanque de tránsito,  $R$ , se actualiza como:



$$R_1 = R - P_3$$

Ec.9. Representa el nivel inicial del tanque de tránsito.

Sin embargo, “debido a que existe un intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial, el volumen del reservorio se corrige por el factor  $X_2$  y este es representado de la siguiente manera” (Cabrera, 2013):

$$R_2 = X_2 - R_1$$

Ec.10. Representa la corrección del volumen del reservorio.

Finalmente, para obtener el caudal de salida el reservorio de agua gravitacional se vacía siguiendo una función cuadrática:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}$$

Ec.11. Representa el caudal de salida.

“Como se puede observar, la máxima capacidad del tanque de tránsito tiene un valor de 60 mm, que dependen de dos variables a optimizar  $X_1$  y  $X_2$ ” (Cabrera, 2013). Finalmente, el nivel en el tanque de tránsito al inicio del siguiente mes se calcula como:

$$R = R_2 - Q$$

Ec.12. Representa el nivel del tanque de tránsito.

## 2.2.8. Calibración y validación del modelo GR2M

### 2.2.8.1. Calibración

Según Seiller *et ál.* (2017), el proceso de calibración requiere la selección de un conjunto de parámetros del modelo para hacer coincidir el conjunto de datos simulados con los datos reales, esto se hace para obtener un ajuste preciso. Se utiliza una "función objetivo" para evaluar el ajuste entre los datos y el modelo, ya que la eficacia de la aplicación de un modelo hidrológico depende en gran medida de una calibración precisa. La "función objetivo" suele ser una medida de qué tan bien se ajusta algo, como el coeficiente de correlación, la eficiencia de Nash-Sutcliffe u otras métricas que son bastante comparables. En determinadas circunstancias, se puede construir una función de "objetivo múltiple" que proporcione una evaluación más completa del ajuste del modelo mediante la combinación de varias de estas métricas en una sola puntuación.

### 2.2.8.2. Validación

De acuerdo con Seiller *et ál.* (2017), la validación de un modelo implica el empleo de indicadores estadísticos para evaluar su capacidad de replicación y predicción en una región específica, especialmente durante períodos que no forman parte del proceso de calibración. El propósito de esta validación es demostrar que los errores del modelo se mantienen por debajo de los límites aceptables. Estos indicadores estadísticos son utilizados para comparar los resultados simulados del modelo con los datos observados en un conjunto de datos independiente. Al realizar esta validación, se busca verificar la capacidad del modelo para representar de

manera precisa y fiable los procesos hidrológicos en la región de interés y asegurarse de que sus resultados sean confiables para su aplicación en escenarios futuros.

## 2.2.9. Indicadores estadísticos de eficiencia del modelo GR2M

### 2.2.9.1. Eficiencia de Nash – Sutcliffe

Para Seiller *et ál.* (2017) manifiestan que en Hidrología uno de los criterios más utilizados es la eficiencia Nash – Sutcliffe, ya que este tiene la capacidad de reproducir caudales promedios, mínimos y máximos y está definido como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Dónde:  $Q_{sim}$ : caudal simulado,  $Q_i$ : caudal observado,  $Q$ : caudal medio observado.

Esta ecuación se desarrolló para determinar qué porcentaje de la variabilidad inherente de los datos se refleja en el modelo al observar los resultados. Cuando  $E = 1$ , la simulación se considera perfecta; sin embargo, si se intenta ajustar las observaciones al valor medio, el resultado es  $E = 0$  (Seiller *et ál.*, 2017).

**Tabla 1**

*Criterios de eficiencia de Nash – Sutcliffe*

CRITERIO DE NSE	AJUSTE
> 0.8	Excelente
0.6 – 0.8	Muy bueno
0.4 – 0.6	Bueno
0.2 – 0.4	Satisfactorio
< 0.2	Insuficiente

Nota: Recuperado de Seiller *et ál.* (2017).

En la Tabla 1 podemos observar que según los criterios de NSE, hay cinco rangos de valores que se pueden observar y cada uno se puede usar para caracterizar la eficiencia de ajuste de los datos observados. Estos rangos comienzan con valores por debajo de 0,2, lo que indicaría una insuficiencia en el ajuste y terminan con valores superiores a 0,8, lo que indicaría un gran ajuste.

### 2.2.10. Cambio climático

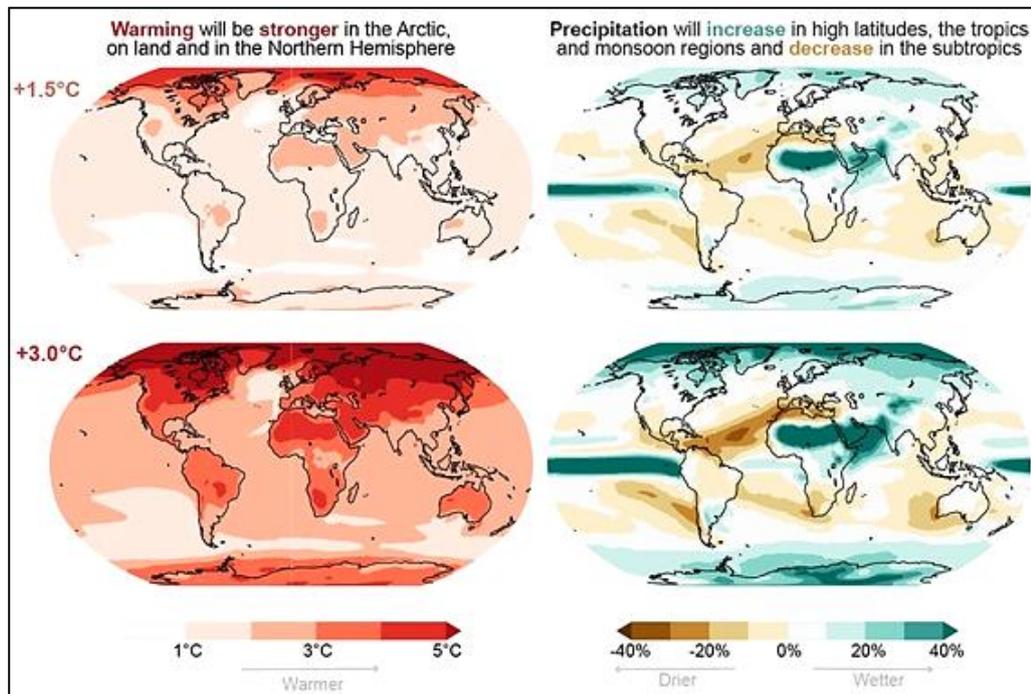
De acuerdo al IPCC (2013), el cambio climático es determinado como “el cambio en el estado del clima que puede ser identificado por cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades y persistir por un extenso periodo de tiempo, normalmente décadas o más”.

Según Arnell *et ál.* (2011), el clima de la tierra ha evolucionado a lo largo de su historia como resultado de cambios en las presiones naturales y/o humanas que actúan sobre él. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) son los tres gases de efecto invernadero más importantes en relación con el cambio climático. Estos gases de efecto invernadero son producidos no solo por fuentes naturales, como las emisiones volcánicas y los incendios forestales,

sino también por fuentes que están influenciadas por la actividad humana. (por ejemplo, la quema de combustibles fósiles y la deforestación).

### Figura 3

#### *Efectos del cambio climático a nivel mundial*



Nota: La figura muestra los efectos del cambio climático tanto en la temperatura y precipitación a nivel mundial. Recuperado de Pörtner *et ál.* (2022).

La figura 3 muestra que el cambio climático no es proporcional a nivel global, se observa que el calentamiento será más fuerte en el Ártico y en el hemisferio norte de la tierra de la misma forma de se observa que las precipitaciones aumentarán en las latitudes altas, los trópicos y las regiones monzónicas, pero disminuirán en las zonas subtrópicas.

#### **2.2.11. Modelos climáticos globales**

Según O'Neill *et ál.* (2016), los modelos climáticos globales, también conocidos como modelos de circulación general, se fundamentan en los principios generales de la dinámica de fluidos y la termodinámica. Estos modelos tuvieron



sus inicios en la predicción numérica del tiempo atmosférico y describen de manera explícita la dinámica tanto de la atmósfera como del océano. Su objetivo principal es proporcionar un entorno de laboratorio para llevar a cabo experimentos numéricos que permitan comprender las transiciones climáticas en el pasado, presente y futuro.

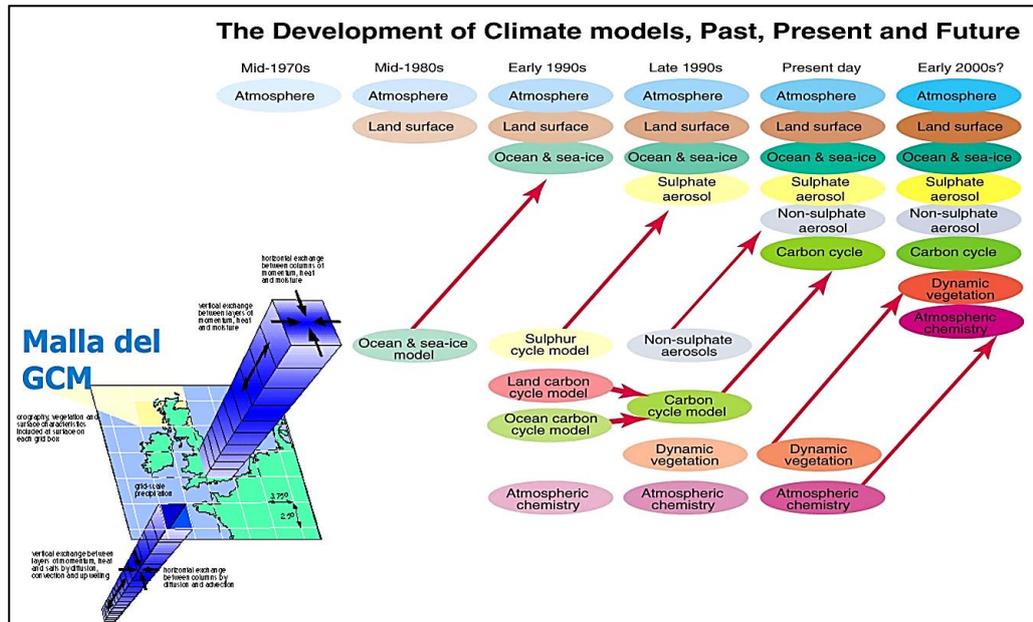
Mediante la utilización de estos modelos, es posible identificar resonancias y umbrales en el sistema climático, lo que a su vez facilita la estimación de posibles cambios climáticos futuros. Los modelos climáticos globales desempeñan un papel fundamental en los informes del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) y contribuyen a mejorar nuestra comprensión de los procesos climáticos, así como a realizar proyecciones y evaluaciones del cambio climático en diferentes escenarios (IPCC, 2013).

Según el IPCC (2013), las ecuaciones matemáticas que componen un GCM pueden ser analizadas de manera independiente en el contexto de sus tres componentes principales. Estos componentes son los siguientes: la dinámica del sistema climático, que es responsable de describir los movimientos de las masas de aire a gran escala, así como el transporte de energía y cantidad de movimiento; la física del sistema climático, que cubre la radiación transmitida por medio de la atmósfera, la evaporación y la termodinámica, así como otros factores como la interacción entre el océano y la atmósfera. Para combinar estos componentes y establecer una descripción completa y precisa de los procesos climáticos en un escenario global, cada uno de estos componentes tiene su propio conjunto único de expresiones matemáticas y estas expresiones se consideran de forma independiente dentro del modelo. Al considerar la dinámica atmosférica, la física climática y las interacciones océano-atmósfera, los GCMs permiten simular y

comprender los patrones y cambios climáticos a largo plazo en diferentes regiones del mundo.

#### Figura 4

*Evolución de los modelos climáticos globales*



Nota: Esta figura muestra la evolución que ha tenido los GCM a través de los años. Recuperado de IPCC (2013).

La Figura 4 ilustra la evolución de los modelos climáticos a lo largo del tiempo, desde su desarrollo inicial como modelos individuales de cada componente hasta su acoplamiento en modelos climáticos integrados. Recientemente, se han incorporado componentes relacionados con el ciclo del azufre para representar mejor los procesos atmosféricos y sus interacciones en los modelos climáticos, pero el proceso de acoplamiento de los diversos componentes ha sido un desafío técnico importante. Estas adiciones reflejan las emisiones de azufre y su oxidación, lo que conduce a la formación de partículas de aerosol, estas adiciones permiten una representación más completa de los procesos atmosféricos y sus interacciones en los modelos climáticos (IPCC, 2013).



### 2.2.12. Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP)

Según menciona Eyring *et ál.* (2016), el “Proyecto de Intercomparación de Modelos de Clima Acoplados (CMIP en sus siglas en inglés, Coupled Model Intercomparison Project) es el marco de comparación diseñado para mejorar nuestro conocimiento del cambio climático, siendo el equivalente del Proyecto de inter comparación de Modelos Atmosféricos (AMIP en sus siglas en inglés, Atmospheric Model Intercomparison Project) para modelos acoplados océano – atmósfera”.

En ese mismo sentido O’Neill *et ál.* (2016) manifiestan que el fin del CMIP es tener una mejor comprensión del clima en el pasado, presente y futuro como resultado de la variabilidad natural no forzada, además de la respuesta del clima a varios forzamientos. En los últimos años, el CMIP ha visto un aumento en el éxito y para responder a los problemas y requisitos significativos, actualmente se encuentra en su sexta fase (CMIP6), esta fase representa la principal diferencia entre los modelos de la generación anterior (CMIP5) y los modelos que se han desarrollado más recientemente, el CMIP6 es el aumento de la retroalimentación media de varios modelos debido a la retroalimentación relacionada con las nubes. Este aumento se debe a una caída en la cobertura de nubes bajas extratropicales, así como a una disminución en el albedo, los cuales son factores relacionados con la física de las nubes (Zelinka *et ál.*, 2020).

Según Voltaire *et ál.* (2019) la última fase del CMIP contiene parametrizaciones de última generación para los componentes de la atmósfera y la superficie terrestre, estos modelos se basan en nuevas vías socioeconómicas compartidas que son producidas con una base de datos actualizados sobre las

tendencias de emisiones de GEI y versiones actualizadas de modelos integrados de evaluación.

### **2.2.13. CMIP6**

Según menciona Eyring *et ál.* (2016), “la planificación de la sexta fase empezó en 2013 es decir poco antes de la finalización de la fase anterior, mientras que la visión general del diseño y la organización de CMIP6 fue publicada durante el 2016, dos años después es decir en el 2018 se han aprobado 23 proyectos de intercomparación de modelos (MIPs) implicando 33 grupos de investigación de 16 países”.

Además de esto, el CMIP6 pretende mantener la coherencia con respecto a los requisitos de distribución de documentación y datos. Para lograr este objetivo, se han incluido enfoques que permiten una mayor dispersión de las simulaciones y una caracterización más específica de las mismas. Además, se ha sugerido el uso de técnicas estándar para el análisis y para el cumplimiento de este objetivo, se han desarrollado instrucciones especializadas adaptadas a las necesidades de los distribuidores de datos, desarrolladores de modelos climáticos y usuarios de los resultados obtenidos (Eyring *et ál.*, 2016).

### **2.2.14. Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP)**

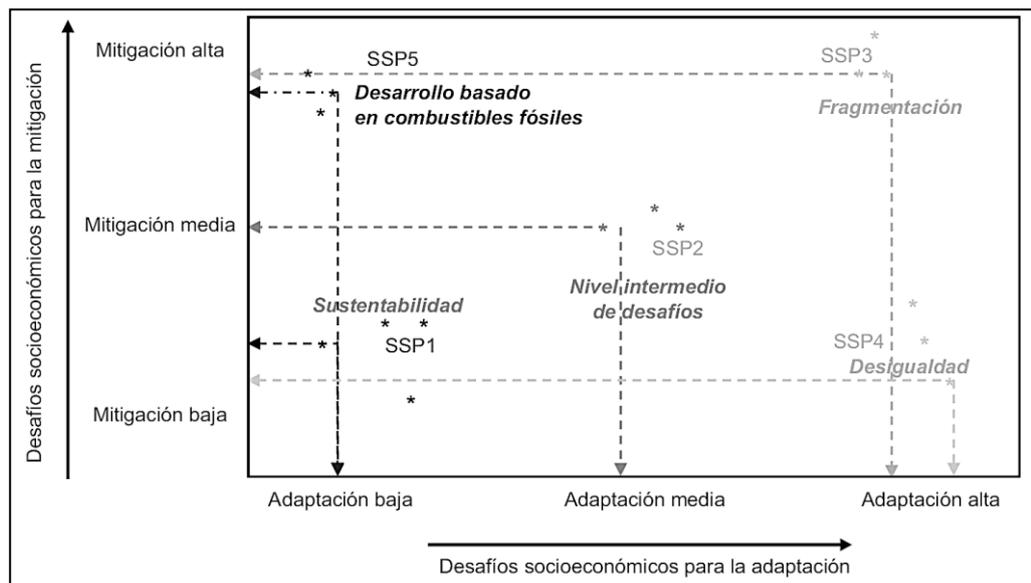
Las trayectorias socioeconómicas compartidas son descripciones de diferentes futuros posibles en términos de desarrollo socioeconómico, utilizan una narrativa y datos cuantitativos para ofrecer una visión de cómo podría evolucionar el mundo en las próximas décadas y cuáles serían los desafíos relacionados con la mitigación y la adaptación al cambio climático como resultado de esos cambios (O'Neill *et ál.*, 2014); los SSP abordan temas como el crecimiento económico, la

desigualdad, los cambios demográficos y tecnológicos, todos los cuales influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero y en las estrategias para enfrentar los impactos del cambio climático (Ebi *et ál.*, 2014).

Es importante destacar que los SSP no tienen en cuenta directamente los efectos del cambio climático ni las políticas de mitigación y adaptación, considerándolos factores "externos" (Kriegler *et ál.*, 2014). Su objetivo principal es crear escenarios integrados que abarquen tanto los aspectos socioeconómicos como los ambientales, que serían afectados por el cambio climático y las políticas climáticas, a través de su diseño (Kriegler *et ál.*, 2012).

### Figura 5

*El panorama de los SSP en las cinco categorías*



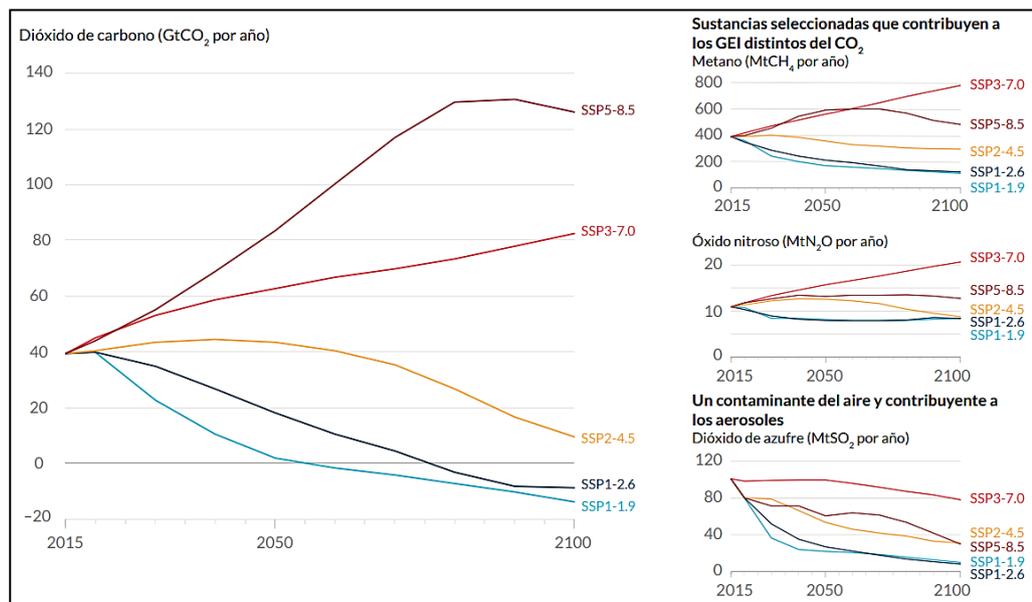
Nota: esta figura muestra los desafíos socioeconómicos para la mitigación. Tomado de O'Neill *et ál.* (2014).

La Figura 5, basada en O'Neill *et ál.* (2014) ilustra un espacio de desafíos dividido en cinco tipos de escenarios que representan diferentes posibilidades futuras, aunque el número exacto de escenarios y su ubicación en esta figura pueden variar.

El CMIP6 presenta nuevas versiones de los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, y RCP8.5 ahora son llamados SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0, y SSP5-8.5, cada uno de los cuales resulta en niveles de forzamiento radiativo similares para el año 2100 como sus predecesores. Asimismo, Hausfather (2019) indica que los nuevos escenarios ofrecen una selección más amplia de futuros socioeconómicos posibles, al incluir nuevas posibles trayectorias los escenarios SSP3-7.0 y el SSP1-1.9, tal como se muestra en la figura 6.

## Figura 6

### *Trayectorias socioeconómicas y los GEI al 2100*



Nota: La figura muestra los SSP y su comportamiento frente a los gases de efecto invernadero hasta el año 2100. Tomado de Pörtner *et ál.* (2022).

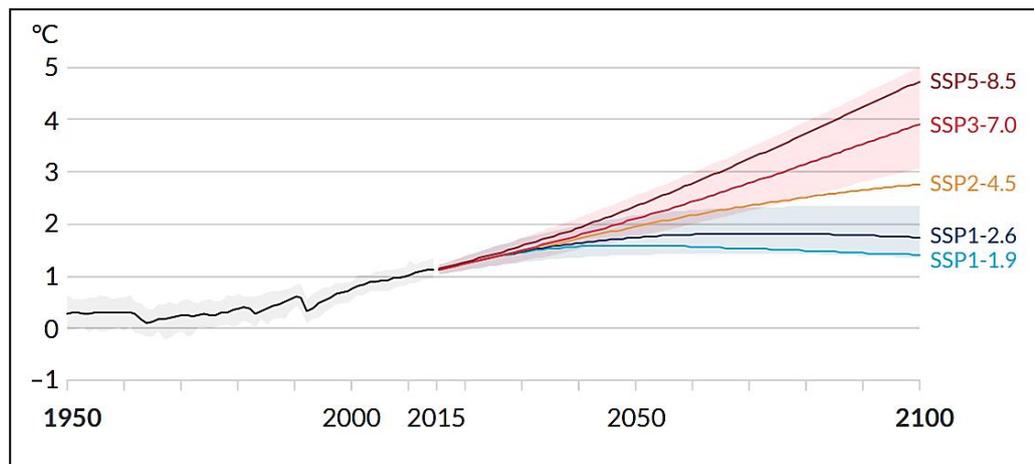
Se determinaron las variaciones en la temperatura global en la superficie en relación al período 1850-1900 mediante la combinación de simulaciones de modelos CMIP6 y la aplicación de restricciones basadas en observaciones del calentamiento histórico. También se utilizó una evaluación actualizada de la sensibilidad climática de equilibrio. Los cambios respecto al período 1850-1900 se calcularon en intervalos de 20 años, sumando 0,85 °C, que corresponde al

aumento observado en la temperatura global en superficie desde 1850-1900 hasta 1995-2014 (Pörtner *et ál.*, 2022).

Los valores y rangos muy probables de la temperatura para las trayectorias SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 se muestran en la figura 7.

### Figura 7

*Rangos de temperatura para los SSP*



Nota: Esta figura muestra los rangos de temperatura para cada trayectoria socioeconómica hasta el año 2100. Tomado de Pörtner *et ál.* (2022).

#### 2.2.15. Downscaling estadístico

De acuerdo con Rodríguez y Villalba (2021), se utiliza ampliamente una técnica para mejorar la habilidad de los modelos climáticos globales en la representación más precisa de las distribuciones espaciales y/o temporales de las variables meteorológicas, en este sentido, establecer correlaciones empíricas entre variables climáticas históricas a nivel local y las variables atmosféricas a gran escala es un paso necesario en este proceso. Esta técnica permite vincular y relacionar los datos observados a nivel local con los datos generados por los modelos a escala global, mejorando así la capacidad de los modelos para capturar de manera más precisa las condiciones climáticas en diferentes regiones.

Aybar *et ál.* (2020) “indica que al establecer estas correlaciones empíricas, se logra una calibración y ajuste más efectivos de los modelos climáticos globales, lo que resulta en una mejora de su capacidad para representar de manera más fiel y detallada los patrones climáticos y su variabilidad, al considerar las relaciones entre las variables locales y las variables atmosféricas a gran escala, se puede obtener una mayor confiabilidad en las proyecciones y simulaciones de los modelos climáticos”.

#### **2.2.16. Conjunto de datos meteorológicos de alta resolución PISCO**

Aybar *et ál.* (2017) “el producto grillado PISCO es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas pluviométricas, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada en su versión diaria y mensual a nivel nacional y con una alta resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ; esta base de datos grillados abarca una serie temporal que data desde el 01/01/1981 hasta 31/12/2016”.

Llauca *et ál.* (2020) indica que, para la generación del producto PISCO, específicamente en relación a la precipitación, fue necesario desarrollar un algoritmo de interpolación. Este algoritmo selecciona la técnica de interpolación más adecuada para cada día, considerando opciones como el "Inverse Distance Weighting" (IDW), el "Kriging with External Drift" (KED) y el "Regression Inverse Distance Weighting" (RIDW). El proceso de generación de PISCO se divide en dos etapas fundamentales, que se describen a continuación:

- Para realizar el método de ponderación de inversa de la distancia (IDW) y optimizar el exponente de ponderación, se llevó a cabo un procedimiento que implicaba evaluar el valor  $p$  obtenido al correlacionar espacialmente



los datos de las estaciones convencionales y los datos correspondientes del producto CHIRP para cada día. Si el valor  $p$  no presentaba significancia estadística al 95% (es decir,  $p\text{-valor} > 0,05$ ), se pasaba a la siguiente etapa para minimizar el error medio cuadrático (EMC) mediante validación cruzada. En caso de que el valor  $p$  presentara significancia estadística al 95% (es decir,  $p\text{-valor} < 0,05$ ), se procedía a evaluar qué método de interpolación (KED y RIDW) se utilizaría en el resto del proceso. Este enfoque se implementó para obtener un producto preliminar de precipitación grillado diario y mensual ( $P_d$  y  $P_{dm}$ ) para cada día desde 1981 hasta 2015 (Llauca *et ál.*, 2021).

- Un segundo componente del plan de SENAMHI es ajustar el producto de precipitación grillado preliminar ( $P_d$ ) para tener en cuenta cualquier subestimación o sobreestimación que pueda estar presente y para realizar este ajuste se utilizó los datos mensuales de precipitación de las estaciones del SENAMHI y los datos mensuales de CHIRP para poder generar bajo las mismas condiciones un producto grillado mensual ( $P_m$ ), posterior a ello procedieron a comparar el producto grillado mensual que se formó ( $P_m$ ) y el producto de precipitación grillado preliminar de los datos diarios que se habían recopilado previamente en el paso mensual ( $P_{dm}$ ), para generar proporciones grilladas mensuales los cuales serán utilizados para rectificar los datos diarios (Aybar *et ál.*, 2017).
- Otro componente importante del plan implementado por SENAMHI consiste en ajustar el producto de precipitación grillado preliminar ( $P_d$ ) con el fin de corregir posibles subestimaciones o sobreestimaciones que puedan estar presentes. Para llevar a cabo este ajuste, se utilizaron los datos





### 2.2.16.1.Producto PISCO – Precipitación V2.1

Según Aybar *et ál.* (2020), se presenta un nuevo conjunto de datos de precipitación denominado PISCOp V2.1, con una resolución espacial de ~10km. (0.1°); asimismo para la obtención de este producto se utilizó un algoritmo de fusión que está basada en un método de interpolación geoestadística y determinista en los cuales se incluyen tres diferentes fuentes de precipitación como: (i) Precipitación infrarroja del Grupo de peligros climáticos ( CHIRP), (ii) el conjunto de datos de pluviómetros rellenados y con control de calidad nacional, (iii) climatologías de precipitación fusionadas con medidores de radar.

Iguchi *et ál.* (2000) menciona que para el caso específico del Perú se ha encontrado que el producto 2A25 del radar de precipitación TRMM, es la fuente de precipitación más apropiada para analizar la variabilidad espacial de la precipitación y los patrones estacionales. Además, el producto PISCOp v2.1 ha introducido diversas modificaciones y mejoras en comparación con las versiones anteriores los cuales se enumeran a continuación:

- Automatización al 100% de todo el proceso de PISCOp.
- Se ha cambiado la completación por Qm de CHIRP a CHIRPM lo que implica un método de estimación diferente.
- Nuevo método de ajuste del variograma teórico (Tratamiento de Outliers).



- Se ha sustituido la completación diaria basada en el método IDW por el método CUTOFF (modificado) lo que implica un enfoque diferente en la interpolación de datos.
- Mejora del control de calidad automático (Implausible Detect Function).
- Relajación de los umbrales para la completación por estaciones vecinas.
- Interpolación a paso mensual de KED a ROK (Cambio de Gstat a Constrained Kriging).
- Cambio de la climatología TRMM 2A25 por PISCOp climatología.
- Transformación a base logarítmica.

#### **2.2.16.2.Producto PISCO – Temperatura V1.1**

Según Huerta *et ál.* (2018) PISCOt V1.1 se crea mediante la integración de datos procedentes de estaciones climatológicas convencionales, información satelital (LST) y variables topográficas (Z, X, Y y TDI). La construcción de PISCOt V1.1 es un proceso que implica tres pasos clave desde una perspectiva climatológica. “En primer lugar, se realiza una combinación a nivel de normales climatológicas (nT); en segundo lugar, se interpola la anomalía mensual/diaria (dT) utilizando la variación mensual de las normales previamente combinadas y finalmente, se suma la normal interpolada (G\_nT) y la anomalía interpolada (G\_dT) para obtener T”. Este proceso se aplica de manera idéntica e independiente tanto para las temperaturas máximas (Tx) como para las temperaturas mínimas (Tn).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

##### 3.1.1. Ubicación geográfica

El desarrollo de la presente investigación se encuentra ubicado en la cuenca del río Huancané, en las siguientes coordenadas:

Este : 376030 – 468557

Norte : 8301965 – 8397410

Altitud : 3,806 – 5,100 m.s.n.m.

##### 3.1.2. Ubicación hidrográfica

La cuenca del río Huancané, hidrográficamente se encuentra ubicada en:

Región Hidrográfica : Titicaca

Sistema Hídrico : TDPS

Y limita con las siguientes cuencas hidrográficas:

Este : Cuencas río Suches y río Huaycho.

Oeste : Cuenca río Azángaro e intercuenca Ramis.

Norte : Cuenca río Azángaro.

Sur : Zona circunlacustre del lago Titicaca.

### 3.1.3. Ubicación política

Políticamente la cuenca del río Huancané se encuentra en:

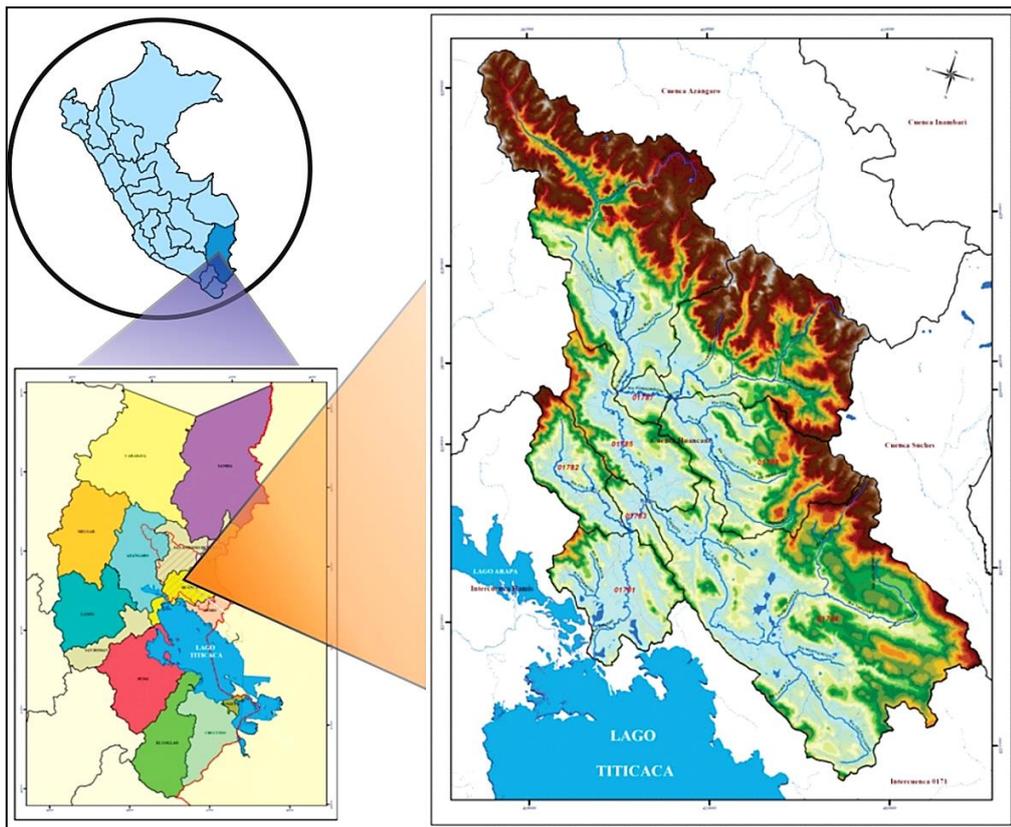
Región : Puno

Provincias : Huancané, Moho, San Antonio de Putina y Azángaro.

Distritos : Huancané, Huatasani, Cojata, Putina, Moho, Pedro Vilca Apaza, Huayrapata, Quilcapuncu, Rosaspata, Ananea, Inchupalla, Muñani, Potoni y Vilque Chico.

### Figura 9

*Mapa de ubicación del área de investigación*



Nota: La figura muestra la ubicación geográfica de la cuenca del río Huancané. Adaptado de [www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe)



## **3.2. MATERIALES**

Los materiales y equipo necesarios para el desarrollo de esta investigación fueron las siguientes:

### **3.2.1. Hardware**

- Laptop Intel Core I7 HP Decima generación.
- Impresora Láser a color HP.

### **3.2.2. Software**

- Microsoft Office 2016.
- Microsoft Excel 2016.
- Trend.
- ArcGis 10.4.2.
- Modelo Hidrológico GR2M.
- RStudio.

### **3.2.3. Cartografía, Imagen e Información**

- Modelo de elevación digital (DEM).
- Imagen satelital de LandSat.
- Información Hidrometeorológica (precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial), datos interpolados peruanos PISCO.
- Información hidrométrica (caudal).
- Información climática futura (GCM).



### 3.3. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Según Arias (2012), es una investigación de tipo aplicada por que se utilizaron conocimientos teóricos en situaciones reales con el objetivo de generar datos, proyecciones, resultados y recomendaciones prácticas que puedan ser utilizadas para la toma de decisiones informadas con respecto a la oferta hídrica en la cuenca.

Además, tal como lo señala Hernández *et ál.* (2016) el enfoque adoptado en este estudio es de naturaleza cuantitativa, ya que se basa en la recopilación de datos de una muestra que posteriormente se someten a un análisis matemático o estadístico.

Tiene un diseño no experimental, “ya que no existe manipulación directa de las variables ni se establece un control sobre las condiciones del estudio ni tampoco se han llevado a cabo experimentos” (Arias, 2012, p. 31).

Así mismo es de nivel explicativo “ya que se busca las causas y factores que influyen en la problemática, asimismo el método utilizado fue hipotético/deductivo el cual se fundamenta en la formulación de una hipótesis inicial, seguida por la deducción lógica de consecuencias que pueden ser puestas a prueba o refutadas a través de evidencia empírica” (Hernández *et ál.*, 2016, p. 127).

### 3.4. METODOLOGÍA

La razón principal de proyectarse hacia un horizonte a mediano plazo (2025 – 2050) es poder identificar de manera clara las señales del cambio climático en la simulación de los caudales. Asimismo, este horizonte evaluado se basa en el informe realizado por el panel de expertos del IPCC, en donde indica que en el escenario SSP5-8.5 es el futuro que hay que evitar y que los niveles actuales de emisiones de CO<sub>2</sub> se duplican aproximadamente en el 2050. En ese sentido, el presente trabajo de investigación

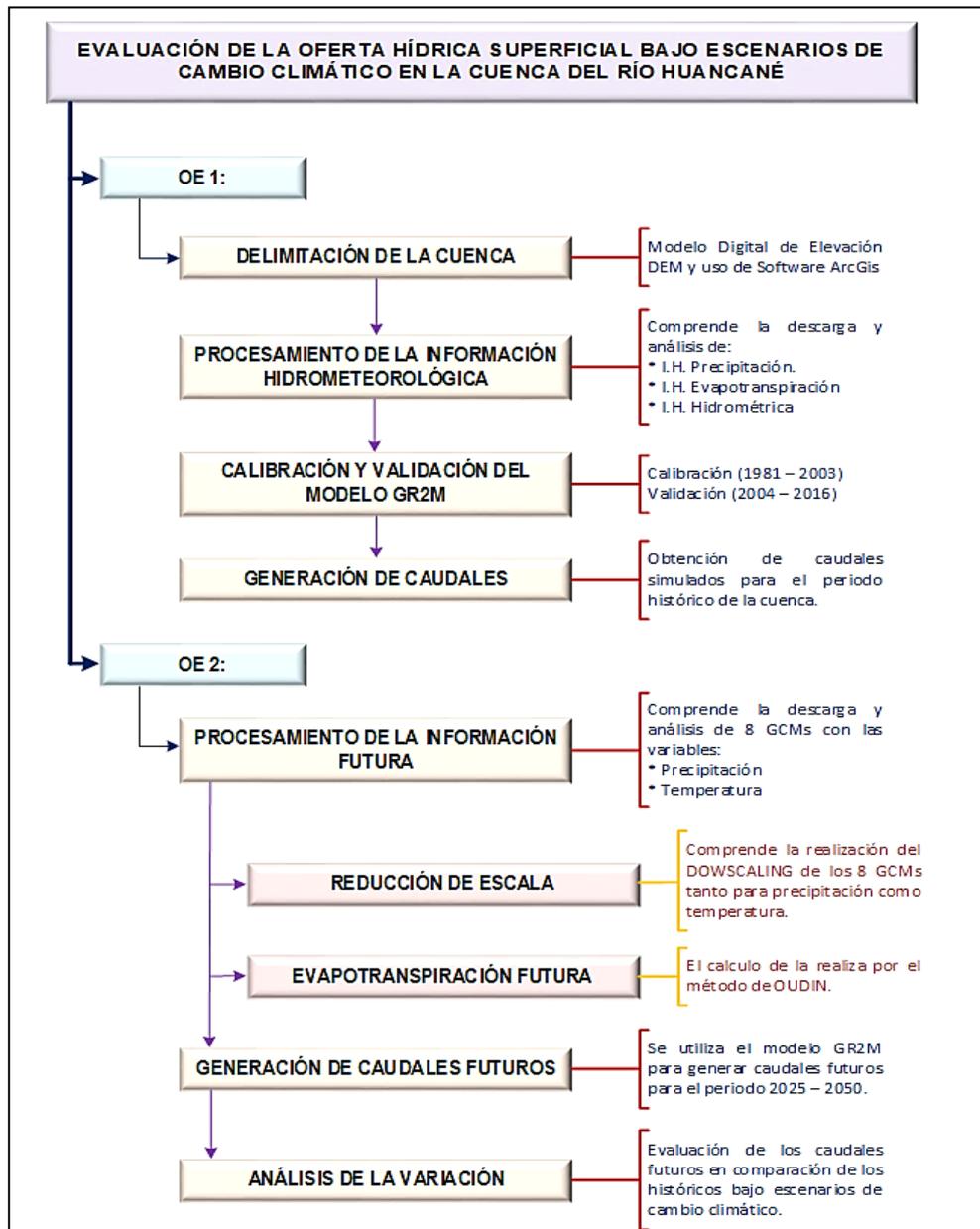


ha desarrollado un proceso metodológico que se muestra en la figura 10 y se enfoca en el estricto cumplimiento de los objetivos trazados y para ello se realiza los siguientes procedimientos: OE1: (a) Delimitación de la cuenca del río Huancané, (b) Procesamiento de la información hidrometeorológica, que implica el análisis de los datos históricos de precipitación y evapotranspiración, (c) Calibración y Validación del modelo hidrológico GR2M y (d) Generación de caudales medios mensuales. OE2: (e) Procesamiento de la información futura, que implica la descarga, análisis de los GCMs, (f) Reducción de escala (Downscaling), (g) Calculo de la Evapotranspiración Futura, por medio de la metodología de Oudin, (h) Simulación de caudales el horizonte 2025 – 2050 y (i) Evaluación de la variación de la oferta hidra futura.

Estos procedimientos permitirán obtener una comprensión más precisa de los posibles efectos del cambio climático en la cuenca del río Huancané durante el período mencionado.

**Figura 10**

*Esquema metodológico de la investigación*



Nota: Esta figura muestra el esquema metodológico que se utilizó para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

### 3.4.1. Proceso de calibración y validación del modelo hidrológico GR2M

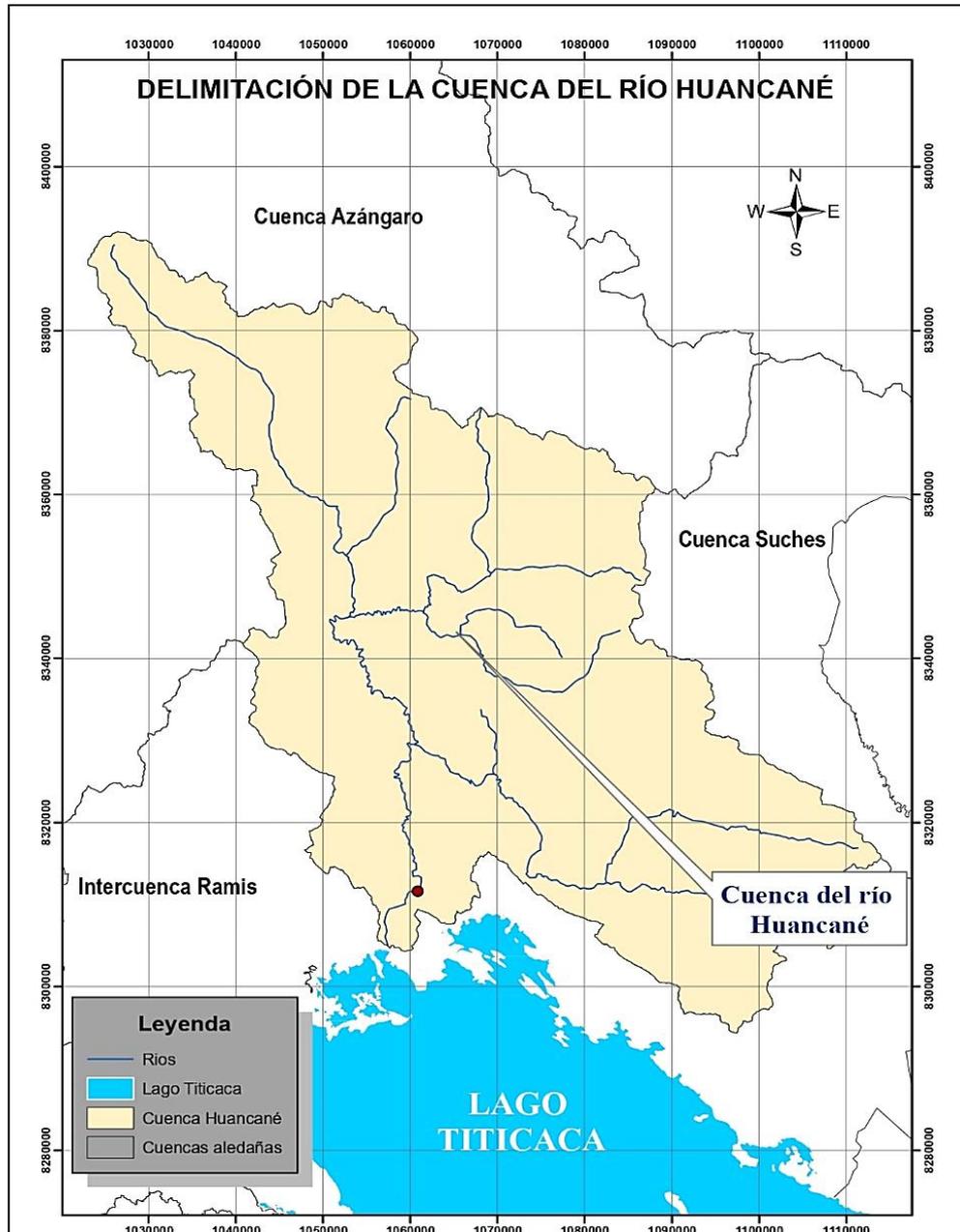
#### 3.4.1.1. Delimitación de la cuenca del río Huancané

La delimitación de cuenca Huancané fue realizada tomando en cuenta el Modelo Digital de Elevación (DEM) generado a partir de datos

de interferometría SAR (conocido como ALOS PALSAR), el cual tiene una resolución espacial de pixel de 30 metros y es gracias a este DEM, se puede generar un banco de datos topográficos de alta resolución.

**Figura 11**

*Delimitación de la cuenca del río Huancané*



Nota: La figura muestra la delimitación de la cuenca del río Huancané por medio del software AecGis.

### 3.4.1.2. Procesamiento de la información hidrometeorológica

- **Precipitación histórica**

En este estudio, se utilizó la información obtenida del conjunto de datos meteorológicos de alta resolución PISCO v2.1 (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) en su versión mensual, este conjunto de datos de alta resolución utilizado, conocido como PISCOp, consiste en registros mensuales de precipitación con una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , que abarca una serie de datos desde el año 1981 hasta el 2016, estos datos están disponibles de forma gratuita en la siguiente dirección web: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/.Prec/?Set-Language=es>.

El uso de estos datos de alta calidad y amplia cobertura permite un análisis más preciso de los patrones de precipitación, logrando así identificar los periodos con mayor presencia de lluvias como también los periodos en donde su presencia ha sido menor, en ese sentido esta base de datos a proporcionado una base sólida para la evaluación de los escenarios futuros y el impacto del cambio climático en la cuenca del río Huancané, la información se detalla en anexo 2.

- **Evapotranspiración histórica**

Para el análisis de la variable de evapotranspiración histórica de la cuenca en este estudio, se utilizaron los datos grillados del producto experimental PISCOpet V.1. Este producto se genera a partir de los datos de temperatura mínima y temperatura máxima grillados del producto

PISCOtemp V1.1, asimismo estos datos de evapotranspiración potencial obtenidos de PISCOpet presentan una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  y cubren todo el territorio peruano (Aybar *et ál.*, 2020).

Al igual que en el caso de la variable de precipitación, se utilizaron datos desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016 para integrarlos en el modelo hidrológico GR2M y la disponibilidad de esta información detallada y de amplia cobertura se encuentra disponible en la siguiente dirección web:

<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SEAMHI/.HSR/.PISCO/.PE T/?Set-Language=es>.

Estos datos fueron utilizados para examinar las variaciones en la evapotranspiración a lo largo del tiempo para visualizar las fluctuaciones y tendencias a largo plazo en la evapotranspiración en la cuenca del río Huancané. Estos resultados son de gran importancia para comprender los patrones de consumo de agua en la zona y su relación con los factores climáticos y ambientales.

**Tabla 2**

*Estaciones meteorológicas influyentes en la cuenca del río Huancané*

N°	Estación	Código	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)
1	Ramis	270200	15°15'20.91"	69°52'26.14"	3826 msnm
2	Cojata	115053	15°0'42.45"	69°21'40.15"	4347 msnm
3	Putina	114093	14°55'15.6"	69°52'32.5"	3861 msnm
4	Muñani	114042	14°46'1"	69°57'6.5"	3932 msnm
5	Moho	115038	15°23'17.15"	69°29'3.09"	3836 msnm
6	Ananea	114050	14°40'34.6"	69°32'1.88"	4660 msnm

Nota: Adaptado de <https://www.senamhi.gob.pe/>.

En la Tabla 2 se muestran las 6 estaciones meteorológicas clave ubicadas en la cuenca del río Huancané, estas estaciones proporcionaron información crucial que permitió realizar un análisis de consistencia detallado de las variables climáticas en la zona de estudio.

- **Información hidrométrica**

En la cuenca del río Huancané, se cuenta con una única estación hidrométrica ubicada en el Puente Carretera Huancané la cual es gestionada por el SENAMHI, esta estación proporciona una serie histórica de caudales medios diarios, la cual ha sido utilizada en el presente estudio de investigación. La información hidrométrica correspondiente al periodo de 1981 a 2016 ha sido fundamental para llevar a cabo el análisis en esta investigación y en la tabla 3 se detalla la ubicación y características de la estación hidrométrica en la cuenca del río Huancané.

**Tabla 3**

*Ubicación de la estación hidrométrica puente Huancané*

Nombre	ID Estación	Cuenca	Coordenadas UTM (WGS-84)		Altitud (msnm)
			Este (m)	Norte (m)	
Puente Huancané	210201	Huancané	414875	8317577	3821

Nota: Adaptado de <https://www.senamhi.gob.pe/>.

### 3.4.1.3. Análisis de consistencia de la información hidrometeorológica

Este análisis es una técnica importante para evaluar la calidad y la coherencia de los datos hidrométricos lo que permite mejorar la precisión y la confiabilidad de los modelos hidrológicos ya que nos permite identificar posibles errores o discrepancias en los datos, al detectar estos



errores y corregirlos, se mejora la precisión y la confiabilidad de los datos y por lo tanto, la precisión de los modelos hidrológicos.

- **Análisis de consistencia en los datos de precipitación**

Para la correcta implementación de la información del producto PISCOp se examinó minuciosamente, utilizando el Método de Vector Regional (MVR). La premisa básica se basa en la presunción de que los valores de precipitación anual total en una zona climática dada con un régimen de lluvia, son en gran medida proporcionales, con cambios aleatorios menores cada año causados por la distribución de la lluvia dentro de la región. Por ello, se evalúan las siguientes variables: a) Se compararon el Vector Regional (VR) y las desviaciones estándar de los desvíos (DED) de las estaciones, en donde un valor alto de DED indica que la estación tiene una desviación significativa con respecto al promedio regional, lo cual puede sugerir problemas de calidad de los datos o la posibilidad de que la estación no pertenezca a la misma zona climática. Por otro lado, si el valor de DED es bajo, significa que la estación se encuentra dentro del rango esperado; b) Se examinó la relación entre el VR y la estación. Si la zona es homogénea climáticamente, se espera una alta correlación entre todas las fuentes de datos.

- **Análisis de consistencia en los datos de caudal**

En cuanto al análisis de consistencia realizada a la información hidrométrica de la cuenca del río Huancané se realizó en dos etapas la primera consistió en un análisis visual de los datos históricos de caudal y la segunda en un análisis estadístico en donde se realizó la prueba t de Student y la prueba de regresión lineal para la tendencia.

La prueba t de student es una de las pruebas estadísticas más comunes en el análisis hidrológico y se utiliza para evaluar la calidad de los datos de caudales, esta prueba se basa en la hipótesis nula de que las medias de dos periodos son iguales (Molina *et ál.*, 2020) y para probar esta hipótesis, se utilizó el software TREND y está representada por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}}$$

Donde:

m y n : Número total de observaciones (1er y 2do periodo).

S : Desviación estándar

$\bar{x} - \bar{y}$  : Medias de los datos (1er y 2do periodo).

Para realizar las comparaciones entre t calculado ( $t_c$ ) y t tabular ( $t_t$ ), tomamos en cuenta los criterios establecidos para la prueba t de Student que se detallan en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Criterios de decisión para la prueba t de Student*

Valor t	Criterio
Si: $ t_c  \leq t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 = \bar{x}_2$	Siendo las medias $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$ , estadísticamente no se debe realizar proceso de corrección.
Si: $ t_c  > t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$	Siendo las medias $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ , estadísticamente se debe corregir la información.

Nota: Criterios de decisión de la prueba t de Student. Tomado de Molina *et ál.* (2020).

Posteriormente, a la evaluación de la prueba t de student se realizó la prueba de regresión lineal para poder evaluar si los datos presentan una

tendencia lineal, para ello se utilizó el software TREND, en donde dicha prueba está representada por la siguiente ecuación:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Dónde: el intercepto estimado está dado por:  $a = \bar{y} - b\bar{x}$  y el estadístico de prueba S está dado por:  $s = \frac{b}{\sigma}$  , :

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)}{n(n-2)(n^2-1)}}$$

La prueba estadística S, está basada en una versión de 2 grados de libertad ( $n - 2$ ) de la distribución t de student.

#### **3.4.1.4. Calibración y validación del modelo hidrológico GR2M**

En esta etapa se utilizó el modelo hidrológico GR2M en su versión Excel y para el ingreso de los datos se tomó un año como período de calentamiento, esto se debe a que es una práctica estándar ignorar los resultados del primer año al calcular los flujos estimados y esto es debido a que existe la posibilidad de que surjan inconsistencias al comienzo de un período de simulación como resultado de la selección de las condiciones iniciales (Llauca *et ál.*, 2021). Asimismo, se dividió la serie histórica en tres partes, donde 2/3 de la serie forma parte del proceso de calibración y el 1/3 restante para el periodo de validación. Bajo esas recomendaciones para la calibración del modelo se ingresaron los datos de entrada para la cuenca Huancané como el área, la información de precipitación y evapotranspiración de 12 meses que corresponde al año 1981, para el

periodo de calentamiento y 263 meses para el periodo evaluado que corresponde de los años 1982 hasta 2003. Asimismo, se utilizó el programa Solver de Microsoft Excel; que, a través de una función objetivo, ajusta automáticamente los parámetros  $X_1$  y  $X_2$  del modelo, con el fin de maximizar el valor del coeficiente de Nash (Charles *et ál.*, 2007).

Para confirmar la calidad de los resultados se utilizó la medida de bondad de ajuste de coeficiente de determinación  $R^2$  y la raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE.

- **Coficiente de determinación ( $R^2$ );** este coeficiente describe la proporción de la varianza en los datos medidos explicada por el modelo. Tiene un rango de 0 a 1, donde valores altos indican menos error de la varianza. Valores mayores a 0.5 son considerados como aceptables y la ecuación que la representa se muestra a continuación:

$$R^2 = \frac{\sum XY - (\sum X \sum Y)/n}{\sqrt{(\sum X^2 - (\sum X)^2/n)(\sum Y^2 - (\sum Y)^2/n)}}$$

Dónde: X, Y: variables y  $n$ : número de variables.

- **Error cuadrático medio (RMSE),** es un coeficiente que permite evaluar la discrepancia entre dos conjuntos de datos, cuantificando la diferencia entre ellos. En otras palabras, el RMSE proporciona una medida de qué tan cercanos son los valores predichos en comparación con los valores observados. Un valor de RMSE más pequeño indica una mayor proximidad entre los conjuntos de valores. La ecuación que calcula el RMSE se define como:



$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

Dónde:

$P_i$ : valores predichos,  $O_i$ : valores observados y  $n$ : número total de datos.

Después de la calibración del modelo GR2M se llevó a cabo la validación, se utilizó el 1/3 restante de los datos y se usaron los mismos valores de los parámetros  $X_1$  y  $X_2$ , que se obtuvieron en la calibración, en este caso no se presenta un periodo de calentamiento por lo que no es necesario configurar esos parámetros, en la validación se consideró 156 meses iniciando en el año 2004 hasta el año 2016. Durante esta etapa, se evaluó el rendimiento del modelo tanto gráficamente como estadísticamente, utilizando los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el Error Cuadrático Medio (RMSE). Estos procedimientos nos permitieron obtener los caudales simulados para el periodo de 1981 a 2016 (Anexo 3), lo cual resulta de gran utilidad para analizar y comparar las variaciones en los caudales a lo largo del tiempo.

#### **3.4.1.5. Análisis de sensibilidad de los parámetros $X_1$ y $X_2$**

El análisis de sensibilidad se refiere a una representación de la variedad de valores que se asignan a los parámetros en un modelo, con el fin de evaluar su impacto en el funcionamiento del mismo. Este análisis cumple varios propósitos, que incluyen la determinación de la importancia relativa de cada parámetro, la comprensión de cómo opera el modelo y la

detección de si el modelo contiene un exceso de parámetros, es decir, si algunos de ellos no influyen significativamente en sus resultados.

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, se ejecutó el modelo variando individualmente cada parámetro de interés, ya sea  $X_1$  o  $X_2$ , mientras que el otro parámetro se mantuvo constante. Además, es importante señalar que este análisis de sensibilidad se llevó a cabo utilizando los parámetros derivados durante la etapa de calibración del modelo, específicamente para la cuenca del río Huancané.

### **3.4.2. Proceso de simulación y análisis de la variación de la oferta hídrica**

Para realizar la simulación de la oferta hídrica futura fue necesario descargar los GCMs y posteriormente seleccionarlos por medio de un ensamble de modelos estadísticos como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación múltiple. Posterior a ello se realizó el downscaling para finalmente simular los caudales para el horizonte 2025 – 2050 y cumplir con el segundo objetivo de esta investigación.

#### **3.4.2.1. Descarga de los modelos climáticos globales**

Los modelos climáticos globales (GCM), necesarios para este trabajo investigativo fueron aquellos que necesariamente cuenten con información de precipitación y temperatura, estos modelos fueron obtenidos de Climate Explorer que es un servidor que recopila herramientas de análisis y una gran cantidad de datos climáticos entre ellos 40 GCMs del CMIP6 y puede ser accedido por medio del siguiente enlace: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>, por medio de servidor se seleccionó el escenario SSP5-8.5, de los cuales se descargaron

38 GCMs teniendo en cuenta que estos tengan información con respecto a la variable precipitación y temperatura.

**Figura 12**

*Descarga de GCMs del servidor Climate Explorer*

The screenshot shows the Climate Explorer website interface. At the top, there is a navigation bar with links for Home, Help, News, About, World weather, Effects of ENSO, and Climate Change Atlas. Below the navigation bar, there is a table with columns for model, exp, tas, tas min, tas max, pr, rsds, and psl. The table is divided into three sections: 2 ACCESS-ESM1-5, 4 BCC-CSM2-MR, and 5 CAMS-CSM1-0. Each section contains rows for different scenarios (ssp126, ssp245, ssp370, ssp585) with radio buttons for selection. The 'pr' column for the ssp585 scenario in the ACCESS-ESM1-5 section is selected.

model	exp	tas	tas min	tas max	pr	rsds	psl
2 ACCESS-ESM1-5	ssp126	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ssp245	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ssp370	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ssp585	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
model	exp	tas	tas min	tas max	pr	rsds	psl
4 BCC-CSM2-MR	ssp126	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ssp245	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ssp370	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ssp585	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5 CAMS-CSM1-0	ssp126	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

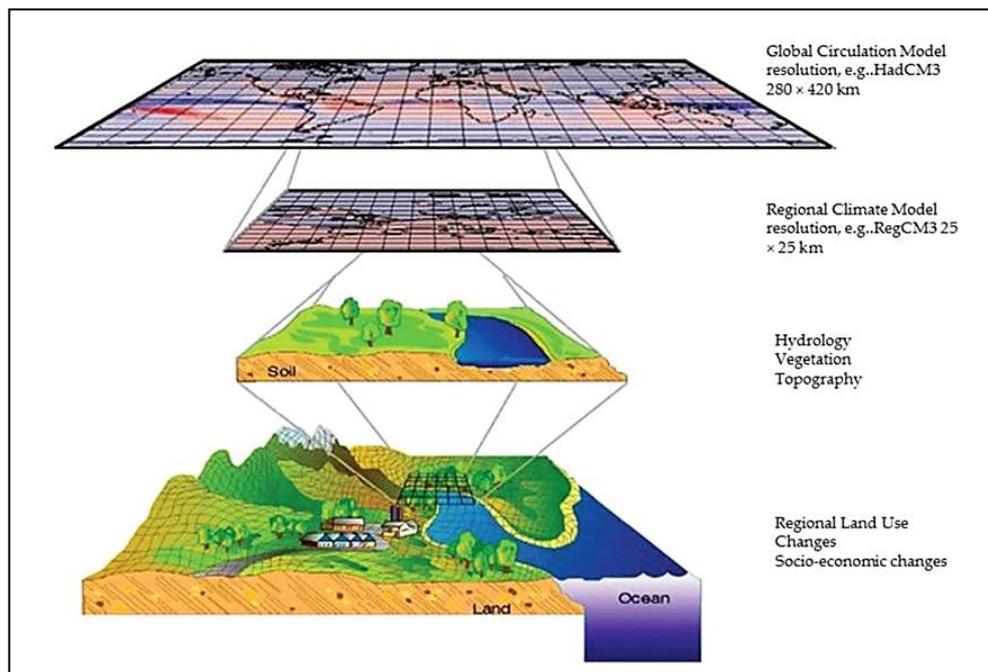
Nota: La figura muestra la página del servidor Climate Explorer.

### 3.4.2.2. Reducción de escala o downscaling

Dado el amplio alcance de la resolución espacial de los Modelos Climáticos Globales (GCM), no resulta viable su aplicación directa en escalas más pequeñas, como lo señala Rauscher *et ál.* (2010) y para abordar este desafío, se implementó un enfoque de downscaling estadístico.

**Figura 13**

*Esquema de la reducción de escala*



Nota: Tomado de Khan & Pilz (2018).

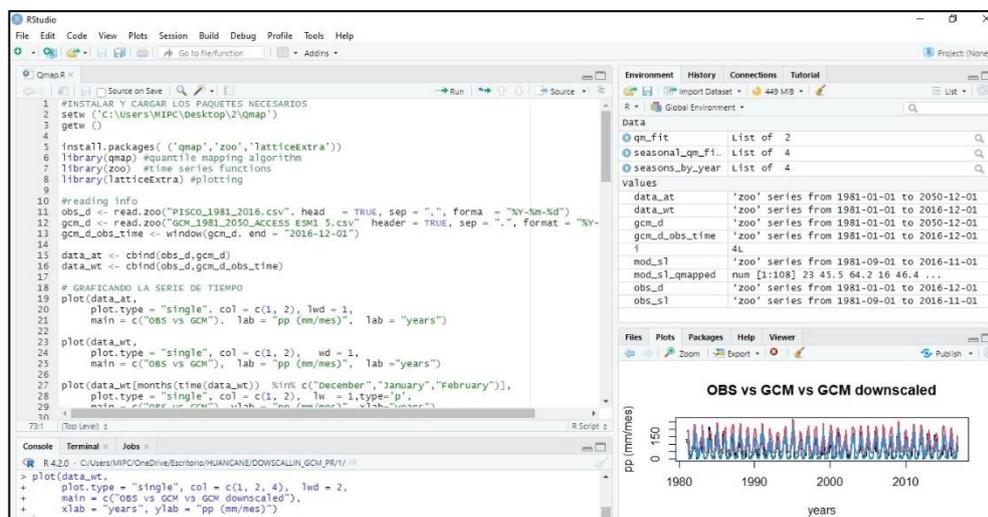
En el proceso de downscaling, para esta investigación se emplearon datos climáticos procedentes del conjunto de datos meteorológicos de alta resolución PISCO, de precipitación (PISCOp v2.1) y temperatura (PISCOt v1.1) los cuales cuentan con series de datos observados de 1981 al 2016, estos datos fueron utilizados para calibrar y ajustar las series temporales de los GCMs. Para llevar a cabo el downscaling estadístico se empleó el método de corrección de sesgo por medio de un proceso de ajuste lineal.

Para abordar este proceso se aplicó un factor de corrección a la media, varianza y/o quintiles de la serie temporal del modelo, es decir se contrastó las curvas de duración mensual, utilizando datos históricos recopilados junto con los resultados obtenidos del proceso de ajuste espacial. A partir de esto, se crean funciones de transferencia que se

aplican tanto a las mediciones de precipitación como a las de temperatura con el propósito de acercarla a la variable observada y obtener una serie temporal corregida. Este proceso se llevó a cabo empleando el software libre RStudio en la versión 2023.09 y los packages qmap, zoo, latticeextra y una serie de códigos que se visualizan en el anexo 4.

**Figura 14**

*Reducción de escala de los GCMs en el software RStudio*



Nota: La figura muestra el proceso seguido en la reducción de escala en el software RStudio.

### 3.4.2.3. Selección de modelos climáticos globales

En el presente estudio se seleccionaron ocho GCMs del CMIP6 en el experimento SSP5-8.5 y para dicha selección se tomó en cuenta lo mencionado por Pulido *et ál.* (2021) quien afirma que los “modelos climáticos son una herramienta esencial para estudiar y predecir el cambio climático, sin embargo, su utilidad depende de cuán realistas simulen las estadísticas del clima actual”. En tal sentido, para la selección de los GCMs se tuvo en cuenta lo siguiente: a) el modelo que mayor información presente con respecto a la variable precipitación; b) el modelo que mayor

información presente con respecto a la variable temperatura; c) el modelo que mayor similitud presente con respecto a las variables precipitación y temperatura con los datos históricos PISCO y d) el modelo que presenta mejor coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de correlación múltiple.

**Tabla 5***Descripción de los modelos climáticos globales seleccionados*

<b>Modelo</b>	<b>Institución</b>	<b>Variabes</b>	<b>Lanz.</b>	<b>Escenario</b>
ACCESS-ESM1-5	Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth	Precipitación Temperatura	2019	SSP5-8.5
BCC-CSM2-MR	Centro Climático de Beijing	Precipitación Temperatura	2017	SSP5-8.5
CanESM5-CanOE	Centro Canadiense de Modelado y Análisis Climático	Precipitación Temperatura	2019	SSP5-8.5
CMCC-CM2-SR5	Centro Euro-Mediterráneo per I Cambiamenti Climatici	Precipitación Temperatura	2016	SSP5-8.5
GFDL-ESM4	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos	Precipitación Temperatura	2018	SSP5-8.5
MIROC-ES2L	Instituto de Investigación de la Atmósfera y los Océanos	Precipitación Temperatura	2018	SSP5-8.5
MRI-ESM2-0	Instituto de Investigación Meteorológica, Japón	Precipitación Temperatura	2017	SSP5-8.5
NorESM2-MM	Centro del Clima de Noruega	Precipitación Temperatura	2017	SSP5-8.5

Nota: Adaptado de <https://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>

#### 3.4.2.4. Cálculo de la evapotranspiración futura

El cálculo de la evapotranspiración según la metodología de Oudin implica el uso de una ecuación que se obtiene a partir de un análisis de rendimiento realizado sobre más de 25 formulaciones de evapotranspiración existentes y que considera la temperatura media, combinando simplicidad y eficiencia presentando una buena adaptación a los modelos lluvia – escorrentía, esta metodología ha sido ampliamente utilizada en estudios hidrológicos y se considera una técnica confiable para calcular la evapotranspiración potencial en diferentes regiones y escalas temporales, ya que ha sido aplicada en más de 300 cuencas de Australia, Francia y Estados Unidos demostrando así su alto rendimiento (Oudin *et ál.*, 2005).

Según Oudin *et ál.* (2005) recomienda la siguiente fórmula para calcular la evapotranspiración:

$$PE = \frac{R_e}{\lambda \rho_w} * \frac{T_\alpha}{100} * (m/s)$$

Dónde:

Re : Radiación extraterrestre, depende de la latitud y el día juliano (J/m<sup>2</sup>/s).

λ : Flujo de calor latente. (2.45\*10<sup>6</sup> J/kg)

ρ<sub>w</sub> : Densidad del agua. (1000 kg/m<sup>3</sup>)

T<sub>α</sub> : Temperatura media mensual. (°C)

- **Formulación en Excel**

Los cálculos de evapotranspiración fueron realizados por medio de la herramienta formulada en el software Excel, en cual se encuentra insertada la formulación propuesta por Oudin *et ál.* (2005), figura 15.

Para el llenado de los datos en la herramienta en Excel, primeramente, se tuvo en cuenta la latitud en grados decimales, luego se procedió a convertirlo en radianes y antes de ingresar el valor se tuvo en cuenta el hemisferio donde se ubica la cuenca del río Huancané.

**Figura 15**

*Cálculo de evapotranspiración en formato Excel*

Potential evapotranspiration (PE) calculation using the formulation proposed by Oudin et al. (2005)															
References:															
For the mathematical details of the PE formulation, see: Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. and Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology 303(1-4), 230-306.															
For the calculation of extra-atmospheric global radiation, see Appendix C of the article by Morton, F.I., 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. Journal of Hydrology 66 (114), 1-76.															
Fill in yellow cells with data															
Latitude (degree):		-15.0												Annual PE (mm/y)	667.0
Temperature (°C)	Julian day	teta	cosGz	Gz	cosOM	OM	Eta	cosPz	Global radiation (MJm2/d)	PE (mm/d)					
10.0	ENERO	15	-0.373	0.994	0.111	-0.105	1.676	1.032	0.628	484.59	2.543				
11.0	FEBRERO	45	-0.241	1.000	0.020	-0.066	1.637	1.024	0.634	473.58	2.663				
10.1	MARZO	75	-0.047	0.977	0.215	-0.012	1.583	1.009	0.621	442.86	2.348				
9.6	ABRIL	105	0.160	0.912	0.422	0.043	1.527	0.992	0.582	393.66	2.020				
7.8	MAYO	135	0.325	0.833	0.587	0.090	1.480	0.977	0.533	343.92	1.544				
7.4	JUNIO	165	0.406	0.785	0.667	0.115	1.456	0.968	0.504	316.55	1.377				
6.3	JULIO	195	0.380	0.801	0.642	0.107	1.464	0.967	0.513	324.19	1.289				
6.8	AGOSTO	225	0.255	0.869	0.517	0.070	1.501	0.975	0.556	362.80	1.500				
8.3	SEPTIEMBRE	255	0.064	0.947	0.326	0.017	1.554	0.989	0.604	413.91	1.934				
9.5	OCTUBRE	285	-0.144	0.993	0.118	-0.039	1.610	1.006	0.631	455.54	2.323				
10.3	NOVIEMBRE	315	-0.314	0.999	0.052	-0.087	1.658	1.022	0.632	477.45	2.556				
9.8	DICIEMBRE	345	-0.403	0.990	0.141	-0.114	1.685	1.031	0.625	484.73	2.514				

Nota: En la figura se muestra el desarrollo del cálculo de la evapotranspiración.

Como se puede observar en la figura 15, los valores de temperatura media mensual obtenida de los GCMs son ingresados en la columna de color amarillo y los resultados obtenidos figuran en la columna de color gris y estos se encuentran en (mm/d), posteriormente estos resultados son convertidos a periodos mensuales para realizar las proyecciones del

periodo 2025 – 2050. Este procedimiento se repite para los 8 modelos climáticos globales y los resultados se detallan en el anexo 5.

#### **3.4.2.5. Generación de caudales futuros para el horizonte 2025 – 2050 bajo escenarios de cambio climático**

Para realizar las proyecciones y/o simulaciones de la oferta hídrica para el periodo 2025 – 2050, es necesario la base de datos de la variable precipitación en (mm), que se obtuvo en la etapa de la selección de los ocho GCMs seleccionados (tabla 5) conjuntamente con los datos de evapotranspiración de referencia mensual en (mm) los cuales fueron calculados por medio de la metodología de Oudin, en donde se utiliza la temperatura media y la radiación global que depende de la latitud y el día juliano (Oudin *et ál.*, 2005).

Una vez realizado los pasos anteriormente mencionados se procedió a determinar el régimen de caudales en el horizonte 2025 – 2050 por medio del modelo hidrológico GR2M, que es una herramienta muy utilizada para la modelación hidrológica de diversos escenarios el cual está desarrollado en Excel para los 8 GCMs seleccionados. Estos resultados son de mucha utilidad para poder evaluar la variación de la oferta hídrica futura en la cuenca del río Huancané y se detallan en el anexo 6.

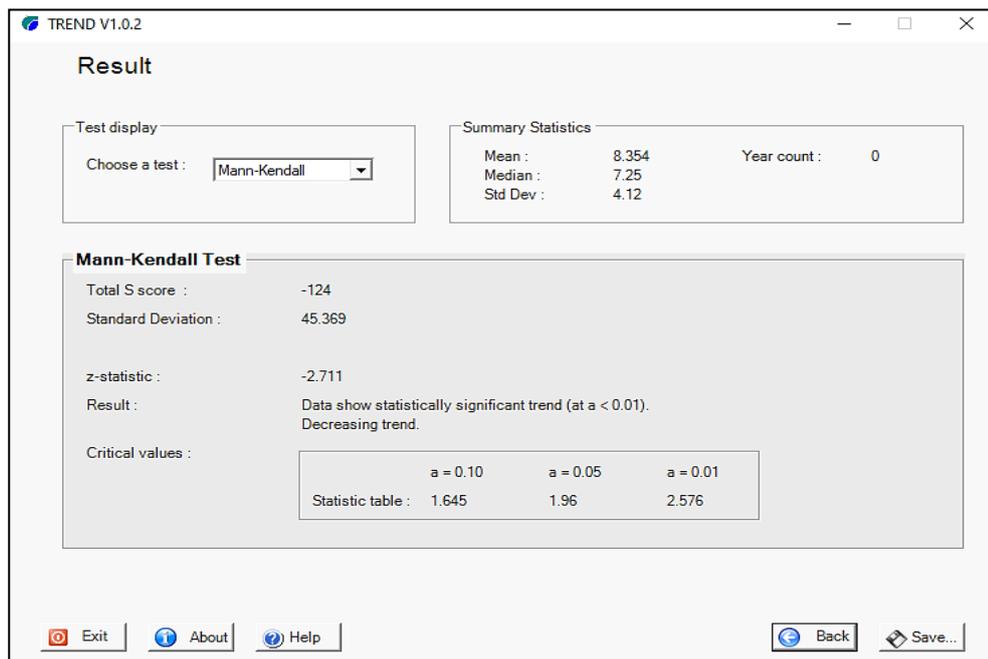
#### **3.4.2.6. Análisis de tendencia a los caudales futuros de los GCMs**

Para el análisis de tendencia de los caudales futuros de los 8 GCMs seleccionados se utilizó la prueba de Mann-Kendall, esta prueba es utilizada comúnmente para detectar la presencia de tendencias a una serie de datos a lo largo del tiempo (Alencar y Silva 2017). Para la realización

de esta prueba se utilizó el software Trend, para ello se ordenaron cronológicamente los datos de caudal para el periodo 2025 – 2050 y fueron insertados al software y fueron sometidos a la prueba de Mann-Kendall, este procedimiento se repitió para todos los GCMs (Anexo 7).

**Figura 16**

*Análisis de tendencia a los caudales futuros*



Nota: La figura muestra el cálculo realizado para las tendencias de los caudales futuros por medio del software Trend V1.0.2.

En este estudio se utilizó un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ . Por lo tanto, cuando el valor estadístico de Z es igual a cero, se aceptará la hipótesis nula al nivel del 5%, lo que significa que no hay una tendencia evidente, si el resultado de Z es diferente a cero se tendrá en cuenta el criterio de decisión de la tabla 6.

**Tabla 6***Criterio de decisión de la significancia del test de Mann-Kendall*

Significancia	Simbología	Estadístico Z
<b>Sin tendencia</b>	ST	0
<b>Tendencia significativa creciente</b>	TSC	> + 1.96
<b>Tendencia significativa decreciente</b>	TSD	< - 1.96
<b>Tendencia no significativa creciente</b>	TNSC	< + 1.96
<b>Tendencia no significativa decreciente</b>	TNSD	> - 1.96

Nota: Tomado de Alencar y Silva (2017).

### 3.4.2.7. Análisis de variación de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático en el horizonte 2025 – 2050

Para la variación se realizaron análisis de los caudales, utilizando los resultados obtenidos en las simulaciones futuras de los 8 GCMs seleccionados: a) BCC-CSM2-MR, b) ACCESS-ESM1-5, c) CanESM5-CanOE, d) CMCC-CM2-SR5, e) MIROC-ES2L, f) MRI-ESM2-0, g) GFDL-ESM4 y h) NorESM2-MM, los análisis de estos modelos abarcaron el estudio del comportamiento de los caudales a lo largo del tiempo y las tendencias que estos tienen hacia el futuro, asimismo los resultados fueron agrupados a series anuales y mensuales para el análisis de variación porcentual en comparación con el periodo histórico. Para determinar las variaciones de los caudales se tuvo en cuenta la ecuación propuesta por (Cepeda, 2017).

$$\Delta Q_i = \frac{Q_{esci}}{Q_{hist}}$$

Donde:

 $\Delta Q$  : Variación de caudal en el mes i $Q_{esci}$  : Caudal en el escenario futuro

*Q<sub>hist</sub>* : Caudal histórico del mismo mes

Estos cálculos permitieron realizar un análisis estacional en la cuenca, de la misma forma se agruparon a una serie anual para el análisis de variación de los modelos, estos análisis nos permitieron determinar el comportamiento esperado de la serie de caudales hasta el año 2050, lo que nos permite comprender el impacto del cambio climático en la oferta hídrica superficial y obtener conclusiones sobre cómo se verá afectada la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Huancané debido a estos cambios climáticos.

- **Análisis de incertidumbre a los modelos**

La incertidumbre en los caudales de los GCMs se refiere a la falta de certeza o precisión en las estimaciones o predicciones, esta incertidumbre puede deberse a una variedad de factores y es esencial tenerla en cuenta para tomar decisiones informadas y confiables. En esta investigación se realizó el cálculo de la desviación estándar a los caudales generados por los GCMs para el periodo evaluado y está representado por la siguiente formula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Y para el cálculo de la media aritmética está representado por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Finalmente, la incertidumbre es calculada por la siguiente ecuación:



$$\Delta x = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

La desviación estándar proporciona una medida de cuánto las predicciones del modelo varían con respecto a su valor medio, esta información es utilizada para evaluar la incertidumbre en las predicciones de los caudales simulados por los GCMs, en ese sentido para la interpretación de este valor se tuvo en cuenta que mientras más bajo sea la desviación estándar menor será la incertidumbre en las predicciones.

- **Promedio o ensamble de modelos**

Calcular el promedio de resultados de múltiples modelos es una práctica común en la investigación científica, con este proceso se busca obtener una estimación más robusta o precisa en las estimaciones para la cuenca del río Huancané. Por tal razón en esta investigación se calculó los promedios de las variaciones de caudales de los 8 GCMs, tanto a periodos anuales como a periodos mensuales para el horizonte 2025 – 2050.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO GR2M

##### 4.1.1. Características geomorfológicas de la cuenca del río Huancané

Las propiedades geomorfológicas de la cuenca, que se resumen en la tabla 7 con base en el DEM y la red hidrográfica de la cuenca, tienen un efecto sobre la respuesta hidrológica de la cuenca. Por lo anterior, es posible afirmar que la cuenca del río Huancané tiene la forma general de un cuerpo alargado con un área de 3,631.19 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 421.97 km, de la misma forma la longitud del río principal es de 142.05 km y la cota máxima de la cuenca es de 5,100 m.s.n.m. mientras que la mínima es de 3,806 m.s.n.m.

**Tabla 7**

*Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Huancané*

Descripción	Medida
Área (km <sup>2</sup> )	3,631.19
Longitud de río principal (km)	142.05
Perímetro de la cuenca (km)	421.97
Cota máxima de la cuenca (m.s.n.m.)	5,100.00
Cota mínima de la cuenca (m.s.n.m.)	3,806.00
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0.0067
Pendiente media del río principal (m/m)	0.0070

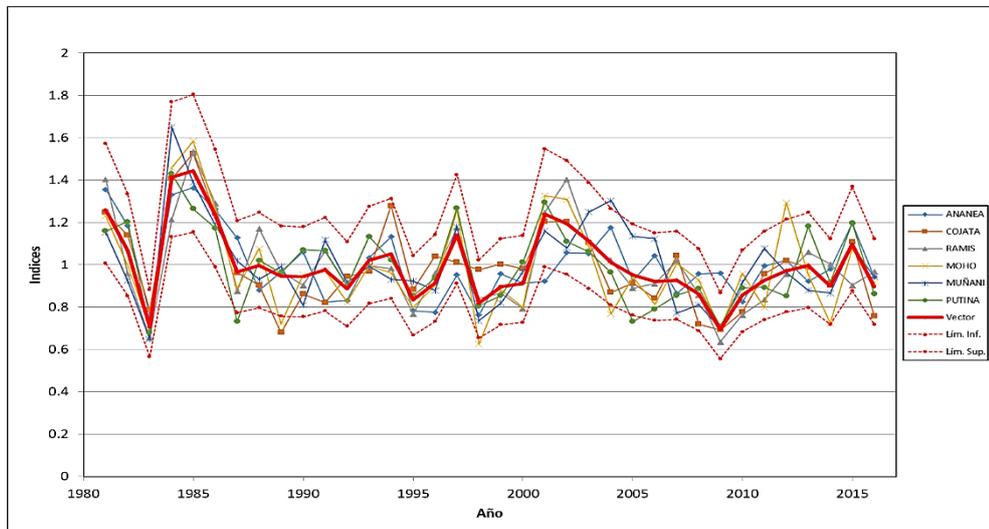
##### 4.1.2. Análisis de consistencia en los datos de precipitación

El análisis de consistencia y homogeneidad se llevó a cabo utilizando el método del vector regional de índice pluviométrico anual. Según se muestra en la

Figura 17, los índices anuales del Vector Regional y de las estaciones exhiben una variabilidad similar y la mayoría de ellos se encuentran dentro de los límites de confianza establecidos por el vector regional lo que indica que la información utilizada es confiable.

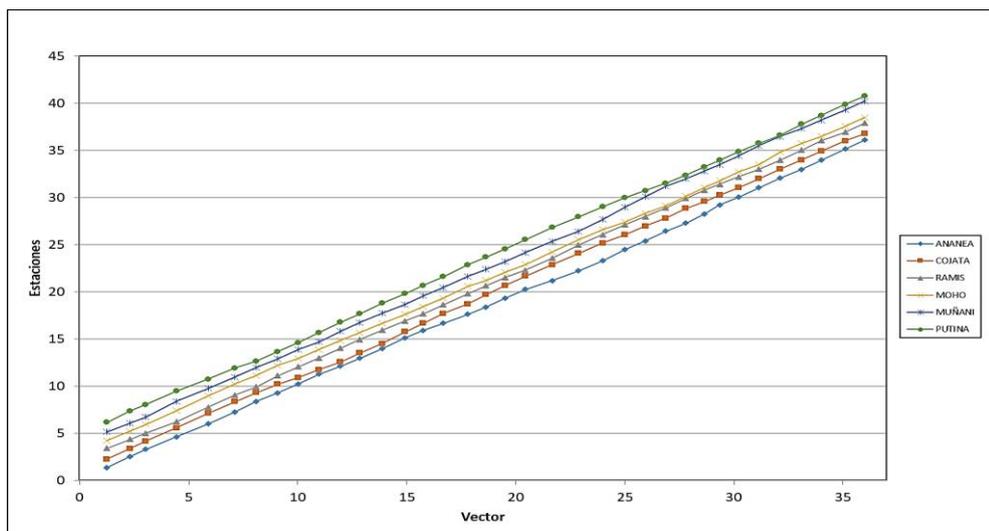
**Figura 17**

*Índices anuales del MVR y las estaciones de la cuenca Huancané*



**Figura 18**

*Suma de índices del MVR y las estaciones de la cuenca Huancané*



En la Figura 18 se puede observar que los índices acumulados de las estaciones consideradas no presentan cambios significativos, sino que siguen una tendencia casi lineal, lo que nos indica una buena confiabilidad de los datos.

En relación a la evaluación de los datos, se puede deducir que las 06 estaciones exhiben una alta proporcionalidad en cuanto a la correlación entre los índices del Vector Regional y las estaciones (Correl./Vector). Estos valores varían entre 0.759 y 0.893, tal como se muestra en la Tabla 8. Además, es importante destacar que las desviaciones estándar de los desvíos (DED) son menores a 0.115, lo cual indica una consistencia y coherencia significativas en los datos evaluados.

**Tabla 8**

*Parámetros de análisis de homogeneidad*

<b>Estación</b>	<b>D.E.D.</b>	<b>Correl./ Vector</b>
Ananea	0.115	0.759
Cojata	0.099	0.858
Ramis	0.091	0.893
Moho	0.110	0.886
Muñani	0.112	0.829
Putina	0.097	0.851

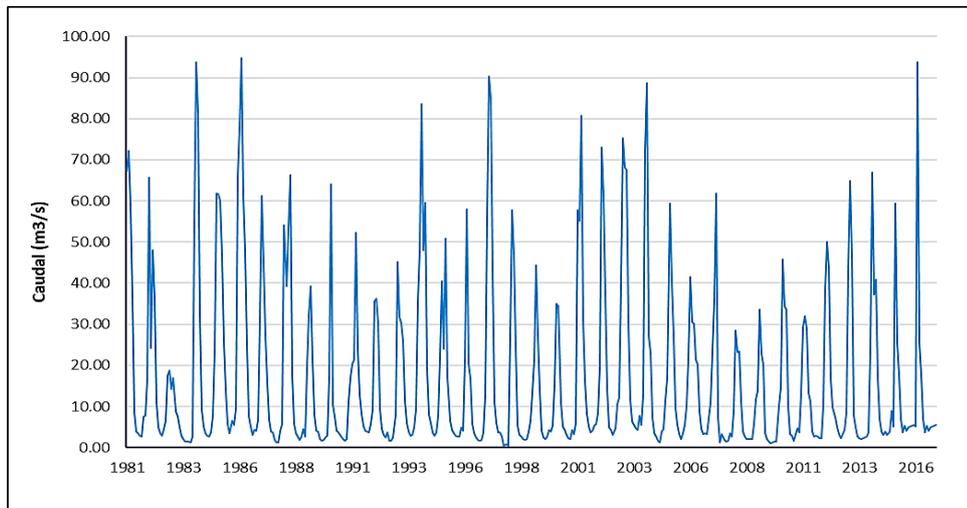
#### **4.1.3. Análisis de consistencia en los datos de caudal**

##### **4.1.3.1. Análisis visual**

En la figura 19, se presenta el comportamiento de esta variable basado en los registros recopilados por la estación Puente Huancané durante el periodo de 1981 a 2016, se visualiza que las series de tiempo que representan el caudal medio mensual muestran una notable estabilidad a lo largo del tiempo, sin evidencia de cambios bruscos, lo que indica que conservan su uniformidad a lo largo de los años.

**Figura 19**

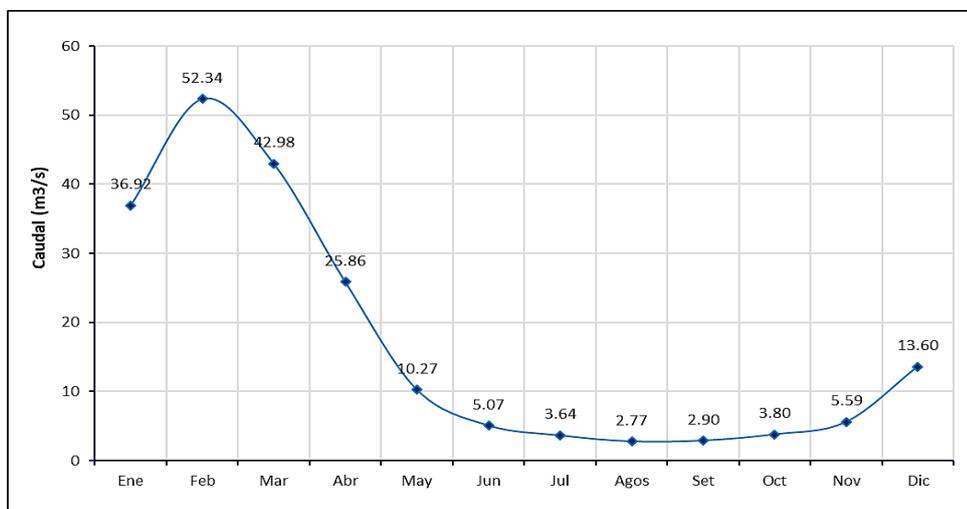
*Caudal histórico de la cuenca del río Huancané*



La Figura 20 muestra el comportamiento propio de la cuenca donde los meses con mayores crecidas se presentan de enero a marzo, en donde el caudal llega a su máxima crecida en el mes de febrero con  $52.34 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que los meses en donde se registran el menor caudal a lo largo del año son de junio hasta octubre, meses que representa la época de estiaje en la cuenca.

**Figura 20**

*Caudal histórico mensual de la cuenca del río Huancané*



#### 4.1.3.2. Análisis estadístico

- **Análisis de saltos**

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de la prueba t de Student realizado a la información hidrométrica y basándonos los criterios de decisión para la prueba t de Student de la tabla 4 podemos afirmar que el  $t_c$  es menor que el  $t_t$ , para todos los valores críticos (0.1 – 0.05 – 0.01), ya que el  $t_c = 0.88$ , en consecuencia, se concluye que las medias no son significativamente diferentes por ende estadísticamente no se realiza el proceso de corrección a los datos.

**Tabla 9**

*Prueba t de Student para los caudales*

Estación	Estadístico t ( $t_c$ )	Valores críticos			Resultado $t_c < t_t$
		a = 0.1	b = 0.05	c = 0.01	
Huancané	1.387	1.69	2.031	2.727	NS

- **Análisis de tendencia**

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de regresión lineal, en donde el  $t_c = -1.919$ , este valor es menor a los valores críticos de  $t_t$  (0.1 – 0.05 – 0.01) por lo tanto, los datos analizados presentan una tendencia decreciente durante el periodo de análisis (1981 – 2016).

**Tabla 10**

*Prueba de tendencia para los caudales*

Estación	Estadístico t ( $t_c$ )	Valores críticos			Resultado $t_c < t_t$
		a = 0.1	b = 0.05	c = 0.01	
Huancané	-1.919	1.692	2.034	2.732	S (0.1)

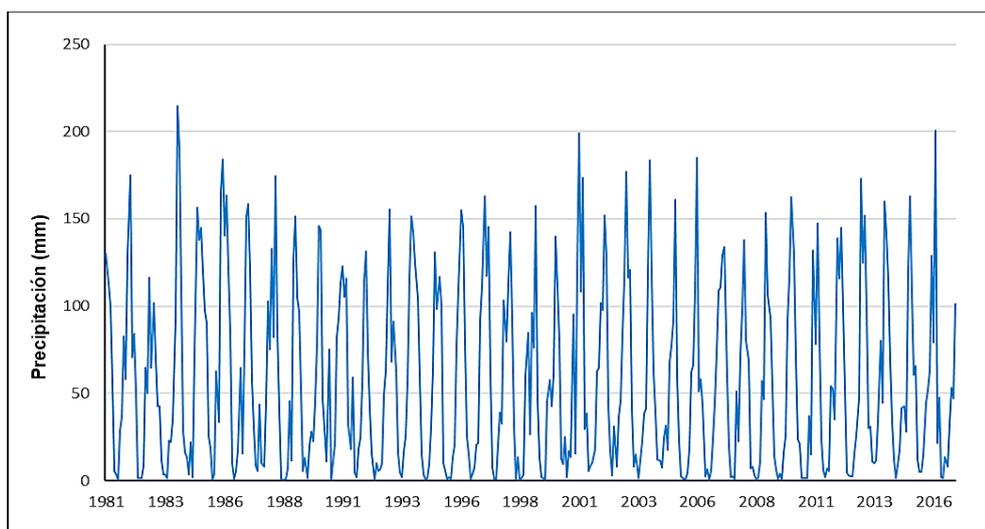
#### 4.1.4. Análisis visual de los datos hidrológicos

##### 4.1.4.1. Precipitación

En la figura 21 se representa gráficamente el comportamiento histórico que ha tenido la precipitación en la cuenca del río Huancané desde el año 1981 hasta el año 2016, en ella podemos ver que aparentemente el comportamiento no ha variado mucho a través de los años. La precipitación media anual es de 56.71 mm, mientras que la precipitación máxima mensual se presenta en el mes de enero con 214.66 mm y la mínima en el mes de agosto con 0.37 mm (Anexo 2). Asimismo, se observa un patrón estacional en los datos, los mismos que son típicos en la zona como la temporada húmeda que generalmente ocurre en los meses de enero a marzo, mientras que la temporada seca es de junio a agosto.

**Figura 21**

*Precipitación histórica de la cuenca del río Huancané*

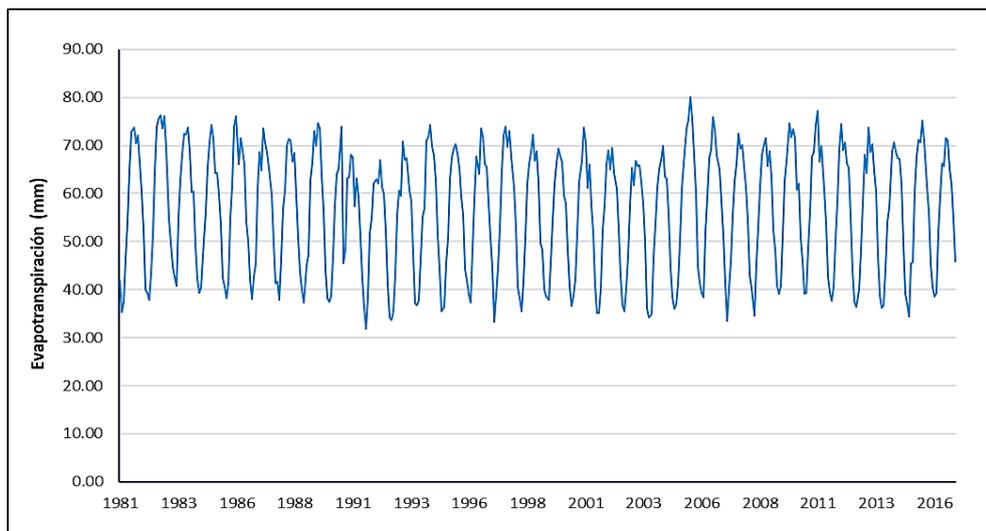


#### 4.1.4.2. Evapotranspiración

La figura 22 muestra el comportamiento histórico de la evapotranspiración en la cuenca durante el periodo 1981 – 2016, esta serie muestra fluctuaciones estacionales con valores más altos en los meses de verano y más bajos durante el invierno. A lo largo de los años se observa cambios en los patrones de evapotranspiración los cuales podrían estar relacionados con factores climáticos y ambientales como el calentamiento global la urbanización y la variabilidad de las precipitaciones (Anexo 2).

**Figura 22**

*Evapotranspiración histórica de la cuenca del río Huancané*



#### 4.1.5. Calibración del modelo hidrológico GR2M

La tabla 11 muestra los valores de los parámetros de entrada de modelo GR2M para la calibración, se destaca los valores obtenidos para los parámetros  $X_1$  de 6.28 que representa el nivel máximo que alcanza el reservorio suelo y un valor de 0.79 para  $X_2$  el cual nos indica que la cuenca Huancané presenta un aporte de aguas subterráneas de cuencas vecinas.

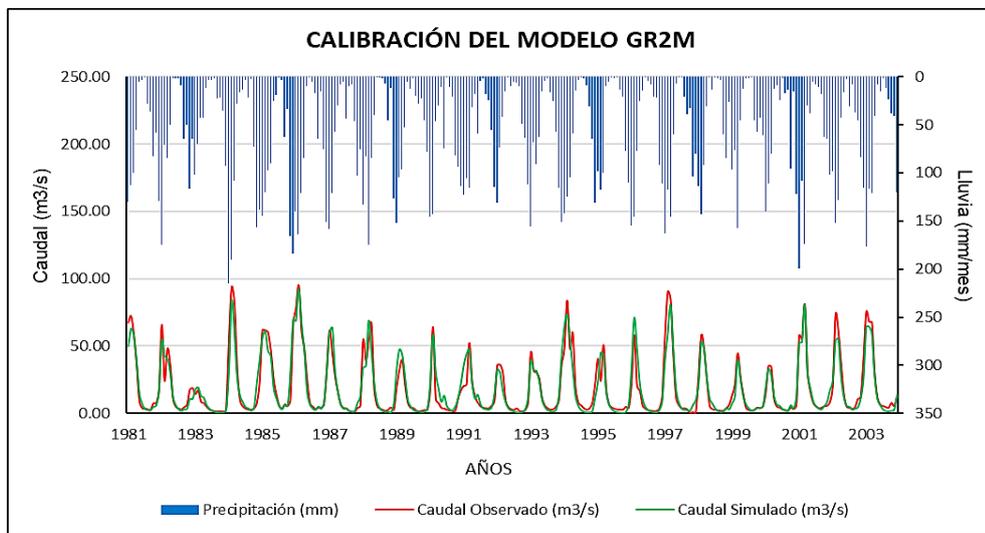
**Tabla 11***Valores de los parámetros del modelo GR2M para la calibración*

<b>Nombre de la cuenca</b>	<b>Huancané</b>
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	3,631.19
<b>Parámetros del modelo</b>	<b>Transformado</b>
X <sub>1</sub> : Capacidad del reservorio de producción (mm)	6.28
X <sub>2</sub> : Parámetro de intercambio (mm)	0.79
<b>Periodo</b>	
Duración del periodo de puesta en marcha (meses)	12
Duración del periodo de test (meses)	263
Fecha de inicio de la simulación	01/1982
Fecha del fin	12/2003

En la figura 23 se presentan los resultados del hidrograma generado por el modelo GR2M a partir de los parámetros establecidos en la tabla 11, en ella podemos observar que los periodos de estiaje y avenidas se representaron de manera similar durante todo el periodo de calibración que corresponde desde el año 1981 hasta el 2003, también se puede observar que el modelo en algunos casos de eventos extremos subestima los valores altos y sobrestima algunos casos durante el periodo de estiaje, de la misma forma se observa también que el comportamiento que ha tenido las precipitaciones son similares con el comportamiento que ha tenido el caudal esto nos da a entender que el modelo tiene validez y estos son confirmados con los indicadores estadísticos correspondientes.

**Figura 23**

*Hidrograma generado por el modelo GR2M en la calibración*



Con respecto a los criterios estadísticos, el modelo hidrológico GR2M presenta una serie de criterios de eficiencia (tabla 12), de los cuales el más utilizado es la eficiencia Nash y el resultado obtenido en la calibración del modelo es de 89.2% esto nos indica que el modelo presenta un Nash considerado “excelente” de acuerdo a los valores referenciales del criterio de Nash – Sutcliffe de la tabla 1, con esto se demuestra que la varianza del caudal simulado y la variación del caudal observado tienen una gran semejanza.

**Tabla 12**

*Resultados estadísticos en la calibración del modelo GR2M*

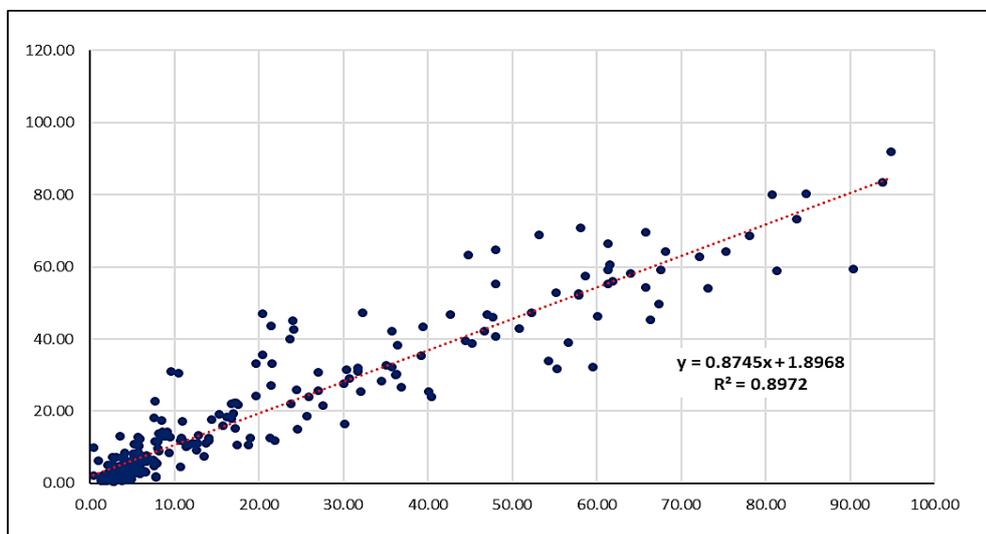
Criterios de eficacia	(%)
Nash (Q)	89.2
Nash (raíz (Q))	89.3
Nash (ln(Q))	82.4
Balance	99.2

La figura 24 muestra un diagrama de dispersión de datos que nos permite evaluar el ajuste del modelo. Observamos que existe una buena correlación entre

los datos simulados y los datos observados ya que el coeficiente de determinación es del 89.72%. Esto indica que el modelo se ajusta de manera adecuada a los datos reales y en consecuencia, tiene la capacidad de predecir con precisión los valores de esorrentía en el área de estudio. En otras palabras, el modelo de simulación de esorrentía es capaz de capturar correctamente los patrones y comportamientos hidrológicos.

### Figura 24

*Dispersión de datos en la calibración del modelo GR2M*



#### 4.1.6. Validación del modelo hidrológico GR2M

En la validación del modelo se consideró 155 meses para los años 2004 al 2016 sin periodo de calentamiento y los mismos valores de los parámetros  $X_1$  y  $X_2$ , que se obtuvieron en la calibración, tal como se detalla en la tabla 13.

**Tabla 13**

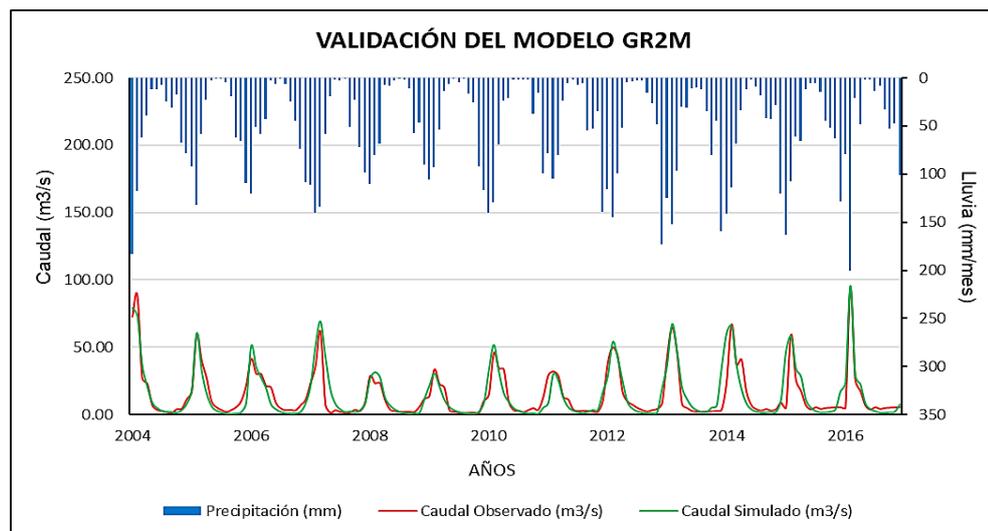
*Valores de los parámetros del modelo GR2M para la validación*

Nombre de la cuenca	Huancané
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	3,631.19
Parámetros del modelo	Transformado
X <sub>1</sub> : Capacidad del reservorio de producción (mm)	6.28
X <sub>2</sub> : Parámetro de intercambio (mm)	0.79
Periodo	
Duración del periodo de puesta en marcha (meses)	0
Duración del periodo de test (meses)	155
Fecha de inicio de la simulación	01/2004
Fecha del fin	12/2016

En la figura 25 se observa que el modelo logra representar de manera consistente los periodos de estiaje y avenidas a lo largo del periodo de validación (2004 – 2016), esto indica que el modelo es capaz de capturar los patrones hidrológicos característicos de la cuenca del río Huancané durante este periodo.

**Figura 25**

*Hidrograma generado por el modelo GR2M en la validación*



En la tabla 14 se detalla los resultados de la estadística proporcionada por el modelo GR2M, de los cuales el más utilizado es la eficiencia Nash y el resultado

obtenido en la validación del modelo es de 76.2%, esto nos indica que el modelo presenta un Nash considerado “muy bueno” de acuerdo a los valores referenciales del criterio de Nash – Sutcliffe de la tabla 1, con esto se demuestra que la varianza del caudal simulado y la variación del caudal observado tienen una gran semejanza.

**Tabla 14**

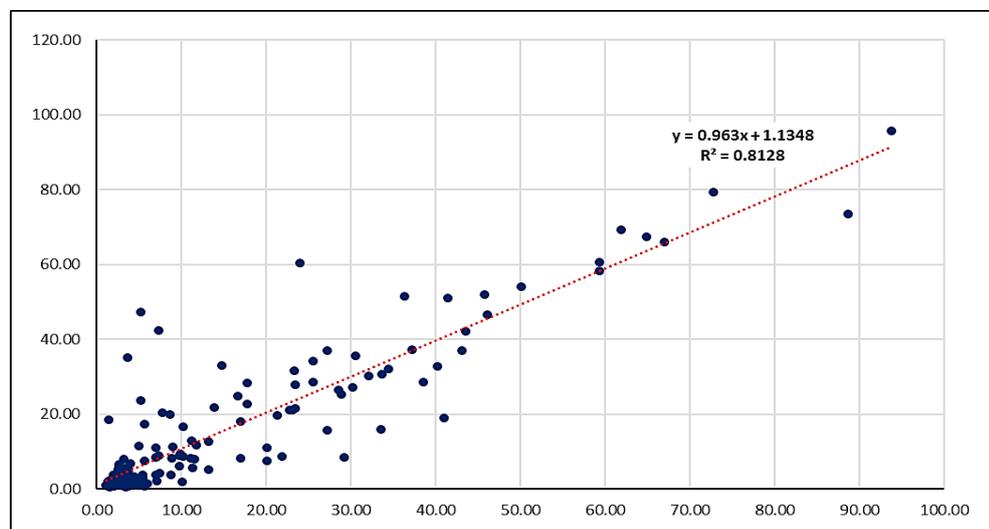
*Resultados estadísticos en la validación del modelo GR2M*

Criterios de eficacia	(%)
Nash (Q)	76.2
Nash (raíz (Q))	71.1
Nash (ln(Q))	56.3
Balance	104.2

De acuerdo a la figura 26 de dispersión de datos, podemos ver que el modelo tiene un buen ajuste con la línea de tendencia ya que presenta un coeficiente de determinación de 81.28%, lo que indica que el modelo se ajusta a los datos reales prediciendo perfectamente la escorrentía.

**Figura 26**

*Dispersión de datos en la validación del modelo GR2M*

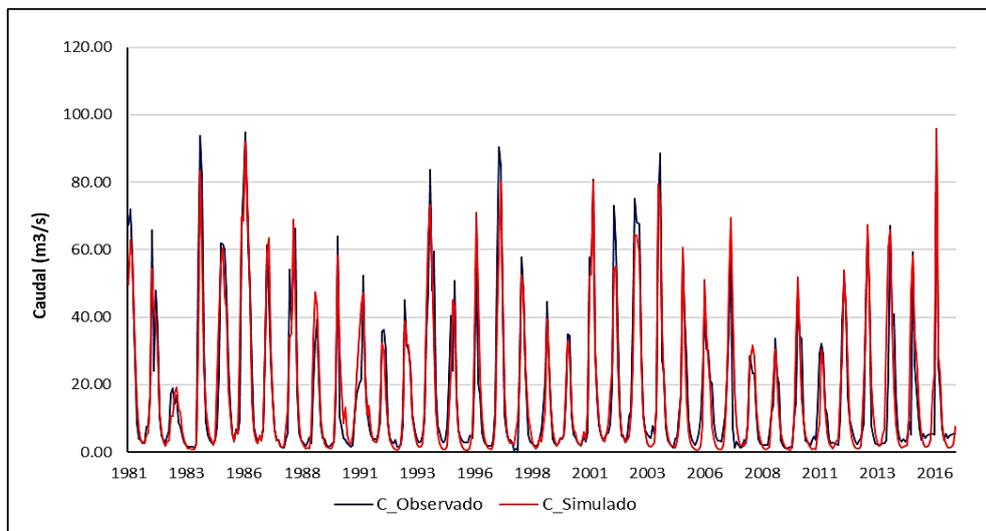


#### 4.1.7. Caudal simulado para el periodo 1981 – 2016

Los resultados de la figura 27 muestran la similitud entre los valores observados y simulados lo cual respalda la confiabilidad y la capacidad del modelo para representar adecuadamente los patrones hidrológicos en la cuenca.

#### Figura 27

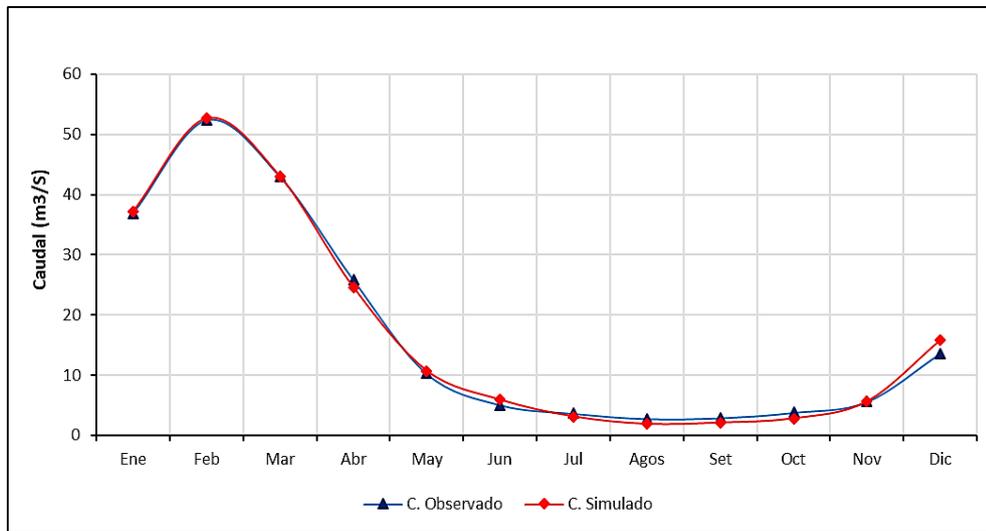
*Caudal simulado por el modelo GR2M vs el caudal observado*



Como se puede observar en la Figura 28, los meses en donde mayor caudal se presenta son de enero a marzo siendo el mes de febrero en donde se registra el máximo caudal, mientras que los meses que registran menor caudal a lo largo del año son de junio hasta octubre siendo el mes de agosto en donde se registra la menor cantidad de caudal. Por otro lado, con base en el mismo gráfico, se puede observar que los caudales simulados presentan una estrecha relación con los caudales observados, estos resultados resaltan la variabilidad estacional de los caudales de la cuenca, con un período de mayor oferta de agua durante los meses de verano y un período de menor oferta durante los meses de invierno.

**Figura 28**

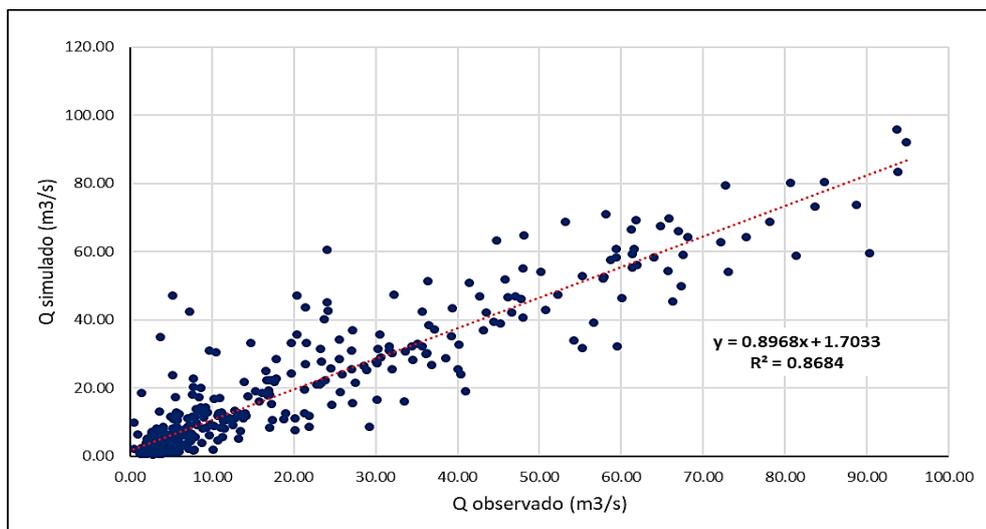
*Caudal simulado vs caudal observado a periodos mensuales*



De acuerdo a la figura 29 de dispersión de datos, podemos ver que el modelo tiene una buena bondad de ajuste con la línea de tendencia ya que presenta un coeficiente de determinación de 86.84%, esto es un valor muy bueno y nos indica que el modelo ajusta los caudales simulados con los observados en consecuencia se afirma que el modelo simula correctamente los caudales.

**Figura 29**

*Dispersión de datos de caudales observados y simulados*



#### 4.1.8. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de los parámetros  $X_1$  y  $X_2$  en el modelo GR2M reveló diferencias significativas en su impacto en los indicadores de eficiencia. En particular, se observó que el parámetro  $X_2$  mostró una mayor sensibilidad en comparación con  $X_1$ . Se encontró que el parámetro relacionado con la capacidad del reservorio de producción ( $X_1$ ) demostró una mejor respuesta a un valor de 6.28, pero su eficiencia disminuyó a medida que se alejaba de este valor, tanto en direcciones mayores como menores, como se muestra en la tabla 15 y figura 30.

Por otro lado, el parámetro de intercambio ( $X_2$ ) mostró una mejor respuesta a un valor de 0.79, pero su eficiencia también disminuyó a medida que se alejaba de este valor y además, demostró una mayor sensibilidad. Esto se refleja en los indicadores Nash, muestran un comportamiento desfavorable a medida que  $X_2$  se alejaba de 0.79, como se puede apreciar en la tabla 15 y figura 30. Por lo tanto se deduce que  $X_2$  ejerce una influencia considerable en el rendimiento del modelo en la cuenca del río Huancané.

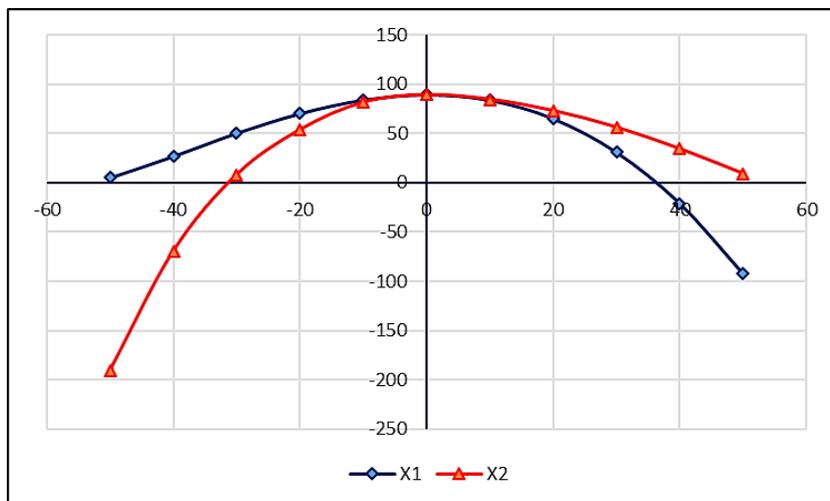
**Tabla 15**

*Variación de los parámetros del modelo GR2M*

%	$X_1$	Nash	$X_2$	Nash
50	9.42	-92.40	1.19	9.05
40	8.79	-21.00	1.11	34.20
30	8.16	30.80	1.03	56.10
20	7.54	65.00	0.95	73.00
10	6.91	83.70	0.87	84.40
0	6.28	89.20	0.79	89.20
-10	5.65	83.90	0.71	81.40
-20	5.02	70.10	0.63	53.60
-30	4.40	50.20	0.55	8.00
-40	3.77	26.70	0.47	-69.60
-50	3.14	4.90	0.40	-190.80

**Figura 30**

*Análisis de sensibilidad del modelo GR2M*



## 4.2. PROCESO DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

### 4.2.1. Descarga de los modelos climáticos globales

La plataforma Climate Explorer es un servidor en el que contiene 40 GCMs del CMIP6, de donde se seleccionó el escenario SSP5-8.5, de los cuales se descargaron 38 GCMs teniendo en cuenta que estos tengan información con respecto a la variable precipitación y temperatura.

### 4.2.2. Reducción de escala o downscaling

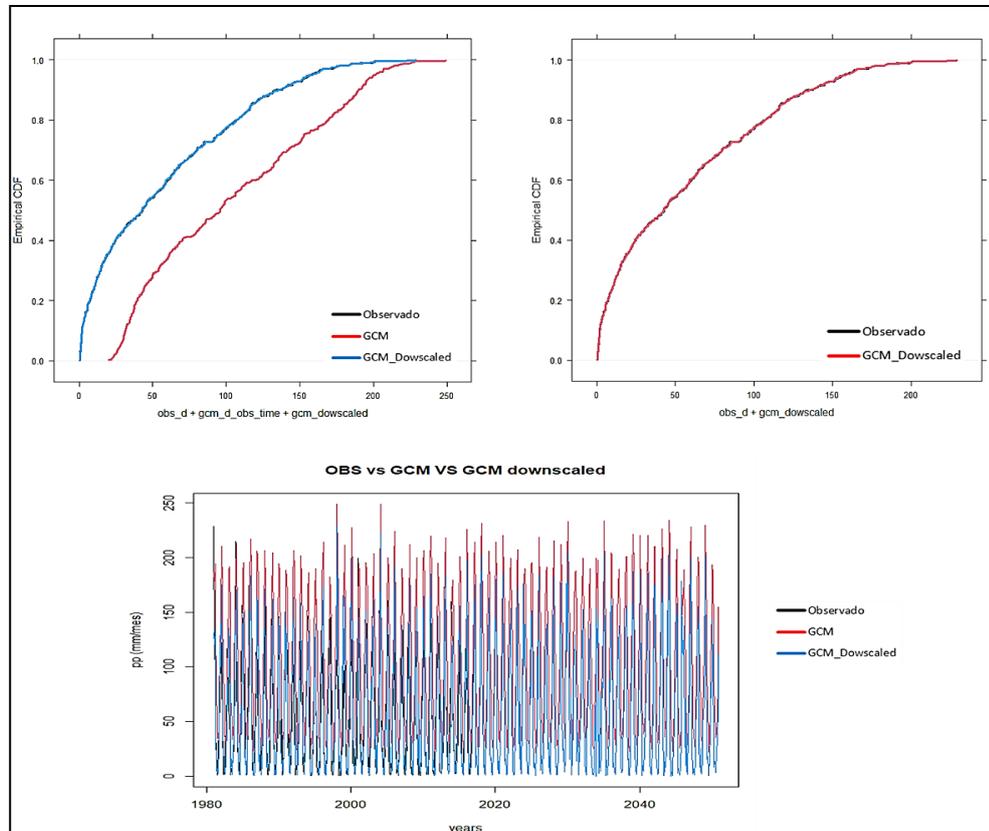
En la figura 31, se muestra el proceso de downscaling realizado a la variable precipitación en el modelo BCC-CSM2-MR, en la parte superior izquierda se muestra los datos observados, los datos del GCM y el GCM downscaled. En la parte superior derecha de la figura se muestra los resultados después de la interpolación inversa a la distancia (IDW), se observa que el ajuste de datos se sobrepone a los datos observados teniendo una semejanza entre los valores medios mensuales del conjunto de datos observados y los datos corregidos del GCM.

Finalmente, en la parte inferior de la figura se muestra los resultados de la interpolación para el periodo histórico 1981 – 2016 y para el periodo futuro 2025 – 2050, esto después de realizar el ajuste de sesgo en la precipitación es decir se ajustaron las estadísticas de la media de los datos del GCM para que coincidieran con la media de los datos históricos. Por medio de estas correcciones se reducen los riesgos de que los datos sean excesivos en el escenario futuro.

Los resultados obtenidos en los demás GCMs son similares y se muestran en las figuras 32, 33, 34, 35, 36, 37 y 38, de la misma forma con respecto a la variable temperatura se presentan resultados similares durante el proceso de downscaling.

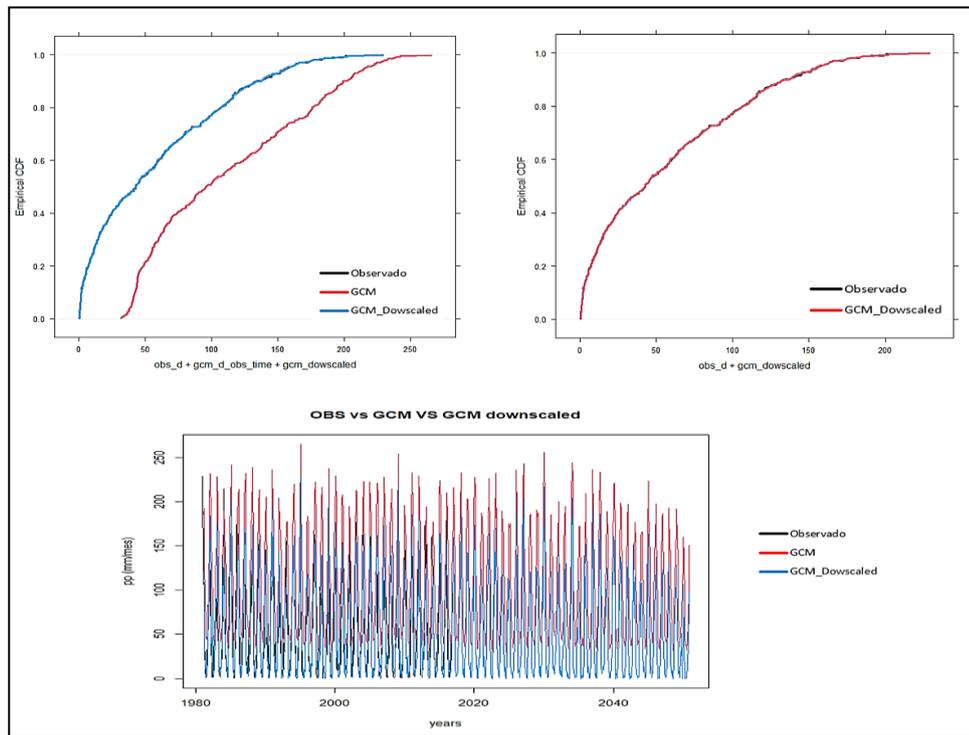
**Figura 31**

*Reducción de escala del modelo BCC-CSM2-MR*



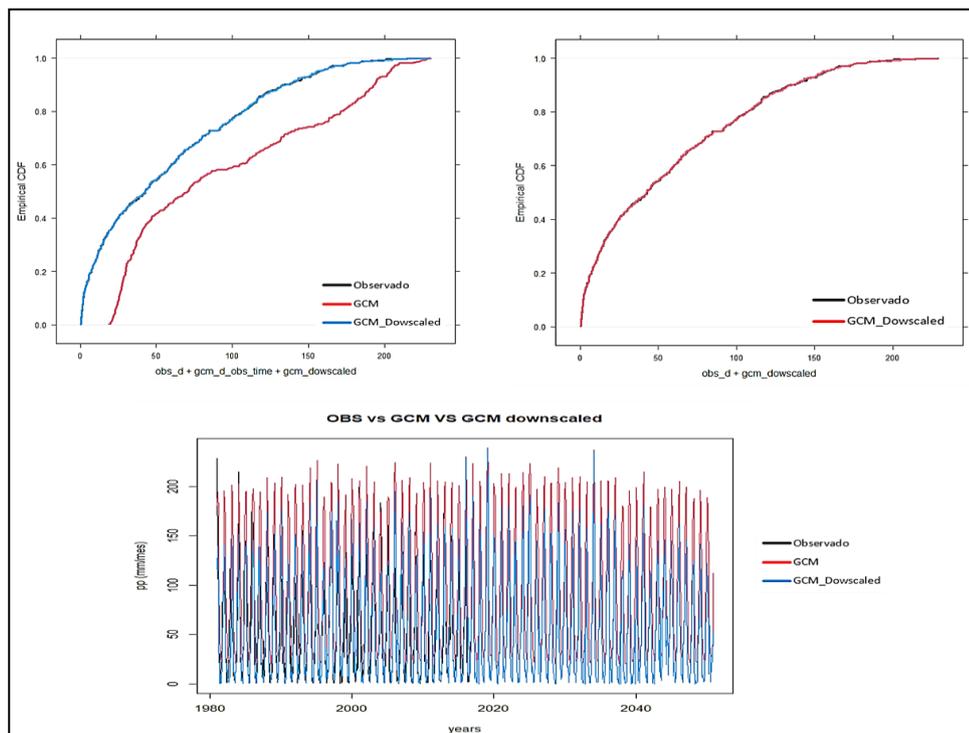
**Figura 32**

*Reducción de escala del modelo ACCESS-ESM1-5*



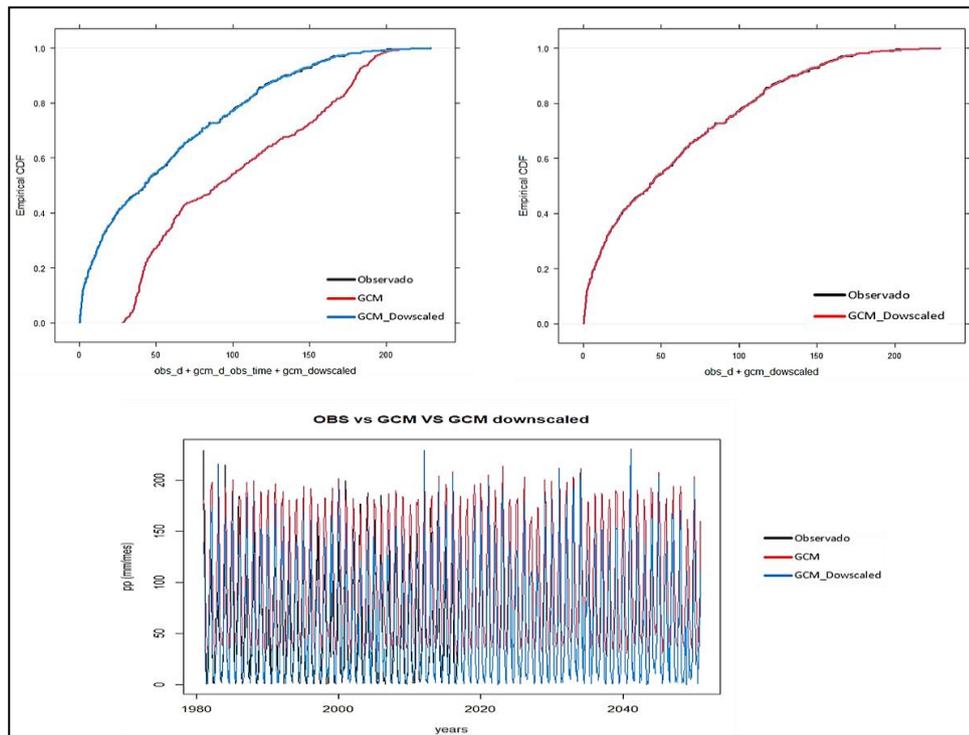
**Figura 33**

*Reducción de escala del modelo CanESM5-CanOE*



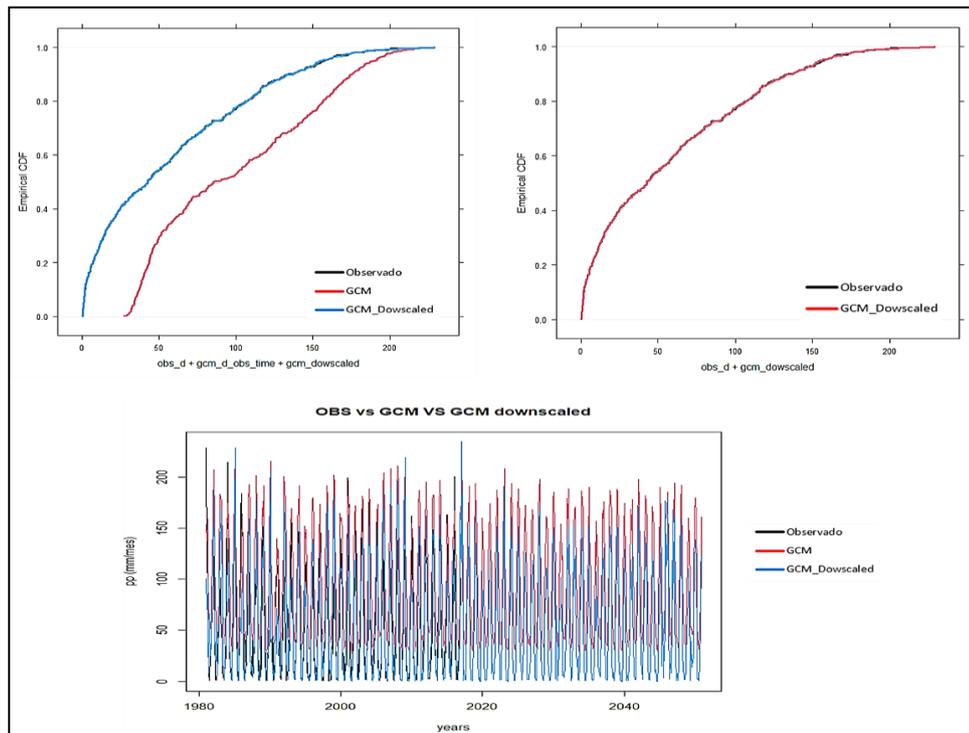
**Figura 34**

*Reducción de escala del modelo CMCC-CM2-SR5*



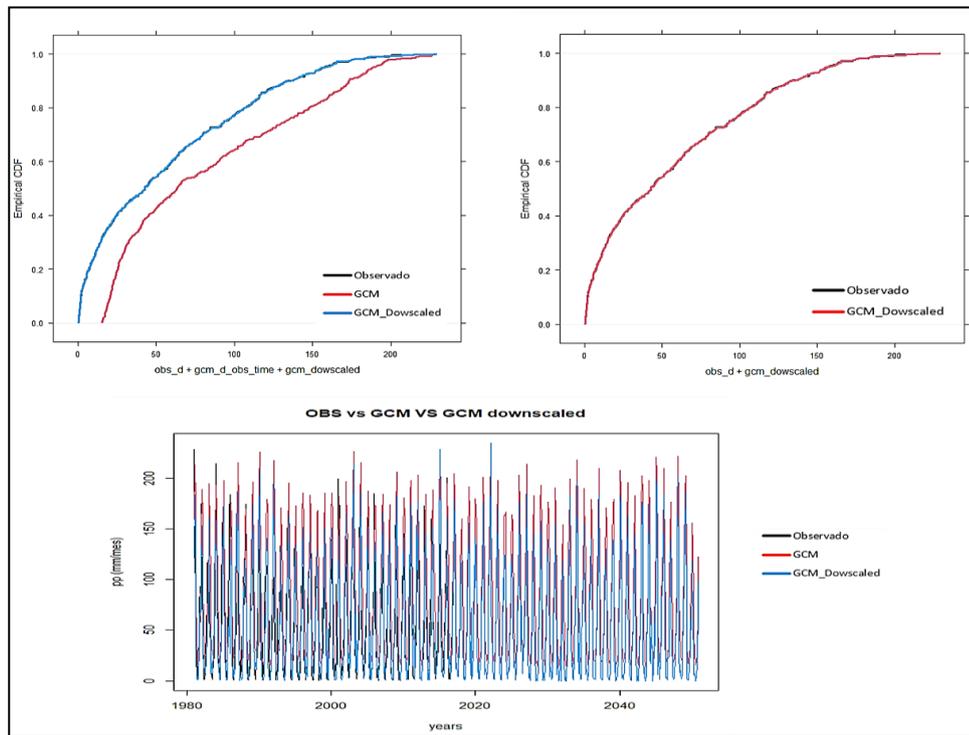
**Figura 35**

*Reducción de escala del modelo MIROC-ES2L*



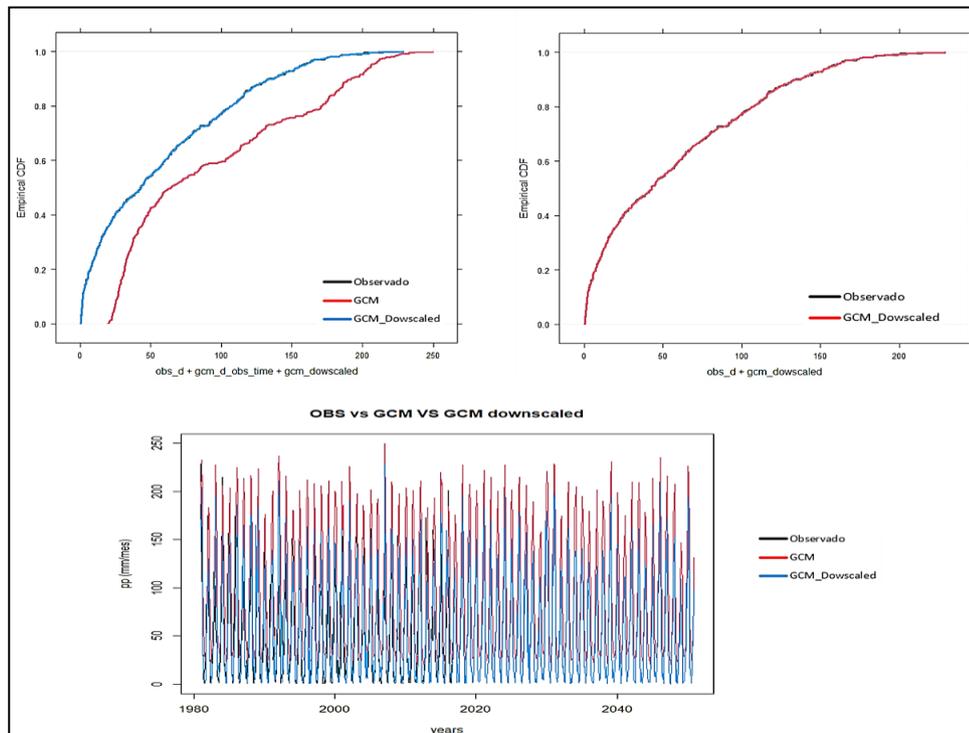
**Figura 36**

*Reducción de escala del modelo MRI-ESM2-0*



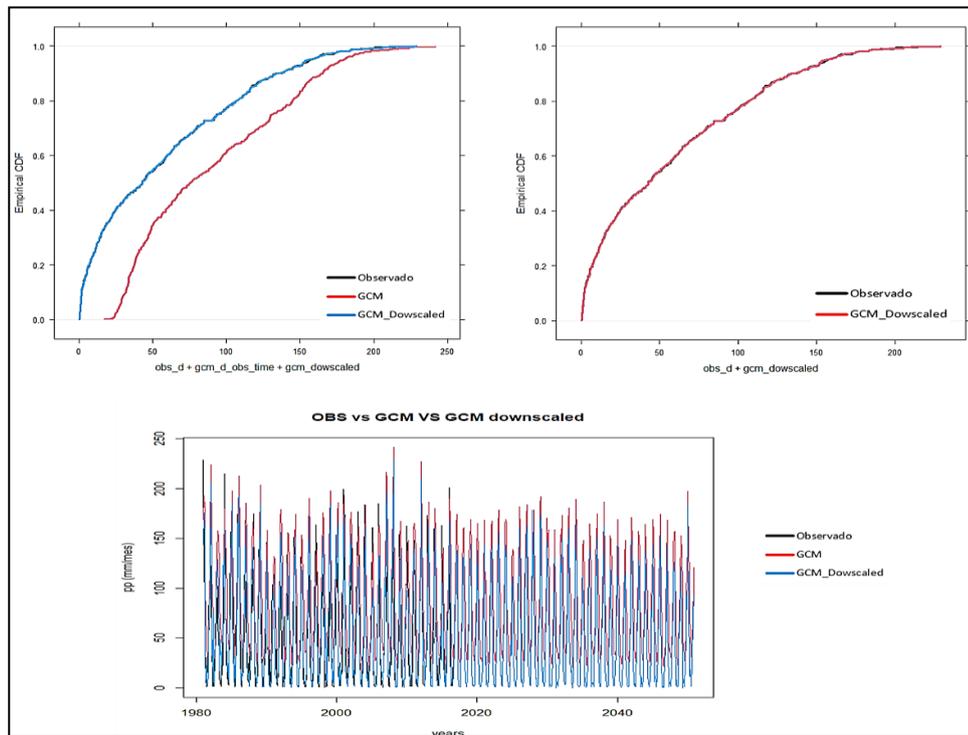
**Figura 37**

*Reducción de escala del modelo GFDL-ESM4*



**Figura 38**

*Reducción de escala del modelo NorESM2-MM*



Se observa que la reducción de escala realizada a los 8 GCMs seleccionados: a) modelo BCC-CSM2-MR, b) modelo ACCESS-ESM1-5, c) modelo CanESM5-CanOE, d) modelo CMCC-CM2-SR5, e) modelo MIROC-ES2L, f) modelo MRI-ESM2-0, g) modelo GFDL-ESM4 y h) NorESM2-MM, se ajustan correctamente a los patrones de la cuenca del río Huancané.

#### 4.2.3. Selección de los modelos climáticos globales

En la tabla 16 se detalla el análisis estadístico para la variable precipitación de los 8 GCMs que obtuvieron un buen desempeño para la cuenca del río Huancané, en este caso los valores de  $R^2$  oscilan entre 0.81 y 0.877, esto indica que los modelos tienen una capacidad para explicar la variabilidad en las precipitaciones. Además, los valores de RMSE son relativamente bajos lo que sugiere que los ajustes son buenos, de la misma forma los valores del coeficiente

de correlación múltiple oscilan entre 0.893 y 0.936 estos valores indican que existe una buena correlación entre las variables. El modelo BCC-CSM2-MR es el que obtiene los mejores valores como un  $R^2 = 0.877$ ,  $RMSE = 1.429$  y un coeficiente de correlación múltiple de 0.936.

**Tabla 16**

*Valores estadísticos de la variable precipitación para los 8 GCMs*

MODELO	$R^2$	RMSE	Coef. Correl. Múltiple
BCC-CSM2-MR	0.877	1.429	0.936
ACCESS-ESM1-5	0.855	1.968	0.925
CanESM5-CanOE	0.842	1.857	0.918
CMCC-CM2-SR5	0.836	2.218	0.915
MIROC-ES2L	0.833	2.436	0.913
MRI-ESM2-0	0.825	2.448	0.908
GFDL-ESM4	0.817	2.474	0.904
NorESM2-MM	0.810	2.643	0.893

En la tabla 17 se detalla el análisis estadístico para la variable temperatura de los 8 GCMs, en este caso los valores  $R^2$  oscilan entre 0.769 y 0.794 lo que indica que los GCMs tienen una buena capacidad para explicar la variabilidad de las temperaturas; asimismo, los valores RMSE varían entre 0.680 y 0.720 lo que indica que los valores de temperatura obtenidos están bastante cerca de la temperatura observada. Finalmente, los valores del coeficiente de correlación múltiple oscilan entre 0.877 y 0.891 lo que indica una correlación positiva entre los valores de temperatura observados y obtenidos.

**Tabla 17***Valores estadísticos de la variable temperatura para los 8 GCMs*

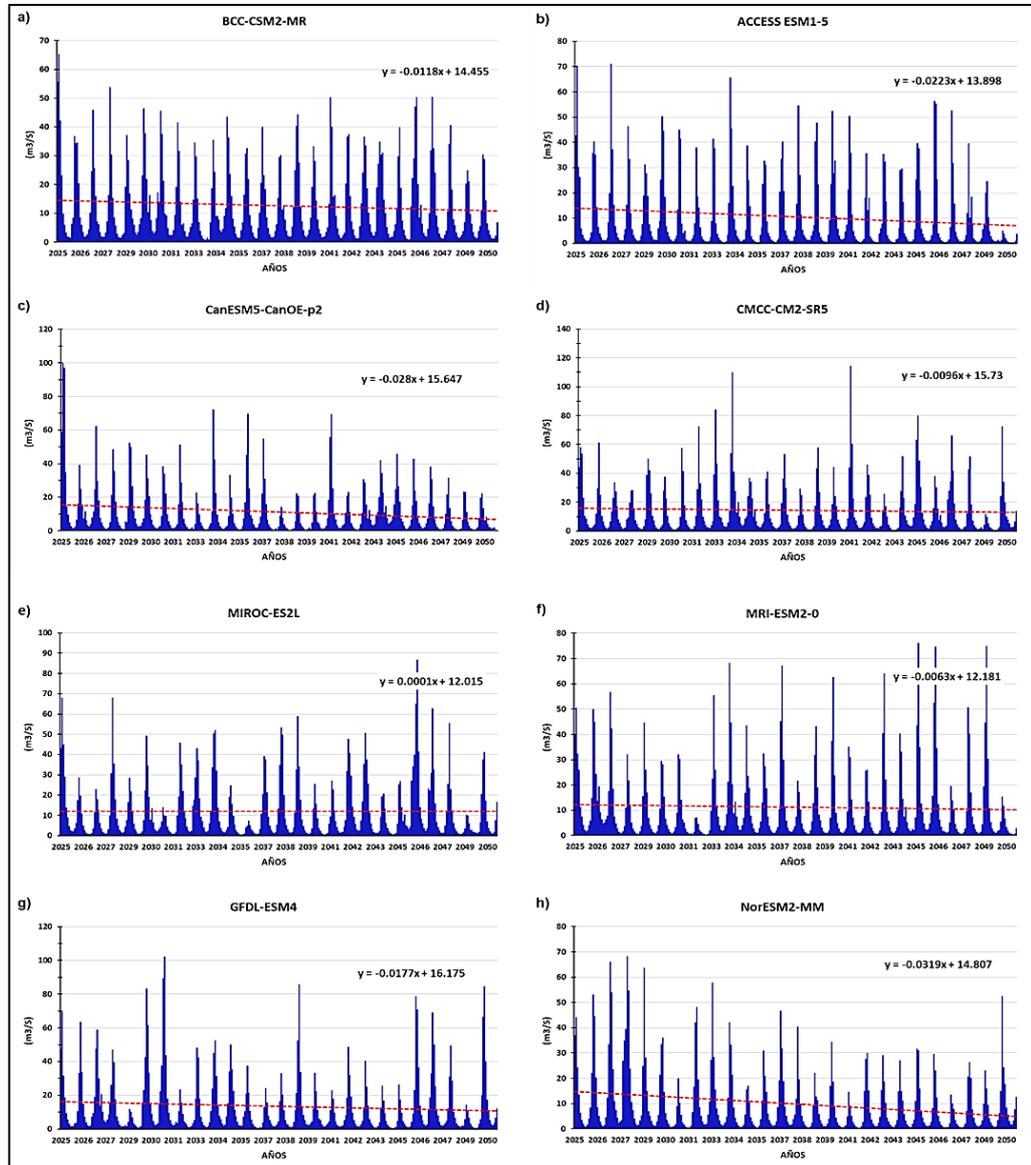
MODELO	R <sup>2</sup>	RMSE	Coef. Correl. Múltiple
BCC-CSM2-MR	0.794	0.680	0.891
ACCESS-ESM1-5	0.790	0.686	0.889
CanESM5-CanOE	0.787	0.690	0.887
CMCC-CM2-SR5	0.785	0.695	0.886
MIROC-ES2L	0.776	0.709	0.880
MRI-ESM2-0	0.773	0.714	0.879
GFDL-ESM4	0.770	0.718	0.877
NorESM2-MM	0.769	0.720	0.877

#### 4.2.4. Caudal simulado para el periodo 2025 – 2050

La figura 39 presenta los caudales simulados para la cuenca del río Huancané utilizando los modelos climáticos globales: a) BCC-CSM2-MR, b) ACCESS-ESM1-5, c) CanESM5-CanOE, d) CMCC-CM2-SR5, e) MIROC-ES2L, f) MRI-ESM2-0, g) GFDL-ESM4 y h) NorESM2-MM, bajo el escenario SSP5-8.5 y estos presentan sus propias estimaciones del caudal para el periodo 2025 – 2050, en general cada modelo presenta variaciones en el caudal a lo largo del periodo estudiado. Los modelos BCC-CSM2-MR, ACCESS-ESM1-5 y CanESM5-CanOE-p2 tienden a mostrar picos más altos de caudal en comparación con otros modelos en varios puntos a lo largo del período evaluado. El modelo MRI-ESM2-0 muestra una tendencia a tener caudales más bajos en comparación con otros modelos en la mayoría de los puntos de tiempo.

**Figura 39**

*Caudales simulados por el modelo hidrológico GR2M, para los 8 GCMs, periodo 2025 – 2050 en la cuenca del río Huancané*



#### 4.2.4.1. Análisis de tendencia para los GCMs seleccionados

Los resultados obtenidos de la prueba de Mann-Kendall indican que todos los modelos climáticos globales muestran tendencias negativas, estos resultados sugieren que los modelos proyectan una disminución en los caudales de la cuenca del río Huancané (tabla 18).

**Tabla 18***Prueba de Mann-Kendall para los 8 GCMs*

GCM	Estadístico z	Valores críticos			Resultado
		$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	
<b>BCC-CSM2-MR</b>	-0.595	1.645	1.96	2.576	NS
<b>ACCESS-ESM1-5</b>	-2.711	1.645	1.96	2.576	S(0.01)
<b>CanESM5-CanOE</b>	-2.248	1.645	1.96	2.576	S(0.05)
<b>CMCC-CM2-SR5</b>	-0.132	1.645	1.96	2.576	NS
<b>MIROC-ES2L</b>	-0.176	1.645	1.96	2.576	NS
<b>MRI-ESM2-0</b>	-0.044	1.645	1.96	2.576	NS
<b>GFDL-ESM4</b>	-1.102	1.645	1.96	2.576	NS
<b>NorESM2-MM</b>	-2.954	1.645	1.96	2.576	S(0.01)

Según la tabla 18 el modelo BCC-CSM2-MR presenta un valor estadístico z de: -0.595; esto indica que no hay una tendencia significativa en los datos, ya que el valor está cerca de cero. En el modelo ACCESS-ESM1-5 el valor del estadístico z es -2.711; este valor negativo es bastante fuerte y sugiere una tendencia decreciente y significativa lo que indica una disminución en los caudales de la cuenca del río Huancané. Para el modelo CanESM5-CanOE el valor del estadístico z es -2.248 que al igual que en el caso anterior, este valor negativo indica una tendencia decreciente y significativa en los datos. Asimismo, en el modelo CMCC-CM2-SR5 el valor del estadístico z es -0.132, lo que sugiere que no hay una tendencia significativa en los datos.

En el modelo MIROC-ES2L el valor del estadístico z es -0.176; al igual que en el caso del modelo CMCC-CM2-SR5, no se observa una tendencia significativa en los datos. Para el modelo MRI-ESM2-0 el valor del estadístico z es -0.044; este valor cercano a cero indica que no hay una tendencia significativa en los datos. En el modelo GFDL-ESM4 el valor

del estadístico  $z$  es  $-1.102$ ; esto indica una tendencia decreciente en los datos, pero no significativa. Finalmente, el modelo NorESM2-MM presenta un valor del estadístico  $z$  de  $-2.954$ , este es el valor más negativo de todos los modelos, lo que indica una tendencia decreciente muy pronunciada y significativa en los datos según este modelo.

#### 4.2.4.2. Caudal promedio mensual simulados para los 8 GCMs

La tabla 19 muestra el resultado de los caudales promedio mensual de los GCMs seleccionados para el periodo 2025 – 2050; asimismo en la figura 40 se visualiza la variación estacional de los caudales, se observa que en el mes de febrero se presentan los mayores caudales con picos que van desde  $36.45 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $50.28 \text{ m}^3/\text{s}$ , a medida que avanza el año, los caudales disminuyen gradualmente, alcanzando valores mínimos en los meses de agosto y septiembre, siendo este último el mes en donde se presentan los caudales mínimos que van desde  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $2.03 \text{ m}^3/\text{s}$ .

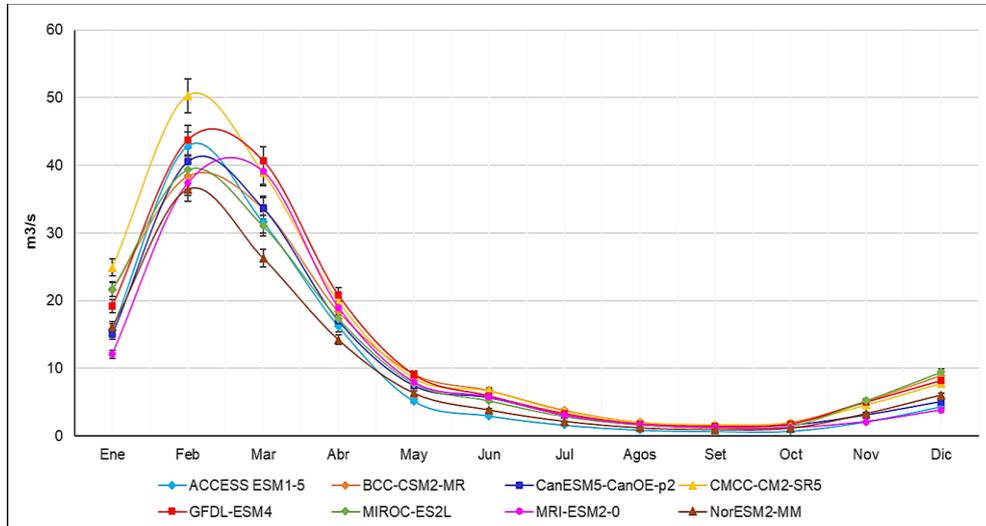
**Tabla 19**

*Caudal promedio mensual de los GCMs, periodo 2025 – 2050*

Periodo 2025 – 2050	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
BCC-CSM2-MR	21.64	38.34	33.57	18.39	9.15	6.71	3.77	2.03	1.65	2.00	5.13	8.95
ACCESS-ESM1-5	15.74	42.78	31.58	16.23	5.18	2.99	1.63	0.90	0.70	0.73	2.11	4.35
CanESM5-CanOE	15.04	40.54	33.73	17.05	7.43	5.66	3.06	1.64	1.33	1.58	3.08	5.07
CMCC-CM2-SR5	24.91	50.28	38.92	19.87	8.56	6.65	3.66	2.01	1.66	1.92	4.56	7.77
MIROC-ES2L	21.66	39.35	31.07	17.34	7.79	5.23	2.90	1.66	1.25	1.47	5.20	9.47
MRI-ESM2-0	12.09	37.36	39.13	19.02	7.95	5.75	3.05	1.67	1.20	1.20	2.09	3.82
GFDL-ESM4	19.18	43.70	40.70	20.84	9.09	5.93	3.31	1.78	1.45	1.79	4.98	8.19
NorESM2-MM	16.09	36.45	26.29	14.20	6.32	3.80	2.13	1.17	0.90	1.12	3.25	6.03

**Figura 40**

*Caudales promedio mensual simulados para los 8 GCMs en la cuenca del río Huancané*



#### 4.2.5. Variación de la oferta hídrica bajo escenario del cambio climático periodo 2025 – 2050

##### 4.2.5.1. Variación anual de los GCMs

En la tabla 20 se muestra la comparativa de los resultados obtenidos para la media anual de los caudales históricos y caudales futuros de los modelos climáticos globales bajo el escenario SSP5-8.5, los resultados muestran que históricamente la cuenca del río Huancané presenta un caudal de  $17.08 \text{ m}^3/\text{s}$  y el resultado obtenido para el modelo BCC-CSM2-MR es de  $Q = 12.61 \text{ m}^3/\text{s}$ , de la misma forma el modelo ACCESS-ESM1-5 presenta un  $Q = 10.41 \text{ m}^3/\text{s}$ , el modelo CanESM5-CanOE un  $Q = 11.27 \text{ m}^3/\text{s}$ , el modelo CMCC-CM2-SR5, MIROC-ES2L, MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4 y NorESM2-MM presentan un caudal promedio anual de  $14.23 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $12.03 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $11.19 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $13.41 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $9.81 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente, con estos resultados podemos afirmar que el caudal de la cuenca del río

Huancané disminuirá considerablemente en comparación a los caudales históricos.

**Tabla 20**

*Variación promedio anual de caudales futuros en los GCMs*

GCM	Periodo Histórico (m <sup>3</sup> /s)	Prom. Anual 2025 – 2050 (m <sup>3</sup> /s)	Incert.	Variación 2025 – 2050 (Δ %)
BCC-CSM2-MR	17.08	12.61	± 2.35	-26.2
ACCESS-ESM1-5	17.08	10.41	± 3.01	-39.1
CanESM5-CanOE	17.08	11.27	± 2.90	-34.0
CMCC-CM2-SR5	17.08	14.23	± 3.96	-16.7
MIROC-ES2L	17.08	12.03	± 3.34	-29.6
MRI-ESM2-0	17.08	11.19	± 4.27	-34.5
GFDL-ESM4	17.08	13.41	± 4.40	-21.5
NorESM2-MM	17.08	9.81	± 3.45	-42.6

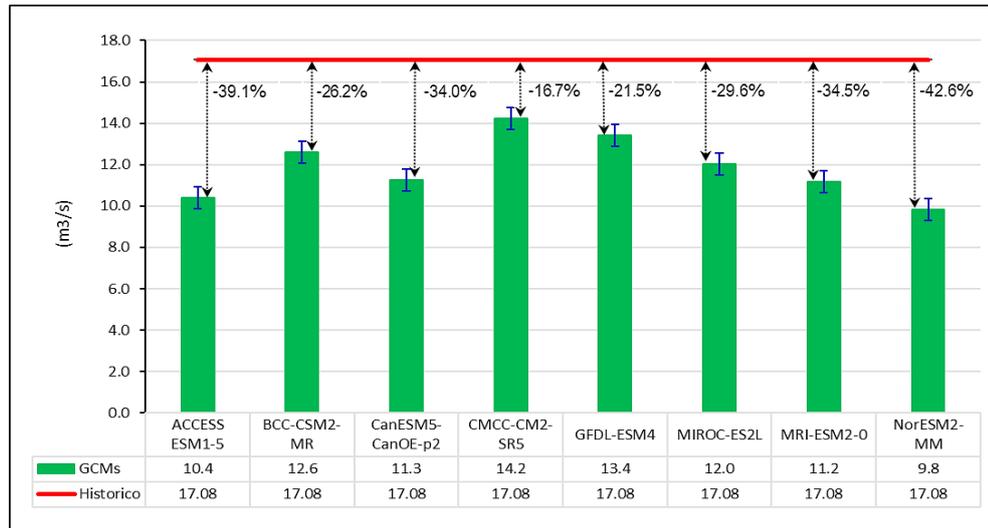
Según la tabla 20, el modelo GFDL-ESM4 tiene la incertidumbre más alta de  $\pm 4.4$  lo que sugiere una variabilidad considerable en sus datos de caudal, esto significa que las observaciones de caudal tienden a alejarse del valor promedio de 13.41 m<sup>3</sup>/s, por otro lado, el modelo BCC-CSM2-MR tiene la incertidumbre baja de  $\pm 2.35$  lo que sugiere una menor variabilidad en sus datos de caudal en relación con su valor promedio de 12.61 m<sup>3</sup>/s.

La figura 41 muestra que el caudal promedio anual y estos varían entre los diferentes modelos climáticos globales, el modelo CMCC-CM2-SR5 tiene el caudal promedio anual más alto con 14.23 m<sup>3</sup>/s y en consecuencia presenta la variación más baja con -16.7%, caso contrario pasa con el modelo NorESM2-MM que presenta la variación más alta con -42.6% ya que tiene un caudal de 9.81 m<sup>3</sup>/s. Los otros modelos, como BCC-CSM2-MR, GFDL-ESM4, y MIROC-ES2L, se encuentran en un

rango intermedio con valores de caudal promedio cercanos a 12 m<sup>3</sup>/s y estos presentan una variación desde -21.5% hasta -29.6%.

**Figura 41**

*Variación promedio anual de caudales futuros para los 8 GCMs*



La tabla 21 muestra los resultados del ensamble de modelos o promedio de modelos, según estos resultados podemos afirmar que la cuenca del río Huancané presentará en el futuro un caudal promedio anual de 11.9 m<sup>3</sup>/s, que comparado con el periodo histórico significa una variación negativa de los caudales en un -30.3%; asimismo, al realizar el análisis de incertidumbre se obtuvo un valor de  $\pm 2.35$  esto sugiere que la mayoría de los datos de caudal están en el rango de 9.55 a 14.25 m<sup>3</sup>/s (11.9  $\pm 2.35$ ), en este caso la variabilidad en el caudal es relativamente baja, ya que la mayoría de estos datos se encuentran cerca al valor medio de 11.9 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 21***Variación promedio de modelos para la cuenca del río Huancané*

Periodo Histórico (m <sup>3</sup> /s)	Horizonte: 2025 – 2050 (m <sup>3</sup> /s)	Incert.	Variación Promedio (Δ %)
17.08	11.9	± 2.35	-30.3

**4.2.5.2. Variación promedio mensual de los GCMs**

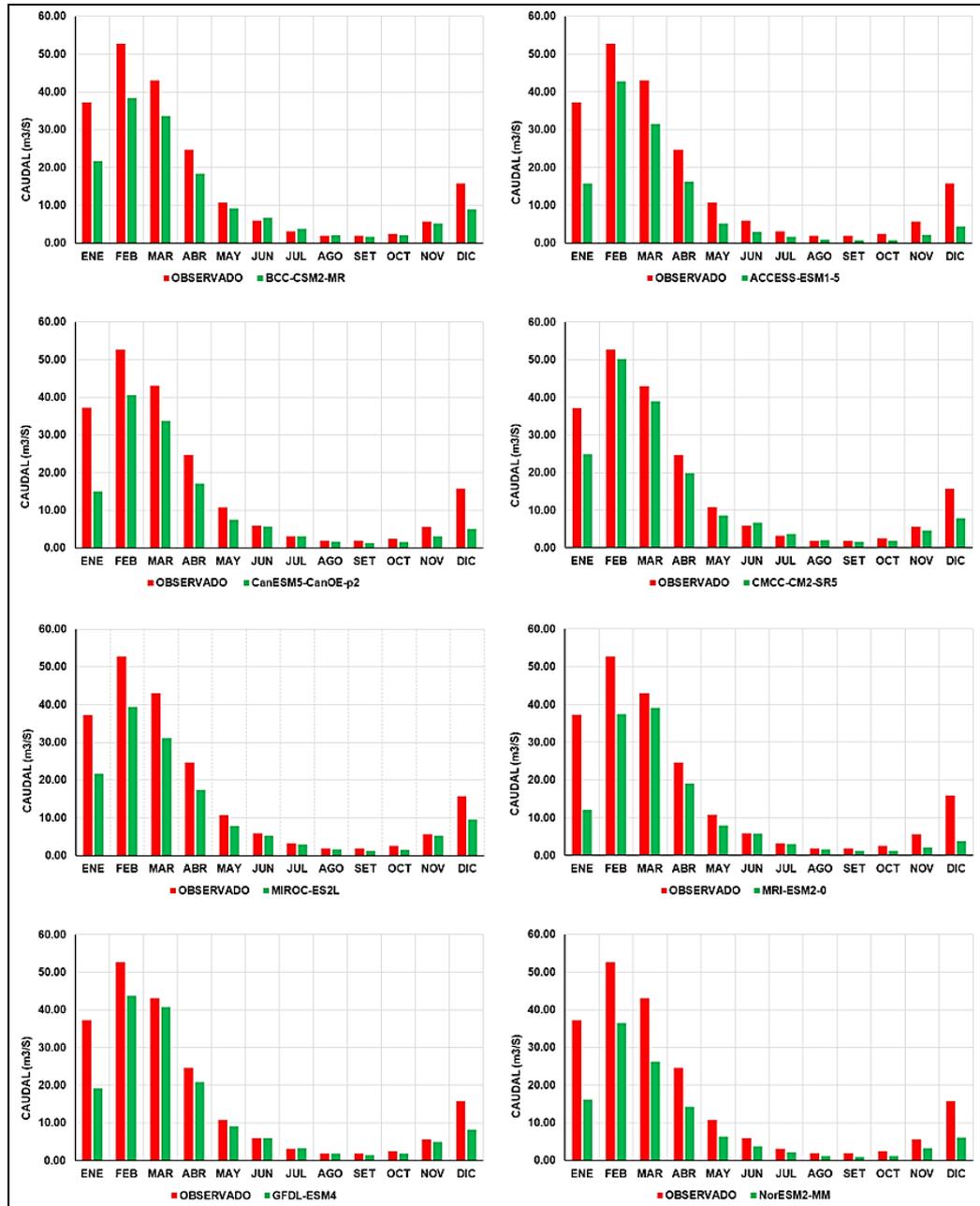
En la tabla 22 se presenta los resultados detallados en cuanto a la variación de la oferta hídrica en la cuenca del río Huancané para los 8 GCMs seleccionados, los resultados muestran una variación negativa en la mayoría de los meses del año, siendo el mes de diciembre en donde los modelos climáticos globales presentan mayores variaciones que van desde -40.0 % hasta -75.8 %, seguido por el mes de enero donde se observa variaciones desde -33.1 % hasta -67.5 %, con esto se afirma que en el futuro el caudal de la cuenca del río Huancané disminuirá.

**Tabla 22***Variación mensual de la oferta hídrica en los 8 GCMs*

Δ % Prom. 2025 – 2050	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
BCC-CSM2-MR	-41.9	-27.2	-22.0	-25.3	-14.8	13.5	20.4	7.3	-11.9	-19.0	-8.6	-43.3
ACCESS-ESM1-5	-57.7	-18.8	-26.6	-34.1	-51.8	-49.9	-47.9	-52.2	-62.4	-70.5	-62.4	-72.4
CanESM5-CanOE	-59.6	-23.0	-21.6	-30.7	-30.8	-4.3	-2.5	-13.0	-29.0	-36.0	-45.0	-67.8
CMCC-CM2-SR5	-33.1	-4.5	-9.5	-19.3	-20.3	12.3	16.8	6.6	-11.4	-22.4	-18.8	-50.7
MIROC-ES2L	-41.8	-25.3	-27.8	-29.6	-27.5	-11.6	-7.6	-11.9	-33.6	-40.4	-7.3	-40.0
MRI-ESM2-0	-67.5	-29.1	-9.0	-22.8	-26.0	-2.8	-2.6	-11.6	-36.2	-51.5	-62.8	-75.8
GFDL-ESM4	-48.5	-17.0	-5.4	-15.4	-15.4	0.2	5.5	-5.7	-22.8	-27.6	-11.2	-48.0
NorESM2-MM	-56.8	-30.8	-38.9	-42.3	-41.2	-35.8	-32.1	-38.0	-52.1	-54.6	-42.0	-61.7

**Figura 42**

*Variación de caudal promedio mensual histórico y futuro en los 8 GCMs seleccionados*



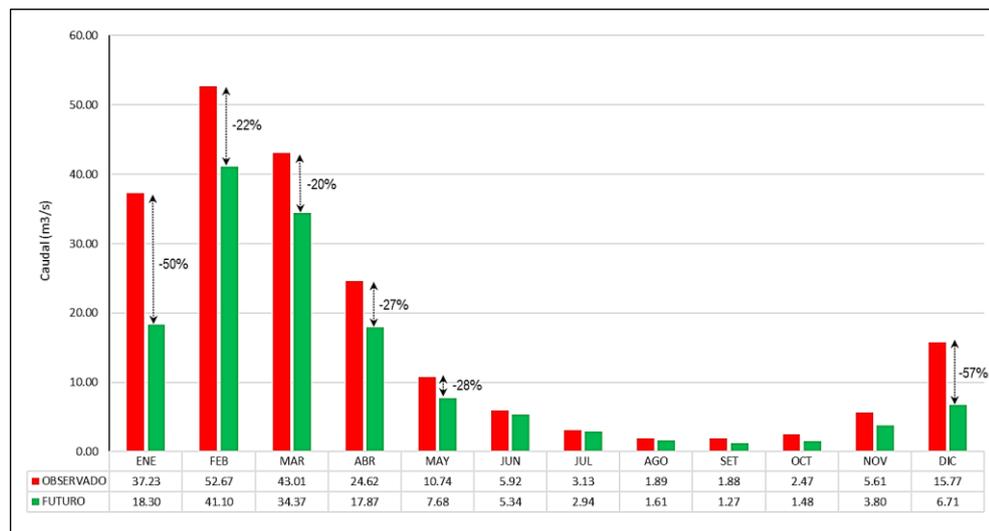
Los resultados mostrados en la figura 42, representa la variación de los caudales para la cuenca del río Huancané, en los ocho modelos climáticos globales seleccionados del escenario SSP5-8.5. Los resultados sugieren que en el horizonte 2025 – 2050, se presentarán variaciones

negativas en comparación a los caudales históricos, las mayores variaciones se presentan en el mes de diciembre y enero, lo que podría tener implicaciones en la oferta hídrica para los diversos usos en la cuenca.

La figura 43 muestra los resultados promedio mensual del ensamble de modelos o promedio de modelos, según estos resultados podemos afirmar que la cuenca del río Huancané presentará en el futuro un caudal promedio mensual, que comparado con el periodo histórico significa una variación negativa en todos los meses del año. Asimismo, se observa la mayor variación en el mes de diciembre con un valor de -57 % seguido por el mes de enero con una variación de -50 %, los meses de febrero, marzo, abril y mayo presentan variaciones moderadas que van desde -22 % hasta -28 %.

**Figura 43**

*Variación promedio mensual del ensamble de modelos*



### 4.3. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo investigativo proporcionan una valiosa perspectiva sobre la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Huancané para el horizonte 2025 – 2050, en un contexto de cambio climático, según estos hallazgos se proyecta que la cuenca experimente un importante descenso en los caudales con una variación negativa del 30.3 % en comparación con el periodo histórico, esto debido al incremento de la temperatura que el caso de esta cuenca es en promedio 1.44°C, de la misma forma al analizar la incertidumbre de los resultados se observa que la variabilidad en los caudales es relativamente baja con la mayoría de los datos cercanos al valor medio, es por eso que estos resultados fueron comparados con los antecedentes tanto a nivel internacional, nacional y local.

A nivel internacional, en el estudio de Ilbay-Yupa *et ál.* (2021) indican un aumento de temperatura de aproximadamente 2°C y un cambio del 6% en las precipitaciones, estos cambios están relacionados con un posible déficit de agua en la estación seca y una disminución del 8% en las precipitaciones que podría llevar a una reducción del 60% en el caudal de la cuenca del río Guaynas en el Ecuador, este resultado muestra paralelismo con los obtenidos en la cuenca del río Huancané ya que ambos resultados señalan un aumento en la temperatura lo que puede provocar una mayor evaporación y reducción en los caudales, de la misma forma Hadour *et ál.* (2020) mencionan que en el noreste de Argelia los caudales de invierno tienden a disminuir debido a la reducción de las precipitaciones y al aumento de la evapotranspiración, en este estudio los autores proyectan una disminución del caudal en promedio del 38 % para el 2039 con reducciones mayores en el futuro, este estudio resalta una tendencia similar a la disminución de caudales debido al cambio climático. Asimismo, Allani *et ál.* (2020) evalúan el impacto del cambio climático en el suministro y demanda de agua en un



sistema de represas en Argelia, en donde se proyecta un aumento en la evapotranspiración del 6.1 % y una disminución del 11.4 % en la precipitación anual lo que conlleva a una disminución del 24% de la afluencia de agua, estos resultados respaldan la idea de que la reducción de la precipitación puede afectar significativamente los caudales lo que se alinea con los resultados en la cuenca del río Huancané. Pérez *et ál.* (2019) comparan la efectividad de varios modelos hidrológicos en España peninsular en donde destacan que el modelo GR2M fue el que mejor se ajustó en las cuencas evaluadas demostrando su alta eficiencia y utilidad en regiones con variabilidad climática, esto respalda la decisión de utilizar el modelo GR2M en el presente estudio ya que es una herramienta confiable para pronosticar caudales. Finalmente, Ouhamdouch *et ál.* (2019) proyectan un aumento en los caudales futuros bajo los escenarios RCP 2.5 y RCP 8.5 en un 19 % y 43 %, una disminución de 38% bajo el escenario RCP 4.5 esto subraya la importancia de considerar múltiples posibles futuros al igual que en el presente estudio, en general es importante resaltar que los antecedentes internacionales y los resultados en la cuenca del río Huancané coinciden en mostrar la influencia del cambio climático en los caudales de las cuencas.

A nivel nacional, los hallazgos de Rodas (2022) en la cuenca Caplina – Tacna, indica una tendencia similar de disminución de caudales, en el futuro cercano (2020 – 2040) disminuye en un 5,3% (RCP4.5) y un 3,6% (RCP8.5), en el futuro medio (2041-2070), la disminución es del 6,3% (RCP4.5) y del 8,8% (RCP8.5). Finalmente, en el futuro lejano (2071-2100), disminuye un 6,7% (RCP4.5) y un 2,0% (RCP8.5) estos hallazgos son coherentes con los resultados obtenidos en este estudio, de la misma forma López (2022) utilizó el modelo hidrológico GR2M y encontró que la precipitación mensual futura, presenta variaciones notables entre septiembre y abril con un 25.06% para RCP4.5 y 33.97% para RCP 8.5, mientras que entre mayo y agosto se observaron



disminuciones del 13.75% para RCP4.5 y 18.66% para RCP 8.5, esto respalda el uso del modelo GR2M puesto que en sus estudios este modelo refleja una mejor precisión en la simulación de flujo dando mayor solidez al uso del modelo GR2M, así mismo se observa que los resultados obtenidos presentan cierta similitud con una tendencia decreciente especialmente en el escenario RCP 8.5 que es la versión anterior a la evaluada en el presente estudio. Huamani (2022) examinó cómo el cambio climático afecta la disponibilidad de agua en la cuenca del río Ica – Alto Pampas en donde sus resultados indican una disminución de los caudales en todos los escenarios, lo que sugiere una tendencia general a la baja en la disponibilidad de agua, estos hallazgos son coherentes con las proyecciones del presente estudio, Tello (2019) encontró que la cantidad de agua disponible de escorrentía disminuirá en un 30.16% en el escenario futuro 2030 en comparación con el escenario actual, esto muestra una reducción significativa en la disponibilidad de agua, especialmente durante ciertos meses del año, los resultados de Tello respaldan la idea de que la cuenca del río Huancané podría enfrentar desafíos similares. En el estudio realizado por León *et ál.* (2019) en la cuenca del río Piura, se proyectó un aumento en la escorrentía en ciertos meses y una disminución en otros debido al cambio climático los cuales son coincidentes con la cuenca Huancané en los meses de mayo a setiembre; sin embargo, las diferencias entre octubre hasta abril pueden deberse a que estas cuencas se encuentran en diferentes regiones geográficas del Perú con características hidroclimáticas y topográficas distintas.

A nivel local tenemos el estudio de Coaquira (2023), que menciona que la cuenca del río Ilave revela una disminución proyectada en la oferta hídrica anual bajo condiciones de cambio climático. Los resultados indican que esta disminución variará entre 9% y 10.3% en el escenario SSP2 4.5 y entre 24% y 25.2% en el escenario SSP5 8.5 en comparación con el período histórico, esta proyección se alinea con los resultados de este



estudio, que también indican una reducción en el caudal promedio en la cuenca del río Huancané. El análisis de Huarahuara (2022) sobre la temperatura y las precipitaciones en la cuenca hidrográfica Huancané muestra un aumento significativo en las temperaturas promedio, con proyecciones de 1.1°C y 2.6°C para el año 2050. Esto respalda los resultados en esta investigación que indican un aumento en la temperatura promedio de GCMs de 1.44°C en la cuenca del río Huancané. Además, Huarahuara identifica un descenso proyectado de caudal de 0.066 m<sup>3</sup>/año, lo que refuerza los hallazgos de una disminución del caudal en la cuenca, este análisis subraya la influencia directa del cambio climático en el aumento de temperaturas y la reducción de precipitaciones, lo que afecta negativamente la oferta hídrica. El estudio de Quispe y Huanca (2021), se enfoca en la cuenca Ilave y utiliza modelos climáticos globales para proyectar el impacto del cambio climático, las proyecciones indican una disminución desde 0.29 mm hasta 38.08 mm, en la precipitación y una reducción del caudal de 41.2% para el año 2050. Esto se alinea con nuestros resultados, que también sugieren una disminución significativa en el caudal anual del río Huancané. Zubieta *et ál.* (2021) se centra en la evaluación de sequías en la región y encuentra que las sequías hidrológicas y las condiciones meteorológicas serán más severas y frecuentes debido al cambio climático. Además, se proyecta un aumento en la frecuencia y severidad de las sequías agrícolas e hidrológicas, lo que sugiere una disminución de los recursos hídricos en la región. Estos hallazgos coinciden con las preocupaciones planteadas en tu estudio sobre la cuenca del río Huancané y respaldan la idea de una reducción en la oferta hídrica debido al cambio climático, especialmente en el contexto de sequías más frecuentes y severas. Finalmente, en el estudio de Lujano *et al.* (2016) evalúan cómo cambiará la disponibilidad de recursos hídricos en respuesta a diferentes escenarios de emisiones de modelos climáticos globales en la región del altiplano peruano. Aunque proyectaron un ligero aumento en la precipitación anual en la



cuenca de Ramis, también previeron una disminución en la cuenca de Ilave. Esto sugiere que las proyecciones de cambio climático pueden variar entre cuencas. En este estudio los resultados muestran una disminución del caudal promedio, la variabilidad en las proyecciones entre diferentes cuencas destaca la importancia de evaluar regiones específicas para comprender mejor los efectos del cambio climático en los recursos hídricos.

En general, los antecedentes y los resultados en la Cuenca del río Huancané coinciden en mostrar la influencia negativa del cambio climático en los caudales de las cuencas fluviales. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de medidas de adaptación y planificación a largo plazo para garantizar la disponibilidad de agua y la resiliencia de las comunidades en un contexto de cambio climático global.



## V. CONCLUSIONES

- A través de la simulación del modelo hidrológico GR2M se logró estimar la oferta hídrica superficial en la cuenca del río Huancané bajo escenarios del cambio climático para el horizonte 2025 – 2050 y las proyecciones indican una disminución general en los niveles de caudal, ya que según el modelo ACCESS-ESM1-5 en el futuro estudiado se tendrá un caudal de 10.4 m<sup>3</sup>/s, 12.6 m<sup>3</sup>/s para el modelo BCC-CSM2-MR, 11.3 m<sup>3</sup>/s para el modelo CanESM5-CanOE, 14.2 m<sup>3</sup>/s para el modelo CMCC-CM2-SR5, 13.4 m<sup>3</sup>/s para el modelo GFDL-ESM4, 12.0 m<sup>3</sup>/s para el modelo MIROC-ES2L, 11.2 m<sup>3</sup>/s para el modelo MRI-ESM2-0 y finalmente 9.8 m<sup>3</sup>/s para el modelo NorESM2-MM, en tal sentido se concluye que el cambio climático afectará de manera negativa en la oferta hídrica superficial futura de la cuenca del río Huancané.
- Durante la calibración y validación, el modelo hidrológico GR2M demostró una eficiente simulación de los eventos de avenida y estiaje del caudal observado, los resultados obtenidos durante la calibración revelaron un valor de eficiencia Nash del 89.2%, lo cual indica un ajuste considerado como "excelente" y el análisis del diagrama de dispersión de datos mostró una buena correlación entre los datos simulados y los observados, con un coeficiente de determinación del 89.72%. Durante la validación del modelo, se obtuvo un valor de eficiencia Nash del 76.2%, nuevamente considerado como "muy bueno", mientras que, en la dispersión de datos se observó un buen ajuste del modelo a la línea de tendencia, evidenciado por un coeficiente de correlación del 81.28%.
- El análisis de los caudales simulados para el horizonte 2025 – 2050, utilizando los ocho modelos seleccionados, se identifica que los meses de diciembre y enero



presentarían las mayores variaciones, estas variaciones tienen un impacto significativo en el período de avenidas, mientras que en el período de estiaje muestran cambios menos notables. De la misma forma los resultados indican una disminución en los niveles de caudal, es decir que en el futuro se esperan caudales que parten desde  $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $14.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , de un caudal actual promedio de  $17.08 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo cual representa una variación de caudales futuros que van desde  $-16.7 \%$  hasta  $-42.6 \%$ . Finalmente, se concluye que en el escenario SSP5-8.5 del CMIP6 y según los ocho modelos evaluados se tendrá un caudal general promedio de  $11.9 \text{ m}^3/\text{s}$  lo cual representa una variación general de  $-30.3 \%$  en la cuenca del río Huancané.



## VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda llevar a cabo un análisis detallado de la generación de caudales en intervalos de tiempo más cortos, como dos o tres periodos de 10 a 15 años, con el objetivo de obtener una representación más precisa del comportamiento de las variables climáticas durante la generación de los caudales, esto permitirá obtener una comprensión más completa y detallada de cómo se verá afectada la oferta hídrica y la generación de caudales en el futuro, tanto a corto, mediano como a largo plazo.
- Se recomienda utilizar el modelo hidrológico GR2M como una herramienta confiable para la simulación del caudal en futuros estudios relacionados con la disponibilidad de agua ya que los resultados obtenidos durante la calibración y validación del modelo demostraron un ajuste eficiente, por lo tanto, se recomienda utilizar este modelo en estudios futuros para evaluar la oferta hídrica y realizar proyecciones hidrológicas en las demás cuencas de la región Puno.
- Con base en las proyecciones realizadas y considerando la disminución general en los niveles de caudal en la cuenca del río Huancané debido al cambio climático, se recomienda enfocar los esfuerzos de investigación en el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación, alternativas de almacenamiento, estudios de eficiencia y conservación del agua, planes de gestión del agua, etc. Estas recomendaciones buscan orientar la investigación hacia acciones prácticas que puedan contribuir a enfrentar los desafíos planteados por la disminución de la oferta hídrica en la cuenca del río Huancané debido al cambio climático.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET y OECC. (2021). Cambio Climático: Bases físicas. Guía resumida del sexto informe de evaluación del IPCC. Grupo de trabajo I. Climate Change. *The Physical Science Basis*.
- Alencar, K. M. y Silva, R. (2017). Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó–Pernamcuco–Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, 1(58), 295-313. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/9383>.
- Allani, M., Mezzi, R., Zouabi, A., Béji, R., Joumade, F., Hamza, M. E., & Sahli, A. (2020). Impact of future climate change on water supply and irrigation demand in a small Mediterranean catchment. Case study: Nebhana dam system, Tunisia. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1724-1747.
- Arias, F. (2012). El Proyecto de investigación introducción a la metodología científica. *Editorial Episteme*. <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigación-F.G.-Arias-2012-pdf-1.pdf>.
- Arnell, N. W., Vuuren, D. P., & Isaac, M. (2011). The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environmental Change*, 21(2), 592-603. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378011000161>.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Obando, F. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770-785. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E. & Felipe, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>



- Bajracharya, A. R., Bajracharya, S. R., Shrestha, A. B., & Maharjan, S. B. (2018). Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*, 625, 837–848. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717337658>
- Borja, P., Bievre, B., Célleri, R., Llambí, L. D., Ochoa, B., & Soto, W. A. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. *Ecuador*. 238, 239.
- Cabrera, J. (2013). Modelos agregados: GR2M. *SSPP*, 1(1).
- Cepeda, J. (2017). Análisis de los caudales nivo-glaciares históricos y proyectados en la cuenca del Río Olivares: Comparación entre el modelo DHSVM y WEAP. Universidad de Chile. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144605>
- Charles, P., Claude, M., & Vazken, A. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref. *UR Hydrosystèmes et Bioprocédés*.
- Cruz, E., y Romero, J. (2018). Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: GR2M, TEMEZ y LUTZ-SCHOLZ aplicados en la subcuenca del río Callazas. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3003586>
- Coaquira, L. K. (2023). Estimación de la oferta hídrica en la cuenca del río Ilave en condiciones de cambio climático. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/20197>.
- Easton, Z. M. (2020). Hydrology Basics and the Hydrologic Cycle.
- Ebi, K. L., Hallegatte, S., Kram, T., Arnell, N. W., Carter, T. R., Edmonds, J., ... & Zwickel, T. (2014). A new scenario framework for climate change research: background, process, and future directions. *Climatic Change*, 122, 363-372. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0912-3>
- 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://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/>



- Hadour, A., Mahé, G., & Meddi, M. (2020). Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100671. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581819301041>
- Hausfather, Z. (2019). CMIP6: the next generation of climate models explained. *Carbon Brief*, 2. <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-modelsexplained>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2016). *Metodología de la investigación. 6ta Edición Sampieri. Soriano*. Guía para realizar investigaciones sociales. Plaza y Valdés.
- Huamani, Y. (2022). Influencia del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas, aplicando el modelo hidrológico WEAP, 2021. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. <https://repositorio.unica.edu.pe/handle/20.500.13028/4407>
- Huarahuara, L. L. (2022). Efectos del cambio climático sobre la temperatura y precipitación en la cuenca hidrográfica Huancané – Puno. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19286>
- Huerta, A., Aybar, C., & Lavado-Casimiro, W. (2018). PISCO temperatura v. 1.1. *SENAMHI-DHI*. (Lima, Peru). <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>
- Iguchi, T., Kozu, T., Meneghini, R., Awaka, J., & Okamoto, K. I. (2000). Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 39(12), 2038-2052. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/39/12/1520-0450\\_2001\\_040\\_2038\\_rpaftt\\_2.0.co\\_2.xml?tab\\_body=pdf](https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/39/12/1520-0450_2001_040_2038_rpaftt_2.0.co_2.xml?tab_body=pdf)
- Ilbay-Yupa, M., Ilbay, F., Zubieta, R., García-Mora, M., & Chasi, P. (2021). Impacts of climate change on the precipitation and streamflow regimes in equatorial regions: Guayas river basin. *Water*, 13(21), 3138. <https://doi.org/10.3390/w13213138>



- IPCC, A. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1535.
- Juncosa, R., y Padilla, F. (2009). Capítulo 4: Evaporación y transpiración. Evapotranspiración. *Hidrología superficial y subterránea*, 24.
- Khan, F., & Pilz, J. (2018). Statistical methodology for evaluating process-based climate models. In *Climate Change and Global Warming*. IntechOpen. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=NBT8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA43&dq=Khan+y+Pilz+\(2018\)&ots=rmWa9Gn8Vf&sig=UYrnFhICxTBbenIEvatuy5nZeHg#v=onepage&q=Khan%20y%20Pilz%20\(2018\)&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=NBT8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA43&dq=Khan+y+Pilz+(2018)&ots=rmWa9Gn8Vf&sig=UYrnFhICxTBbenIEvatuy5nZeHg#v=onepage&q=Khan%20y%20Pilz%20(2018)&f=false)
- Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R. J., Moss, R. H., & Wilbanks, T. (2012). The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 22(4), 807-822. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378012000593>
- Kriegler, E., Edmonds, J., Hallegatte, S., Ebi, K. L., Kram, T., Riahi, K., ... & Van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions. *Climatic Change*, 122, 401-414. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0971-5>
- León, R. F., Portuguez, D. M., & Chávarri, E. A. (2019). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura-Perú, considerando la incidencia del cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 182-193. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2313-29572019000300004&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2313-29572019000300004&script=sci_arttext)
- Llauca, H., Lavado, W., Montesinos, C., Santini, W. & Rau, P. (2021). PISCO\_HyM\_GR2M: Un modelo de balance hídrico mensual en Perú (1981-2020). *Agua*, 13, 1048. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/8/1048#B57-water-13-01048>
- Llauca, H. y Montesinos, C. (2020). Modelamiento hidrológico mensual a nivel nacional para el monitoreo de sequías en el Perú. *Estudios Hidrológicos del SENAMHI*, 10.



- López, 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]. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3399916>
- Lujano, E., Hidalgo, L., Tapia, B., Lujano, A. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4. 5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el Altiplano Peruano. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 18(2), 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5560554>
- Mafilika, S. B. (2021). *Using stable isotopes to understand relative contributions of evaporation and evapotranspiration on groundwater recharge in the Verlorenvlei catchment, west coast, South Africa* [Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University]. <https://scholar.sun.ac.za/items/10b48ef6-818a-437c-9c0e-c35c742c02f7>
- Marín, A. P. G., Cañas, J. R., Gualda, J. E., Pérez, F. M., Serrat, A., González, J., ... & Cervera, J. V. G. (2014). Hydrology and its role in water engineering. *Ingeniería del agua*, 18(1), 1-14. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4820612>
- Mediero, L. J. (2007). *Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido* [Doctoral dissertation, UPM]. <https://oa.upm.es/669/>
- Molina, M., Ochoa, C., & Ortega, E. (2020). Comparación de dos medias. Pruebas de la t de Student. *EVIDENCIAS EN PEDIATRÍA-Toma de Decisiones Clínicas Basadas en Pruebas Científicas*, 16(4), 4. [https://evidenciasenpediatria.es/files/41-13858-RUTA/51\\_Fundamentos\\_ComparacionMedias.pdf](https://evidenciasenpediatria.es/files/41-13858-RUTA/51_Fundamentos_ComparacionMedias.pdf)
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Comparative analysis of continuous simulation hydrological models in high-mountain watersheds: Chinchiná River case. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242014000100004&script=sci\\_abstract&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242014000100004&script=sci_abstract&tlng=en)



- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global environmental change*, 42, 169-180.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378015000060>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.  
<https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/>
- Ouhamdouch, S., Bahir, M., Carreira, P. M., & Zouari, K. (2019). Climate change impact on future flows in semi-arid environment, case of Essaouira Basin (Morocco). In *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1), Tunisia 2018* (pp. 305-308). Springer International Publishing.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01572-5\\_72](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01572-5_72)
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4), 290-306.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169404004056>
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., ... & Okem, A. (2022). IPCC, 2022: Summary for policymakers.  
<https://edoc.unibas.ch/91322/>
- Puertas, O. L., Carvajal, Y., & Quintero, A. M. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. *Dyna*, 78(169), 112-120.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532011000500013&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532011000500013&script=sci_arttext)
- Pulido, D., Collados, A. J., Pérez, J., Segura, F. J., & Senent, J. (2021). Climate change impacts on the streamflow in Spanish basins monitored under near-natural



- conditions. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100937.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221458182100166X>
- Quispe, K., y Huanca, C. (2021). Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca Ilave bajo escenario climático. [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana Unión].  
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3001633>
- Rauscher, S. A., Coppola, E., Piani, C., & Giorgi, F. (2010). Resolution effects on regional climate model simulations of seasonal precipitation over Europe. *Climate dynamics*, 35, 685-711. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-009-0607-7>
- Rodas Guizado, 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://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3267978>
- Rodríguez, F. E., & Villalba, A. J. (2021). Comparación de los modelos hidrológicos lluvia–escorrentía GR2M y GR4J en la obtención de caudales medios en la cuenca del río Subachoque. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia].  
<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/e23ea41d-058b-4a98-b081-f35922b5111c>
- Seiller, G., Roy, R., & Anctil, F. (2017). Influence of three common calibration metrics on the diagnosis of climate change impacts on water resources. *Journal of Hydrology*, 547, 280-295.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169417300744>
- Tello, K. R. (2019). Disponibilidad de agua de escorrentía en la captación del Río Ronquillo en base a información climática. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22167>
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., ... & Alcántara, J. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <https://www.fondoeditorialunalm.com/wp-content/uploads/2020/09/CUENCAS-HIDROGRAFICAS.pdf>



- Voltaire, A., Saint, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., ... & Waldman, R. (2019). Evaluation of CMIP6 deck experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(7), 2177-2213. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019MS001683>
- Webera, J. F., Dasso, C. M., & Jorquera, E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica computacional*, 29(39), 4013-4037. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/188477>.
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., ... & Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47(1). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GL085782>
- Zubieta, R., Molina, J., Laqui, W., Sulca, J., & Ilbay, M. (2021). Comparative analysis of climate change impacts on meteorological, hydrological, and agricultural droughts in the lake Titicaca basin. *Water*, 13(2), 175. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/2/175>



## ANEXOS



Matriz de consistencia

ANÁLISIS DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO HUANCANÉ

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN
<p>Estimar la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Huancané bajo escenarios de cambio climático en el horizonte 2025 – 2050?</p> <p>Calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M para la representación de los caudales de la cuenca del río Huancané?</p> <p>Simular y analizar la variación de la oferta hídrica mensual bajo escenario de cambio climático en el horizonte 2025 – 2050?</p>	<p><b>O. General</b></p> <p>Estimar la oferta hídrica superficial mensual en la cuenca del río Huancané, en escenarios de cambio climático en el horizonte 2025 – 2050.</p> <p><b>O. Específicos</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M para la representación de los caudales en la cuenca del río Huancané.</li> <li>2. Simular y analizar la variación de la oferta hídrica mensual bajo escenario de cambio climático en el horizonte 2025 – 2050.</li> </ol>	<p><b>H. General</b></p> <p>La oferta hídrica superficial en la cuenca del río Huancané experimentará variaciones significativas en el horizonte 2025-2050 bajo distintos escenarios de cambio climático.</p> <p><b>H. Específicos</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La calibración y validación del modelo GR2M permite una mejor representación de los caudales de la cuenca del río Huancané.</li> <li>2. El análisis de la oferta hídrica mensual presenta variaciones en las simulaciones del horizonte 2025 – 2050 bajo escenarios de cambio climático.</li> </ol>	<p><b>V. Independiente</b></p> <p>Escenarios de cambio climático (precipitación, temperatura).</p> <p><b>V. Dependiente</b></p> <p>Oferta hídrica superficial (caudal).</p>	<p><b>Tipo:</b></p> <p>Aplicativo</p> <p><b>Enfoque:</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p><b>Diseño:</b></p> <p>No experimental</p> <p><b>Nivel:</b></p> <p>Explicativo</p>



## ANEXO 2: Datos de entrada al modelo hidrológico GR2M

### a. Precipitación histórica de la cuenca del río Huancané

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (mm) - PRODUCTO PISCO												
Departamento:	PUNO		Provincia:	HUANCANÉ				Distrito:	HUANCANÉ			
Latitud:	15°16'27"		Longitud:	69°48'43"				Altitud:	3806-5100 msnm.			
Cuenca:	HUANCANÉ		Propietario:	SENAMHI								
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
1981	130.00	112.63	99.97	55.70	5.62	3.62	0.64	28.38	36.72	82.89	57.97	129.10
1982	175.10	70.61	84.43	50.11	1.35	1.30	1.73	8.76	64.64	50.40	116.56	64.67
1983	102.00	69.58	42.78	42.87	11.46	3.41	3.47	1.56	23.00	22.13	35.26	92.89
1984	214.66	190.64	107.85	27.98	15.84	13.65	3.40	22.07	2.20	72.88	156.51	138.10
1985	145.01	119.96	97.50	90.44	25.79	18.83	0.57	3.88	62.74	33.62	165.27	183.84
1986	140.56	163.51	120.87	84.75	9.82	0.98	5.67	17.61	64.80	15.36	75.43	151.39
1987	158.47	120.60	57.42	30.26	8.32	5.49	43.88	10.09	7.80	46.36	102.84	75.08
1988	132.67	82.38	174.46	84.81	40.39	1.21	0.73	1.28	6.93	45.44	11.66	126.37
1989	151.71	104.82	96.77	52.37	5.50	12.96	1.50	19.87	27.94	22.63	45.64	78.48
1990	146.05	143.20	46.65	29.61	11.14	75.02	0.58	11.20	21.01	82.12	93.51	113.49
1991	123.04	105.51	115.85	32.07	18.25	59.01	4.35	1.91	17.99	24.67	55.59	114.83
1992	131.26	73.46	41.34	15.44	0.57	9.86	5.68	6.45	10.21	49.05	63.38	112.02
1993	155.46	68.18	91.33	62.67	15.39	4.49	2.09	16.38	25.38	56.93	116.01	151.27
1994	142.31	124.31	104.50	59.06	14.87	3.31	0.56	1.64	9.35	30.43	64.33	131.08
1995	98.32	117.11	100.07	10.11	5.43	0.82	2.14	0.99	13.77	20.37	77.22	110.40
1996	154.93	145.60	77.77	25.24	14.53	0.94	4.18	7.79	20.37	21.74	91.61	111.16
1997	163.23	117.41	145.36	60.02	7.31	0.91	1.01	20.80	38.97	32.71	103.42	79.61
1998	113.45	142.60	91.79	30.46	0.52	13.79	0.56	1.67	3.32	59.80	84.87	26.71
1999	96.21	76.46	157.51	45.56	12.98	2.04	1.62	0.77	45.52	57.65	42.70	61.27
2000	139.74	110.89	80.16	12.75	9.37	24.85	1.84	17.30	13.76	95.24	15.73	121.52
2001	199.35	108.29	173.52	29.85	38.54	5.62	8.42	10.75	17.91	62.53	64.70	101.79
2002	98.06	152.00	128.29	42.84	16.42	2.84	31.29	8.20	36.77	45.60	83.97	115.79
2003	176.82	116.13	121.08	41.14	8.17	14.94	1.74	12.02	23.11	38.51	41.14	120.11
2004	183.54	117.29	62.14	39.33	12.17	11.46	7.33	24.40	31.38	17.52	67.49	77.90
2005	91.63	160.93	58.62	22.68	2.35	0.86	1.12	4.39	18.68	62.14	66.00	109.39
2006	184.85	51.37	58.37	42.95	2.63	6.62	0.49	6.07	24.20	44.95	73.93	108.86
2007	110.84	129.50	134.00	58.71	18.96	1.83	2.30	0.90	51.12	22.79	71.57	97.99
2008	137.95	80.29	68.72	7.17	8.07	3.01	0.77	1.81	11.28	57.21	46.45	153.72
2009	106.12	93.30	53.59	13.84	6.17	0.89	4.09	0.37	16.29	25.72	91.61	116.24
2010	162.27	129.55	69.30	23.67	21.30	1.48	1.54	1.69	1.37	36.91	15.16	131.91
2011	78.19	147.69	80.11	23.65	5.87	2.11	7.29	5.79	54.38	52.88	34.95	139.12
2012	115.68	144.94	99.04	51.51	4.48	3.22	2.44	2.70	15.35	26.28	47.88	172.84
2013	124.90	152.10	96.56	30.13	31.07	11.20	10.13	11.60	34.48	80.18	44.83	159.82
2014	141.33	114.21	68.03	33.61	12.15	1.74	9.00	17.75	41.51	42.62	28.08	120.55
2015	162.95	107.19	60.94	65.95	12.07	5.20	5.02	14.82	44.44	52.11	63.20	128.79
2016	79.12	200.71	21.35	47.89	2.09	1.67	13.57	8.25	32.68	53.28	47.09	101.12
Prom	137.99	118.47	91.33	41.03	12.14	9.20	5.35	9.22	26.98	45.66	68.43	114.70
Max	214.66	200.71	174.46	90.44	40.39	75.02	43.88	28.38	64.80	95.24	165.27	183.84
Min	78.19	51.37	21.35	7.17	0.52	0.82	0.49	0.37	1.37	15.36	11.66	26.71



b. Evapotranspiración histórica de la cuenca del río Huancané

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL (mm) - PRODUCTO PISCO												
Departamento:	PUNO			Provincia:	HUANCANÉ			Distrito:	HUANCANÉ			
Latitud:	15°16'27"			Longitud:	69°48'43"			Altitud:	3806-5100 msnm.			
Cuenca:	HUANCANÉ			Propietario:	SENAMHI							
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
1981	41.87	35.38	37.42	46.35	54.11	64.80	72.84	73.77	70.42	72.19	66.38	60.48
1982	52.53	40.02	39.31	37.93	43.49	51.52	64.64	73.96	75.52	76.33	73.62	76.13
1983	69.30	54.68	49.55	44.75	42.50	40.80	54.89	62.81	68.20	72.46	72.19	73.72
1984	68.87	60.33	60.39	49.37	42.22	39.32	40.39	50.21	56.25	65.63	70.78	74.20
1985	71.30	64.23	64.25	59.75	53.54	42.40	40.61	38.29	41.43	54.74	61.62	74.00
1986	76.06	66.11	71.48	69.07	65.89	54.03	50.03	42.07	38.12	42.82	45.38	60.99
1987	68.72	64.82	73.60	70.44	68.38	65.24	59.79	49.93	41.35	41.67	37.81	46.47
1988	57.01	60.64	69.96	71.29	71.00	66.63	68.48	59.50	50.68	43.52	39.84	37.21
1989	45.12	47.29	62.87	66.48	73.01	69.94	74.58	73.57	63.78	56.70	43.96	38.27
1990	37.55	38.71	46.99	57.63	64.04	65.22	73.86	45.57	48.47	63.14	63.29	68.14
1991	67.60	57.43	63.16	59.17	50.92	42.18	36.26	31.90	38.65	51.63	54.96	62.04
1992	63.03	62.04	67.09	61.40	59.94	52.04	40.96	34.25	33.70	35.65	43.30	55.54
1993	60.59	59.50	70.90	67.08	67.41	60.59	58.45	47.32	37.15	36.75	37.77	46.57
1994	55.17	57.04	70.93	71.81	74.35	69.68	67.92	62.55	51.38	44.23	35.47	36.35
1995	45.51	50.79	63.06	67.60	69.31	70.19	68.33	65.40	59.35	55.60	44.17	41.82
1996	38.95	37.22	48.69	58.92	67.72	64.01	73.58	71.66	66.12	65.62	58.04	50.85
1997	44.49	33.37	38.99	44.58	52.89	64.65	72.06	73.95	69.69	73.07	67.48	61.22
1998	53.06	40.34	38.18	35.40	41.77	50.99	62.10	66.33	68.57	72.22	66.88	68.90
1999	62.00	49.62	48.25	40.07	38.50	37.79	45.77	54.51	62.02	66.39	69.30	67.76
2000	66.47	59.61	57.80	48.09	40.49	36.64	38.68	42.30	51.93	62.50	66.83	73.70
2001	70.69	61.23	66.14	57.47	51.84	40.72	35.19	35.08	40.20	52.44	57.58	66.00
2002	68.99	64.99	69.55	64.24	61.00	52.65	42.81	36.83	35.56	40.31	47.07	57.59
2003	65.29	61.77	66.90	65.77	65.94	62.22	57.91	49.95	36.00	34.18	34.87	46.85
2004	53.73	61.32	65.12	67.03	69.97	63.56	63.04	55.50	44.58	38.48	35.98	36.96
2005	41.44	50.09	60.94	66.51	73.62	75.41	80.21	75.44	67.88	60.01	44.80	41.34
2006	39.26	38.35	52.08	59.34	67.35	69.28	75.94	73.24	67.87	64.97	58.25	51.21
2007	41.39	33.40	40.17	45.85	55.47	62.65	66.30	72.47	69.38	70.08	65.60	61.24
2008	54.49	42.96	40.17	34.55	45.56	53.13	61.48	68.16	70.06	71.57	65.76	68.89
2009	63.38	52.42	48.14	40.84	39.05	40.69	51.07	62.70	66.84	74.67	71.75	73.31
2010	71.57	60.75	62.06	50.86	45.87	39.20	39.23	48.85	56.27	67.69	68.56	74.36
2011	77.19	66.55	69.94	60.76	53.75	42.85	39.26	37.71	40.80	50.40	58.41	69.18
2012	74.50	68.95	70.59	66.21	65.30	55.08	43.95	37.42	36.42	40.05	48.18	58.30
2013	68.10	64.34	73.78	68.58	70.24	64.62	60.53	46.99	38.74	36.26	36.68	44.30
2014	54.06	57.16	68.90	70.59	68.67	67.35	67.14	61.97	49.53	39.06	37.01	34.34
2015	45.50	45.69	60.24	67.67	71.11	70.65	75.27	70.81	61.54	56.25	45.37	40.33
2016	38.65	39.35	51.86	59.58	66.21	65.69	71.58	71.02	65.24	61.84	54.75	45.80
Prom	57.60	53.01	58.60	57.58	58.68	56.51	58.20	56.22	53.88	55.86	54.16	56.79
Max	77.19	68.95	73.78	71.81	74.35	75.41	80.21	75.44	75.52	76.33	73.62	76.13
Min	37.55	33.37	37.42	34.55	38.50	36.64	35.19	31.90	33.70	34.18	34.87	34.34

### ANEXO 3: Calibración y validación del modelo GR2M y caudales simulados

#### a. Calibración

	A	B	C	D	E
1	<b>Modelo lluvia-caudal mensual GR2M (version Mouelhi et al., 2006)</b>				
2					
3					
4					
5					
6					
7	<b>Nombre de la cuenca</b>		Huancané		
8					
9	<b>Superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>		3631.19		
10					
11	<b>Parametros del modelo</b>		<b>Transf.</b>	<b>Real</b>	
12	x1: Capacidad del reservorio de producción (mm)		6.28	536.29	
13	x2: Parametro de intercambio (mm)		0.79	0.79	
14					
15	<b>Valores iniciales</b>				
16	Nivel de llenado inicial S0 (max.: x1 mm)			262.85	
17	Nivel de llenado inicial R0 (max.: 60 mm)			30	
18					
19	<b>Periodo</b>				
20	Duración del período de puesta en marcha (calentamiento) (meses)			12	
21	Duración del período de test (meses)			263	
22	Fecha de inicio de la simulación			01/1982	
23	Fecha del fin			12/2003	
24					
25	Promedio de las lluvias observadas (mm/mes)			58.2	
26	Promedio de la EVP observado (mm/mes)			55.9	
27	Promedio de los caudales observados (mm/mes)			13.2	
28	Promedio de la raíz cuadrada de los caudales observados			3.1	
29	Promedio de los logaritmos de los caudales observados			2.0	
30					
31	<b>Criterios de eficiencia (%)</b>				
32	Nash(Q)			89.2	
33	Nash(raiz(Q))			89.3	
34	Nash(ln(Q))			82.4	
35	Balance			99.2	
36					

#### b. Validación

	A	B	C	D	E
1	<b>Modelo lluvia-caudal mensual GR2M (version Mouelhi et al., 2006)</b>				
6					
7	<b>Nombre de la cuenca</b>		Huancané		
8					
9	<b>Superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>		3631.19		
10					
11	<b>Parametros del modelo</b>		<b>Transf.</b>	<b>Real</b>	
12	x1: Capacidad del reservorio de producción (mm)		6.28	536.29	
13	x2: Parametro de intercambio (mm)		0.79	0.79	
14					
15	<b>Valores iniciales</b>				
16	Nivel de llenado inicial S0 (max.: x1 mm)			262.85	
17	Nivel de llenado inicial R0 (max.: 60 mm)			30	
18					
19	<b>Periodo</b>				
20	Duración del período de puesta en marcha (calentamiento) (meses)			0	
21	Duración del período de test (meses)			155	
22	Fecha de inicio de la simulación			01/2004	
23	Fecha del fin			12/2016	
24					
25	Promedio de las lluvias observadas (mm/mes)			53.1	
26	Promedio de la EVP observado (mm/mes)			57.3	
27	Promedio de los caudales observados (mm/mes)			10.4	
28	Promedio de la raíz cuadrada de los caudales observados			2.8	
29	Promedio de los logaritmos de los caudales observados			1.8	
30					
31	<b>Criterios de eficiencia (%)</b>				
32	Nash(Q)			76.2	
33	Nash(raiz(Q))			71.1	
34	Nash(ln(Q))			56.3	
35	Balance			104.2	
36					

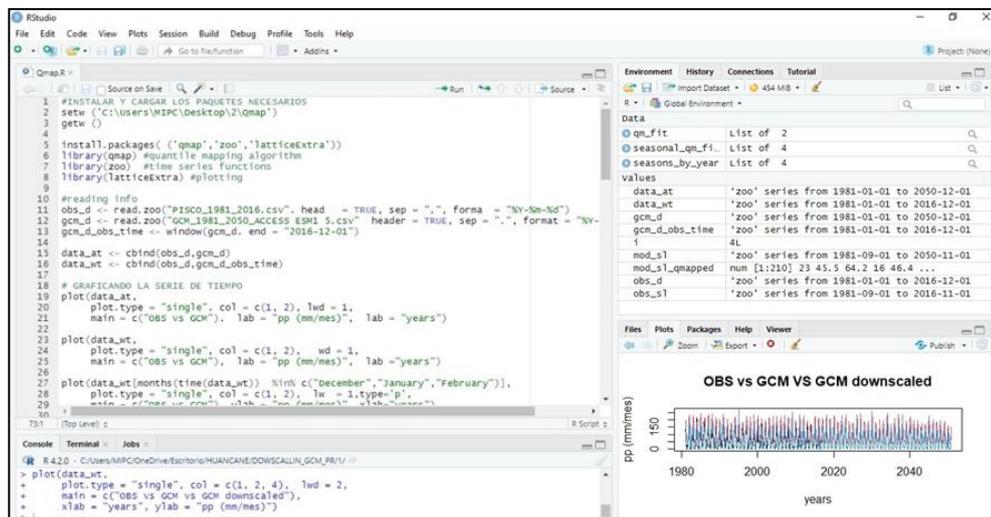
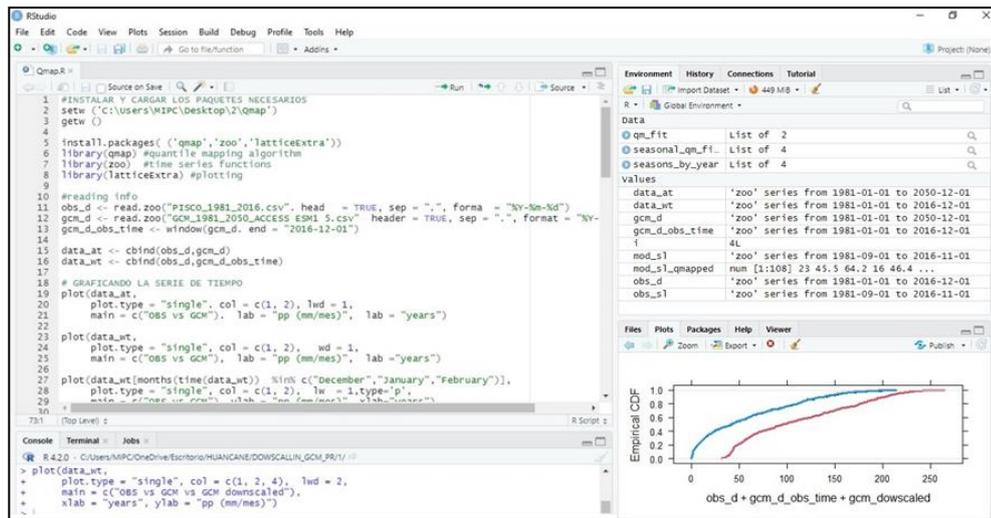
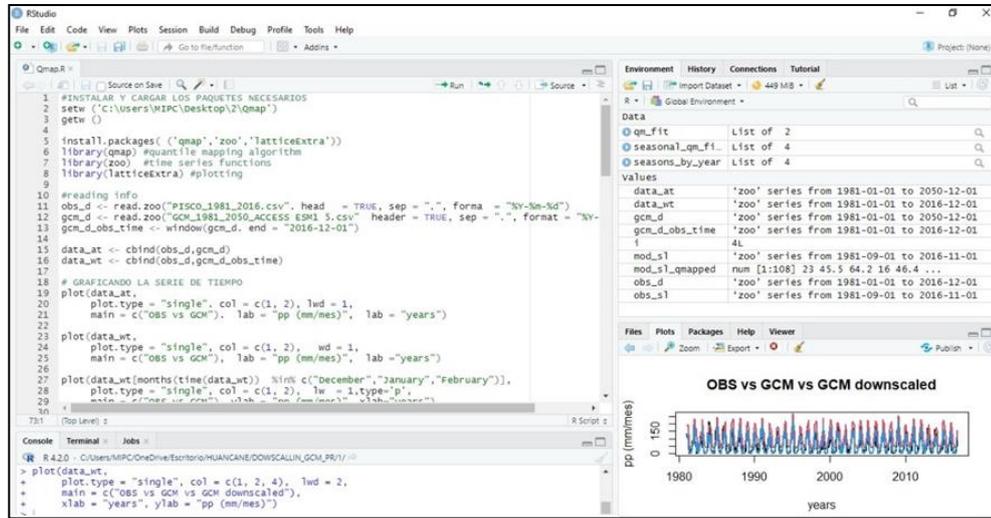


c. Caudales simulados por el modelo hidrológico GR2M periodo 1981 – 2016

Caudal historico SIMULADO - GR2M												
Departamento:	PUNO		Provincia:	HUANCANÉ		Distrito:	HUANCANÉ					
Latitud:	15°16'27"		Longitud:	69°48'43"		Altitud:	3806-5100 msnm.					
Cuenca:	HUANCANÉ											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
1981	49.76	62.87	57.53	38.42	14.39	6.92	3.29	2.60	2.49	4.84	5.97	17.92
1982	54.32	42.70	40.69	30.22	11.90	6.07	3.15	1.84	3.11	3.44	10.62	10.75
1983	17.67	19.26	13.05	11.64	6.33	3.57	2.03	1.09	0.94	0.74	0.79	2.53
1984	31.73	83.41	58.91	25.43	12.95	8.24	4.57	3.71	2.10	4.29	22.66	40.05
1985	56.05	60.74	46.27	42.22	18.77	11.13	5.43	3.07	6.11	5.53	31.00	69.71
1986	68.67	92.07	66.49	46.05	15.09	6.61	3.58	2.57	5.07	3.48	7.80	31.05
1987	59.24	63.35	30.89	15.98	6.85	3.49	3.57	2.07	1.32	1.78	7.64	12.92
1988	33.97	35.28	68.81	45.37	21.83	8.29	3.71	1.81	1.10	1.35	1.00	7.23
1989	33.25	47.38	43.47	27.03	9.75	5.32	2.52	1.64	1.35	1.02	1.36	3.66
1990	22.20	58.22	30.43	18.10	8.54	13.14	5.31	2.97	2.30	5.12	11.36	22.24
1991	35.58	43.75	47.25	22.15	11.18	13.86	6.90	3.73	3.19	2.84	4.59	14.37
1992	32.29	29.97	16.58	8.48	3.71	2.28	1.35	0.84	0.62	1.12	2.88	11.66
1993	38.89	32.09	31.49	24.01	10.27	4.89	2.44	1.63	1.50	2.64	12.76	42.29
1994	64.69	73.31	55.19	32.32	12.52	5.53	2.59	1.29	0.82	0.75	1.71	11.84
1995	23.89	45.12	42.97	15.31	6.51	3.11	1.59	0.82	0.56	0.42	1.21	6.58
1996	33.09	70.85	47.17	22.15	10.49	4.83	2.48	1.37	1.03	0.76	2.44	9.19
1997	39.05	59.45	80.34	46.90	17.11	7.65	3.65	2.53	2.54	2.13	6.33	9.84
1998	21.53	52.64	46.78	25.85	10.77	7.20	3.58	1.83	1.06	1.61	4.08	3.04
1999	7.46	12.57	39.52	25.60	12.55	6.62	3.64	1.94	2.72	3.94	4.13	5.29
2000	19.14	32.84	28.26	12.66	6.65	5.70	3.16	2.45	1.86	6.05	3.85	12.35
2001	52.16	52.89	80.18	29.00	18.52	9.00	5.43	3.62	3.07	5.56	8.70	17.36
2002	24.23	54.01	55.25	26.66	11.79	5.59	4.93	2.94	3.53	4.63	11.07	25.47
2003	64.26	64.32	59.07	27.70	10.65	6.14	3.00	1.85	1.62	1.97	2.83	13.38
2004	79.46	73.61	37.01	21.08	9.05	4.90	2.63	1.94	1.87	1.41	3.36	8.10
2005	17.99	60.72	32.81	15.69	6.17	2.92	1.45	0.77	0.54	0.82	1.87	8.63
2006	50.95	35.61	27.31	19.62	7.57	3.93	1.90	1.03	0.80	0.89	2.13	8.32
2007	21.65	51.46	69.34	42.50	18.50	8.01	3.87	1.87	2.38	1.72	3.21	8.21
2008	26.54	31.54	27.86	12.86	6.94	3.83	2.01	1.07	0.72	1.08	1.46	11.70
2009	21.79	30.60	21.11	11.03	5.76	3.20	1.90	1.01	0.78	0.66	2.28	8.81
2010	33.12	51.89	32.19	16.01	9.44	4.83	2.67	1.47	0.87	0.98	0.75	5.15
2011	8.56	30.21	25.37	12.60	5.63	2.95	1.81	1.11	2.09	3.38	3.58	16.79
2012	28.63	53.99	42.13	24.92	9.01	4.36	2.29	1.27	1.01	1.00	1.75	20.02
2013	37.05	67.41	46.65	20.32	11.50	5.83	3.19	1.90	1.98	5.16	6.63	35.06
2014	60.49	65.98	37.21	19.13	8.35	3.87	2.15	1.41	1.58	1.93	2.02	11.31
2015	47.24	58.31	34.26	28.49	11.09	5.15	2.57	1.54	1.67	2.17	3.91	17.32
2016	23.74	95.83	28.60	22.79	8.53	4.07	2.49	1.38	1.26	1.68	2.25	7.53
Prom	37.23	52.67	43.01	24.62	10.74	5.92	3.13	1.89	1.88	2.47	5.61	15.77
Max	79.46	95.83	80.34	46.90	21.83	13.86	6.90	3.73	6.11	6.05	31.00	69.71
Min	7.46	12.57	13.05	8.48	3.71	2.28	1.35	0.77	0.54	0.42	0.75	2.53

## ANEXO 4: Proceso de Dowscaling o reducción de escala de los GCMs

### a. Procedimiento en el software RStudio



b. Códigos utilizados en el software RStudio

```
#INSTALAR Y CARGAR LOS PAQUETES NECESARIOS
Setw ('C:\Users\MIPC\Desktop\2\Qmap')
Getw ()

install.packages(('qmap','zoo','latticeExtra'))
library(qmap) #quantile mapping algorithm
library(zoo) #time series functions
library(latticeExtra) #plotting

#reading info
obs_d <- read.zoo("PISCO_1981_2016.csv", head = TRUE, sep = ".", forma = "%Y-
%m-%d")
gcm_d <- read.zoo("GCM_1981_2050_ACCESS ESM1 5.csv" header = TRUE, sep =
".", format = "%
gcm_d_obs_time <- window(gcm_d, end = "2016-12-01")

data_at <- cbind(obs_d,gcm)
data_wt <- cbind(obs_d,gcm_obs_time)

# GRAFICANDO LA SERIE DE TIEMPO
plot(data_at,
      plot.type = "single", col = (1, 2), lwd
      main = c("OBS vs GCM"), ylab = "pp (mm/mes)" = "years")

plot(data,
      plot.type = "single", col = c(1, 2), lwd = 1,
      main = c("OBS vs GCM"), ylab = "pp (mm/mes)"="years")

plot(data_wt[months(time(data_wt)) %in% c("December","January","February")],
      plot.type = "single", col = c(1, 2), lwd = 1,type='p',
      main = c("OBS vs GCM"), ylab = "pp (mm/mes)", xlab="years")

# Graficando scatterplot

Plot(gcm_d_obs_time~obs_coredata(data), col = (1,2))
Plot(gcm_d_obs_time~obs
      coredata(data_w[mont(time(data_wt)) %in%
      c("December","January","February")]), col =(1,2))

#### seasonal quantile empirical mapping ####

data_gcm_downscaled <- data_gcm_obs_time
seasons_by_year <- list(c("December","January","February"),
      c("March","April","May"),
      c("June","July","August"),
      c("September","October","November"))
seasonal_fit_model <- list()
```



```
## funcion quantil mapping 0.1 es a correccion, es linea

for(1:4)
  obs_sl <- data_wt[months(time(data_wt)) % seasons_by_year[[i]]]
  mod_s <- data_wt[months(time(data_wt)) % seasons_by_year[[i]]]

#MODEL, read!: L. Gudmundsson et al. (2012)
qm_fit <- fitQmapQUANT(obs = coredata(obs_sl), coredata(mod_sl),
  qstep = boot = 1, day = TRUE, type="linear")

# Graficando
plot(data_wt,
  plot.type = "single", col = (1, 2, 4), ld = 2,
  main = c("OBS vs GCM vs GCM downscaled"),
  xlb = "years", ylab = "pp (mm/mes)")

plot(gcm_downscaled~obs_d, coredata(data_t), col = c(4,1))

plot(gcm_downscaled~obs_d, coredata(data_w[months(time(data_t)) %
  ("December","January","February")]),

ecdfplot(~ obs_d + gcm_d_obs_time + gcm_downscaled,
  data = data. (data_wt[months(times(data_y)) %in%
  c("Dicember","January","February")]),
  ld = 3, col = c(1, 2, 4))
ecdfplot(~ obs_d + gcm_downscaled, data = data.frame(data_wt),
  lwd = 3, col = c(1, 2, 4))

# INTERPOLANDO LA INFORMACION
plot(datosobs$Valor,type="l",col="black",xlab="Años",ylab="Pr (C)",
main="1981-2050",xaxt="n",ylim=c(12,28))
axis(1,at=seq(1,360,1),labels=datosobs$Anyo)
lines(datosohist[4],type="l",col="red")
lines(datosohistajus[3],type="l",col="blue")
legend("topleft",c("Observados","Modelo sin ajustar","Modelo ajustado"),
fill=c("black","red","blue"),cex=0.4, bty="n")

# Guardando los datos ajustados para GCM
write.zoo(data_c[,3], fyle = "GCM_downscaled_1981_2050_ACCESS ESM1_5.csv" ,
sep = ",")
print("realizado por Edwin Anahua Balcon")
```

### ANEXO 5: Evapotranspiración calculada para los 8 GCMs seleccionados, periodo (2025 – 2050)

Evapotranspiración (2025-2050) Mod: ACCESS ESM1.5													
Departamento:	PUNO	HUANCANÉ										Distrito:	HUANCANÉ
Latitud:	15°16'27"	69°48'43"										Altitud:	3806-5100 msnm.
Cuenca:	HUANCANÉ												
Evapotranspiración (2025-2050) Mod: BCC-CSM2-MR													
Departamento:	PUNO	HUANCANÉ										Distrito:	HUANCANÉ
Latitud:	15°16'27"	69°48'43"										Altitud:	3806-5100 msnm.
Cuenca:	HUANCANÉ												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	
2025	76.28	79.89	70.45	60.61	46.32	41.31	38.66	45.00	58.03	69.68	76.68	75.43	
2026	80.71	79.00	67.67	59.06	47.28	42.44	40.26	44.18	58.49	69.20	76.27	74.64	
2027	79.29	79.83	70.65	58.35	46.08	42.14	39.61	44.60	59.49	69.98	75.40	73.92	
2028	79.06	79.27	66.50	56.64	45.93	41.24	39.01	44.81	58.83	69.93	76.88	81.42	
2029	83.25	83.28	72.98	63.89	52.06	43.71	42.20	46.55	60.73	70.33	78.70	81.55	
2030	81.71	83.45	74.09	63.57	50.02	43.99	41.72	47.32	61.31	71.90	78.52	80.86	
2031	82.98	82.80	72.60	63.70	48.99	43.33	41.85	46.24	60.72	70.31	77.86	79.75	
2032	81.98	81.01	70.36	61.48	47.85	42.58	40.30	45.90	60.49	70.40	76.59	76.37	
2033	79.83	79.49	70.37	57.96	46.68	42.17	40.20	45.09	59.55	69.64	76.32	78.61	
2034	81.24	80.65	71.53	59.88	47.50	42.12	40.28	45.74	59.87	69.99	77.78	80.96	
2035	82.88	81.52	71.73	62.31	48.49	42.90	41.42	46.76	60.75	71.21	77.18	81.53	
2036	82.25	82.14	71.95	62.67	48.00	43.37	41.84	47.27	60.90	70.91	78.51	81.75	
2037	81.75	82.68	72.01	62.23	48.26	43.57	40.37	46.58	60.17	70.28	77.25	81.31	
2038	83.09	83.25	72.86	64.02	49.66	44.58	42.04	48.17	61.22	73.28	79.83	81.99	
2039	84.73	83.92	74.16	64.17	52.82	45.43	43.66	48.88	62.80	75.10	80.72	82.50	
2040	83.71	82.81	74.07	64.83	50.62	44.63	42.96	48.14	61.86	72.46	77.98	78.21	
2041	81.12	80.78	71.78	63.25	49.77	43.85	41.36	47.55	60.88	71.32	78.03	80.92	
2042	82.84	81.89	73.40	64.96	48.29	44.11	41.86	48.02	61.68	73.19	79.08	81.58	
2043	83.94	83.45	73.71	64.16	50.25	43.96	42.94	47.63	61.66	72.55	78.96	82.53	
2044	83.30	82.48	72.91	62.57	48.78	43.77	42.24	47.80	62.25	72.24	78.28	79.23	
2045	82.20	81.54	71.35	60.37	46.89	43.29	40.96	46.22	60.78	70.98	79.30	81.73	
2046	81.99	82.39	73.02	63.49	50.67	44.62	43.38	48.66	63.65	74.67	80.12	82.96	
2047	84.53	83.50	73.64	63.64	49.44	44.76	43.28	48.05	61.63	71.29	78.03	80.81	
2048	81.07	82.01	71.79	62.71	48.04	43.44	41.71	47.88	61.74	71.83	78.64	80.97	
2049	82.59	81.68	72.70	62.78	49.87	45.38	43.26	48.71	61.17	73.29	79.69	81.99	
2050	83.91	83.24	72.67	62.87	48.79	43.75	42.53	48.27	62.66	72.68	79.66	82.69	
Prom	82.12	81.84	71.96	62.16	48.74	43.48	41.53	46.92	60.90	71.49	78.16	80.24	
Max	84.73	83.92	74.16	64.96	52.82	45.43	43.66	48.88	63.65	75.10	80.72	82.96	
Min	76.28	79.00	66.50	56.64	45.93	41.24	38.66	44.18	58.03	69.20	75.40	73.92	

Evapotranspiración (2025-2050) Mod: BCC-CSM2-MR													
Departamento:	PUNO	HUANCANÉ										Distrito:	HUANCANÉ
Latitud:	15°16'27"	69°48'43"										Altitud:	3806-5100 msnm.
Cuenca:	HUANCANÉ												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	
2025	76.77	79.97	70.83	59.09	44.69	42.30	38.45	42.54	57.52	68.33	76.54	72.15	
2026	73.30	78.79	70.70	58.04	44.42	41.66	37.64	42.16	57.35	66.24	74.66	72.33	
2027	76.36	79.97	71.23	59.18	45.52	42.26	38.43	42.98	59.46	67.80	78.03	73.89	
2028	81.09	81.04	71.19	62.39	46.57	42.91	39.37	43.39	59.53	69.40	78.01	72.94	
2029	79.57	79.96	70.41	62.35	45.83	42.57	37.78	42.18	58.47	67.45	77.40	73.12	
2030	81.14	81.38	72.21	62.46	45.09	42.71	38.51	42.96	58.47	67.48	76.99	72.87	
2031	76.31	79.57	70.28	59.52	45.90	42.93	38.57	42.97	59.62	69.23	77.74	73.35	
2032	79.76	80.64	71.11	61.93	46.14	42.99	38.04	42.91	58.45	67.39	76.01	73.12	
2033	80.55	80.53	70.95	57.96	45.92	42.90	39.57	43.50	58.25	67.79	76.51	73.41	
2034	80.62	80.85	71.68	62.84	46.37	42.97	39.69	44.04	60.15	69.11	78.57	75.42	
2035	81.18	81.20	72.08	62.68	46.57	42.94	38.59	43.16	59.81	67.44	77.09	72.85	
2036	76.24	79.54	70.64	62.30	46.17	42.74	38.68	42.76	59.74	70.59	79.38	76.37	
2037	83.06	82.28	73.33	63.29	48.00	43.62	40.81	45.21	61.34	70.80	79.41	75.54	
2038	81.12	80.76	71.47	63.11	47.12	43.67	39.48	45.84	60.84	71.45	80.08	80.82	
2039	83.76	83.44	73.64	63.56	47.40	43.91	40.83	44.48	60.43	69.62	78.30	73.47	
2040	80.89	80.78	71.85	60.78	46.27	43.05	39.38	44.18	60.99	69.53	79.07	78.52	
2041	83.52	82.83	72.67	64.33	47.94	44.03	41.79	44.14	61.36	74.00	80.95	81.21	
2042	83.34	82.79	73.60	64.53	49.79	44.38	40.41	45.31	60.56	72.25	80.08	76.35	
2043	81.29	80.94	72.43	63.41	46.83	43.68	40.41	44.06	60.05	69.27	78.94	76.17	
2044	81.92	82.30	72.88	64.26	48.98	44.28	40.81	45.34	61.70	73.23	80.40	80.82	
2045	83.65	83.60	74.00	64.20	49.44	44.50	42.92	45.37	61.58	73.56	80.34	80.91	
2046	83.87	84.35	74.44	65.12	50.22	44.70	42.99	48.23	61.56	73.56	80.25	76.73	
2047	82.11	82.54	73.79	63.67	49.03	44.54	42.82	47.90	61.51	74.77	81.55	81.86	
2048	83.21	83.07	74.09	64.40	50.64	44.62	42.44	46.08	61.59	73.52	81.54	80.75	
2049	83.50	83.41	74.83	64.78	49.21	44.72	43.03	48.53	61.25	73.63	80.40	80.64	
2050	83.20	83.65	74.74	65.21	50.61	44.91	43.44	48.58	63.59	74.93	82.01	81.34	
Prom	80.82	81.55	72.35	62.52	47.33	43.48	40.19	44.57	60.20	70.48	78.86	76.42	
Max	83.87	84.35	74.83	65.21	50.64	44.91	43.44	48.58	63.59	74.93	82.01	81.86	
Min	73.30	78.79	70.28	57.96	44.42	41.66	37.64	42.16	57.35	66.24	74.66	72.15	



Evapotranspiración (2025-2050) Mod: GWCC-GW2-SR5												
Departamento:	PUNO	Provincia: HUANCANÉ										Distrito:
Latitud:	15°16'27"	Longitud: 69°48'43"										Altitud:
Cuenca:	HUANCANÉ											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	73.51	77.46	66.59	57.19	44.20	40.76	37.39	41.40	55.73	66.86	74.08	72.54
2026	76.82	79.51	69.06	59.14	44.28	41.05	37.43	41.77	56.57	66.81	74.45	70.41
2027	74.74	78.77	66.89	57.39	44.33	41.35	38.40	42.15	57.54	67.82	75.53	72.35
2028	75.17	77.96	67.12	58.24	45.25	41.21	38.32	42.60	59.12	69.06	75.41	71.88
2029	76.43	77.95	69.41	61.52	46.05	42.35	39.51	43.09	59.79	70.51	76.25	73.31
2030	78.46	79.23	70.52	62.06	47.37	42.04	38.91	43.55	59.20	69.11	75.74	73.76
2031	76.98	79.06	69.05	59.28	45.88	41.94	38.61	42.98	58.83	70.13	75.41	71.45
2032	75.53	75.15	68.50	59.12	45.04	41.22	37.59	41.52	57.76	69.61	75.82	71.69
2033	73.09	74.85	66.56	59.12	45.33	41.55	38.53	43.56	59.73	71.32	76.24	72.28
2034	74.02	76.19	66.48	57.89	44.36	41.07	38.31	42.81	58.03	69.14	75.38	70.85
2035	74.66	77.87	67.74	59.13	45.01	41.16	38.89	42.75	59.29	71.64	75.72	73.31
2036	77.05	79.89	69.98	61.86	46.84	41.74	39.28	44.61	59.54	70.55	76.32	75.15
2037	80.55	80.00	70.42	61.82	46.68	41.93	38.93	43.07	60.44	71.71	78.97	76.94
2038	80.70	81.06	70.70	61.59	46.68	42.76	40.09	43.56	60.46	71.94	77.08	76.59
2039	80.69	80.19	69.83	61.37	46.63	42.29	38.91	43.55	60.47	72.16	77.22	74.75
2040	79.66	79.92	70.17	61.41	47.48	42.46	40.19	44.15	60.71	72.48	77.89	76.52
2041	79.16	79.63	69.79	61.91	46.88	43.29	40.26	45.06	62.06	72.53	77.75	76.50
2042	80.73	81.85	73.13	63.63	49.26	44.15	42.24	45.15	62.86	73.35	77.38	78.56
2043	82.34	83.32	74.33	64.23	52.75	45.02	42.64	46.85	64.27	73.09	78.88	77.03
2044	80.56	80.28	69.80	61.81	46.68	42.20	39.95	45.37	60.83	72.54	77.38	73.30
2045	76.75	79.06	69.62	60.06	45.28	42.05	39.45	43.36	59.54	72.05	76.19	73.19
2046	76.87	79.68	70.41	61.77	47.29	42.13	39.89	45.00	62.35	72.22	76.42	75.70
2047	80.81	80.97	71.97	63.30	49.20	44.40	42.39	47.24	64.24	73.91	78.91	78.89
2048	82.08	82.30	72.06	63.63	50.38	44.21	42.38	47.29	63.75	74.14	79.22	80.57
2049	82.78	84.28	74.25	65.45	53.86	45.91	43.08	48.11	65.38	74.92	79.16	80.55
2050	81.54	81.41	71.92	62.80	49.05	43.14	40.59	46.56	62.88	74.10	80.12	76.50
Prom	78.14	79.53	69.86	61.03	47.00	42.44	39.70	44.12	60.44	71.30	76.88	74.83
Max	82.78	84.28	74.33	65.45	53.86	45.91	43.08	48.11	65.38	74.92	80.12	80.57
Min	73.09	74.85	66.48	57.19	44.20	40.76	37.39	41.40	55.73	66.81	74.08	70.41

Evapotranspiración (2025-2050) Mod: CanESM5-CanOE-r2												
Departamento:	PUNO	Provincia: HUANCANÉ										Distrito:
Latitud:	15°16'27"	Longitud: 69°48'43"										Altitud:
Cuenca:	HUANCANÉ											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	80.82	79.60	71.25	59.12	44.90	42.01	40.03	45.12	58.23	68.69	77.50	75.47
2026	76.21	78.17	70.69	59.11	45.45	42.06	40.16	44.94	57.62	68.88	77.98	75.94
2027	81.24	79.86	71.00	59.03	45.79	42.45	39.49	45.24	58.47	69.49	77.30	79.23
2028	76.96	80.26	71.28	58.09	46.24	42.80	40.03	45.67	58.47	68.64	78.73	78.61
2029	80.66	80.59	71.20	59.43	46.68	43.45	40.82	45.67	59.89	72.63	79.48	80.83
2030	82.32	81.06	72.14	61.82	46.29	42.60	40.23	45.58	58.48	72.66	79.03	80.82
2031	81.35	80.64	71.53	62.43	46.85	43.48	40.90	45.55	58.32	71.84	79.42	80.84
2032	82.02	81.87	72.24	62.60	46.83	43.92	40.86	45.60	58.48	69.11	77.15	74.82
2033	80.55	80.91	71.76	59.01	44.78	42.08	39.26	45.20	57.54	68.29	77.31	76.75
2034	80.83	81.14	72.38	62.45	47.23	43.92	41.60	46.80	59.53	73.24	79.89	82.80
2035	84.21	82.46	73.29	63.29	47.18	43.50	41.32	48.09	60.35	73.09	81.24	82.91
2036	84.83	82.98	74.42	64.73	49.72	45.19	44.06	49.74	61.98	75.76	83.41	84.93
2037	86.52	84.92	75.12	65.66	50.88	45.54	44.28	49.88	61.88	74.70	81.92	82.76
2038	83.31	81.82	73.49	63.50	47.79	44.45	43.20	48.40	61.39	74.32	81.06	80.39
2039	81.91	81.92	73.79	63.67	47.99	44.31	41.86	48.10	58.53	72.20	80.69	82.07
2040	82.27	82.40	73.41	63.24	47.42	44.36	41.89	48.60	60.02	73.67	81.55	82.53
2041	82.70	82.65	73.48	63.81	48.04	44.35	42.83	49.09	61.25	74.15	81.02	81.55
2042	83.07	83.13	74.03	64.07	49.44	45.60	43.11	49.42	61.63	75.06	82.53	83.31
2043	83.52	83.62	74.67	64.07	48.81	44.71	43.03	48.57	60.70	73.53	80.93	82.55
2044	82.70	81.65	73.13	63.80	49.95	45.37	43.86	49.28	61.42	74.07	81.48	83.89
2045	86.45	83.82	74.26	63.86	49.94	45.26	43.31	49.12	61.85	75.38	81.14	81.60
2046	82.94	82.77	73.97	63.51	47.84	44.39	42.05	48.47	60.00	74.17	81.37	83.22
2047	83.50	82.16	73.71	63.66	49.74	45.10	43.87	49.34	61.69	75.18	83.32	82.71
2048	83.03	82.61	73.40	63.79	47.95	44.69	43.07	48.95	61.64	74.40	82.49	84.05
2049	85.28	84.76	76.22	66.60	54.36	47.21	44.93	50.70	63.35	76.68	83.13	84.25
2050	84.24	84.44	75.06	64.70	50.24	45.28	43.79	49.56	62.00	76.35	82.11	82.55
Prom	82.44	82.01	73.11	62.61	48.01	44.16	42.07	47.72	60.18	72.93	80.51	81.21
Max	86.52	84.92	76.22	66.60	54.36	47.21	44.93	50.70	63.35	76.68	83.41	84.93
Min	76.21	78.17	70.69	58.09	44.78	42.01	39.26	44.94	57.54	68.29	77.15	74.82

Evapotranspiración (2025-2050) Mod: GFDL-ESM4												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		3806-5100 msnm.
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	76.36	78.74	69.63	59.45	45.39	42.08	38.93	44.92	58.48	71.01	77.51	76.20
2026	78.66	78.77	69.48	57.68	45.30	41.44	38.43	44.35	56.92	69.07	73.70	73.49
2027	76.33	77.69	66.51	56.26	44.23	39.67	37.27	41.40	56.12	65.75	73.66	72.09
2028	76.15	76.88	65.80	56.23	44.16	41.01	37.74	44.55	56.93	68.83	73.86	80.08
2029	80.69	80.88	71.97	61.72	46.81	43.00	40.29	46.01	58.58	68.93	77.08	72.31
2030	73.00	74.23	64.59	54.55	43.84	39.36	37.51	44.51	56.62	68.56	73.46	73.04
2031	76.16	78.03	69.16	57.34	44.87	39.40	38.49	45.05	57.90	67.37	77.49	76.27
2032	80.53	79.01	71.58	61.71	47.41	42.90	40.26	45.06	58.44	69.77	75.15	75.43
2033	79.70	78.90	69.04	57.77	46.06	42.85	40.21	45.05	58.55	69.19	75.04	72.61
2034	76.08	78.32	68.86	55.80	44.38	40.55	37.59	44.30	57.49	69.56	75.64	72.18
2035	73.23	76.67	64.90	54.55	43.80	39.31	37.62	43.72	56.17	68.86	72.36	72.98
2036	76.60	79.00	69.80	61.35	46.23	43.01	40.27	45.60	58.40	70.28	78.58	76.70
2037	80.55	79.04	69.57	60.52	45.79	42.48	40.25	45.50	57.51	70.47	78.27	74.52
2038	79.09	78.46	69.66	57.65	45.12	41.52	38.43	44.38	56.49	67.62	76.74	74.78
2039	78.63	78.99	69.24	57.70	45.13	41.64	40.12	44.60	56.94	68.57	79.00	78.67
2040	80.69	78.97	71.20	61.35	45.89	42.52	40.26	44.99	58.35	68.47	76.89	74.34
2041	76.75	78.80	69.67	60.09	45.87	41.97	39.01	44.21	56.61	69.27	76.82	74.23
2042	76.55	78.75	69.50	57.64	45.05	40.48	38.51	44.71	57.95	70.33	77.20	76.62
2043	80.62	79.19	71.28	61.25	46.82	43.25	41.07	46.78	60.44	72.93	78.40	76.69
2044	80.52	78.92	70.49	61.44	47.60	43.92	41.27	47.13	60.64	73.62	79.90	80.60
2045	81.48	80.99	72.99	62.45	48.33	43.72	41.77	47.22	61.79	74.07	78.86	74.53
2046	76.77	78.90	69.78	58.69	45.49	42.10	40.11	47.08	59.53	70.95	78.15	75.00
2047	79.14	78.99	69.94	61.36	45.85	42.66	40.32	46.60	59.74	70.26	78.98	78.63
2048	80.83	80.93	72.17	61.88	47.48	42.75	42.20	47.69	59.75	72.17	79.20	81.06
2049	81.93	83.61	75.46	64.79	50.40	44.94	43.23	48.55	61.71	73.27	78.07	76.02
2050	78.62	78.85	69.38	57.68	45.64	42.14	40.08	47.13	60.72	72.98	79.18	76.20
Prom	78.29	78.86	69.68	59.19	45.88	41.95	39.66	45.43	58.41	70.05	76.89	75.59
Max	81.93	83.61	75.46	64.79	50.40	44.94	43.23	48.55	61.79	74.07	79.90	81.06
Min	73.00	74.23	64.59	54.55	43.80	39.31	37.27	41.40	56.12	65.75	72.36	72.09

Evapotranspiración (2025-2050) Mod: MIROC-ES2L												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		3806-5100 msnm.
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	76.45	74.57	64.91	56.63	46.18	39.57	37.12	43.29	59.92	69.09	75.55	75.95
2026	76.08	78.82	69.02	58.37	48.64	41.52	40.18	45.18	61.40	71.88	77.07	76.66
2027	76.92	79.80	70.01	60.19	49.36	42.73	40.94	46.38	62.37	71.85	74.78	74.41
2028	75.71	74.24	64.90	57.26	45.91	39.43	38.73	43.85	56.85	66.85	73.41	73.29
2029	74.75	74.28	63.95	56.31	46.09	39.43	36.78	43.28	57.88	68.02	75.19	74.62
2030	76.18	74.64	64.99	57.21	46.00	40.56	38.69	44.67	59.85	70.34	77.13	78.69
2031	82.02	82.70	73.15	63.46	50.36	43.53	43.20	48.73	64.24	73.01	77.05	76.40
2032	78.48	78.48	68.31	59.56	48.72	41.48	40.39	45.31	61.37	70.88	73.76	74.73
2033	75.07	74.42	64.22	57.01	44.92	39.59	37.40	43.04	57.05	66.61	73.01	72.55
2034	73.15	73.77	63.35	56.32	44.13	39.56	37.05	44.96	60.00	70.79	75.53	76.58
2035	76.63	80.18	70.33	61.29	49.47	43.17	42.04	48.75	64.63	73.23	79.34	82.74
2036	82.88	83.73	72.37	63.56	50.47	43.55	42.63	48.49	64.43	71.78	74.99	74.20
2037	75.55	74.63	65.06	57.25	46.81	40.62	40.14	45.33	60.43	70.46	75.37	75.01
2038	76.10	74.56	64.39	57.24	46.29	39.54	38.70	45.26	60.77	69.34	75.49	75.13
2039	75.08	74.32	65.03	57.74	47.71	40.42	40.42	45.69	61.70	72.01	78.27	76.67
2040	78.69	80.90	72.39	62.68	50.36	43.95	42.83	48.03	63.58	73.23	76.70	76.17
2041	76.64	75.08	66.59	58.40	48.08	41.59	40.25	45.40	60.78	70.10	74.57	76.17
2042	76.19	74.89	66.42	57.39	47.70	41.47	40.44	46.23	61.63	72.02	76.21	75.51
2043	76.64	80.26	68.52	59.51	49.11	42.28	40.81	45.79	62.99	73.25	79.33	82.47
2044	84.63	84.42	74.55	65.07	52.83	45.06	44.25	49.46	66.16	77.48	81.00	83.93
2045	84.31	83.38	71.84	64.11	51.69	43.81	43.21	48.58	64.32	72.47	74.25	75.06
2046	76.20	74.89	64.95	57.24	46.94	40.09	39.95	45.26	60.01	70.41	74.20	73.33
2047	76.17	74.81	64.96	57.50	47.61	41.14	40.41	45.69	61.18	71.41	75.93	76.07
2048	76.64	76.88	70.73	61.49	50.01	43.05	41.43	48.23	65.47	74.90	81.81	83.99
2049	86.07	85.09	74.48	65.74	53.60	45.49	44.89	50.10	66.51	76.00	81.41	82.12
2050	81.82	81.26	70.27	61.76	50.02	43.54	42.64	47.39	63.92	71.70	76.35	76.23
Prom	77.89	77.88	68.07	59.63	48.42	41.78	40.60	46.25	61.89	71.50	76.45	76.87
Max	86.07	85.09	74.55	65.74	53.60	45.49	44.89	50.10	66.51	77.48	81.81	83.99
Min	73.15	73.77	63.35	56.31	44.13	39.43	36.78	43.04	56.85	66.61	73.01	72.55



Evapotranspiración (2025-2050) Mod: MRI-ESM2-0												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	82.36	81.44	71.44	61.98	45.51	42.90	39.39	45.05	57.68	69.10	77.06	74.79
2026	79.22	79.03	70.31	61.32	45.80	43.01	39.11	44.10	57.15	67.99	77.67	76.22
2027	80.87	80.46	70.35	61.16	44.96	43.31	39.38	45.21	57.49	70.21	79.21	76.66
2028	80.59	79.88	70.05	60.62	44.94	42.24	40.16	44.07	56.69	66.90	76.62	73.54
2029	80.40	74.88	65.16	55.77	44.04	42.02	39.35	43.81	57.51	69.90	78.96	80.41
2030	81.11	80.37	70.62	61.41	45.86	42.66	39.02	44.78	57.24	67.83	77.25	73.80
2031	80.75	79.04	69.33	59.19	45.59	43.06	40.26	44.66	58.00	68.98	79.29	79.97
2032	82.81	81.78	72.40	63.48	47.79	44.49	40.43	45.68	59.59	73.40	80.01	80.57
2033	81.62	81.97	71.57	61.55	45.64	43.58	40.27	45.06	57.69	69.12	78.35	74.79
2034	80.68	79.29	69.09	59.07	44.89	42.89	39.14	45.22	57.20	69.08	77.90	73.21
2035	79.13	79.37	70.83	61.81	45.89	43.54	40.51	47.31	59.61	73.11	79.29	79.23
2036	82.58	82.77	72.05	61.74	45.88	43.54	40.36	45.24	57.88	71.67	80.02	78.56
2037	81.68	80.65	70.80	61.89	46.36	43.23	39.97	45.23	58.04	72.21	78.19	76.66
2038	81.46	80.70	71.50	61.72	46.62	43.09	39.97	45.23	58.77	72.41	78.71	80.71
2039	82.64	82.73	72.93	63.09	47.49	43.73	42.80	48.60	59.02	74.26	81.28	81.62
2040	83.84	82.77	72.72	62.84	47.64	44.38	43.40	48.49	60.74	74.28	80.61	81.66
2041	83.46	82.89	73.35	63.64	48.70	44.75	42.88	48.01	60.48	74.17	80.50	82.92
2042	84.34	84.03	74.38	65.44	50.60	45.21	43.18	48.00	60.56	74.92	81.38	82.57
2043	83.30	82.80	72.82	63.62	48.14	44.69	43.26	49.39	61.29	74.51	82.02	81.08
2044	83.45	82.83	73.61	63.91	47.81	44.73	43.14	48.90	60.76	73.76	80.40	82.33
2045	83.25	82.53	72.77	63.05	47.89	44.80	43.72	48.46	60.29	73.68	80.92	80.90
2046	84.32	83.58	73.44	64.12	48.81	45.06	43.99	48.96	61.15	75.07	82.55	82.75
2047	84.51	85.36	75.69	65.66	53.86	46.36	44.97	51.16	63.42	75.23	81.45	83.26
2048	84.63	83.49	74.46	65.17	49.13	44.60	43.62	49.37	61.35	73.87	80.79	81.75
2049	83.52	83.49	73.52	64.62	50.58	45.26	43.64	50.13	63.80	75.17	81.04	84.40
2050	85.89	85.25	75.40	65.34	51.61	46.10	44.75	50.52	62.78	75.50	81.53	81.42
Prom	82.25	81.67	71.95	62.43	47.39	43.97	41.56	46.95	59.47	72.17	79.73	79.45
Max	85.89	85.36	75.69	65.66	53.86	46.36	44.97	51.16	63.80	75.50	82.55	84.40
Min	76.40	74.88	65.16	55.77	44.04	42.02	39.02	43.81	56.69	66.90	76.62	73.21

Evapotranspiración (2025-2050) Mod: NorESM2-MM												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	76.83	78.81	70.11	62.24	47.93	41.86	39.77	44.30	58.30	69.12	76.46	74.71
2026	76.75	77.51	66.33	57.77	45.51	39.75	37.56	42.86	55.49	66.86	72.97	72.18
2027	74.07	73.30	63.06	54.83	43.15	38.57	35.70	40.80	55.28	65.74	70.16	70.33
2028	73.29	74.26	63.68	55.74	43.32	39.32	36.63	42.03	56.76	67.00	73.39	72.18
2029	73.92	74.23	64.34	56.58	44.52	40.29	39.86	44.23	57.51	67.82	76.42	72.88
2030	74.88	77.07	65.17	56.60	44.85	39.96	37.74	41.94	57.52	67.53	76.56	76.58
2031	80.38	79.10	70.13	62.26	49.44	41.99	40.88	45.68	60.73	72.99	76.69	75.62
2032	79.44	78.78	66.56	57.35	46.27	39.95	37.76	42.38	57.38	68.91	74.23	72.81
2033	76.45	77.85	67.34	59.02	46.82	41.77	38.75	42.75	59.24	69.38	76.52	73.27
2034	76.65	77.84	66.62	57.17	46.27	40.02	38.38	44.29	58.48	69.10	76.65	76.18
2035	80.54	79.13	70.11	61.52	47.78	41.92	40.48	44.22	59.62	72.93	76.61	74.29
2036	76.55	74.96	66.42	56.97	45.83	40.09	38.83	44.22	58.07	69.10	76.47	72.10
2037	74.25	74.82	65.16	57.29	45.02	39.81	37.35	42.96	57.51	68.80	73.81	73.24
2038	76.10	77.04	66.53	59.14	47.08	41.77	39.51	44.97	59.71	69.43	76.54	75.30
2039	76.50	78.03	68.21	57.88	46.27	40.39	39.46	44.30	60.13	70.18	76.63	74.79
2040	78.71	78.97	70.04	62.22	48.28	41.94	40.45	45.78	60.05	71.99	76.74	79.15
2041	80.83	79.11	70.22	62.37	49.44	42.02	40.45	45.29	61.29	70.68	76.65	75.81
2042	79.51	78.57	67.30	58.32	46.99	41.70	39.18	44.24	59.59	70.25	76.56	74.37
2043	76.69	78.26	67.90	59.14	47.72	41.85	39.66	45.26	58.77	72.92	76.63	76.41
2044	77.15	78.96	70.01	60.69	47.99	41.84	40.51	44.48	59.74	70.14	76.54	75.30
2045	79.62	78.99	70.03	60.22	47.93	41.92	40.56	45.43	59.78	72.92	76.78	76.61
2046	80.79	79.10	70.13	62.33	49.84	42.01	42.76	47.89	62.82	73.00	76.93	80.75
2047	81.01	79.51	70.42	62.60	51.86	42.15	42.87	47.94	64.69	73.21	76.97	80.70
2048	80.92	79.30	70.25	62.43	50.74	42.05	42.67	47.36	61.62	73.14	77.03	80.77
2049	81.19	79.48	70.42	62.54	51.70	42.06	42.82	42.82	63.78	73.13	76.77	78.57
2050	80.63	78.89	70.02	59.31	47.81	41.79	39.84	45.19	60.76	73.06	76.77	75.98
Prom	77.83	77.76	67.94	59.41	47.32	41.11	39.63	44.49	59.41	70.36	75.94	75.42
Max	81.19	79.51	70.42	62.60	51.86	42.15	42.87	47.94	64.69	73.21	77.03	80.77
Min	73.29	73.30	63.06	54.83	43.15	38.57	35.70	40.80	55.28	65.74	70.16	70.33

**ANEXO 6: Caudales simulados para los 8 GCMs seleccionados, periodo (2025 – 2050)**

Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: ACCESS ESM1-5												
Departamento: PUNO		Provincia: HUANCANÉ										Distrito: HUANCANÉ
Latitud: 15°16'27"		Longitud: 69°48'43"										Altitud: 3806-5100 msnm.
Cuenca: HUANCANÉ												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	42.62	70.24	30.16	26.21	5.83	3.27	1.83	1.00	0.80	1.04	2.01	4.13
2026	35.62	40.26	35.12	14.26	6.42	3.86	2.29	1.25	1.16	1.05	2.04	8.26
2027	19.68	70.98	37.04	15.24	6.82	4.00	2.20	1.20	1.12	0.97	3.28	5.43
2028	15.09	46.25	33.21	11.91	5.50	3.13	1.84	1.02	0.93	1.04	2.93	7.45
2029	18.76	31.13	27.54	18.72	7.52	4.63	2.52	1.35	1.31	1.29	5.88	8.81
2030	25.10	50.10	44.38	18.35	6.81	4.36	2.53	1.35	0.79	0.77	1.54	2.84
2031	13.25	44.87	41.25	7.62	3.97	4.89	1.51	0.93	0.86	0.96	1.83	3.11
2032	7.74	37.89	18.45	14.10	6.23	2.46	1.44	0.81	0.67	0.59	0.91	2.33
2033	8.69	41.26	37.56	7.85	3.60	2.08	1.15	0.64	0.37	0.31	0.71	3.28
2034	15.87	65.50	45.28	22.60	9.45	5.17	2.77	1.53	0.90	0.75	1.30	1.51
2035	5.16	38.56	24.89	14.56	2.73	1.48	0.88	0.49	0.30	0.25	3.17	6.24
2036	23.37	32.61	30.89	8.52	4.06	2.66	1.44	0.78	0.47	0.37	1.08	1.73
2037	20.20	33.33	40.26	20.56	4.84	3.03	1.64	0.89	0.85	0.92	2.57	5.06
2038	15.61	54.47	26.93	11.39	5.19	3.31	2.25	1.43	1.21	1.16	2.96	4.65
2039	7.12	40.26	47.56	23.25	4.10	2.25	1.21	0.65	0.50	0.47	3.26	9.14
2040	23.38	52.29	27.56	32.70	10.70	5.64	2.93	1.55	1.36	1.70	4.60	7.21
2041	21.14	50.22	35.65	11.33	4.74	2.67	1.48	0.81	0.49	0.39	0.81	1.59
2042	17.89	35.41	13.02	17.89	2.60	1.52	0.85	0.47	0.29	0.24	3.86	5.86
2043	7.63	35.21	32.14	16.52	3.02	1.63	0.90	0.50	0.30	0.40	1.45	1.85
2044	6.07	28.89	29.50	16.25	3.84	2.50	1.35	0.73	0.44	0.65	1.43	5.36
2045	25.19	39.56	37.56	20.89	5.60	3.63	2.07	1.13	0.78	0.89	1.34	3.02
2046	7.43	56.20	55.24	25.26	3.86	2.06	1.12	0.61	0.39	0.32	0.67	1.51
2047	6.45	52.47	31.56	15.58	4.35	2.48	1.36	0.75	0.65	0.57	1.27	2.98
2048	11.81	39.54	10.11	18.21	7.26	1.81	1.08	0.59	0.48	0.84	1.85	5.47
2049	7.21	19.89	24.56	10.15	4.63	2.74	1.48	0.80	0.77	0.82	1.24	0.64
2050	1.23	4.97	3.54	2.00	1.01	0.58	0.33	0.19	0.15	0.18	0.85	3.54
Prom	15.74	42.78	31.58	16.23	5.18	2.99	1.63	0.90	0.70	0.73	2.11	4.35
Max	42.62	70.98	55.24	32.70	10.70	5.64	2.93	1.55	1.36	1.70	5.88	9.14
Min	1.23	4.97	3.54	2.00	1.01	0.58	0.33	0.19	0.15	0.18	0.67	0.64

Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: BCC-CSM2-MR												
Departamento: PUNO		Provincia: HUANCANÉ										Distrito: HUANCANÉ
Latitud: 15°16'27"		Longitud: 69°48'43"										Altitud: 3806-5100 msnm.
Cuenca: HUANCANÉ												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	55.64	65.23	42.20	23.08	9.79	5.93	3.21	1.73	1.56	1.52	6.31	8.40
2026	36.74	34.26	34.48	20.33	8.51	5.93	3.35	1.84	1.88	2.60	4.37	10.13
2027	24.52	45.84	25.60	15.95	7.15	6.11	3.46	1.87	1.66	1.82	3.22	7.09
2028	16.16	53.72	30.26	15.24	8.44	5.64	2.96	1.61	1.40	1.52	2.40	3.15
2029	19.10	37.05	28.30	16.89	11.37	8.04	5.96	3.19	2.36	3.32	6.10	8.26
2030	23.15	46.25	37.72	21.80	10.34	16.13	7.59	3.78	2.92	3.55	8.24	17.18
2031	13.89	45.55	37.55	21.12	9.79	9.21	4.76	2.48	2.24	2.48	4.06	9.33
2032	19.06	41.58	31.65	13.89	5.89	6.48	3.68	1.96	1.84	3.19	5.08	6.41
2033	14.65	34.50	29.70	15.15	6.87	3.86	2.10	1.15	0.73	0.68	1.43	0.75
2034	6.79	18.54	35.36	24.36	8.95	8.98	7.78	4.07	3.36	4.57	8.95	11.76
2035	43.41	36.21	23.56	15.89	8.10	5.30	2.82	1.57	1.24	1.40	4.05	6.79
2036	16.31	30.56	32.94	21.80	9.28	5.64	3.19	1.74	1.09	1.22	4.88	10.17
2037	20.51	39.96	23.16	18.25	8.55	4.87	2.66	1.55	1.46	1.80	3.64	6.17
2038	15.24	29.51	30.10	11.26	12.62	7.68	3.94	2.07	1.57	1.95	5.34	11.97
2039	24.89	40.26	44.27	27.59	12.17	7.13	3.97	2.10	1.67	2.49	4.14	8.35
2040	19.16	33.12	28.02	14.23	7.78	4.55	2.90	1.67	1.58	1.98	3.32	5.04
2041	13.16	50.19	39.87	15.68	16.27	9.07	4.74	2.47	1.46	1.30	2.27	3.08
2042	20.29	36.54	37.41	15.91	7.08	4.32	2.32	1.31	1.18	1.23	5.51	13.33
2043	23.99	36.54	33.56	18.65	10.07	6.19	3.40	2.26	2.04	3.52	18.89	27.11
2044	34.81	30.26	30.89	14.56	9.95	5.19	2.78	1.50	1.71	1.79	3.73	6.15
2045	11.89	29.61	39.72	18.84	7.41	4.16	2.25	1.21	0.81	0.83	12.23	22.16
2046	29.09	47.00	50.23	20.07	8.56	12.80	6.34	3.14	2.17	1.83	4.52	9.97
2047	31.81	50.26	32.54	24.05	9.09	5.19	2.97	1.59	1.18	1.20	2.40	3.87
2048	10.57	33.96	40.63	18.18	7.80	5.84	3.22	1.73	1.34	1.66	2.50	3.70
2049	6.89	20.25	24.89	21.01	9.71	6.27	3.40	1.76	1.36	1.46	3.66	5.49
2050	11.01	30.23	28.63	14.50	6.44	4.02	2.41	1.33	1.17	1.12	2.07	6.82
Prom	21.64	38.34	33.57	18.39	9.15	6.71	3.77	2.03	1.65	2.00	5.13	8.95
Max	55.64	65.23	50.23	27.59	16.27	16.13	7.78	4.07	3.36	4.57	18.89	27.11
Min	6.79	18.54	23.16	11.26	5.89	3.86	2.10	1.15	0.73	0.68	1.43	0.75

Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: CMCC-CMP2-SRS													
Departamento:	PUNO											Distrito:	
Latitud:	15°16'27"											Provincia:	HUANCANÉ
Cuenca:	HUANCANÉ											Altitud:	3806-5100 msnm.
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	
2025	44.21	57.98	53.27	22.71	10.01	8.10	4.53	2.41	1.78	1.73	3.03	4.26	
2026	11.77	29.37	61.05	24.83	10.27	6.19	3.62	2.13	1.67	2.34	6.48	13.41	
2027	22.79	33.58	27.10	16.94	7.79	5.35	2.83	1.60	1.70	2.51	7.78	9.27	
2028	19.49	27.74	28.23	15.57	8.82	4.82	2.60	1.41	1.16	1.29	2.98	7.99	
2029	38.75	50.01	41.80	25.83	10.18	6.83	3.74	2.02	1.28	1.21	2.60	4.17	
2030	27.64	37.30	22.29	10.17	4.91	2.90	1.61	0.90	0.71	0.90	1.87	2.71	
2031	9.51	57.27	41.23	17.51	7.15	4.13	2.37	1.33	1.18	1.18	3.27	10.30	
2032	28.74	72.34	33.04	21.85	9.46	6.57	4.15	2.41	2.05	1.82	3.65	6.71	
2033	39.10	83.83	46.44	21.14	9.84	8.92	5.66	3.02	2.76	2.81	5.82	14.16	
2034	53.68	109.84	40.99	27.49	12.60	19.91	9.48	4.61	3.53	4.34	8.23	9.82	
2035	24.07	36.50	33.79	22.37	9.39	14.34	6.54	3.34	2.59	2.60	4.26	5.84	
2036	12.24	36.11	40.97	18.60	8.52	5.68	3.14	2.05	1.38	1.51	2.62	4.23	
2037	19.01	36.20	52.95	29.77	11.14	6.11	3.28	1.76	1.40	1.53	2.26	3.75	
2038	10.41	29.13	24.63	11.27	5.15	2.86	1.56	0.86	0.89	0.96	1.85	3.21	
2039	17.24	43.30	57.57	26.84	11.13	7.33	3.75	2.11	1.64	2.23	3.77	8.04	
2040	18.49	44.26	23.97	16.75	7.75	4.62	2.76	1.47	1.00	1.19	2.78	8.40	
2041	43.93	114.39	60.07	22.34	9.28	6.82	3.71	2.07	1.92	2.62	4.21	6.04	
2042	23.37	45.63	38.76	24.85	8.90	5.10	3.18	1.78	1.76	1.62	2.73	3.48	
2043	14.19	25.66	16.78	9.82	4.08	2.22	1.20	0.65	0.55	0.58	1.11	2.21	
2044	15.82	27.49	51.37	22.67	10.64	7.37	4.47	3.33	3.20	3.85	9.28	18.54	
2045	63.09	79.67	48.76	30.42	12.48	8.05	4.20	2.22	1.46	1.49	3.66	6.70	
2046	15.74	37.64	30.11	15.25	7.41	10.92	5.63	2.90	2.50	3.31	21.66	27.91	
2047	34.28	65.98	41.62	18.95	7.49	4.48	2.60	1.41	1.00	1.27	2.36	3.16	
2048	12.04	42.45	51.65	18.17	7.10	3.77	2.22	1.22	1.16	1.63	2.51	1.22	
2049	4.11	11.40	9.65	4.92	2.47	1.77	1.17	0.69	0.47	0.49	1.47	2.88	
2050	23.86	72.23	33.86	19.69	9.95	7.69	5.15	2.60	2.50	2.81	6.18	13.53	
Prom	24.91	50.28	38.92	19.87	8.56	6.65	3.66	2.01	1.66	1.92	4.56	7.77	
Max	63.09	114.39	61.05	30.42	12.60	19.91	9.48	4.61	3.53	4.34	21.66	27.91	
Min	4.11	11.40	9.65	4.92	2.47	1.77	1.17	0.65	0.47	0.49	1.11	1.22	

Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: CanESM5-CanOE-p2													
Departamento:	PUNO											Distrito:	
Latitud:	15°16'27"											Provincia:	HUANCANÉ
Cuenca:	HUANCANÉ											Altitud:	3806-5100 msnm.
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	
2025	58.88	99.60	96.71	34.67	14.41	9.31	4.84	2.57	1.49	1.32	2.38	6.38	
2026	15.91	39.20	24.83	15.43	7.18	11.22	6.11	3.12	2.58	3.79	7.73	11.32	
2027	24.58	62.13	29.47	17.84	7.61	4.79	2.91	1.55	0.96	1.18	1.99	5.07	
2028	21.32	48.45	35.52	17.15	8.16	5.14	3.09	1.65	0.94	0.82	5.15	4.94	
2029	14.64	52.37	49.89	26.32	11.86	7.09	3.89	2.36	2.42	2.94	4.82	7.25	
2030	18.20	45.02	31.04	20.26	9.76	6.35	3.49	1.85	1.44	1.19	1.98	2.69	
2031	8.57	38.33	33.95	22.14	9.64	5.53	3.28	1.75	1.52	1.37	2.23	3.75	
2032	15.64	51.20	28.51	16.73	7.03	3.99	2.13	1.16	0.92	1.25	1.96	0.99	
2033	4.03	22.59	16.35	9.82	4.73	2.81	1.54	0.85	0.67	0.97	2.46	4.26	
2034	11.27	72.14	42.32	22.18	9.30	4.88	2.67	1.45	0.86	1.10	2.07	2.80	
2035	8.58	32.97	19.58	9.87	4.47	2.87	1.58	0.86	0.65	0.83	2.50	7.08	
2036	16.69	45.12	69.53	25.14	9.03	7.08	3.67	1.92	1.45	2.02	4.21	8.24	
2037	22.10	54.61	30.78	15.68	6.44	3.73	2.00	1.07	0.61	0.63	1.22	0.64	
2038	2.23	8.81	14.00	7.59	3.57	2.12	1.15	0.63	0.38	0.48	0.93	1.48	
2039	5.65	21.94	20.70	10.28	4.30	2.52	1.37	0.75	0.61	0.90	1.76	0.89	
2040	4.79	20.98	22.31	11.43	4.94	3.89	2.09	1.12	1.19	1.56	2.78	7.19	
2041	18.11	55.43	69.30	25.18	10.00	6.61	3.45	1.81	1.42	1.84	3.04	3.83	
2042	10.41	20.54	22.99	10.92	4.58	2.81	1.72	0.94	0.54	0.68	1.34	3.87	
2043	10.41	30.42	28.68	15.45	7.26	12.21	6.41	3.30	3.01	3.83	8.83	11.09	
2044	19.73	41.82	33.99	22.66	10.84	14.72	7.42	4.14	4.92	5.85	8.68	15.39	
2045	24.57	45.54	26.31	17.03	7.31	5.18	2.72	1.44	0.94	1.39	2.88	6.50	
2046	14.86	42.60	23.59	17.56	7.56	4.59	2.72	1.45	1.49	2.09	4.26	7.09	
2047	16.31	38.03	30.57	14.29	6.82	3.93	2.14	1.14	0.93	0.74	1.35	4.01	
2048	9.92	21.54	31.33	13.55	5.44	2.94	1.59	0.86	0.52	0.38	0.78	1.24	
2049	6.32	23.06	22.76	11.03	4.97	2.87	1.54	0.84	0.50	0.62	1.09	2.02	
2050	7.44	19.70	22.05	13.17	6.09	8.01	3.95	2.10	1.68	1.30	1.79	1.85	
Prom	15.04	40.54	33.73	17.05	7.43	5.66	3.06	1.64	1.33	1.58	3.08	5.07	
Max	58.88	99.60	96.71	34.67	14.41	14.72	7.42	4.14	4.92	5.85	8.83	15.39	
Min	2.23	8.81	14.00	7.59	3.57	2.12	1.15	0.63	0.38	0.38	0.78	0.64	



Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: MIROC-ES2L												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	43.12	67.97	44.72	29.05	13.73	8.76	4.55	2.47	1.90	1.98	3.44	6.13
2026	17.25	28.62	19.59	10.66	4.63	2.49	1.39	0.83	0.58	0.53	1.10	3.37
2027	11.48	22.77	17.78	12.50	6.15	3.27	1.79	0.97	0.83	1.02	2.94	9.81
2028	30.68	67.91	35.48	17.82	8.23	4.74	2.74	1.50	1.10	1.68	4.29	7.49
2029	16.38	28.20	21.60	11.77	5.61	3.00	1.66	0.94	0.76	0.97	2.03	7.42
2030	22.06	49.20	34.53	18.94	7.64	13.32	6.41	3.24	2.15	2.06	2.96	4.10
2031	6.71	13.89	9.67	9.47	4.35	2.46	1.49	0.86	0.66	0.82	1.72	9.84
2032	19.25	45.59	34.91	21.88	11.36	8.45	4.21	2.40	1.81	2.17	14.68	17.55
2033	28.47	42.98	36.93	18.33	9.10	7.00	3.78	2.02	1.57	2.33	5.89	11.99
2034	33.68	50.32	51.96	31.88	13.57	6.88	3.66	1.98	1.56	1.63	2.60	4.14
2035	18.95	24.75	15.55	9.54	5.09	2.67	1.48	0.80	0.49	0.42	0.57	0.90
2036	3.90	4.67	7.15	4.91	2.93	1.90	1.18	0.69	0.54	0.75	3.24	10.70
2037	20.41	39.13	37.57	21.25	9.13	4.79	2.61	1.44	1.15	1.44	5.29	13.10
2038	34.83	53.18	49.66	19.85	8.25	4.92	2.86	1.55	1.28	1.70	3.92	11.19
2039	32.40	58.81	34.11	17.48	7.75	4.60	2.48	1.34	0.77	0.63	1.11	3.41
2040	13.22	25.37	15.54	8.47	3.69	2.12	1.16	0.65	0.50	0.52	1.08	5.64
2041	9.23	26.95	22.59	12.29	7.10	4.02	2.21	1.22	1.42	1.79	4.39	7.40
2042	31.80	47.56	40.74	29.50	14.21	9.08	5.55	2.89	2.14	2.41	7.23	16.70
2043	35.12	50.43	37.48	25.60	11.03	5.77	3.08	1.66	1.27	1.05	1.38	2.29
2044	8.97	19.21	20.49	13.26	6.07	3.66	2.01	1.07	0.61	0.42	0.52	1.06
2045	5.76	25.07	26.73	13.93	6.92	10.25	5.04	4.17	3.14	4.20	27.02	34.02
2046	39.81	64.87	86.75	41.28	13.79	8.13	5.86	3.49	2.31	3.39	22.93	22.13
2047	30.83	62.72	32.37	15.79	6.46	4.07	2.41	1.31	1.03	1.24	4.71	11.30
2048	25.38	55.39	22.79	12.40	6.20	3.43	1.88	1.04	0.72	0.62	0.83	1.52
2049	3.26	10.05	9.81	5.82	2.63	2.68	1.82	1.59	1.25	1.04	1.74	6.39
2050	20.31	37.52	41.22	17.16	6.90	3.64	1.95	1.10	0.85	1.43	7.59	16.52
Prom	21.66	39.35	31.07	17.34	7.79	5.23	2.90	1.66	1.25	1.47	5.20	9.47
Max	43.12	67.97	86.75	41.28	14.21	13.32	6.41	4.17	3.14	4.20	27.02	34.02
Min	3.26	4.67	7.15	4.91	2.63	1.90	1.16	0.65	0.49	0.42	0.52	0.90

Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: GFDL-ESM4												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	47.25	69.38	31.53	18.63	9.29	5.43	2.93	1.60	1.45	1.51	3.21	3.44
2026	10.39	33.02	63.30	33.54	14.61	7.14	3.81	2.05	1.61	1.78	6.91	9.31
2027	18.72	47.35	58.73	29.95	13.69	20.37	10.02	4.90	4.01	5.28	8.53	15.95
2028	25.89	46.80	39.37	17.42	7.21	4.44	2.47	1.38	1.41	1.31	1.97	1.60
2029	3.97	11.70	9.99	6.72	3.27	2.10	1.29	0.76	0.79	1.39	15.40	22.99
2030	42.34	83.07	61.54	33.11	14.53	8.58	4.48	2.39	2.32	3.27	14.90	22.12
2031	37.53	89.03	101.98	43.68	17.62	9.41	4.97	2.78	1.89	2.41	3.92	3.57
2032	10.25	23.18	15.55	8.56	4.34	3.12	1.77	0.98	0.87	1.40	3.13	5.09
2033	17.87	47.93	42.19	17.67	7.03	3.98	2.17	1.20	1.00	1.54	3.65	10.22
2034	23.77	44.84	52.28	31.10	13.63	7.68	5.76	3.01	1.81	2.25	7.29	15.06
2035	33.93	49.94	35.22	22.35	11.11	7.38	4.02	2.15	1.70	1.84	7.13	10.37
2036	20.86	37.22	21.29	10.69	5.43	3.00	1.66	0.91	0.57	0.46	0.79	0.78
2037	3.60	12.76	23.92	15.44	7.45	5.09	2.80	1.65	1.34	1.51	2.64	4.36
2038	16.49	32.83	20.25	10.84	5.06	2.95	2.26	1.22	0.97	1.29	4.10	11.00
2039	21.00	52.25	85.45	33.67	12.69	8.09	5.17	2.75	2.40	2.10	3.04	4.27
2040	11.84	33.09	22.07	11.25	5.88	5.23	2.73	1.45	1.13	1.76	2.86	4.30
2041	11.28	22.63	17.76	9.59	4.28	2.42	1.60	1.26	1.49	2.01	5.03	7.91
2042	18.31	48.54	31.79	19.10	9.43	4.98	2.79	1.52	1.38	1.38	2.56	4.55
2043	12.70	40.23	24.99	13.50	5.66	3.56	2.06	1.12	0.80	0.66	1.65	3.60
2044	12.61	25.48	16.66	9.10	4.43	2.38	1.33	0.74	0.45	0.41	0.69	0.98
2045	4.60	26.28	17.26	9.37	4.55	2.91	1.60	0.89	0.81	1.25	4.08	8.84
2046	23.04	78.48	70.62	36.52	13.63	8.21	4.92	2.54	1.77	2.61	11.60	18.64
2047	32.71	68.70	49.79	25.09	11.53	7.75	4.04	2.08	1.80	1.95	3.25	4.54
2048	12.07	30.99	49.42	28.51	10.16	6.43	3.32	1.75	1.40	1.11	1.68	1.74
2049	5.73	14.20	10.93	6.41	2.88	1.57	0.90	0.51	0.44	0.61	2.95	5.69
2050	19.99	66.32	84.40	39.97	17.05	9.93	5.09	2.67	2.04	3.40	6.54	12.09
Prom	19.18	43.70	40.70	20.84	9.09	5.93	3.31	1.78	1.45	1.79	4.98	8.19
Max	47.25	89.03	101.98	43.68	17.62	20.37	10.02	4.90	4.01	5.28	15.40	22.99
Min	3.60	11.70	9.99	6.41	2.88	1.57	0.90	0.51	0.44	0.41	0.69	0.78

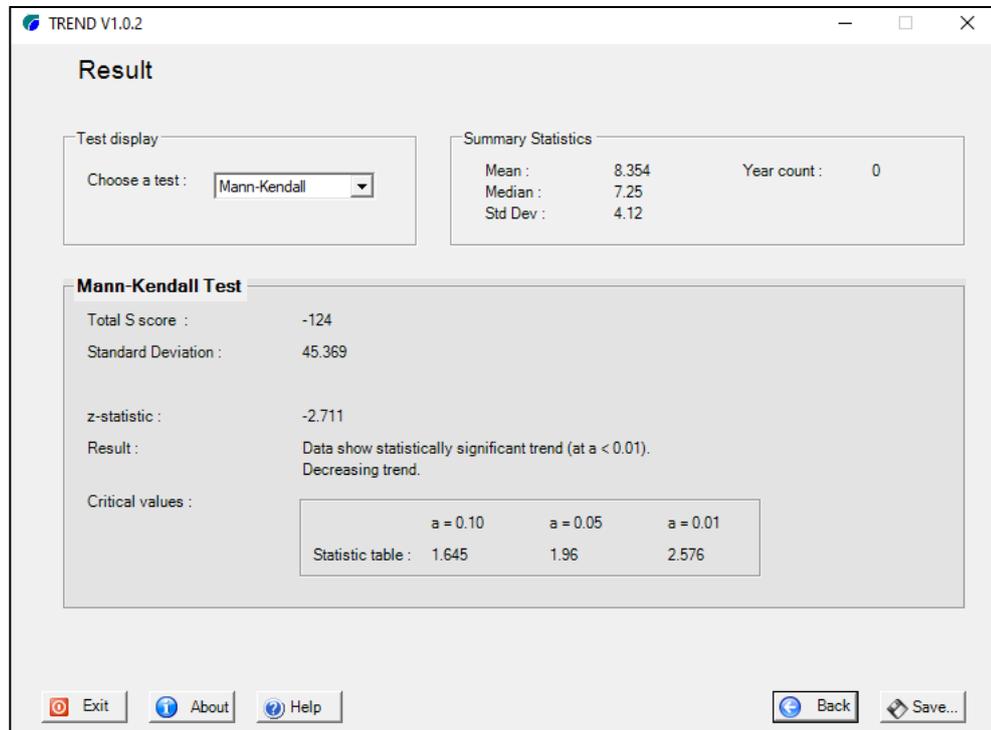
Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: WRI-ESM2-0												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		3806-5100 msnm.
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	39.58	50.45	32.22	25.95	11.19	7.41	4.08	2.15	1.48	1.92	3.99	5.80
2026	14.73	49.96	44.67	24.29	13.56	19.21	9.14	6.28	4.63	5.00	6.23	7.78
2027	17.45	56.67	42.26	18.33	7.47	4.62	2.62	1.41	0.96	0.83	1.62	3.56
2028	10.89	31.97	21.65	12.18	5.04	2.65	1.48	0.80	0.62	0.54	1.60	3.70
2029	15.41	44.59	25.87	16.84	6.76	4.03	2.41	1.31	1.04	0.87	1.45	3.99
2030	10.50	29.42	28.03	15.23	6.40	4.11	2.41	1.31	0.81	0.83	1.46	3.15
2031	8.83	31.97	30.09	14.06	6.29	4.96	2.57	1.36	0.81	0.62	0.80	0.43
2032	1.36	6.92	6.97	4.48	2.12	1.32	0.73	0.40	0.25	0.21	0.67	1.93
2033	9.56	22.48	55.42	25.90	11.40	7.32	3.93	2.07	1.79	2.13	3.67	8.30
2034	21.13	68.10	44.61	20.18	8.74	13.31	7.40	3.68	2.07	2.06	3.97	6.77
2035	16.81	43.50	23.47	18.70	7.75	4.66	2.70	1.43	0.96	0.96	2.86	5.40
2036	12.86	32.38	27.40	18.48	7.48	3.82	2.09	1.15	0.88	0.94	1.86	3.28
2037	10.30	45.14	67.16	29.90	11.27	5.68	3.08	1.67	1.42	1.43	2.21	3.51
2038	7.39	21.57	17.08	10.13	4.67	2.47	1.37	0.75	0.54	0.63	1.99	5.32
2039	12.72	31.82	43.15	18.92	8.16	5.93	2.99	1.58	1.00	0.79	1.05	1.94
2040	6.80	37.24	62.49	23.63	8.95	4.87	2.61	1.41	1.01	0.83	1.53	2.66
2041	9.34	35.02	30.85	14.10	6.78	3.86	2.04	1.09	0.98	1.02	1.66	2.72
2042	7.52	25.51	25.81	13.30	5.28	3.03	1.64	0.87	0.50	0.42	0.73	1.82
2043	9.19	40.43	64.01	22.13	9.22	5.69	3.15	1.63	1.03	1.07	1.68	3.19
2044	10.02	40.25	33.06	14.32	7.44	11.26	5.29	2.60	1.73	1.63	2.44	2.10
2045	7.09	43.53	76.03	34.87	12.57	9.32	4.64	2.41	2.05	2.47	4.73	8.85
2046	15.66	52.46	74.66	34.48	12.36	6.08	3.34	1.75	1.55	1.22	1.02	1.30
2047	4.98	19.55	13.87	10.08	4.53	2.51	1.35	0.77	0.68	0.68	1.15	2.59
2048	9.60	50.58	40.20	16.97	7.43	4.36	2.54	1.38	0.88	0.74	1.43	4.29
2049	19.23	44.62	74.75	30.29	10.61	5.15	2.71	1.52	1.08	1.05	1.76	2.12
2050	5.40	15.25	11.62	6.67	3.20	1.88	1.03	0.56	0.35	0.25	0.68	2.79
Prom	12.09	37.36	39.13	19.02	7.95	5.75	3.05	1.67	1.20	1.20	2.09	3.82
Max	39.58	68.10	76.03	34.87	13.56	19.21	9.14	6.28	4.63	5.00	6.23	8.85
Min	1.36	6.92	6.97	4.48	2.12	1.32	0.73	0.40	0.25	0.21	0.67	0.43

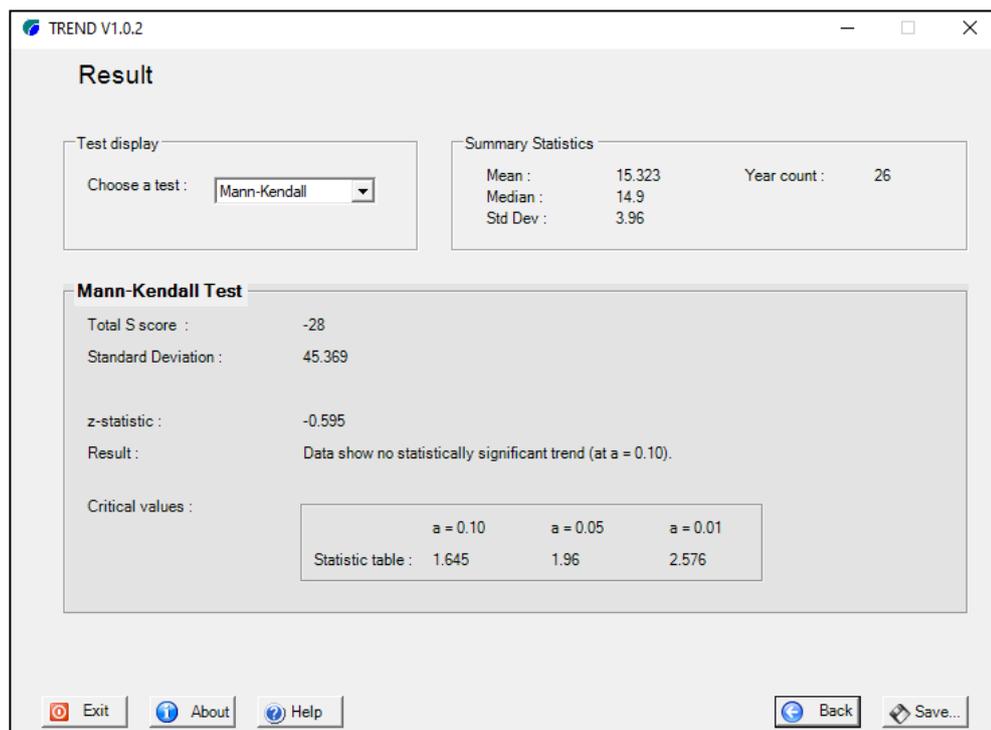
Caudal SIMULADO (2025-2050) Mod: Nor-ESM2-MM												
Departamento:		PUNO		Provincia:		HUANCANÉ		Distrito:		HUANCANÉ		HUANCANÉ
Latitud:		15°16'27"		Longitud:		69°48'43"		Altitud:		3806-5100 msnm.		3806-5100 msnm.
Cuenca:		HUANCANÉ										
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic
2025	36.80	44.08	24.20	13.34	6.35	3.36	1.83	1.01	0.77	1.46	3.84	8.21
2026	21.97	52.94	44.36	20.27	8.53	5.00	2.72	1.51	1.03	1.40	4.36	12.13
2027	33.34	65.98	53.81	23.46	10.84	7.42	4.19	2.33	2.74	3.41	26.70	34.93
2028	39.37	68.15	54.71	23.70	10.44	7.19	3.87	2.11	1.28	1.60	3.20	5.20
2029	24.73	63.54	28.09	14.89	6.77	5.08	3.05	1.66	1.12	1.24	2.86	5.39
2030	21.35	33.44	36.03	14.48	6.05	3.35	1.85	1.04	0.64	0.74	0.98	1.74
2031	8.83	19.79	10.09	5.45	2.49	1.47	0.83	0.47	0.36	0.37	1.12	6.50
2032	16.48	42.06	48.05	19.39	8.55	4.96	2.79	1.61	1.50	1.96	5.56	10.62
2033	27.22	57.74	28.18	15.40	7.91	5.37	3.17	1.67	1.13	1.46	2.47	4.58
2034	12.18	41.91	33.15	21.34	8.29	4.29	2.36	1.30	0.79	0.63	0.85	1.49
2035	5.63	15.46	16.84	10.22	4.40	2.72	1.50	0.82	0.50	0.46	1.17	3.76
2036	11.09	30.81	20.85	14.50	5.94	3.37	2.01	1.11	1.23	1.36	2.76	8.51
2037	19.10	46.50	31.74	18.75	8.58	4.98	2.69	1.50	1.28	1.73	3.74	5.50
2038	11.81	40.35	19.41	9.83	5.01	2.75	1.52	0.83	0.50	0.42	0.81	2.19
2039	9.24	21.96	12.70	11.26	5.82	3.28	1.81	1.01	0.90	0.93	1.84	3.91
2040	16.86	34.31	18.60	8.69	4.33	2.38	1.30	0.72	0.44	0.46	0.78	1.25
2041	4.73	14.57	9.04	5.02	2.54	1.43	0.80	0.45	0.31	0.40	0.97	2.57
2042	14.89	27.54	29.93	15.14	6.30	3.62	2.01	1.10	0.78	0.88	2.27	4.59
2043	15.30	29.03	18.63	10.11	4.35	2.72	1.64	0.90	0.64	0.65	1.49	3.42
2044	14.63	26.93	14.90	11.09	5.67	3.08	1.69	0.92	0.64	0.68	1.90	3.57
2045	10.92	31.56	30.93	15.78	6.78	4.18	2.45	1.32	0.91	1.00	1.28	2.62
2046	8.10	29.59	22.97	12.31	5.06	2.73	1.48	0.80	0.49	0.46	0.51	0.60
2047	2.14	13.43	9.89	7.77	3.43	1.91	1.15	0.63	0.49	0.41	0.85	1.90
2048	7.04	20.62	26.32	19.94	7.59	4.28	2.32	1.24	0.73	0.94	1.45	3.21
2049	9.75	23.00	15.80	9.47	3.99	2.40	1.31	0.72	0.65	0.95	3.31	6.01
2050	14.82	52.51	24.24	17.72	8.21	5.51	3.04	1.65	1.52	3.15	7.54	12.44
Prom	16.09	36.45	26.29	14.20	6.32	3.80	2.13	1.17	0.90	1.12	3.25	6.03
Max	39.37	68.15	54.71	23.70	10.84	7.42	4.19	2.33	2.74	3.41	26.70	34.93
Min	2.14	13.43	9.04	5.02	2.49	1.43	0.80	0.45	0.31	0.37	0.51	0.60

## ANEXO 7: Análisis de tendencia para los caudales de los 8 GCMs

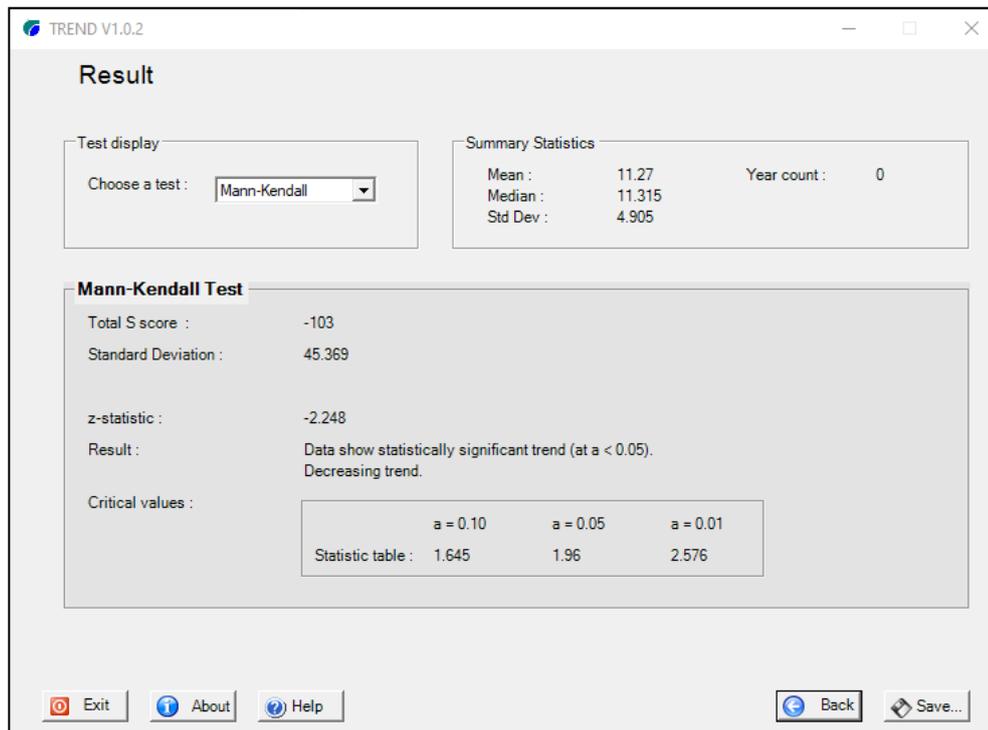
### a. Modelo ACCESS-ESM1-5



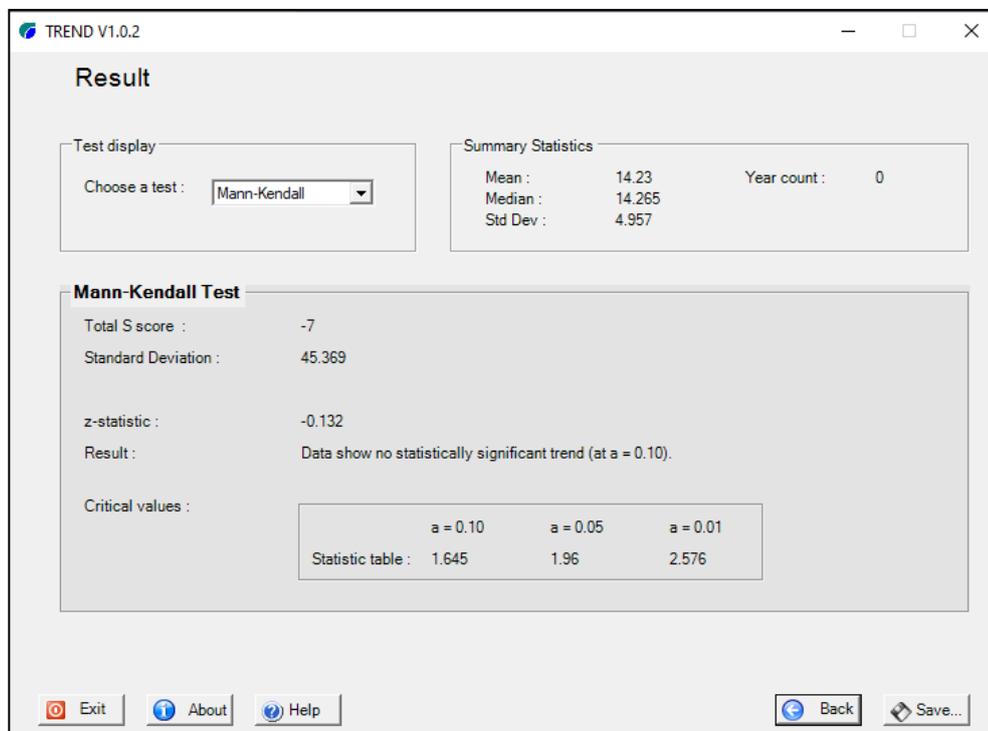
### b. Modelo BCC-CSM2-MR



c. Modelo CanESM5-CanOE-p2

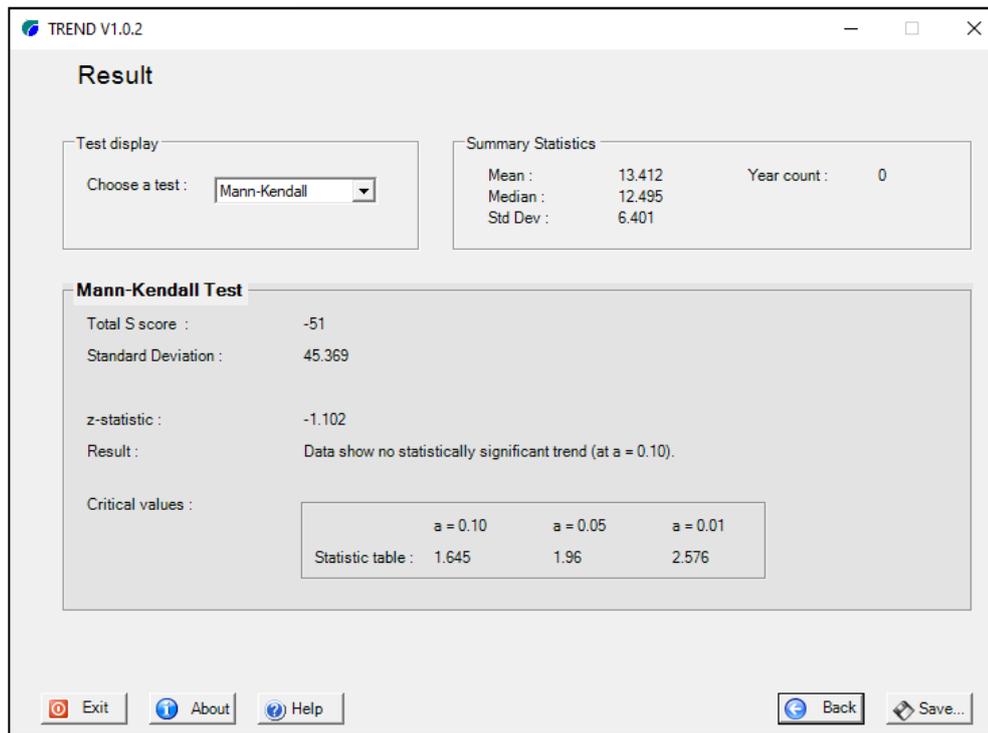


d. Modelo CMCC-CM2-SR5

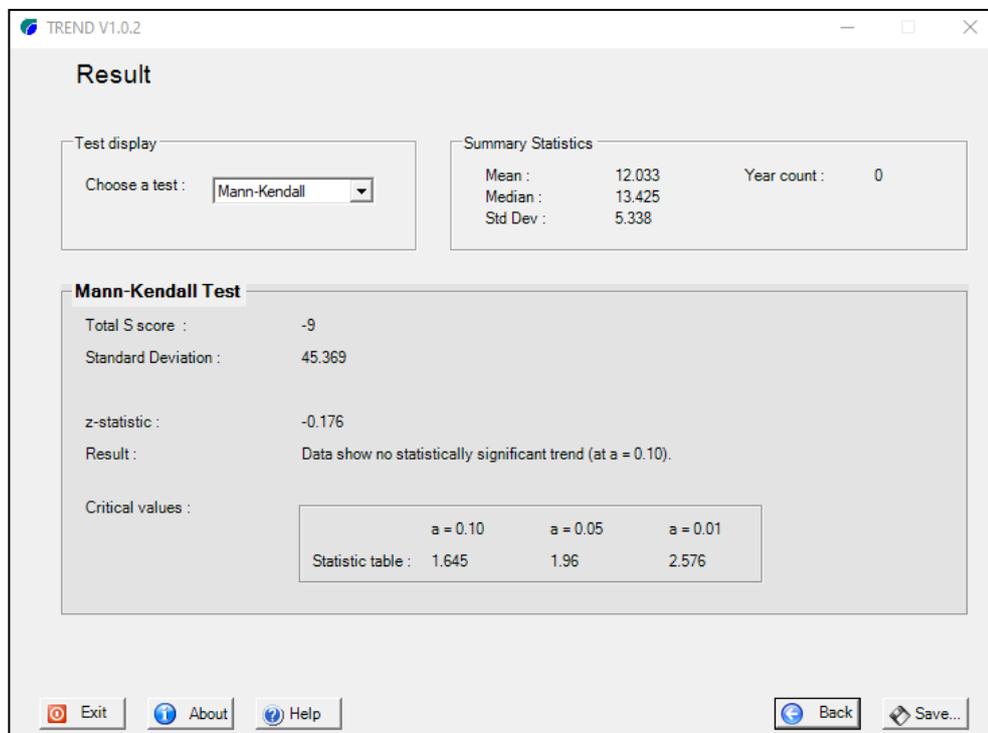




e. Modelo GFDL-ESM4

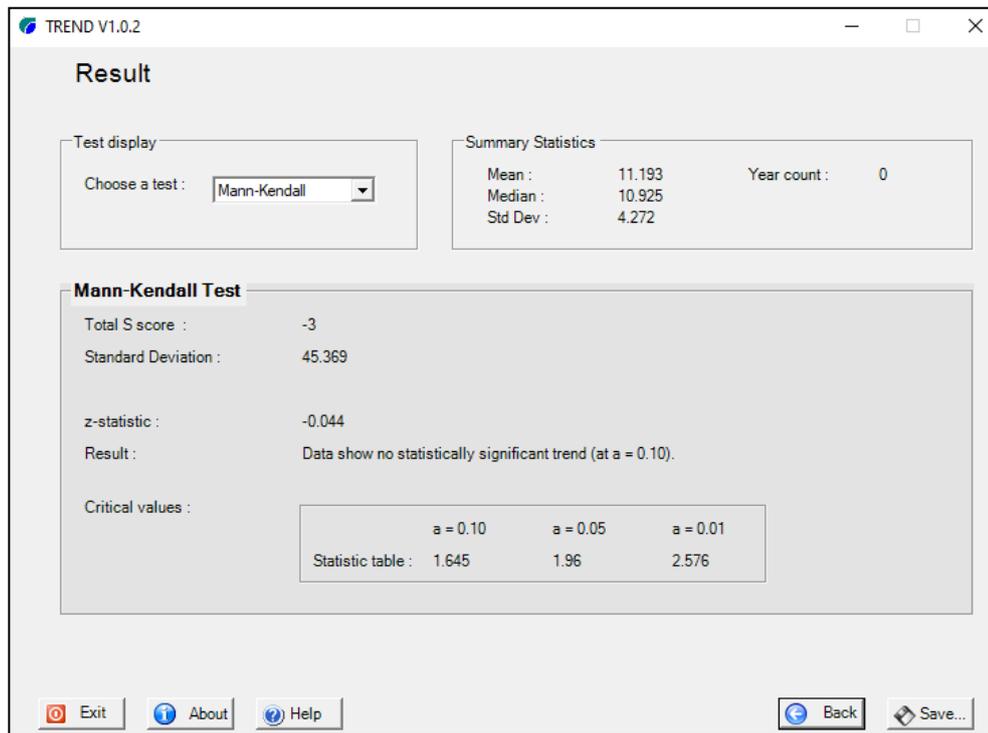


f. Modelo MIROC-ES2L

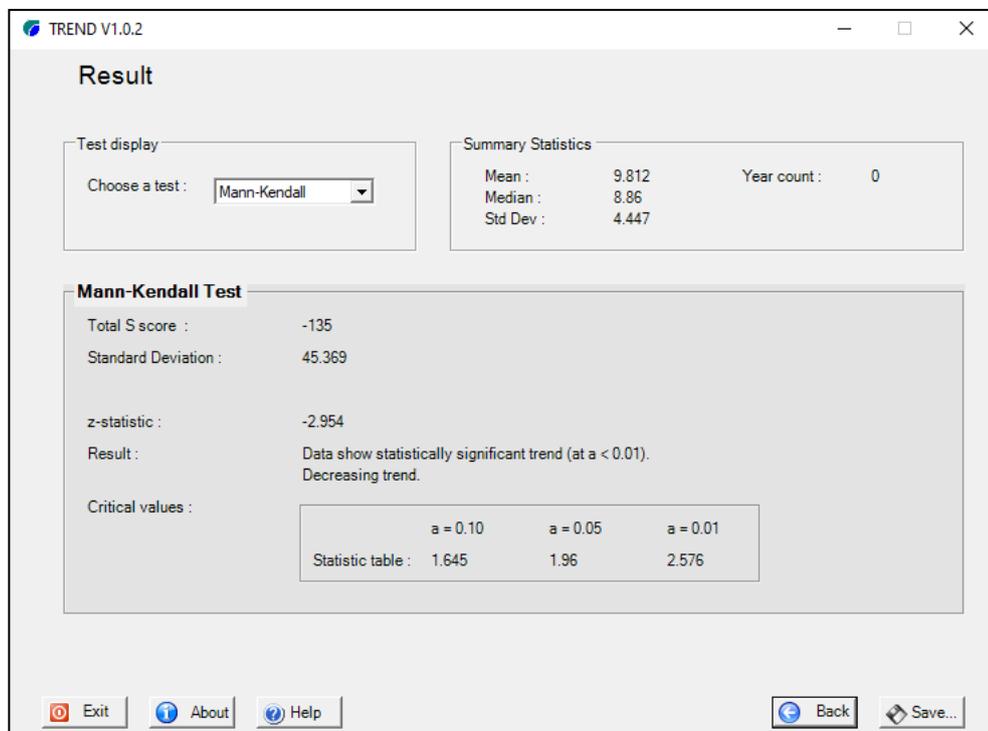




g. Modelo MRI-ESM2-0



h. Modelo NorESM2-MM





## ANEXO 8: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



VRI  
Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Eduin Adderly Anahua Balon  
identificado con DNI 45260925 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Agrícola

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Evaluación de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huancane"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de Diciembre del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 9: Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Eduin Odderly Amahua Balcon  
identificado con DNI 45260985 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Agrícola  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ Evaluación de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huancané. ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de Diciembre del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella