



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



**ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL  
RÍO ILAVE EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. LUZ KARINA COAQUIRA MAYTA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO – PERÚ**

**2023**



NOMBRE DEL TRABAJO

**ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO ILAVE EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

AUTOR

**LUZ KARINA COAQUIRA MAYTA**

RECUENTO DE PALABRAS

**26579 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**145246 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**151 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**7.8MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jul 10, 2023 1:02 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jul 10, 2023 1:05 PM GMT-5**

● **11% de similitud general**

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

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 2% 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 10 palabras)

  
D.S. c. Edilberto Velarde  
Coaquira

  
  
Luz Karina Coaquira Edilberto  
DIRECTOR UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



## DEDICATORIA

*A mis padres Hugo y Lidia, por apoyarme en mis esfuerzos para ser una mejor persona y profesional y por estar a mi lado en cada paso que doy. Este logro es también suyo.*

*También se la dedico a mi abuela, desde el cielo eres esa luz que me daba fuerzas para continuar.*

*A mis hermanos Nancy, Yovana y Edson, que siempre han estado ahí para mí, quiero que sepan cuánto agradezco su apoyo incondicional y moral.*

*Y, finalmente, A todos aquellos que han sido una parte integral de mi camino académico y personal.*

***Luz Karina Coaquira***



## AGRADECIMIENTOS

A los miembros del jurado, por haberme brindado su orientación y recomendaciones para mejorar y culminar el propósito de materializar esta investigación.

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola, por brindarme la oportunidad de estudiar en sus instalaciones y vivir una experiencia enriquecedora.

Expreso mi gratitud a los profesores de la Facultad de Ingeniería Agrícola por compartir sus conocimientos y experiencias, las cuales han contribuido a mi crecimiento profesional.

Quiero agradecer a mi asesor, el Dr. Edilberto Velarde Coaquira, por sus valiosas sugerencias que han mejorado significativamente mi trabajo.

A los miembros del jurado, les agradezco su orientación y recomendaciones, las cuales han sido fundamentales para mejorar y completar exitosamente esta investigación.

A mis amigos incondicionales Nancy, Karen, Bryan y Edwin, quiero expresar un agradecimiento especial por vuestra paciencia y comprensión durante los momentos de estrés y agobio. Vuestras muestras de apoyo y empatía han sido un constante recordatorio de que no estoy solo en este trayecto y que siempre puedo contar con vosotros, incluso en los momentos más difíciles.

*Luz Karina Coaquira*



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN** ..... 14

**ABSTRACT**..... 15

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. GENERALIDADES**..... 16

**1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA** ..... 18

**1.3. JUSTIFICACIÓN**..... 19

**1.4. OBJETIVOS**..... 21

1.4.1. Objetivo general ..... 21

1.4.2. Objetivo específico ..... 21

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES**..... 22

2.1.1. Internacionales..... 22

2.1.2. Nacionales ..... 24

2.1.3. Locales..... 27

**2.2. MARCO TEÓRICO** ..... 30

2.2.1. Hidrología..... 30



2.2.2. Ciclo hidrológico .....	31
2.2.3. Cuenca hidrográfica.....	32
2.2.4. Procesos del ciclo hidrológico.....	33
2.2.5. Oferta hídrica.....	35
2.2.6. Modelos en hidrología.....	35
2.2.7. Clasificación de modelos hidrológicos.....	41
2.2.8. Razones para el modelamiento hidrológico.....	43
2.2.9. Modelo hidrológico GR2M .....	45
2.2.10. Calibración y validación del modelo.....	49
2.2.11. Evaluación del modelo GR2M.....	50
2.2.12. Clima.....	53
2.2.13. El clima en el Perú .....	54
2.2.14. Clima en Puno .....	55
2.2.15. Cambio climático .....	55
2.2.16. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático – IPCC ....	59
2.2.17. Modelos climáticos globales (GCM) .....	61
2.2.18. Escenarios de emisiones de CO2 del IPCC.....	62
2.2.19. Proyecto de intercomparación de modelos climáticos (CMIP).....	63
2.2.20. Sexta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados CMIP 6	64
2.2.21. Downscaling climático.....	67
2.2.22. Cambio climático en Puno .....	68
2.2.23. Base de datos pisco .....	69

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

<b>3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>72</b>
---	-----------



3.1.1. Ubicación política.....	72
3.1.2. Ubicación hidrográfica .....	72
3.1.3. Límites hidrográficos.....	72
3.1.4. Ubicación geográfica.....	73
3.1.5. Características geomorfológicas de la cuenca .....	74
<b>3.2. MATERIALES.....</b>	<b>74</b>
3.2.1. Equipos y software utilizados.....	74
<b>3.3. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA .....</b>	<b>75</b>
3.3.1. Información meteorológica.....	75
3.3.2. Información hidrométrica .....	77
3.3.3. Información climática futura .....	78
<b>3.4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>80</b>
3.4.1. Calibración y validación del modelo hidrológico GR2M .....	81
3.4.2. Corrección de sesgo y selección de los GCMs.....	84
3.4.3. Variación de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático. .....	87

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GR2M .....</b>	<b>89</b>
4.1.1. Precipitación .....	89
4.1.2. Caudal medio mensual.....	93
4.1.3. Calibración.....	95
4.1.4. Validación.....	98
<b>4.2. REDUCCIÓN DE ESCALA Y SELECCIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES. ....</b>	<b>101</b>



4.2.1. Reducción de escala o dowscalling .....	101
4.2.2. Selección de modelo climático global .....	103
4.2.3. Comportamiento de la precipitación y temperatura en el futuro .....	106
<b>4.3. PROYECCIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO .....</b>	<b>109</b>
4.3.1. Proyección de caudales bajo escenarios de cambio climático futuro ssp2 4.5 y ssp5 8.5. ....	109
4.3.2. Efecto del cambio climático en la oferta hídrica en la cuenca del rio Ilave ...	110
<b>4.4. DISCUSIONES .....</b>	<b>116</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>119</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>135</b>

**Área:** Ingeniería y tecnología

**Línea:** Recursos hídricos

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 14 de julio de 2023



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Características de los modelos según su clasificación estructural .....	41
<b>Tabla 2.</b>	Descripción y rango mínimo y máximo de los parámetros del modelo GR2M .....	49
<b>Tabla 3.</b>	Valores referenciales del Coeficiente de Nash-Sutcliffe .....	51
<b>Tabla 4.</b>	Límites hidrográficos de la cuenca del río Ilave .....	73
<b>Tabla 5.</b>	Ubicación de las estaciones meteorológicas de la cuenca .....	76
<b>Tabla 6.</b>	Ubicación de la Estación hidrométrica puente Ilave.....	77
<b>Tabla 7.</b>	Modelos de climáticos globales utilizados en el presente estudio .....	79
<b>Tabla 8.</b>	Parámetros de análisis de homogeneidad de las estaciones.....	92
<b>Tabla 9.</b>	Análisis estadístico de saltos del caudal medio anual y la estadística de t Student's .....	94
<b>Tabla 10.</b>	Tendencia de los caudales anuales y la estadística de regresión lineal.....	95
<b>Tabla 11.</b>	Valores del modelo GR2M para la calibración.....	96
<b>Tabla 12.</b>	Parámetros para el periodo de validación del modelo .....	99
<b>Tabla 13.</b>	Coeficiente de correlación ( $r^2$ ) entre la data histórica Pisco y los GCMs..	104
<b>Tabla 14.</b>	Variación porcentual de la oferta hídrica promedio anual futuro para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5.....	111
<b>Tabla 15.</b>	Caudal promedio anual futuro para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5..	111
<b>Tabla 16.</b>	Variación porcentual de caudal promedio mensual a futuro cercano (2030- 2060) y futuro lejano (2070-2100).....	113
<b>Tabla 17.</b>	Caudal promedio mensual histórico, futuro cercano (2030-2060) y futuro lejano (2070-2100).....	114



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Representación esquemática del ciclo hidrológico.....	32
<b>Figura 2.</b>	Esquema conceptual de modelos matemáticos en hidrología .....	38
<b>Figura 3.</b>	Esquema del modelo GR2M .....	46
<b>Figura 4.</b>	Registros de variaciones de temperatura al 2050 .....	57
<b>Figura 5.</b>	Registros de variaciones de emisiones de CO2 al 2100.....	57
<b>Figura 6.</b>	Contribución del IPCC a la ciencia climática y la formulación de políticas .....	60
<b>Figura 7.</b>	Modelo Climático Global (GCM) .....	62
<b>Figura 8.</b>	Emisiones globales y cambio promedio global en el forzamiento radiativo .....	66
<b>Figura 9.</b>	Extensión espacial de PISCO V2.1. y ubicación y cuencas aguas arriba de los medidores.....	70
<b>Figura 10.</b>	Resumen esquemático del desarrollo de PISCOp V2.1 .....	71
<b>Figura 11.</b>	Ubicación de cuenca del río Ilave .....	73
<b>Figura 12.</b>	Variación de precipitación mensual en la cuenca del río Ilave desde 1981- 2016 .....	76
<b>Figura 13.</b>	Variación de la temperatura promedio mensual la cuenca del río Ilave de 1981- 2016.....	77
<b>Figura 14.</b>	Serie histórica de caudales de la estación hidrométrica puente Ilave.....	78
<b>Figura 15.</b>	Flujograma de la metodología .....	80
<b>Figura 16.</b>	Reducción de escala adaptada a los modelos globales.....	86
<b>Figura 17.</b>	Índices anuales del vector regional y de las estaciones meteorológicas consideradas en la cuenca del río Ilave .....	90
<b>Figura 18.</b>	Suma de los índices del vector regional anual y de las estaciones.....	91



<b>Figura 19.</b> Correlación de precipitación entre los datos observados y datos PISCO... 92	92
<b>Figura 20.</b> Series temporales del caudal para el periodo histórico 1981-2016 ..... 93	93
<b>Figura 21.</b> Análisis de tendencias del caudal promedio anual ..... 95	95
<b>Figura 22.</b> Caudal observado y simulado diarios para la etapa de calibración (1981-2003)..... 97	97
<b>Figura 23.</b> Línea de tendencia y coeficiente $R^2$ para el periodo de calibración..... 98	98
<b>Figura 24.</b> Hidrograma precipitación – escorrentía del periodo de validación ..... 100	100
<b>Figura 25.</b> Línea de tendencia y coeficiente $R^2$ para el periodo de Validación. .... 100	100
<b>Figura 26.</b> Ajuste probabilístico de los datos observados generados de precipitación mensual para los GCMs..... 102	102
<b>Figura 27.</b> Ajuste probabilístico de los datos observados generados de temperatura promedio mensual para los GCMs ..... 103	103
<b>Figura 28.</b> Coeficiente de determinación entre el GCM AWI-CM-1-1-MR y los datos históricos Pisco ..... 105	105
<b>Figura 29.</b> Variación anual de precipitación para el futuro cercano 2030-2060 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 ..... 106	106
<b>Figura 30.</b> Variación anual de precipitación para el 2070-2100 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 ..... 107	107
<b>Figura 31.</b> Variación anual de temperatura para 2070-2100 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 ..... 108	108
<b>Figura 32.</b> Variación anual de temperatura para 2070-2100 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 ..... 108	108
<b>Figura 33.</b> Caudal promedio mensual simulado para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 en el periodo 2030-2060. .... 109	109



<b>Figura 34.</b> Caudal promedio mensual simulado para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 en el periodo 2070-2100.....	110
<b>Figura 35.</b> Hidrograma del caudal promedio mensual para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5, 2030-2060.....	114
<b>Figura 36.</b> Histogramas del caudal promedio mensual para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5, 2070-2100.....	115



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>ANA</b>	: Autoridad Nacional del Agua
<b>AR6</b>	: Sexto informe de evaluación
<b>CMIP6</b>	: Sexta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados
<b>CNCC</b>	: Comisión Nacional de Cambio Climático
<b>CHIRPS</b>	: Climate Hazards InfraRed precipitation with station data
<b>DEM</b>	: Modelo de elevación digital.
<b>GCM</b>	: Modelos climáticos globales
<b>GR2M</b>	: Modelo de ingeniería rural de 2 parámetros a paso mensual.
<b>GEI</b>	: Gases de efecto invernadero
<b>IPCC</b>	: Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático
<b>MINAM</b>	: Ministerio del Ambiente
<b>NEX-GDDP</b>	: Proyecciones descendentes diarias mundiales de la NASA intercambio de la tierra de la Nasa.
<b>PISCO</b>	: Datos peruanos interpolados de las observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI.
<b>SSP</b>	: Vía socioeconómica compartida
<b>SENAMHI</b>	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
<b>SIG</b>	: Sistema de información geográfica.
<b>NASA</b>	: Administración nacional de aeronáutica y del espacio de los Estados Unidos.



## RESUMEN

El agua es el recurso natural muy fundamental. Sin embargo, con el cambio climático se ha incrementado y en algunos casos han disminuido la precipitación y la temperatura promedio de la cuenca, estas son las principales variables del ciclo hidrológico, por lo tanto, existe una gran preocupación sobre esta variación y cómo se verán afectados los recursos hídricos. Ante este problema se plantea como objetivo estimar la oferta hídrica superficial en la cuenca del río Ilave en condiciones de cambio climático para los periodos 2030-2060 y 2070-2100, utilizando modelos climáticos globales. Por lo tanto, para conocer la oferta hídrica se utilizó el modelo hidrológico GR2M para representar los caudales históricos 1981-2016 y para el futuro 2030-2060 y 2070-2100. Los valores obtenidos en la calibración y validación para el periodo presente fueron de Nash-Sutcliffe 0.74 y 0.75 respectivamente. Con respecto para el clima futuro, se utilizó 33 modelos climáticos globales de la base de datos del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, donde el modelo climático global AWWI-CM-1-1-MR estadísticamente y gráficamente obtuvo los más altos indicadores para precipitación y temperatura; finalmente se determinó el efecto del cambio climático con el modelo hidrológico GR2M en la trayectoria socioeconómica compartida SSP2 4.5 y SSP5 8.5 para el futuro cercano (2030-2060) y futuro lejano (2070-2100). Los resultados muestran que la oferta hídrica anual presentaría una disminución con respecto al periodo histórico de 9% hasta 10.3% para el escenario SSP2 4.5 y de 24% hasta 25.2% para el escenario SSP5 8.5; En términos mensuales, se observarían las mayores variaciones durante los meses de septiembre y octubre.

**Palabras clave:** Oferta hídrica, Cambio climático, Modelo climático global, Modelo GR2M, Cuenca Ilave.



## ABSTRACT

Water is a very fundamental natural resource. However, with climate change, precipitation and average temperature in the river basin have increased in some cases and decreased in others. These are the main variables of the hydrological cycle, so there is great concern about this variation and how it will affect water resources. In response to this problem, the objective is to estimate the surface water supply in the Ilave river basin under climate change conditions for the periods 2030-2060 and 2070-2100, using global climate models. Therefore, to understand the water supply, the GR2M hydrological model was used to represent historical streamflows from 1981-2016 and future streamflows from 2030-2060 and 2070-2100. The values obtained for calibration and validation in the present period were Nash-Sutcliffe coefficients of 0.74 and 0.75, respectively. Regarding future climate, 33 global climate models from the Intergovernmental Panel on Climate Change database were used, where the AWWI-CM-1-1-MR global climate model obtained the highest indicators for precipitation and temperature both statistically and graphically. Finally, the effect of climate change was determined using the GR2M hydrological model under the SSP2 4.5 and SSP5 8.5 shared socioeconomic pathways for the near future (2030-2060) and far future (2070-2100). The results show that the annual water supply would decrease by 9% to 10.3% compared to the historical period for the SSP2 4.5 scenario, and by 24% to 25.2% for the SSP5 8.5 scenario. In terms of monthly variations, the greatest changes would be observed during September and October. As for the patterns of monthly hydrographs, there would be a shift in the timing of maximum streamflows, which are typically recorded in February, moving towards the month of March.

**Keywords:** Water supply, Climate change, Global climate model, GR2M Model, Ilave Basin.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

El fenómeno del cambio climático representa uno de los mayores desafíos actuales a nivel mundial. Este término se refiere a alteraciones significativas en los valores promedio de elementos meteorológicos, como la temperatura y la precipitación, cuyos promedios han sido calculados durante un extenso período de tiempo (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2023; Malhi *et al.*, 2021). Las últimas décadas han evidenciado cambios notables en el clima a escala global, siendo el resultado de las actividades humanas que han modificado la composición de la atmósfera global de manera significativa (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2016). La concentración de gases de efecto invernadero, como metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ha aumentado en un 150%, 40% y 20%, respectivamente, desde 1750 (IPCC, 2014).

La vertiente hidrográfica del lago Titicaca, que incluye la cuenca del río Ilave en la sierra peruana, es un área vulnerable al clima (Sanabria *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2021). En comparación con las cuencas del norte de la Sierra, esta área tiene más probabilidades de experimentar sequías, inundaciones y otros fenómenos hidrometeorológicos debido a su mayor vulnerabilidad a los cambios climáticos y eventos severos. Por lo tanto, es importante comprender cómo cambiará el clima futuro de esta región y cómo afectará el suministro de agua de la cuenca (Lavado *et al.*, 2018; Zubieta *et al.*, 2021).

Los Modelos Climáticos Globales (GCM) son una valiosa herramienta para comprender el clima futuro y evaluar las posibles implicaciones del cambio climático en una cuenca. Estos modelos representan la dinámica de los sistemas atmosférico y



oceánico de la Tierra, brindándonos una visión del sistema climático global y permitiéndonos realizar predicciones sobre los posibles cambios climáticos que podrían ocurrir en el futuro (Gorguner et al., 2019; Terando et al., 2020; Rider et al., 2021). El IPCC ha utilizado estos modelos para realizar proyecciones climáticas futuras a través del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 - CMIP6 (Eyring et al., 2016; Durak, 2020). En este contexto, esta fuente proporciona datos de proyecciones climáticas globales diarias y mensuales de una amplia variedad de experimentos, modelos y períodos de tiempo calculados dentro del CMIP6 (IPCC, 2020).

Si bien los GCM pueden ser útiles, su alta resolución geográfica (a menudo superior a 100 km) hace que sea necesario reducirlos antes de que puedan aplicarse localmente. Como resultado, además del GCM, existen productos globales como el NEX-GDDP que tienen tamaños de cuadrícula que tienen un alcance regional en lugar de global. El conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6 se compone de escenarios climáticos globales reducidos derivados de las ejecuciones del GCM realizadas bajo el CMIP6 y en dos de los cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero de "Nivel 1", conocido como Trayectoria Socioeconómicos Compartidos (SSP). El producto NEX-GDDP de la NASA es una colección de modelos y escenarios climáticos reducidos de los GCM del CMIP6, que cubren la precipitación, la temperatura máxima y mínima diaria de 1950 hasta 2100 con una resolución de cuadrícula de 0,25 grados (25 km x 25 km). Este proceso, conocido como reducción de escala, permite que los datos se evalúen y procesen con granularidades más finas. La reducción de escala puede ser estadística o dinámica. La reducción de escala a un tipo estadístico exige menos recursos informáticos y es más sencilla de implementar que el tipo dinámico (Xu *et al.*, 2019; Sun & Chen 2020). Los datos de escalado estadístico se utilizan como entrada en el modelado hidrológico de la cuenca.



Para sus cálculos, el modelo GR2M se basa en promedios mensuales de precipitación y evapotranspiración media (Mouelhi *et al.*, 2006). Dado que la temperatura es el factor principal para determinar la evapotranspiración, se pueden utilizar modelos hidrológicos que combinen la precipitación prevista y las variables de temperatura para predecir los caudales en la cuenca (Fathi *et al.*, 2023). En Perú, se empleó el modelo GR2M para evaluar la respuesta hidrológica en la cuenca Andina-Amazonía, utilizando datos de precipitación del satélite TRMM y registros recolectados en estaciones (Lavado *et al.*, 2009; Zubieta *et al.*, 2018). Investigaciones recientes también han aplicado el modelo GR2M en experimentos de regionalización hidrológica, como el estudio presentado por Rau *et al.* (2019), el cual evaluó el comportamiento a largo plazo de cuencas mensuales en siete vertientes del Pacífico. Esta investigación reveló relaciones empíricas entre los parámetros del modelo y las características fisiográficas de la cuenca.

Además, se realizó una comparación entre el modelo hidrológico GR2M y el modelo SWAT en la cuenca de Huancané, concluyendo que el modelo GR2M demostró un buen desempeño en la simulación de caudales, lo que sugiere su utilidad como herramienta en la hidrología (Laqui *et al.*, 2022).

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la cuenca del río Ilave, situada en el sur de Puno, se encuentra la vital necesidad de agua para la supervivencia de la población y el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas y turísticas. Sin embargo, el cambio climático plantea preocupaciones sobre la disponibilidad futura de los recursos hídricos y los posibles impactos en esta cuenca. Este fenómeno puede ocasionar cambios en los patrones de precipitación en la cuenca, con áreas que podrían experimentar una disminución en la cantidad de lluvia, lo que a su vez puede reducir la recarga de acuíferos y los niveles de agua en los ríos. Estos cambios en



la precipitación pueden afectar la disponibilidad de agua para consumo humano, agricultura y otros usos (Hernández, 2020).

Además, el cambio climático se refleja en un aumento de las temperaturas. Las altas temperaturas pueden aumentar la evaporación de los cuerpos de agua y afectar la cantidad de agua disponible (Reyes & Arenas, 2022). Asimismo, el aumento de la temperatura puede alterar los patrones de precipitación y los flujos de los ríos, lo que puede generar escasez de agua en determinadas épocas del año. Estos cambios en la disponibilidad de agua pueden tener un impacto significativo en la producción agrícola y la seguridad alimentaria de esta cuenca. La escasez de agua puede limitar la capacidad de los agricultores para regar sus cultivos, lo que resulta en una disminución de la productividad agrícola y un aumento en la inseguridad alimentaria (Lozano et al., 2021).

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente a causa del cambio climático están sucediendo variación en el comportamiento de la precipitación, la temperatura y la escorrentía en diferentes lados del mundo. Esto está afectando directamente el comportamiento histórico de los caudales en los ríos. La cuantificación del suministro de agua superficial es fundamental para la gestión. Esta tarea se complica en Perú debido a la baja densidad espacial de las estaciones hidráulicas (Llauca *et al.*, 2021). La escasez de agua es un problema en muchas partes del mundo y otros sucesos graves suelen provocar pérdidas financieras y conflictos sociales, el acceso al agua es uno de los problemas más apremiantes a los que nos enfrentamos en la actualidad. El comportamiento hidrológico de una cuenca y su reacción a estos cambios cobra cada vez más relevancia como consecuencia de los impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico (Castillo, 2018).



El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad. Sus impactos se observan en diferentes sectores, incluyendo los recursos hídricos, que son fundamentales para el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, la cuenca del río Ilave, ubicada en una región vulnerable a los efectos del cambio climático, requiere una evaluación exhaustiva de su oferta hídrica superficial mensual en futuros escenarios climáticos. La cuenca del río Ilave se ubica en el lado sur de la vertiente del Titicaca, consta de cuatro provincias y doce distritos de la región de Puno. Por otro lado, es una cuenca que mayor aporta al lago Titicaca y se caracteriza por ser una zona agrícola, ganadera y piscícola. Sin embargo, se ha observado un incremento en la variabilidad climática en los últimos años, lo que plantea incertidumbres sobre la disponibilidad futura del recurso hídrico.

Los modelos climáticos predicen un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como sequías e inundaciones, en muchas regiones del mundo debido al cambio climático. Estos eventos pueden tener consecuencias significativas en la disponibilidad y distribución del agua en la cuenca del río Ilave. Es fundamental realizar una evaluación detallada de la oferta hídrica superficial mensual en la cuenca del río Ilave para comprender cómo podría cambiar en futuros escenarios climáticos. Esto implica analizar datos históricos de precipitación, caudales y niveles de agua, así como considerar proyecciones climáticas basadas en modelos confiables. Una vez obtenidos los resultados de la evaluación de la oferta hídrica superficial, estos pueden proporcionar información valiosa para la planificación y gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Ilave. Los datos pueden ayudar a identificar períodos críticos de escasez o exceso de agua, lo que permitirá tomar medidas preventivas y adaptativas para garantizar un uso sostenible y equitativo del recurso.



Ante estos desafíos, es fundamental investigar y comprender los efectos del cambio climático en la oferta hídrica en la cuenca del río Ilave, esta investigación contribuirá con información actualizada de la oferta hídrica para la cuenca Ilave para el futuro, esta data podrá ser utilizado para la planificación y para la prevención de futuros escenarios tanto en periodos de avenida y estiaje. Así mismo esta información podría ser utilizada para entidades locales, regionales y nacionales a fin de desarrollar estrategias de adaptación y gestión sostenible de los recursos hídricos. Identificar medidas de conservación y uso eficiente del agua, promover la educación sobre el cambio climático y su impacto en el suministro de agua en esta cuenca.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar la oferta hídrica superficial mensual para futuros escenarios de cambio climático en la cuenca del río Ilave.

### **1.4.2. Objetivo específico**

- Calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M en la cuenca del río Ilave, en el periodo presente (1981-2016).
- Realizar la reducción de escala espacial, selección del GCM de las variables climáticas.
- Analizar la variación de la oferta hídrica superficial de la cuenca Ilave bajo escenarios de cambio climático del futuro cercano (2030 – 2060) y lejano (2070- 2100).



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

Los antecedentes más resaltantes relacionados a la estimación de la disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático con el modelo GR2M podemos citar:

##### 2.1.1. Internacionales

Ilbay *et al.* (2021), en su artículo evaluaron los Impactos del cambio climático en IEos regímenes de precipitación y caudales en las regiones ecuatoriales: Cuenca del río Guayas donde el objetivo fue proyectar caudales, del cual se basó en cuatro modelos climáticos globales BNU-ESM, CSIRO-Mk3-6-0, FGOALS-g2 e INMCM4 para las variables precipitación y temperatura. Los resultados de la evaluación indican un aumento de 2 °C en la temperatura y un aumento del 6 % en la precipitación para el futuro (2050–2079) por lo que se esperan cambios en el régimen hidrológico del río debido al aumento de las precipitaciones, por lo que apuntan a problemas futuros, como el déficit de agua en la estación seca, pero también un aumento del caudal de las inundaciones durante la estación húmeda.

Hadour *et al.* (2020), en la investigación evolución hidrológica basada en cuencas hidrográficas bajo el efecto del cambio climático en el noroeste de Argelia, donde el propósito de esta investigación fue evaluar la sensibilidad de los parámetros hidrológicos al cambio climático futuro, utilizando el modelo hidrológico GR2M y los datos del escenario climático del modelo CNRM-CM5. Los resultados muestran los valores del parámetro de Nash alrededor de 75 a 73 y para el escenario RCP8.5, muestra una disminución de las lluvias invernales de



38 % en promedio para el 1er horizonte (2039) y 31 % durante el 2do horizonte (2069); para fines del siglo XXI (2099), se observa una disminución del 40 %. Además, las lluvias primaverales aumentarán en promedio un 17 % en los tres horizontes futuros. Por otro lado, para el escenario RCP4.5 se prevé una disminución de las lluvias de invierno y primavera de alrededor del 27 % y 65 % respectivamente. Las temperaturas aumentarán en promedio unos 2 °C para cada uno de los horizontes.

Allani *et al.* (2020), se utilizó el modelo hidrológico GR2M para investigar el impacto del cambio climático futuro en el suministro de agua y la demanda de riego en una pequeña cuenca mediterránea. Los escenarios de cambio climático se obtuvieron a partir de cinco modelos de circulación general (GCM) del CMIP5, considerando los escenarios de emisión RCP 4.5 y 8.5. Los resultados revelan que la evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub>) anual aumenta en promedio un 6.1%, mientras que la precipitación anual disminuye en un 11.4%, lo que conlleva a una reducción del 24% en el flujo de agua. Además, se observa una disminución en los períodos de crecimiento de los cultivos, desde un 5.4% para el trigo hasta un 31% para los árboles de cítricos.

Ouhamdouch *et al.*, (2020), el objetivo de este estudio es evaluar los cambios futuros en la evapotranspiración y los flujos en ambientes semiáridos, tomando como ejemplo la cuenca de Essaouira en Marruecos. Para lograr esto, se utilizó el modelo GR2M en los escenarios RCP 2.6, 4.5 y 8.5 del modelo CMIP5. Se aplicaron pruebas estadísticas de Pettitt y Mann-Kendall para determinar la tendencia de la evapotranspiración y los flujos. En relación a la evapotranspiración histórica, las pruebas estadísticas indican un aumento del 4.2% desde 1978 hasta 2005. En cuanto a los caudales históricos, se observa un aumento

en las estaciones de Igrounzar y Zelten, mientras que la estación de Adamna muestra un descenso. Aplicando las mismas pruebas estadísticas a los tres escenarios RCP, se observa una tendencia ascendente en la evapotranspiración futura. Al combinar los resultados del modelo GR2M y las pruebas estadísticas para el período 2020-2050, se observa una tendencia al alza en los caudales futuros para las estaciones de Igrounzar, Zelten y Adamna en los escenarios RCP 2.6 y 8.5, con incrementos del 20%, 28.8% y 19.70%, respectivamente, para el escenario RCP 2.6, y aumentos del 44.4%, 53.8% y 43.7%, respectivamente, para el escenario RCP 8.5. En cambio, para el mismo período y bajo el escenario RCP 4.5, los caudales futuros muestran una tendencia a la disminución del 42.5%, 42.1% y 40.6% en las estaciones de Igrounzar, Zelten y Adamna, respectivamente.

Coulibaly *et al.* (2018), en esta investigación se evaluó el impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca de África occidental a partir de los datos climáticos históricos y futuros de las rutas de concentración representativas (RCP) 4.5 y 8.5 y se proyectaron con el modelo climático regional (RegCM4), la modelación hidrológica de la cuenca del río se realizó con el modelo hidrológico GR2M donde los resultados muestran una reducción en la descarga anual en comparación con la línea de base (1961-1980). Para RCP 4.5, los valores observados van desde  $-1.2\%$  en 2030 a  $-2.3\%$  en 2070 y suben a  $-2.1\%$  en 2090. En cuanto a RCP 8.5, vimos una variación de  $-4.2$  a  $-7.9\%$  en Horizontes 2030 y 2090, respectivamente.

### **2.1.2. Nacionales**

En nacionales tenemos a Bruno (2023), esta investigación presenta los resultados y un análisis de las incertidumbres asociadas a una selección de



modelos climáticos representativos de la fase CMIP6 en la región de Sudamérica. El análisis del error porcentual en las predicciones de temperatura media del aire en América del Sur, realizadas por los modelos climáticos de la CMIP6, revela que a partir de mediados de siglo la incertidumbre interna disminuye al 2%, mientras que la incertidumbre del escenario se incrementa al 85% y la incertidumbre del modelo se reduce ligeramente al 13%. De manera similar, se observa un notable aumento de la incertidumbre del escenario hasta alcanzar valores del 88% durante las estaciones de invierno y primavera

Chávez y Bazán (2022), el estudio se propuso utilizar proyecciones climatológicas para pronosticar el comportamiento de la escorrentía en la intercuenca del Alto Huallaga desde 2020 hasta 2059. Las representaciones entre cuencas y las proyecciones de flujos para los años 2020–2059 se realizaron utilizando el modelo semidistribuido de la Herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT). Los índices estadísticos NSE (0.69), PBIAS (-18.2) y R2 (0.9) muestran que el modelo semidistribuido SWAT es eficiente para representar la intercuenca. De manera similar, utilizando datos climáticos con el enfoque de reducción de escala estadística, este modelo semidistribuido SWAT pudo pronosticar flujos para el período 2020-2059. Finalmente, establecimos que sí existen anomalías de flujo pronosticadas, ocurriendo las mayores y menores variaciones en el escenario RCP 8.5, con un alza de 83.06% en el mes de diciembre para el período 2040-2059 y una disminución de 5.61% en el mes de agosto para el período 2020-2039.

Lavado et al. (2021), en esta investigación realizaron una evaluación del presente y el futuro de la disponibilidad hídrica para el Perú. Para simular utilizaron el modelo hidrológico SWAT para el periodo presente, con respecto para



representar el clima futuro utilizaron 3 modelos climáticos globales del CMIP5 para el periodo 2035-2065. Antes de utilizar estos modelos, se utilizaron la reducción de escala dinámica y la corrección de sesgo para eliminar errores en las simulaciones; luego, utilizando los datos de P y PE, se calibró un modelo probabilístico llamado Budyko para predecir la esorrentía pasada, actual y futura. Hay menos proyecciones de aumento de la producción nacional de agua que de caída. Las dos regiones donde esto no ocurre son la vertiente norte del Pacífico y la vertiente del lago Titicaca. Se determinó que solo 22 EPS, o sea el 45% (15%) del total de EPS analizado, presentaban una tendencia a la disminución (aumento) en la producción de agua a escala de EPS. Para los 19 EPS restantes, o el 40%, existe una gran ambigüedad o no hay indicios evidentes de cambio. Los hallazgos proporcionan instrumentos para una orientación adecuada para la futura utilización de los recursos hídricos por parte de los responsables de la toma de decisiones. Sin embargo, creemos que son necesarias investigaciones adicionales en profundidad en el área de efecto de la producción de agua de la EPS para obtener resultados confiables.

Del Águila (2021), el objetivo general de este estudio fue simular el ciclo del agua en la cuenca del río Mantaro, Junn, que incluye las cuencas Anya y Mchique. Se utilizaron modelos Lutz Scholtz (LS) empíricos mensuales y SWAT semidistribuidos diarios para generar la esorrentía. De manera similar, se utilizaron cinco modelos climáticos globales (Acces, bcc\_csm1, BNU\_ESM, CMCC\_CM y GISS\_E2) y dos escenarios de emisión (RCP 4.5 y 8.5) para mostrar el impacto espacial y temporal del cambio climático en la esorrentía de las cuencas. SWAT se utilizó para ejecutar la simulación desde los años 2070 hasta 2100. En comparación con el período base de 1980 a 2010, los resultados

indican que los caudales en ambas cuencas aumentarían en ambos escenarios RCP: en promedio, los caudales en Anya aumentarían un 29.4 % y 34.1%, mientras que en Mchique subirían 5.4% y 10.8%.

Según Llauca *et al.* (2021), en el estudio titulado PISCO\_HyM\_GR2M: Un Modelo de Balance Hídrico Mensual en Perú (1981-2020), se evaluó el desempeño hidrológico de un modelo de balance hídrico mensual (GR2M) a escala semidistribuida en 3594 subcuencas y quebradas de ríos en Perú. El objetivo fue simular las descargas mensuales desde enero de 1981 hasta marzo de 2020, utilizando datos de precipitación y evapotranspiración del conjunto de datos meteorológicos de alta resolución PISCO. Los resultados revelaron una representación muy precisa de las descargas mensuales en gran parte de las subcuencas peruanas ( $KGE \geq 0.75$ ,  $NSE \sqrt{} \geq 0.65$  y  $-0.29 < WBE < 0.23$ ). Se concluyó que el modelo GR2M tuvo un buen desempeño hidrológico en las subcuencas de la vertiente del Pacífico y en la transición de las regiones Andes-Amazonas (que incluye las vertientes del Titicaca y del Atlántico). El modelo fue capaz de representar adecuadamente la estacionalidad y la variabilidad interanual de los caudales, con excepción de las áreas bajas del Amazonas, donde solo los caudales altos fueron bien representados.

### 2.1.3. Locales

En locales citamos a Quispe *et al.* (2022), evaluó la disponibilidad futura de agua en la cuenca del río Ilave con el modelo SWAT para el periodo 2025-2050 utilizando modelos climáticos globales MIROC-6 y MPI-ESM1-2-LR para los escenarios SSP245 y SSP585. Los resultados de esta investigación pronostican



una disminución de agua en un -41.2% a un 40% para las temporadas de lluvia y para la temporada seca una disminución de -33.8% a -0.1%.

Zubieta *et al.* (2021), en el estudio se analizaron los efectos del cambio climático en las sequías en la cuenca del lago titicaca. Para ello, se utilizaron proyecciones climáticas mensuales del CMIP5 bajo los escenarios de emisión RCP8.5. Las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas se evaluaron mediante el uso de índices de precipitación estandarizada, humedad del suelo estandarizada y escurrimiento estandarizado, respectivamente, los cuales se estimaron utilizando el modelo hidrológico GR2M. Los resultados revelan un incremento en la gravedad de las sequías en la mayor parte del área del Altiplano, siendo su impacto más notable entre los meses de septiembre y noviembre. Además, se proyecta un aumento significativo en la frecuencia de sequías agrícolas e hidrológicas de corta duración, que abarcan de 1 a 2 meses.

Linares (2020), a través del modelo hidrológico GR2M simuló caudales futuros para la cuenca Coata, utilizando el GCM MIROC5 del CMIP5 del IPCC. El análisis del régimen hidrológico de la cuenca muestra aumentos considerables en los caudales, mostrando para el RCP 4.5 un aumento de hasta  $Q = 24.7 \text{ m}^3/\text{s}$  en marzo y para RCP 8.5 mostrando un aumento de hasta  $Q = 94.1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Laura (2019), en su tesis, se utilizó el modelo hidrológico SAC-SMA para evaluar la oferta hídrica de la cuenca de Ilave bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para los años 2020-2060 y 2070-2100, respectivamente. Se obtuvieron índices de eficiencia de 0.86 y 0.82 después de calibrar y validar el modelo para el período actual. Se demostró que el modelo CESM1-BGC es eficaz para modelar la cuenca a partir de los 21 modelos de circulación global (GCM) empleados en esta



investigación, todos los cuales formaban parte de CMIP5. Según los hallazgos, se espera que el suministro anual de agua caiga entre un 3 % y un 24 % en un futuro no muy lejano, pero que crezca un 58 % en un futuro lejano. Habrá fluctuaciones significativas en los caudales a lo largo de los meses de febrero, marzo, abril y noviembre.

Pilares (2018), el objetivo de esta tesis fue analizar los escenarios futuros de disponibilidad del recurso hídrico en el sistema integral de Lagunillas considerando el impacto del cambio climático. Los resultados revelaron pruebas de significancia confiables y una buena concordancia entre los datos simulados y observados. Mediante el uso del modelo hidrológico WEAP, se determinó que la disponibilidad del agua satisface solo el 60% de las necesidades utilizando datos históricos simples. Sin embargo, al considerar la influencia del cambio climático, el promedio de satisfacción aumenta al 75%, destacando el escenario CANESM2-RPC 4.5 con un 85% de satisfacción. Por lo tanto, se concluye que la construcción de la represa Lagunillas y la regulación del río Verde son necesarias para garantizar un suministro suficiente de agua para las ciudades de Juliaca, Lampa y Puno, así como para el uso industrial minero y el mantenimiento del caudal ecológico en el sistema integrado de Lagunillas, abarcando un área de 30.000 hectáreas de agua potable. En todos los escenarios, pero particularmente en CANESM2-RPC 4.5 y CANESM2-RPC 8.5, se observa una influencia positiva del cambio climático en la disponibilidad de agua para el Sistema Integral Lagunillas, aumentándola en un rango del 15% al 20%.

Ticona (2016), a través de cambios en el uso del suelo y cobertura vegetal, modelaron posibles caudales para el futuro mediano al año 2050 para la cuenca del río Ilave, determinando una disminución de hasta -50% de los caudales

promedio en la cuenca en referencia al caudal histórico, debido a cambios en la cobertura vegetal para la cuenca y no cambios en las variables meteorológicas de precipitación y temperatura para los escenarios RCP del IPCC.

Asimismo, Lujano *et al.* (2016), adquirieron para el período 2070-2100, que en las cuencas de los ríos Ramis e Ilave, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5, pronostican variaciones de caudal de hasta +40% para los meses de crecidas y en época seca hasta un 80%, lo que indica que los mayores incrementos de caudales corresponden al RCP 8.5, el escenario futuro más pesimista del IPCC.

## 2.2. MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. Hidrología

Durante las últimas cinco décadas, el campo de la hidrología ha experimentado un notable crecimiento, convirtiéndose en un sistema complejo con diversas ramificaciones (Rui, 2004). Por otro lado, Balairon (2009) ha subdividido la hidrología en varias ramas, como la hidrología de cuencas, fluvial, de lagos y embalses, de aguas subterráneas, estuarios y zonas costeras, humedales, glaciares, hidrometeorología, ecohidrología e hidrología global. La ciencia del agua engloba disciplinas como la hidrología y la oceanografía, que se dedican al estudio de la hidrosfera. Por otro lado, la ciencia atmosférica se enfoca en la investigación de la atmósfera, mientras que la ciencia geológica se centra en el estudio de la litosfera. Asimismo, la ciencia biológica se ocupa de investigar la biosfera.

El estudio del agua y su distribución, circulación, cualidades físicas y químicas, y las interacciones con el medio ambiente y los seres vivos, incluidos, entre otros, los seres humanos, se conoce como ciencias del agua. El término



"hidrología" se usa a menudo para referirse al "estudio del agua en todas sus formas". En su forma más pura, la hidrología es el estudio del ciclo que mantiene el agua moviéndose entre el suelo y la atmósfera (Chow et al., 1994).

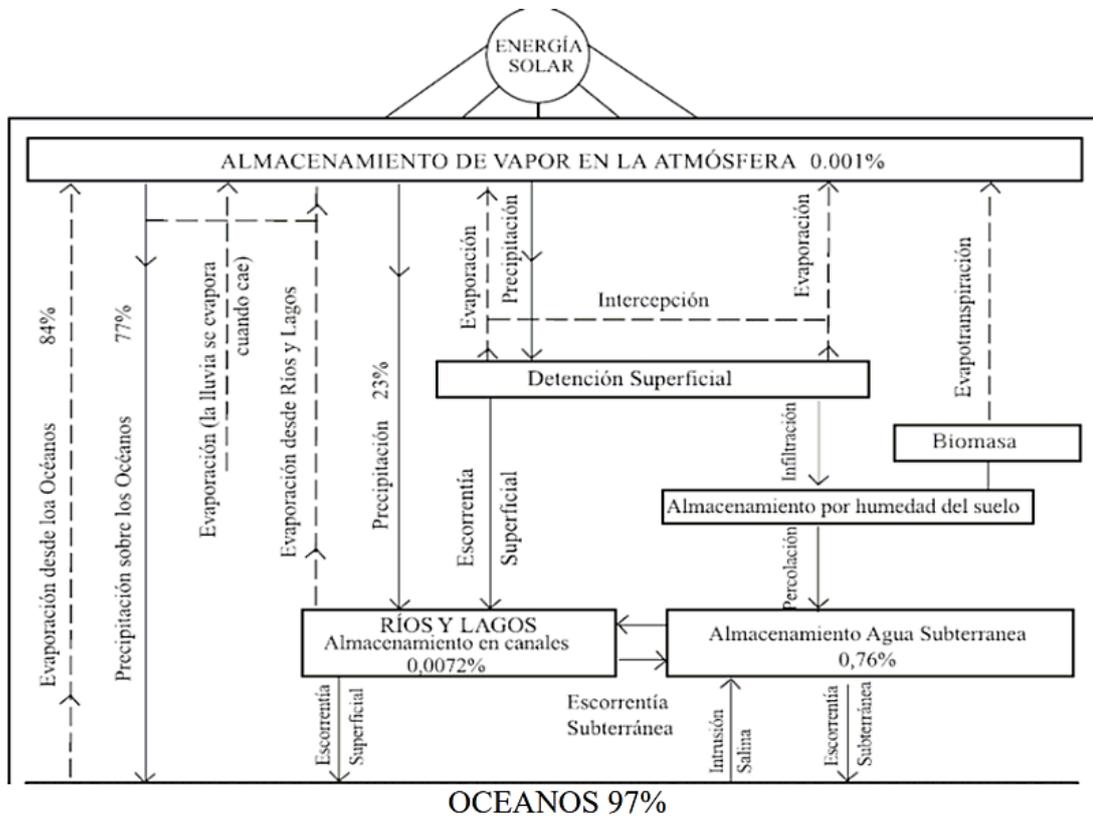
### **2.2.2. Ciclo hidrológico**

El agua se evapora de la superficie de la Tierra, viaja a la atmósfera y luego se precipita de regreso a la Tierra, completando un ciclo conocido como ciclo hidrológico. La Figura 1 muestra la serie de ocurrencias que componen este ciclo, tal como se define anteriormente y es sustentado por Fattorelli y Fernández (2011).

Dado que el ciclo hidrológico constituye el marco conceptual fundamental de la disciplina, resulta esencial para sumergirse en el estudio de la hidrología. “Este ciclo está compuesto por una serie de procesos interconectados y perpetuos que abarcan la transferencia y circulación del agua a través de la tierra, los océanos, otros cuerpos de agua y la atmósfera. El ciclo no tiene un comienzo ni un final definidos y puede describirse como el conjunto de rutas que describe el movimiento del agua en la naturaleza, independientemente de su estado físico”.

La comprensión completa de todos los elementos que componen el ciclo hidrológico representa un desafío significativo que requiere una investigación exhaustiva. Aún queda por obtener un conocimiento cuantitativo completo de todas las partes del ciclo hidrológico a nivel global. Aproximadamente el 96.5% del agua del planeta se encuentra en los océanos, mientras que el 1% restante se distribuye de la siguiente manera: un 1.7% se encuentra en forma de hielo polar, otro 1.7% se almacena en acuíferos subterráneos y un 0.1% está presente en forma de agua superficial y atmosférica. Aunque los sistemas superficiales y

atmosféricos contienen solo una pequeña cantidad de agua, cada año fluyen enormes cantidades de agua a través de ellos.



**Figura 1.** Representación esquemática del ciclo hidrológico

*Nota:* La figura representa el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica y los componentes. Tomado de (Fattorelli & Fernández, 2011).

### 2.2.3. Cuenca hidrográfica

Según Guevara (2015) comprende los puntos más altos y los cerros circundantes definen la cuenca hidrográfica de un río, que es donde vive la mayoría de la población y donde se encuentran la mayoría de los recursos de la población, ciudades, actividades humanas, infraestructura y servicios.

Las cuencas son lugares sociogeográficos en los que individuos y grupos interactúan a partir de la accesibilidad de los recursos naturales, así como de la



compartición de territorios, identidades, tradiciones y culturas (Cotler, 2010). El área está definida por la dirección de sus cursos de agua, y su superficie está definida por la línea divisoria de aguas de donde escurre la precipitación a través de esa sección.

#### **2.2.4. Procesos del ciclo hidrológico**

##### **a) Precipitación**

Según Guevara (2015) es toda el agua que cae en una determinada región se denomina como precipitación. Puede tomar forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo, escarcha). Tanto las corrientes de agua superficial como las subterráneas dependen principalmente de la precipitación como suministro de agua.

Hay varios factores que influyen en la hidrología de un lugar, pero ninguno más importante que la precipitación. Alrededor del 10% de la precipitación en los continentes proviene de la evaporación, por lo que la evaporación de la superficie del océano es el principal suministro de humedad para la lluvia y la nieve. Sin embargo, alrededor de una cuarta parte del agua que cae sobre las tierras continentales finalmente regresa al océano a través de la escorrentía superficial o el movimiento de las aguas subterráneas. Sin embargo, a diferencia de las islas desiertas, la presencia de agua no garantiza precipitaciones abundantes. Para comprender procesos como los cambios en la humedad del suelo, la recarga de los acuíferos y el caudal de los ríos es necesario familiarizarse con el comportamiento temporal y espacial de la precipitación (Aparicio, 1996).



## **b) Escorrentía**

Se denomina escorrentía a la porción de lluvia que llega a la red hidrográfica del interior de la cuenca y la recorre generando caudales líquidos. Los caudales máximos en las avenidas son causados por dos formas diferentes de escorrentía: la escorrentía rápida, que viaja rápidamente a través de la superficie del terreno hacia los lechos de los ríos. En segundo lugar, las escorrentías de aguas subterráneas y superficiales que se combinan gradualmente para formar el flujo base (López, 1998).

## **c) Evapotranspiración**

Según Gutiérrez (2014) la evapotranspiración es la cantidad de agua perdida a la atmósfera como resultado de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo.

Según Allen *et al.* (2006) “la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo” (p. 23).

“La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua” (Allen *et al.*, 2006, p.23)

## **d) Temperatura**

La temperatura del aire a escala de cultivos es el foco de la agrometeorología. De acuerdo con las pautas de la Organización



Meteorológica Mundial, “la temperatura del aire se mide en refugios meteorológicos (pantallas Stevenson o refugios ventilados) a una altura de 2 metros sobre la superficie en estaciones meteorológicas tradicionales y automáticas” (OMM).

Según Gutiérrez (2014) es el valor que indica el grado en que se calienta un cuerpo, típicamente expresado en grados Celsius (°C).

#### **2.2.5. Oferta hídrica**

La demanda de agua se define aquí como el volumen de agua requerido por los usuarios para satisfacer sus necesidades. El agua dulce superficial es el recurso más fácilmente disponible para satisfacer la demanda de agua de la agricultura (es decir, riego y ganadería), la industria, los hogares y los municipios (Van Beek *et al.*, 2011).

#### **2.2.6. Modelos en hidrología**

Un modelo, tal como lo definen Sorooshian *et al.* (2008), es una simplificación del mundo real. Con menos parámetros y menos complejidad, es más probable que un modelo produzca resultados precisos. Las principales aplicaciones de estos modelos se encuentran en las áreas de predicción del comportamiento del sistema y comprensión del proceso hidrológico. Los parámetros de un modelo son los que le dan al modelo sus características únicas. Los parámetros utilizados para caracterizar la cuenca son las entradas de un conjunto de ecuaciones llamado modelo de escorrentía, que ayuda a estimar la escorrentía. La información de lluvia y el área de drenaje son las dos entradas principales para cualquier modelo. Además de las cualidades del agua y del suelo, también se tienen en cuenta la topografía de la cuenca, la cubierta vegetal, el



contenido de humedad del suelo y las características del acuífero (Devi *et al.* 2015). Sin embargo, es crucial recordar que se necesitan modelos más simples en los países en desarrollo para brindar una simulación adecuada, necesitan pocos datos y dan cuenta de la fluctuación temporal de los muchos “fenómenos en la cuenca (Mishra y Singh, 2004). Los modelos hidrológicos son cruciales para la gestión del agua y otros recursos naturales” (Devi *et al.*, 2015).

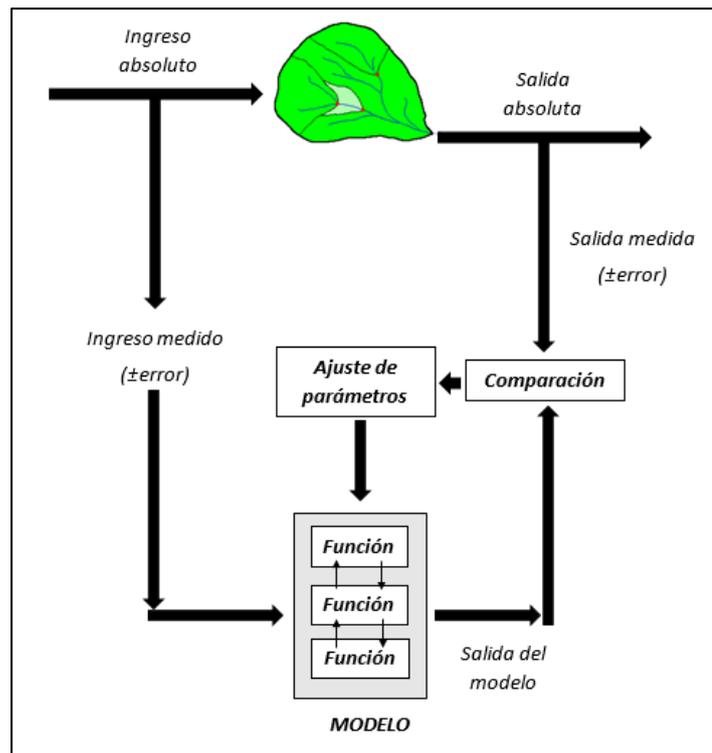
Los primeros intentos de modelado hidrológico se realizaron a principios del siglo XIX y se utilizaron en la construcción de infraestructura hidráulica como canales, alcantarillas, represas, puentes y diques. Hasta mediados del siglo XX, el alcance de la modelización hidrológica fue un intento de usar expresiones matemáticas simples para describir los muchos procesos que componen el ciclo hidrológico. “El enfoque lógico, la curva de infiltración de Horton y los cálculos de evapotranspiración de Thornthwaite y Penman son solo algunos ejemplos” (Weber *et al.*, 2010).

Una de las funciones principales de los modelos de cuenca es generar secuencias sintéticas de datos hidrológicos que se utilizan para el diseño o pronóstico de instalaciones, así como para obtener una comprensión más profunda de los “fenómenos hidrológicos que ocurren en un área de captación y cómo los cambios en la cuenca pueden afectarlos” (Mendoza *et al.*, 2002). “Los objetivos clave para realizar estudios hidrológicos en cuencas son comprender el balance hídrico, los mecanismos que afectan el movimiento del agua y las posibles consecuencias para la cantidad y la calidad del agua”. Una herramienta básica para la planificación y gestión de los recursos hídricos, el modelado hidrológico de cuenca evalúa los mecanismos que regulan el flujo de agua en diferentes escalas espaciales y temporales (Spruill *et al.*, 2000). “Puede ser utilizado para evaluar la

disponibilidad de agua, anticipar caudales a corto y mediano plazo y analizar la respuesta hidrológica de una cuenca ante cambios en el uso y la cobertura del suelo” (Pereira et al., 2016).

**a) Modelos empíricos (modelo métrico o modelo de caja negra)**

Estos modelos están basados en datos porque están orientados a la observación y utilizan únicamente la información de los datos disponibles, en lugar de considerar las características y los modelos de procesos del sistema hidrológico. Este método es matemático y no se basa en los procesos reales que ocurren en la cuenca. Estos modelos solo funcionan dentro de ciertas restricciones. El hidrograma unitario es una buena ilustración de esta técnica. Para determinar el vínculo causal entre las variables, los estadísticos emplean modelos de regresión y relaciones causales (Devi *et al.*, 2015). Los modelos estocásticos son un ejemplo común de este tipo de modelo, en el que las entradas se convierten en salidas sin conocer el mecanismo involucrado (Mejía, 2017). Un modelo empírico tiene la ventaja de ser simple de implementar, pero sus principales limitaciones son su incapacidad para generalizar a nuevos entornos y la información limitada que proporciona (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema conceptual de modelos matemáticos en hidrología

*Nota:* Muestra el esquema de manera conceptual de los modelos matemáticos.  
Tomado de Mejía (2017).

### b) Modelos paramétricos, conceptualmente basados o modelos de caja gris

Todos los procesos hidrológicos están descritos por este tipo de modelo, y se obtiene cierta comprensión de ellos mediante suposiciones empíricas (Mejía, 2017). Se compone de una red de embalses que representan las características físicas de una cuenca y se llenan y drenan por precipitación, infiltración, percolación, escorrentía, drenaje y otros procesos. Sin embargo, la calibración, que se basa en una gran cantidad de registros meteorológicos e hidrológicos, no es la única forma en que se evalúan los parámetros. Los impactos del cambio de uso de la tierra no se pueden anticipar de manera confiable ya que la calibración requiere el ajuste de la curva, lo que requiere



interpretación (Devi *et al.*, 2015). El Stanford Watershed Model IV (SWM), creado por Crawford y Linsley en 1966, es el primer modelo conceptual importante, sin embargo, es solo uno entre varios. Este modelo matemático, que simula de forma agregada el ciclo hidrológico a lo largo de una cuenca, ha tenido una amplia aplicación como técnica para generar hidrogramas horarios o diarios a la salida de la cuenca. Dado que este es un modelo de parámetros agregados, tiene necesidades de datos mucho menos estrictas en comparación con los modelos de parámetros dispersos. Las entradas dependientes de la calibración para el modelo incluyen la precipitación horaria o diaria, la posible evapotranspiración diaria y una amplia gama de características de la cuenca (Estrela, 1992).

**c) Modelos físicamente basados, de caja blanca (relación precipitación – escorrentía)**

Estos modelos, que son simplificaciones matemáticas del fenómeno real, también se conocen como modelos mecanicistas o modelos basados en procesos porque utilizan variables de estado observables que dependen del tiempo y el espacio e incorporan los principios y leyes de los procesos físicos, como la conservación de masa, energía o cantidad de movimiento. Las condiciones iniciales y de contorno, así como las entradas, se conocen de antemano, lo que les valió la etiqueta de "deterministas" (Mejía, 2017). Las ecuaciones en diferencias finitas se utilizan como modelo para los procesos de transporte de agua en hidrología. "Cuando se aplica espacialmente, desde la pendiente hasta las escalas continentales, el modelo puede incorporar la diversidad espaciotemporal de los forzamientos primarios, como la precipitación, la radiación y las variaciones en las propiedades de la superficie



terrestre, p. topografía, suelos, vegetación, etc. El modelo resuelve el dominio del subsuelo en sentido horizontal y vertical a escala de subpendiente, describiendo la heterogeneidad a una escala igual o mayor a un volumen elemental representativo, para medios porosos”. Se ha demostrado que (Fatichi et al., 2016). La evaluación de varios factores que caracterizan las características físicas de la cuenca es necesaria para su calibración, aunque no lo son los datos hidrológicos y meteorológicos extensos (Abbott et al., 1986). Se necesitan grandes cantidades de información para este tipo de modelos, incluido el contenido de humedad del suelo, la profundidad inicial del agua, el terreno, la topología, el tamaño de la red fluvial, etc. Debido al uso de parámetros con significado físico, el modelo físico puede compensar numerosas deficiencias de los otros dos. Es útil en muchos contextos y puede proporcionarle una gran cantidad de datos, incluso cuando está empujando el sobre (Abbott et al., 1986). Cuando se necesita un modelo detallado de las vías de flujo y los períodos de residencia debido a su influencia dominante en la solución, los procesos basados en permiten estimaciones distribuidas de la humedad del suelo, la evapotranspiración, los sedimentos y la transferencia de contaminantes.

Los cambios en la temperatura y el uso de la tierra son solo dos ejemplos de perturbaciones humanas de los sistemas hidrológicos que pueden entenderse y simularse mejor con la ayuda de este tipo de modelos (Fatichi *et al.*, 2016). Dichos modelos incluyen los modelos SHE, MIKE SHE y SWAT (Abbott et al., 1986).

**Tabla 1.** Características de los modelos según su clasificación estructural

<b>Modelos empíricos matemáticos</b>	<b>- Modelos conceptuales</b>	<b>Modelos físicamente basados y en procesos</b>
Envuelve ecuaciones matemáticas, derivados de series de tiempo disponible. Basado en datos medidos o modelos de caja negra. También llamados estocásticos. Alto poder predictivo, poca profundidad explicatoria. Validos dentro de un contorno de un dominio dado.	Basados en modelamiento de reservorios contiene ecuaciones empíricas. Paramétricos o modelos de caja gris. Los parámetros son derivados de datos de campo y calibración. Requiere cantidad de datos meteorológicos e hidrológicos.	Basados en distribuciones espaciales. Evaluación de parámetros describiendo características físicas. Mecánicos o funcionales modelos de caja blanca. Requiere datos acerca del estado inicial del modelo y de la cuenca. Sufre problemas relacionados con la escala. Valido para un rango amplio de situaciones.

*Nota:* En esta tabla se muestra las diferentes y las características de los modelos hidrológicos. Adaptado de *Devi et al. (2015)* y *Mejía (2017)*.

### 2.2.7. Clasificación de modelos hidrológicos

El ciclo hidrológico está descrito por una serie de factores y componentes, cada uno de los cuales puede dividirse en subcategorías. Los modelos se pueden agrupar o dispersar según cómo cambien sus parámetros en el tiempo y el espacio, y también pueden ser deterministas o estocásticos según otros factores (*Devi et al., 2015*).

Se clasifican en una de tres categorías, dependiendo de la representación espacial:

#### a) Modelos agregados o agrupados

Se utiliza como variable la precipitación media en toda la cuenca y se supone que los parámetros de los distintos submodelos utilizados para simular



los distintos procesos hidrológicos son los mismos en todas partes de la cuenca y en el transcurso del episodio.

#### **b) Modelos semidistribuidos**

La cuenca se puede subdividir en varias subcuencas más pequeñas, con la lluvia y los parámetros del submodelo mantenidos constantes en cada subcuenca, lo que permite un estudio espacialmente detallado de los componentes de la cuenca.

#### **c) Modelos distribuidos**

Mediante la subdivisión de la cuenca en celdas donde se simulan los diferentes procesos hidrológicos, se logra preservar la información espacial de las precipitaciones y los parámetros.

Hay cuatro categorías distintas que pueden definirse por la forma en que se representan los procesos hidrológicos de la cuenca:

#### **a) Modelos métricos**

Tienen una gran confianza en los datos que ya se han recopilado, buscándolos para definir la reacción del sistema. Los procesos físicos del sistema hidrológico no se tienen en cuenta durante el desarrollo de estos modelos.

#### **b) Modelos conceptuales**

Proporcionan una descripción conceptual de los procesos hidrológicos más cruciales, que sirve como punto de partida para futuras investigaciones y desarrollos. En cualquier caso, el modelo hidrológico se construye utilizando valores ficticios para parámetros medibles. Por lo tanto, estos modelos deben



calibrarse con los datos vistos en la cuenca objetivo antes de que puedan usarse allí.

### c) Modelos físicamente basados

Simulación de la hidrología de una cuenca mediante ecuaciones de continuidad; solución numérica de ecuaciones diferenciales utilizando métodos de diferencias finitas o elementos finitos; aplicación de la comprensión más avanzada del comportamiento físico clásico de los procesos hidrológicos. Estos, sin embargo, son del tipo distribuidor y permiten describir el fenómeno en cada uno de los modelos de celda del sistema desde la perspectiva de los parámetros y la resolución de los sistemas de ecuaciones. Un conjunto de ecuaciones diferenciales que expresan la conservación de la masa, el impulso y la energía sirve como modelo para el sistema físico subyacente.

#### 2.2.8. Razones para el modelamiento hidrológico

El objetivo principal del modelado hidrológico es proporcionar datos precisos para una gestión eficiente de los recursos hídricos por las siguientes razones:

- Para tomar decisiones informadas sobre el diseño y la viabilidad económica de un proyecto de sistema hidráulico, planificación, operación y administración de obras, se puede utilizar un modelo hidrológico para estimar las variables hidrológicas cuantitativas, eficientes y a precios razonables en cuencas sin detección. las tasas de flujo, los volúmenes de almacenamiento, la carga de ventas y los sedimentos, las opciones de control, la calidad del agua,



las repercusiones en los cambios de cantidad y calidad, etc., son todos ejemplos de hidráulica.

- Se puede utilizar un modelo hidrológico para completar o sustituir los datos faltantes, crear información a partir de un pequeño conjunto de datos y organizar y sistematizar una gran cantidad de datos hidrometeorológicos.
- Se puede obtener información sobre los procesos físicos, biológicos y químicos dentro del sistema hidrológico mediante el uso de modelos hidrológicos, que permiten modelar los procesos en diversas circunstancias naturales en la cuenca o bajo la intervención del hombre.
- Los hallazgos de la simulación del modelo hidrológico pueden proporcionar un respaldo táctico para las iniciativas de investigación.
- Los datos experimentales para todas las posibles combinaciones de usos de la tierra, tratamientos de la tierra y sistemas hidrológicos aún no están disponibles en hidrología. Los buenos modelos hidrológicos tienen el potencial de responder preguntas sobre una variedad de escenarios y entornos en los que se pueden usar las cuencas.
- Debido a la capacidad del modelo para extrapolar e interpolar datos, puede usarse para pronosticar las consecuencias de la incertidumbre hidrológica, como los resultados del cambio climático global o la ocurrencia de inundaciones o sequías.
- Finalmente, el conocimiento sobre los componentes del sistema se puede dar a través de un modelo hidrológico bien estructurado para proporcionar una aproximación consistente del comportamiento del sistema (Mejía, 2017).



### 2.2.9. Modelo hidrológico GR2M

La Unidad de Investigación en Hidrología del CEMAGREF creó el modelo agregado GR2M, que es del tipo conceptual Ingeniería Rural y tiene 2 parámetros y un paso de tiempo mensual. (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia). Los valores de entrada para la precipitación de área en milímetros, la evapotranspiración de área en milímetros, el tamaño de la cuenca en kilómetros cuadrados y los caudales medidos en milímetros se muestran en la Figura 3. Se deben realizar ajustes en  $X1$  (función de producción) y  $X2$  (función de transferencia) ( $X2$ ).

Cuando se trata de comprender cómo se convierte la precipitación en caudales en una escala de tiempo mensual, GR2M, es un modelo agregado de balance hídrico mensual, es invaluable (Mouelhi *et al.*, 2006). En el modelo se utilizan dos funciones para convertir la lluvia en escorrentía:

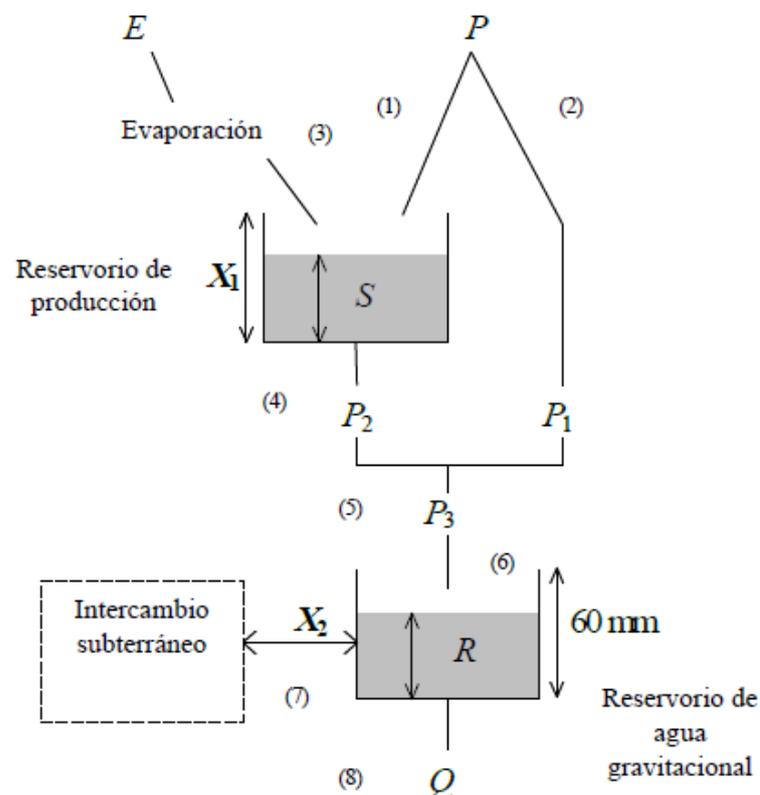
#### a) Funciones del modelo

El modelo combina una función de producción y una función de transferencia para convertir la precipitación en escorrentía, como afirman Mouelhi *et al.* (2006). El reservorio de suelo y el reservorio de agua gravitacional conforman su construcción.

Según Mouelhi *et al.* (2006), el modelo utiliza una función de producción y una función de transferencia para transformar la precipitación en escorrentía. Su estructura se compone principalmente de dos reservorios: el reservorio de suelo y el reservorio de agua gravitacional. El modelo GR2M, como se muestra en la Figura 3, incorpora varias funciones y considera los procesos hidrológicos clave que contribuyen a la formación de la escorrentía.

En cambio, todos los volúmenes de las funciones se pueden obtener a partir de los parámetros del modelo X1 y X2 insertando la herramienta Solver en Excel y optimizando el modelo hasta que la curva resultante se acerque lo suficiente a la original.

El esquema del modelo GR2M se ve en la Figura 3. Este modelo da cuenta de los procesos hidrológicos primarios que conducen a la producción de escorrentía. En este modelo se tienen en cuenta la precipitación (P), la evaporación (E), la escorrentía superficial (P1), la percolación profunda (P2), el almacenamiento en el suelo (S) y el depósito de agua gravitacional (R). Se especifica una capacidad de almacenamiento máxima similar de X1 para el tanque de suelo, mientras que se fija 60 mm para el tanque de agua por gravedad.



**Figura 3.** Esquema del modelo GR2M



En el modelo, todas las magnitudes (entradas, salidas y variables internas) se encuentran expresadas en milímetros (mm). En las ecuaciones siguientes, las variables P y E representan la precipitación y la evapotranspiración potencial promedio de la cuenca.

La precipitación provoca que el almacenamiento en el tanque de producción, S, se transforme en S1, mediante la aplicación de la siguiente expresión:

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

La capacidad máxima del tanque de producción se denota como X1. El cálculo del exceso de precipitación, P1, se realiza de la siguiente manera:

$$P_1 = P + S - S_1$$

Debido a la evaporación (el cálculo de la evaporación real depende del valor de E), S1 se convierte en S2:

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

Luego, se libera una cantidad de agua, P2, del tanque de producción en forma de percolación. Como resultado, la variable S2 adquiere un nuevo valor, representando el almacenamiento inicial para el mes siguiente:

$$S = \frac{S_2}{\left[ 1 + \left( \frac{S_2}{X_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$P_2 = S_2 - S$$



La suma de P1 y P2 es la cantidad de agua que entra en el tanque de tránsito:

$$P_3 = P_1 + P_2$$

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

$$R_1 = R + P_3$$

Luego se calcula el término de intercambio de agua F:

$$F = (X_5 - 1)R_1$$

El parámetro adimensional X5 se utiliza en la ecuación para determinar si hay una ganancia de agua (F) para la cuenca cuando su valor es mayor que 1, o una pérdida cuando su valor es menor que 1. El nivel actualizado en el tanque de tránsito se calcula de la siguiente manera:

$$R_2 = X_5 * R_1$$

La cantidad de agua que fluye hacia la salida de la cuenca de interés se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + X_4}$$

El parámetro X4 representa la capacidad máxima del tanque de tránsito, que se establece en 60 mm. Al finalizar el cálculo, se obtiene el nivel en el tanque de tránsito al comienzo del siguiente mes.

**Tabla 2.** Descripción y rango mínimo y máximo de los parámetros del modelo GR2M

Parámetro	Unid	Descripción	Mínimo	Máximo
<b>X1</b>	Mm	Capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo.	1	2000
<b>X2</b>	-	Coefficiente de intercambios subterráneo	0.01	2
<b>F<sub>prec</sub></b>	-	Factor de corrección de la precipitación mensual.	0.8	1.2
<b>F<sub>pet</sub></b>	-	Factor de corrección de la evapotranspiración potencial mensual.	0.8	1.2

*Nota:* Adaptado de Pagano et al., (2009)

## 2.2.10. Calibración y validación del modelo

### a) Calibración

Para establecer la mejor coincidencia entre las series de datos simulados y observados, la calibración es el proceso mediante el cual se encuentran los valores óptimos de los parámetros del modelo (Cabrera, 2017). Durante este proceso, se utiliza una "función objetivo" que evalúa la precisión del modelo.

La calibración es el proceso de ajustar los parámetros del modelo durante el entrenamiento para lograr el máximo ajuste entre el modelo y los datos. El ajuste de parámetros a menudo se evalúa utilizando una función de objetivo único que evalúa qué tan bien las predicciones del modelo coinciden con los datos. La mayoría de los modelos hidrológicos emplean la métrica de eficiencia de Nash-Sutcliffe, cuyo objetivo es minimizar la diferencia RMS entre los caudales simulados y observados. La calibración incluye inherentemente la validación (o verificación) del modelo, ya que un

rendimiento deficiente generalmente detendría el proceso de modelado (Arsenault et al., 2018).

## b) Validación

La validación del modelo, según la definición de Refsgaard y Knudsen (1996), implica demostrar que el modelo puede realizar predicciones precisas en una ubicación específica y para períodos de tiempo fuera del período de calibración. Durante la fase de validación, se evalúan los errores y los límites aceptables en la precisión y capacidad predictiva del modelo. Si el modelo cumple con estos criterios, se considera validado.

Al comparar los resultados de la calibración del modelo con los datos, la validación asegura que los parámetros puedan usarse en otros contextos y que el modelo sea estable. El término "validación" tiene un significado significativamente más limitado en el campo del modelado hidrológico, donde se refiere a mostrar que el modelo puede reflejar con precisión los datos recopilados después de haber sido entrenado (Arsenault *et al.*, 2018).

### 2.2.11. Evaluación del modelo GR2M

#### a) Coeficiente de nash-sutcliffe

Un método útil para comparar la eficacia de diferentes modelos hidrológicos es la función de eficiencia de Nash (Nash y Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right]$$

Dónde:  $Y_i^{obs}$ : Datos observados,  $Y_i^{sim}$ : Datos simulados [ $L^3T^{-1}$ ],  $Y_i^{mean}$ : Promedio de datos observados [ $L^3T^{-1}$ ] y  $n$ : número de intervalos temporales.

En la Tabla 3 se tiene un rango propuesto por Moriasi *et al.*, (2007), el cual califica a un modelo en base al coeficiente de Nash-Sutcliffe.

**Tabla 3.** Valores referenciales del coeficiente de Nash-Sutcliffe

Nash	Ajuste
<0.5	Insatisfactorio
0.5 – 0.65	Satisfactorio
0.65 – 0.75	Bueno
0.75 -1	Muy Bueno

Nota: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations (Moriasi et al., 2007)

### b) Coeficiente de nash-logaritmo

Es una adaptación del coeficiente de Nash-Sutcliffe (Krause et al., 2005) que se enfoca en la evaluación más precisa de los caudales durante las estaciones secas. Mediante la transformación logarítmica, se aborda el problema de las diferencias al cuadrado y la sensibilidad a los valores extremos del coeficiente de Nash, al tiempo que se incrementa el valor del indicador de eficiencia.

El coeficiente de Nash-Ln puede tomar valores desde  $-\infty$  hasta 1, siendo 1 el valor óptimo.

$$Nash - 1 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_i^{obs}) - \ln(Y_i^{sim}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_i^{obs}) - \ln(Y_i^{mean}))^2} \right]$$

Dónde:  $Y_i^{obs}$ : Datos observados [ $L^3T^{-1}$ ],  $Y_i^{sim}$ : Datos simulados [ $L^3T^{-1}$ ],  $Y_i^{mean}$ : Promedio de datos observados y  $n$ : número de intervalos temporales.

### c) Raíz del error cuadrático medio

Cuando las descargas observadas se normalizan por el promedio de las descargas observadas, el RMSE proporciona una medida cuantitativa del tamaño de la discrepancia entre los valores de descarga simulados y observados. Este error relativo puede tomar valores entre 0 y  $+\infty$ , siendo los errores más pequeños representados por números negativos (Feyen *et al.*, 2000).

$$RMSE = \left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \cdot \frac{1}{\bar{O}}} \right]$$

Dónde:  $P_i$ : valor simulado,  $O_i$ : valor observado,  $\bar{O}$ : promedio de valores observados,  $n$ : número de observaciones.

### d) Sesgo porcentual BIAS

El porcentaje de sesgo (PBIAS) se utiliza para cuantificar la consistencia con la que los valores generados se desviaban hacia arriba o hacia abajo de los valores reales. El valor óptimo de PBIAS es 0,0 y la magnitud de los valores es mínima, lo que sugiere que el modelo se está simulando con precisión. Los valores más cercanos a cero sugieren un sesgo de sobreestimación y los valores más cercanos a uno indican un sesgo de subestimación, como lo afirman (Gupta *et al.*, 1999).

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)}{\sum_{t=1}^n Q_i} * 100$$

En esta fórmula,  $Q_i$  representa una observación,  $\hat{Q}_i$  un cálculo,  $\bar{Q}$  la media de las observaciones y  $n$  el número total de observaciones.



### 2.2.12. Clima

El clima de un lugar o del planeta es el estado y la tendencia del clima durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para caracterizarse significativamente por esos cambios. Los procesos atmosféricos son impulsados por la radiación solar y, junto con el efecto invernadero, son los agentes de forzamiento climático más importantes (Montealegre & Pabón, 2000). Este equilibrio radiativo está controlado por factores de forzamiento radiativo, por determinantes y por la interacción entre los diversos componentes del sistema climático.

El tiempo es la condición de la atmósfera en un lugar y momento determinados; puede ser frío o cálido, seco o húmedo, lluvioso o no, con o sin viento; mientras que el clima es el tiempo que normalmente ocurre en un lugar determinado a lo largo de los años (Andrades & Muez, 2012).

La palabra "determinantes climáticos" se utiliza para describir los factores físicos y geográficos que tienen un impacto duradero en el clima debido a su naturaleza generalmente constante durante largos períodos de tiempo y su gran extensión espacial. Los factores importantes incluyen la latitud, la altitud y la distancia desde el océano.

Las actividades de los humanos, así como los procesos de la atmósfera, la superficie terrestre, los mares y la superficie terrestre cubierta de hielo, juegan un papel en la determinación de la temperatura. Los elementos del sistema climático son estos. La energía se transfiere a través de ciclos biogeoquímicos como resultado de esta interacción, y estos ciclos son los que controlan la temperatura global (Montealegre & Pabón, 2000).



### 2.2.13. El clima en el Perú

Debido a su posición entre el ecuador y el Trópico de Capricornio, Perú tiene temperaturas cálidas durante todo el año. El clima de Perú es diverso debido a una serie de elementos, incluida la presencia de la Cordillera de los Andes, la interacción entre ciclones y anticiclones, y la corriente peruana o de Humboldt (Ministerio del Medio Ambiente [MINAM], 2013). Los fenómenos de El Niño y La Niña tienen la mayor influencia en el clima del Perú, a pesar de que el clima del país naturalmente fluctúa en diferentes marcos de tiempo. Los cambios en la temperatura del mar provocados por estos eventos reducen la temperatura del aire regional y alteran los patrones de lluvia de la región.

La costa de Perú experimenta una precipitación media anual de 150 mm y una temperatura media anual de 18°C, creando un clima semicálido muy seco de tipo desértico-árido subtropical. En contraste, la presencia de los Andes genera cambios significativos en altitud que moldean la diversidad climática de la sierra. Las principales cuencas interandinas se encuentran entre los 2500 y 3500 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas medias anuales de 11°C a 16°C y precipitaciones anuales que oscilan entre 50 y 1000 mm. Por otro lado, la selva tropical alberga una amplia gama de climas, pero en general se caracteriza por ser tropical, con precipitaciones anuales significativas y temperaturas que fluctúan entre 22 y 26 °C (MINAM, 2013).

De acuerdo con el estudio “Perú y el cambio climático” publicado por el (MINAM, 2016), “la evaluación de los escenarios climáticos en el Perú buscó examinar las tendencias e indicadores de los extremos climáticos actuales a nivel nacional a partir de datos observables”. Además, se realizaron estimaciones de



proyecciones futuras para la década de 2030 (promedio para el período 2025-2035) utilizando modelos de circulación general (GCM) y técnicas de downscaling, tanto de forma dinámica como estadística. Se puede esperar un buen desempeño en el modelado de la precipitación asociada a esta fase climática del modelo regional RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), el cual fue construido para capturar el efecto del fenómeno El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS). SENAMHI de Perú proporcionó los datos utilizados para este análisis, que incluyeron precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas desde 1965 hasta 2006.

#### **2.2.14. Clima en Puno**

Puno tiene un clima alpino frío, subhúmedo y extremadamente seco. La proximidad del lago a la zona hace que el clima sea más moderado. la precipitación anual ocurre principalmente entre diciembre y abril, mientras que varía en los ciclos anuales para producir inundaciones y sequías, así como chubascos de nieve y aguanieve poco frecuentes e irregulares, y la precipitación media anual es inferior a 700 mm.

#### **2.2.15. Cambio climático**

Las condiciones atmosféricas cambiantes son a lo que nos referimos cuando hablamos de cambio climático porque la acción de las variables sobre la temperatura en la atmósfera dará como resultado eventos meteorológicos que caracterizan un clima particular. Nuestra economía, la biodiversidad de nuestro mundo y la disponibilidad de recursos como el agua se ven afectados directa o tangencialmente por el cambio climático, por lo que ya no es solo un tema para que los científicos debatan.

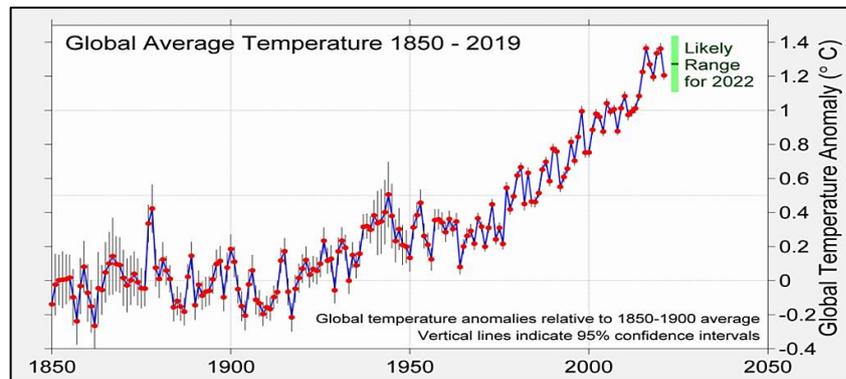


Tanto las causas externas, como El Niño/Oscilación del Sur, como los factores internos, en forma de "forzamientos radiativos" naturales, contribuyen a la climatología que se ha observado. "Las variaciones en la actividad solar, los movimientos planetarios, las erupciones volcánicas y los cambios en la composición atmosférica" califican como forzamientos externos naturales. Sin embargo, investigaciones científicas recientes han señalado con el dedo a las actividades humanas, y más específicamente al aumento de los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos, como la principal influencia externa que influye en los patrones climáticos globales. Todo el calentamiento actual puede atribuirse a estas causas provocadas por el hombre. Otros utilizan la frase "calentamiento global" para describir este proceso, pero "cambio climático" es más amplio porque incluye los efectos de este proceso (Cifuentes, 2010).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, establecida en 1992, define el cambio climático como "un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables". La Convención reconoce la diferencia entre las condiciones climáticas desfavorables que pueden ocurrir debido a causas naturales y el cambio climático que es resultado de las acciones humanas.

Existe evidencia que respalda la suposición de que las personas tienen algún efecto sobre el clima global, como se destaca en el informe "Segunda Evaluación del Cambio Climático" del IPCC de 1995. El IPCC publicó su "Tercer Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático". " en 2001, y señaló que investigaciones recientes han mostrado consistentemente evidencia de señales humanas en registros climáticos que abarcan 35-50 años. La Figura 5 indica que

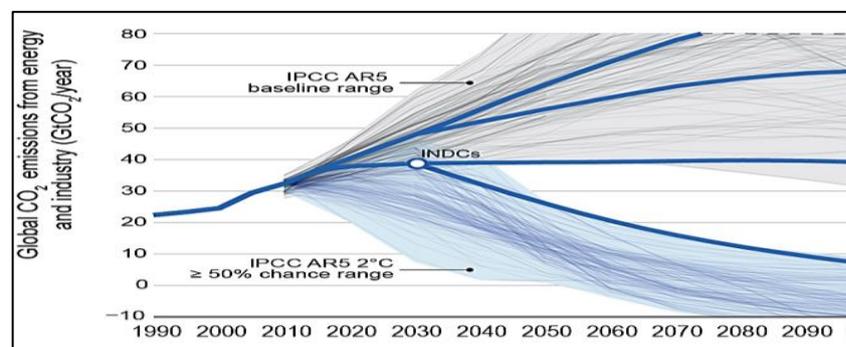
las últimas tres décadas han sido más cálidas que cualquier década anterior en la superficie terrestre desde 1850. Debido a las altas cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la predicción del IPCC de 2005 de un aumento de la temperatura de 1.4 a 5.8 °C por año 2100 ha sido revisado al alza, como se ve en la Figura 5.



**Figura 4.** Registros de variaciones de temperatura al 2050

*Nota:* Anomalías en el promedio mundial de temperaturas desde 1850 al 2019.

Tomado IPCC, 2022.



**Figura 5.** Registros de variaciones de emisiones de CO<sub>2</sub> al 2100

*Nota.* Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> antropógeno y su distribución en la atmósfera, la tierra y los océanos. Tomado del (IPCC,2022).

Al adoptar una estrategia interactiva, que reconoce la interconexión del clima, los ecosistemas, la vida silvestre y las culturas humanas, este estudio evaluó



los efectos, los peligros y las adaptaciones al cambio climático. Dada la ocurrencia de numerosos peligros climáticos a la vez y su naturaleza interactiva, se ha argumentado que los riesgos son complicados, ya que son difíciles de controlar y propagar a través de sistemas interconectados y entre áreas.

En la misma línea, valora no solo el conocimiento científico sino también el conocimiento indígena y local para comprender y evaluar los procesos de adaptación climática y las acciones para disminuir los impactos del cambio climático. También enfatiza estrategias de adaptación que se adhieren a los tres principios de la justicia climática: justicia distributiva (la distribución equitativa de costos y beneficios entre individuos, naciones y generaciones futuras); juicio penal (el proceso mediante el cual se seleccionan individuos y grupos para tomar e implementar-decisiones); y reconocimiento (la observancia de valores fundamentales como el respeto, la dedicación y la justa consideración de las diversas normas y valores culturales) (IPCC, 2022).

Según el último estudio, las respuestas actuales al cambio climático son lamentablemente inadecuadas. Como resultado, se requieren medidas ambiciosas de adaptación y mitigación para lograr el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, refugio y detener la destrucción innecesaria de la vida y las especies (IPCC, 2022).

Según la CNCC del 2002, el efecto invernadero es una parte importante de la estrategia estadounidense para combatir el calentamiento global. El efecto invernadero, dicen, juega un papel fundamental al absorber parte del calor reflejado por el sol, manteniendo la temperatura normal de la Tierra en aproximadamente 15 °C. La ausencia de este mecanismo daría como resultado



una temperatura media global de unos -18 grados centígrados y la inexistencia de agua líquida en la Tierra.

### **2.2.16. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático – IPCC**

Las Naciones Unidas convocaron al IPCC para compilar y difundir informes científicamente sólidos sobre el cambio climático, sus efectos y los pasos que se pueden tomar para adaptarse y mitigarlos. El IPCC da la bienvenida a las nominaciones de delegados de todos los miembros de las Naciones Unidas y la Organización Meteorológica Mundial.

El Grupo de Expertos, compuesto por delegados de los Estados responsables de las decisiones más cruciales, sirve como su pilar central. La Mesa del IPCC, que está compuesta por representantes elegidos por los gobiernos de los Estados miembros, brinda orientación al Grupo sobre cuestiones de administración y política, así como sobre los elementos científicos y tecnológicos de su trabajo. Muchos expertos comparten sus hallazgos por la bondad de sus corazones. Pueden servir en una variedad de capacidades, incluso como organizadores, escritores principales, autores secundarios y revisores (García, 2016).

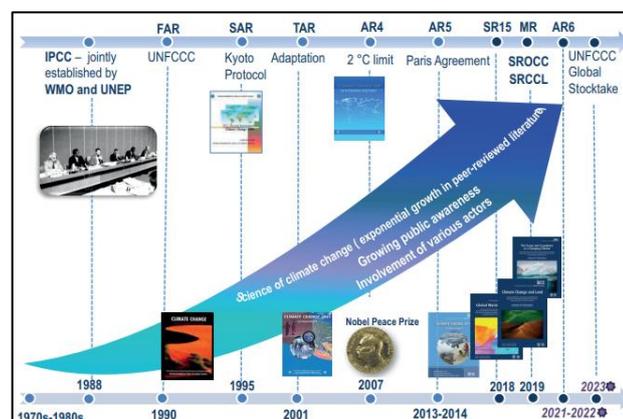
Desde 1988, el IPCC ha producido cinco evaluaciones integrales Informes y varios Informes Especiales sobre temas específicos. El IPCC tiene también elaboró informes de metodología, que brindan Directrices sobre la preparación de inventarios de gases de efecto invernadero para los requisitos de presentación de informes de inventario de las Partes en los Estados Unidos Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (IPCC, 2022). “Los

informes AR (informes de análisis) son donde los hallazgos se comparten con el público. Los hallazgos previos del IPCC se describen en su totalidad a continuación.

- Primer reporte de evaluación (FAR): 1990.
- Segundo reporte de evaluación (SAR): 1995 (base para el protocolo de Kyoto).
- Tercer reporte de evaluación (TAR): 2001.
- Cuarto reporte de evaluación (AR4): 2007.
- Quinto reporte de evaluación (AR5): 2013-2014.
- Sexto reporte de evaluación (AR6): 2022

Más de la mitad de la población mundial reside en áreas urbanas, y la adición del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del IPCC ofrece un análisis integral de los efectos, riesgos y adaptación al cambio climático en estas áreas”. Donde el calentamiento global está muy por los 2° C y se busca esfuerzos para limitarlo a 1.5° C (IPCC, 2022)

Los cronogramas de todos los documentos y hallazgos publicados por el IPCC se pueden encontrar en la Figura 6.

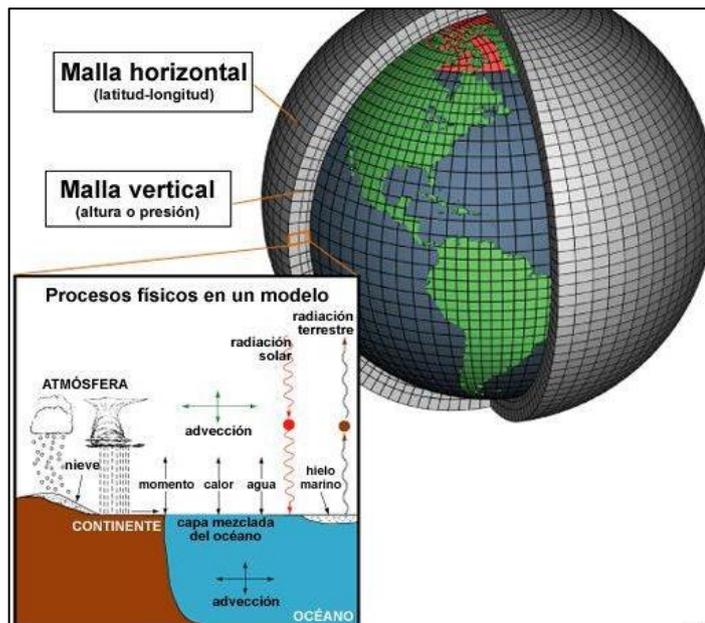


**Figura 6.** Contribución del IPCC a la ciencia climática y la formulación de políticas

### 2.2.17. Modelos climáticos globales (GCM)

Los modelos del sistema climático que se basan en las propiedades físicas, químicas y biológicas de esos componentes se conocen como modelos de circulación global (MCG) o simplemente modelos climáticos. “El grado en que estos modelos describen procesos físicos, químicos y biológicos”, así como la forma en que hacen uso de parametrizaciones empíricas, contribuyen a su grado general de complejidad. El sistema climático se describe en detalle mediante los Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (AOGCM), que incluyen tanto la atmósfera como los mares. Además de tener un propósito científico, los GCM se utilizan con fines prácticos, como hacer proyecciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (Gorguner et al., 2019; IPCC, 2022).

Se están realizando más investigaciones sobre escenarios basados en el clima, que el IPCC clasifica como escenarios graduales o sintéticos, escenarios similares o modelos basados en modelos climáticos globales (GCM). Los modelos del sistema climático requieren escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como entrada, los cuales están determinados por las condiciones socioeconómicas globales. Estos escenarios integran el impacto de las emisiones de GEI como un forzamiento en los modelos. Según Deepthi y Sivakumar (2023), los modelos climáticos globales generalmente proporcionan datos a escalas mayores a 2.5°, los cuales no se pueden aplicar directamente para obtener resultados más detallados en áreas o ubicaciones específicas. Por lo tanto, se requiere una regionalización para obtener resultados más precisos y adaptados a las circunstancias climáticas locales. La Figura 7 ilustra visualmente un ejemplo de un modelo climático global (GCM, por sus siglas en inglés).



**Figura 7.** Modelo Climático Global (GCM)

*Nota:* Obtenido de [https://meteglosario.aemet.es/es/termino/454\\_modelo-climatico](https://meteglosario.aemet.es/es/termino/454_modelo-climatico)

### 2.2.18. Escenarios de emisiones de CO<sub>2</sub> del IPCC

Los modelos climáticos globales son herramientas utilizadas para predecir climas futuros y son fundamentales en la generación de proyecciones del cambio climático. Estos modelos emplean fórmulas y ecuaciones para comprender y explicar el comportamiento de las variables que influyen en el clima. Para explorar las diferentes posibilidades de emisiones, se llevan a cabo estudios como el Informe Especial del IPCC sobre opciones de crecimiento. Estos pronósticos alternativos del cambio climático futuro tienen en cuenta variables demográficas, sociales, económicas, técnicas y naturales, así como las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes. La idea básica detrás de estas situaciones hipotéticas es que las diferentes sociedades pueden trabajar juntas para encontrar soluciones integrales a los problemas globales o pueden intentar encontrar esas



soluciones por su cuenta. Del mismo modo, los objetivos de desarrollo pueden centrarse en reforzar el bienestar material o proteger los recursos naturales (Cifuentes, 2010).

### **2.2.19. Proyecto de intercomparación de modelos climáticos (CMIP)**

El CMIP es un marco comunitario para la evaluación y evaluación de modelos climáticos, así como su intercomparación, registro y difusión. Esta estructura permite que un gran grupo de expertos evalúe cuidadosamente los GCM, lo que a su vez conduce a mejores modelos.

Desde su inicio en 1995, este esfuerzo ha logrado la participación de la mayoría de los investigadores internacionales en modelado climático. “Una gran cantidad de datos del CMIP se encuentran almacenados y el Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI) brinda apoyo adicional al CMIP. El Programa de Modelado Climático Regional y Global (RGCM) de la División de Ciencias Climáticas y Ambientales de la Oficina de Investigación Biológica y Ambiental (BER) del Departamento de Energía de EE. UU. respalda el trabajo de PCMDI en el CMIP” (IPCC, 2020; pág., 25).

Los cambios en el forzamiento del clima, como el aumento del dióxido de carbono atmosférico, pueden reflejarse en un clima replicado con la ayuda de modelos acoplados de circulación general atmósfera-océano. En iteraciones posteriores de CMIP, vemos los resultados de una situación hipotética en la que el CO<sub>2</sub> atmosférico aumenta un 1% por año hasta que se duplique aproximadamente en el año 2070, provocando un calentamiento global catastrófico. Los subproyectos de diagnóstico aprobados pueden hacer uso del resultado de la CMIP.



El proceso CMIP involucra a instituciones (como centros meteorológicos nacionales o institutos de investigación) de todo el mundo que ejecutan sus modelos climáticos con un conjunto acordado de parámetros de entrada (forzamientos). Los centros de modelado producen un conjunto de resultados estandarizados. Cuando se combinan, producen un conjunto de datos de modelos múltiples que se comparte internacionalmente entre los centros de modelado y se comparan los resultados.

El análisis de los datos del CMIP permite:

- Una mejor comprensión del clima, incluida su variabilidad y cambio.
- Una mejor comprensión de las implicaciones sociales y ambientales del cambio climático en términos de impactos, adaptación y vulnerabilidad.
- Informando los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

La comparación de diferentes modelos climáticos permite:

- Determinar por qué los modelos forzados de manera similar producen una variedad de respuestas.
- Evaluar qué tan realistas son los diferentes modelos en la simulación del pasado reciente.
- Examinar la previsibilidad del clima.

#### **2.2.20. Sexta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados CMIP 6**

En las últimas décadas se han logrado avances significativos en la evaluación de modelos. La comunidad CMIP ahora ha llegado a una coyuntura



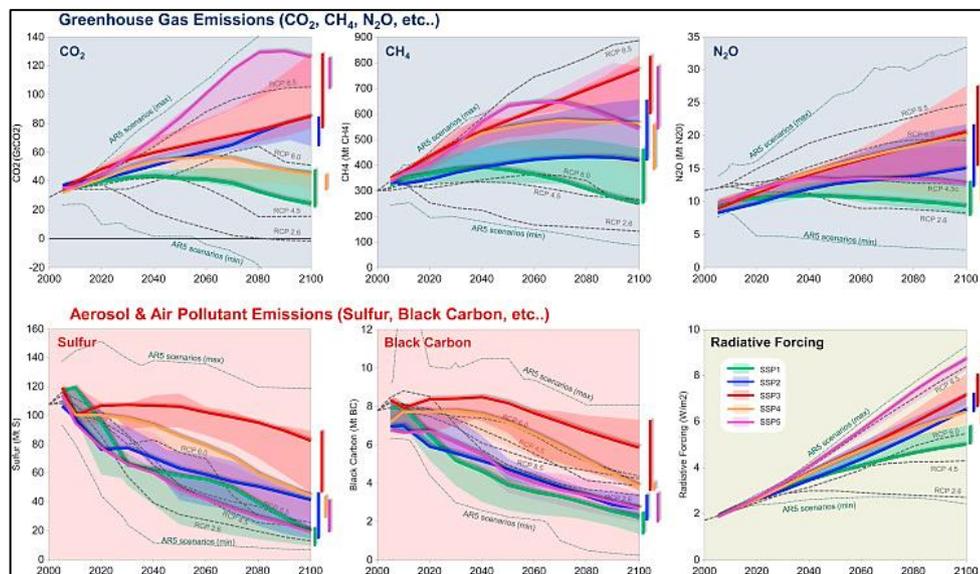
crítica en la que muchos aspectos básicos de la evaluación de modelos deben realizarse de manera mucho más eficiente para permitir una evaluación de rendimiento sistemática y rápida de la gran cantidad de modelos que participan en CMIP. Algunos de los modelos CMIP6 tienen una mayor sensibilidad climática que los modelos CMIP5, y estos resultados se informaron por primera vez en 2021 (Carbonbrief, 2019). Esta sensibilidad mejorada ayuda a explicar por qué se espera que este siglo experimente el mayor calentamiento, con temperaturas proyectadas entre 0.4 °C y 0.9 °C por encima de las de escenarios similares de CMIP5.

La comunidad de modelado de energía ha creado un nuevo conjunto de escenarios de emisión en el tiempo previo al IPCC AR6, con cada escenario impulsado por un conjunto único de supuestos socioeconómicos. Las "Rutas Socioeconómicas Compartidas" (SSP) son los objetivos colectivos de la CMIP6. Había varios escenarios potenciales de emisiones futuras de gases de efecto invernadero proporcionados en las cuatro vías de concentración representativas (RCP) del IPCC AR5. Las nuevas versiones de los escenarios que se muestran en la Figura 8 (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) se pueden encontrar en CMIP6 con los nombres SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5- 8.5.

- SSP585: Este escenario, con un forzamiento radiativo adicional de 8.5 W/m<sup>2</sup> para 2100, es el más extremo de los discutidos en la literatura. Es similar al escenario CMIP5 RCP8.5, pero también tiene en cuenta factores económicos y sociales.
- SSP370: Este escenario, con una proyección de 7 W/m<sup>2</sup> para 2100, se encuentra en el extremo superior de toda la gama de escenarios. Solo se

introdujo siguiendo los escenarios RCP y sirve como un paso de transición entre RCP6.0 y RCP8.5.

- SSP245: El escenario SSP245 se caracteriza por ser una trayectoria de emisiones moderadas de gases de efecto invernadero y es una evolución del escenario RCP4.5 con un forzamiento radiativo adicional de 4.5 W/m<sup>2</sup> para el año 2100. En este escenario se adoptan medidas de precaución para mitigar los impactos del cambio climático.
- SSP126: Este escenario, con un forzamiento radiativo de 2.6 W/m<sup>2</sup> para el año 2100, es una versión actualizada del escenario optimista RCP2.6 y fue diseñado para representar un desarrollo que sea compatible con el objetivo de limitar el calentamiento global a 2 °C. Sin embargo, su viabilidad depende de la implementación efectiva de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático.



**Figura 8.** Emisiones globales y cambio promedio global en el forzamiento radiativo



Los resultados de concentración, forzamiento y temperatura se obtienen mediante el uso de un modelo climático simplificado conocido como MAGICC versión 6.8.01 BETA (Meinshausen et al., 2011). Los resultados de temperatura tienen en cuenta el forzamiento natural durante el período histórico, mientras que las proyecciones suponen un forzamiento volcánico nulo y mantienen ciclos de forzamiento solar de 11 años, siguiendo el enfoque utilizado en la CMIP5 (Meinshausen et al., 2011).

### **2.2.21. Downscaling climático**

Los modelos climáticos globales (GCM) tienen limitaciones cuando se trabaja a escalas más bajas porque, por ejemplo, no reflejan con precisión la topografía local, lo que afecta la temperatura local. Como resultado, sería importante reducir los modelos circulatorios mundiales. Tanto la técnica de reducción de escala dinámica como el método de reducción de escala estadístico u observacional son bien conocidos en el campo de la ciencia del clima.

El término "Downscaling de escala" se refiere al proceso mediante el cual los pronósticos globales generados por GCM se ajustan para adaptarse a las características regionales, locales o a nivel de cuenca. En este paso, creamos conexiones entre varios factores. estadísticas combinadas de modelos climáticos globales y registros de sensores meteorológicos (Torres, 2016).

#### **a) Reducción de escala dinámica**

Según Ochoa (2013) menciona que utilizar el método de reducción de escala dinámica, se puede derivar una gran cantidad de información climática de los modelos de circulación general. Los diferenciales que describen tales procesos pueden resolverse mediante la reducción de escala dinámica con el



uso de un modelo de circulación general que proporcione condiciones iniciales y de contorno.

#### **b) Reducción de escala estadística**

La reducción de escala estadística se basa en el establecimiento de correlaciones cuantitativas entre los factores de superficie a pequeña escala (predictores) y las variables atmosféricas a gran escala, como lo afirman Fiseha *et al.* (2012). Se puede usar la siguiente expresión para expresar esta conexión: La precipitación (R) y la temperatura (X) se pueden predecir usando la fórmula  $R = F(X)$ , donde F es una función fija o aleatoria que vincula las dos variables (Lineal o no lineal), y X es un predictor. (presión atmosférica a nivel del mar, humedad específica, etc.).

Existen tres principales categorías de métodos estadísticos utilizados para la reducción de escala en el contexto del cambio climático: productores de clima, sistemas de tipificación del clima y modelos de regresión. Estos métodos asumen que las relaciones lineales y no lineales entre las variables predictoras a gran escala y las variables predictivas a escala local permanecerán constantes, considerando así los efectos del cambio climático. Los métodos más recientes no lineales utilizan algoritmos de optimización complejos, lo cual resulta en un mayor tiempo de cálculo en comparación con los métodos lineales tradicionales (Fiseha *et al.*, 2012).

#### **2.2.22. Cambio climático en Puno**

Puno, como tercer departamento en términos de dependencia agrícola, enfrenta una gran vulnerabilidad a las variaciones en la humedad climática, lo cual representa un desafío para la seguridad alimentaria y afecta el equilibrio entre los



factores naturales y sociales (Belisario, 2015). Se ha observado una tendencia al aumento de las precipitaciones monzónicas tempranas durante el Holoceno tardío, relacionada con los cambios en la insolación de verano. Sin embargo, no se ha encontrado evidencia de una necesidad hidrológica similar a escalas de tiempo de precesión durante el último período de glaciación (Fornace et al., 2014). Estas condiciones están influenciadas por los patrones atmosféricos y oceánicos en el Pacífico tropical y el Atlántico norte, los cuales afectan los cambios en la temperatura y la precipitación en la región de los Andes (Stansell, *et al.*, 2013).

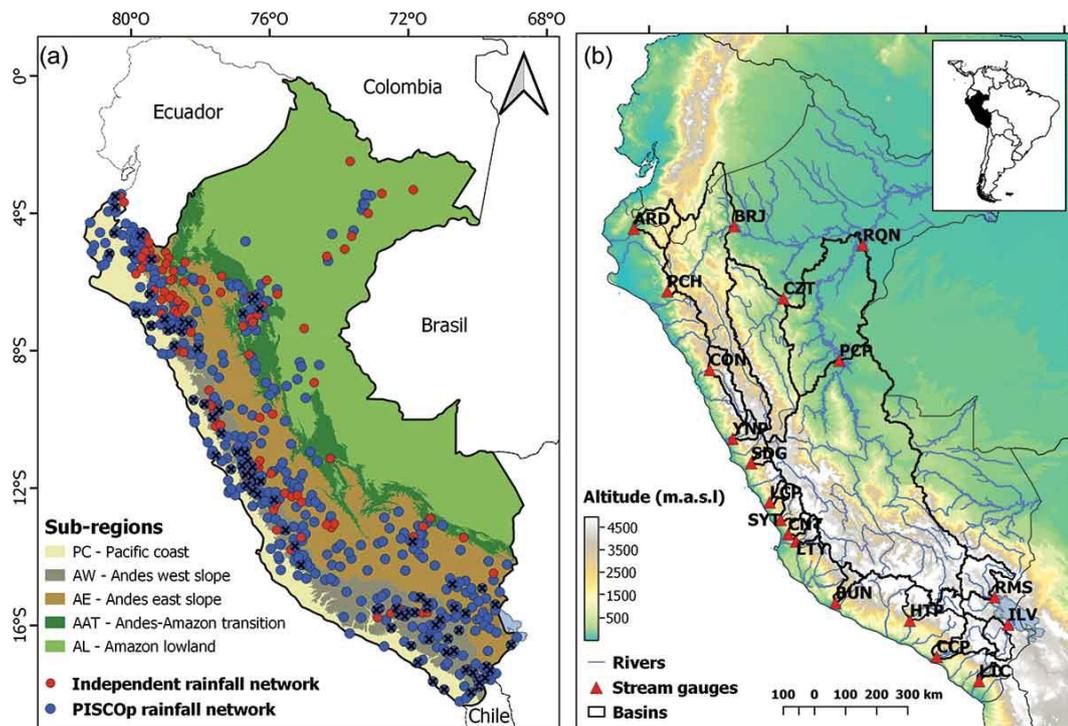
La temperatura promedio en Puno ha subido 0,8 °C entre 1960 y 2010; esto ha tenido un impacto perjudicial significativo en la cosecha de papa, haba y maíz. Sin embargo, la quinua y la cañihua se han beneficiado del entorno cambiante. Las predicciones para 2035 muestran que, debido al cambio climático, la producción agrícola perderá el 0.58 por ciento del PIB de Puno. Esto es igual al poder adquisitivo de unos 20 millones de estadounidenses (Tonconi, 2015). Los fenómenos meteorológicos extremos, como sequías, heladas y tormentas, representan una amenaza para las tierras agrícolas rurales del Altiplano. El cultivo de cereales en los Andes depende de las condiciones climáticas (Thibeault *et al.*, 2010).

### **2.2.23. Base de datos pisco**

A partir de 2013, el Departamento de Hidrología del SENAMHI ha desarrollado el PISCO - Datos Interpolados del Perú. Este es un conjunto de datos hidroclimáticos que se basa en la base de datos de Observaciones Climatológicas e Hidrológicas del SENAMHI, y se presenta a una escala espacial de alrededor de 5 km, abarcando todo el territorio peruano. Esta base de datos, que abarca el

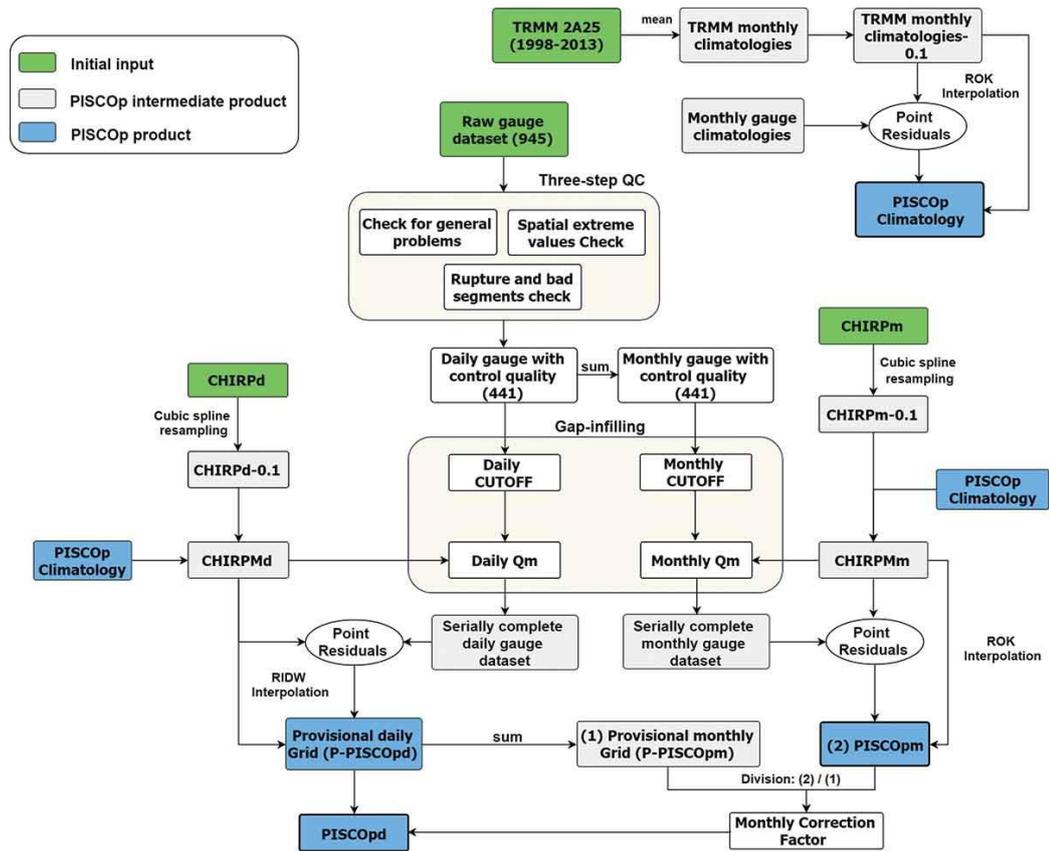
período de enero de 1981 a diciembre de 2016, está disponible de forma gratuita para su descarga en formato NETCDF a través del sitio web del SENAMHI (Aybar *et al.*, 2017).

La investigación de Aybar *et al.* (2020) señala que el desarrollo de PISCO requirió tres pasos distintos: garantía de calidad de los datos meteorológicos; análisis experimental de datos satelitales; e integración de datos utilizando enfoques geoestadísticos y deterministas. La Figura 9 muestra los resultados del riguroso control de calidad realizado por el SENAMHI, que está a cargo de mantener los datos de PISCO.



**Figura 9.** Extensión espacial de PISCO V2.1. y ubicación y cuencas aguas arriba de los medidores

*Nota:* Los puntos con × indican estaciones con más del 95% de los datos dentro del período 1981–2016. (Aybar *et al.*, 2020)



**Figura 10.** Resumen esquemático del desarrollo de PISCOp V2.1

*Nota:* Proceso del desarrollo para la obtención de los datos. Tomado de Aybar *et al.* (2020).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Ilave se puede descomponer en sus dos subcuencas más importantes, que son las de los ríos Huenque y Aguas Calientes. La elevación media de la cuenca del Ilave es de 4.309.31 m.s.n.m., con una altitud máxima de 5.400 msnm y una altitud mínima de 3.805 msnm. La superficie total de la cuenca del Ilave es de 7.832,53 km<sup>2</sup>.

##### 3.1.1. Ubicación política

Políticamente, la cuenca del río Ilave está situada en:

- Región : Puno
- Provincia : Chucuito, El Collao y Puno.
- Distrito : Huacullani, Juli, Capaso, Mazocruz, Conduriri, Ilave, Acora, Platería, Chucuito, Laraqueri, Puno y San Antonio.

##### 3.1.2. Ubicación hidrográfica

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

- Vertiente: Titicaca
- Sistema Hídrico: TDPS

##### 3.1.3. Límites hidrográficos

La Tabla 4 y la Figura 11 ilustran las otras seis cuencas fluviales y las tres intercuencas que rodean la cuenca del río Ilave.

**Tabla 4.** Límites hidrográficos de la cuenca del río Ilave

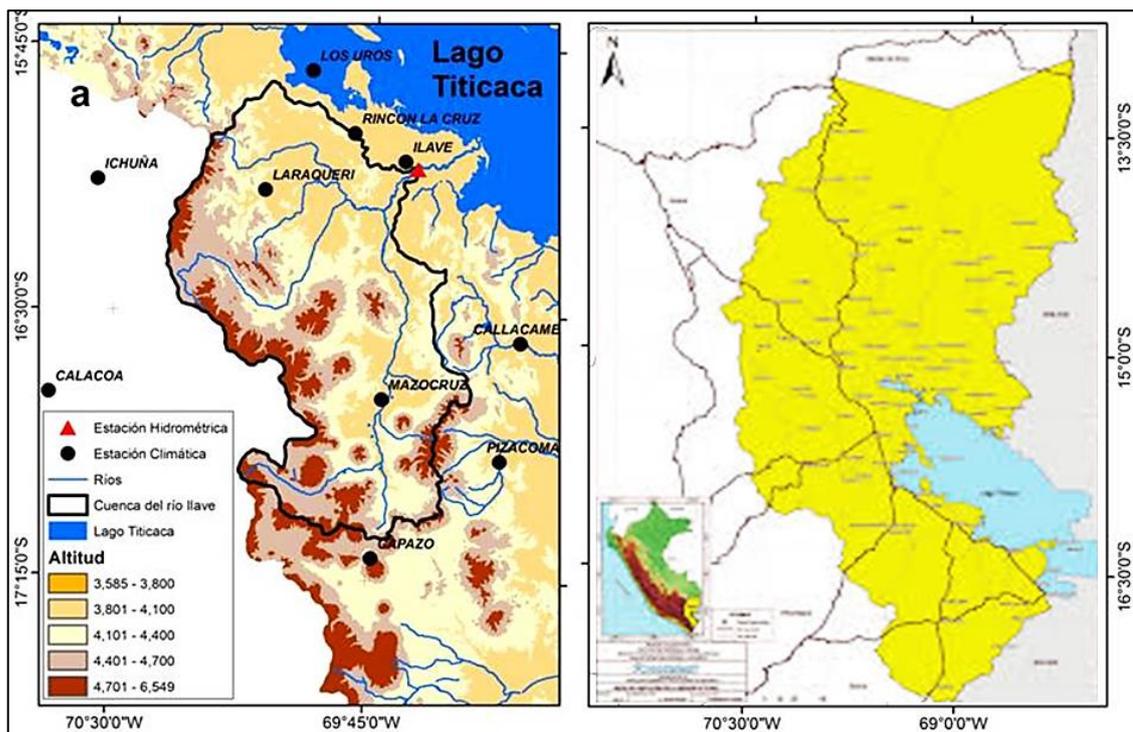
Este	Oeste	Norte	Sur
Cuenca Callacame y Mauri Chico	Cuenca Tambo y Locumba	Cuenca Illpa y 0173	Cuenca Mauri

### 3.1.4. Ubicación geográfica

La cuenca del río Ilave se puede encontrar en estas coordenadas WGS84

UTM:

- Este : 352.353.0 – 452.052.0
- Norte : 8°104,770.0 – 8°248,751.0
- Altitud : 3824 – 5558



**Figura 11.** Ubicación de cuenca del río Ilave



### **3.1.5. Características geomorfológicas de la cuenca**

Se utilizó ArcGIS 10.5 para determinar las características geomorfológicas generales de la cuenca del río Ilave (hasta la estación de aforo Puente Ilave), las cuales muestran rasgos geomorfológicos típicos de la sierra peruana.

El área de la cuenca en estudio es de 7832.53 km<sup>2</sup>, y su perímetro es de 600.39 km; la cuenca tiene un tiempo de concentración de 782.58 min.; sus altitudes van desde los 3824 a 5558 msnm, con una altitud promedio de 3950 msnm; la pendiente media de la cuenca es de 10.60%; la pendiente del cauce principal es de 1.95%; su longitud es de 188.89 km; y estos resultados son similares a los detallados por (ANA, 2009; SENAMHI, 2013).

## **3.2. MATERIALES**

### **3.2.1. Equipos y software utilizados**

Se han utilizado los siguientes equipos y software de computo, para lograr nuestro objetivo de esta investigación:

#### **a) Equipos**

- Laptop Intel Core i7 – Predator 8750H CPU 2.20 GHz
- Impresora laser
- Materiales de escritorio
- Cámara fotográfica

#### **b) Software**

- RStudio
- ArcGis 10.5
- Microsoft Office 2016



- TREND 2.1
- Hidraces

### 3.3. INFORMACIÓN HIDROMETEREOLÓGICA

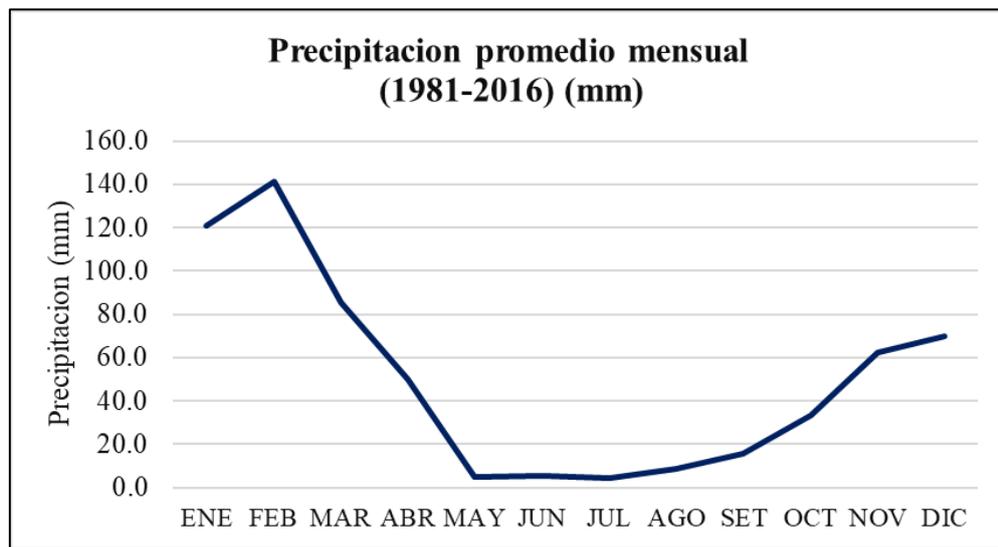
#### 3.3.1. Información meteorológica

Los datos utilizados en el estudio fueron obtenidos de la base de datos grillados PISCO, la cual abarca el período de 1981 a 2016 y han sido homogeneizada según (Luna & Lavado,2015). Estos datos son proporcionados por el SENAMHI y están disponibles de forma gratuita. Se seleccionaron seis estaciones de precipitación ubicadas dentro de la cuenca, teniendo en cuenta su ubicación geográfica y las variables que se miden en cada estación de observación meteorológica.

Se empleó código de programación en R Studio para obtener los datos diarios correspondientes al período de 1981 a 2016, abarcando un total de 35 años. Las estadísticas revelaron que las precipitaciones tuvieron un inicio modesto en octubre, aumentando en intensidad desde diciembre hasta marzo en la región del altiplano. Posteriormente, las lluvias disminuyeron hasta mayo, siendo menos intensas, y apenas se registraron precipitaciones significativas desde junio hasta agosto. Esto se puede observar claramente en la Figura 12, la cual documenta de manera precisa las temporadas de lluvia, caracterizadas por fuertes precipitaciones entre los meses de diciembre a marzo, y las temporadas secas, en las cuales predominan sequías casi constantes entre mayo y agosto.

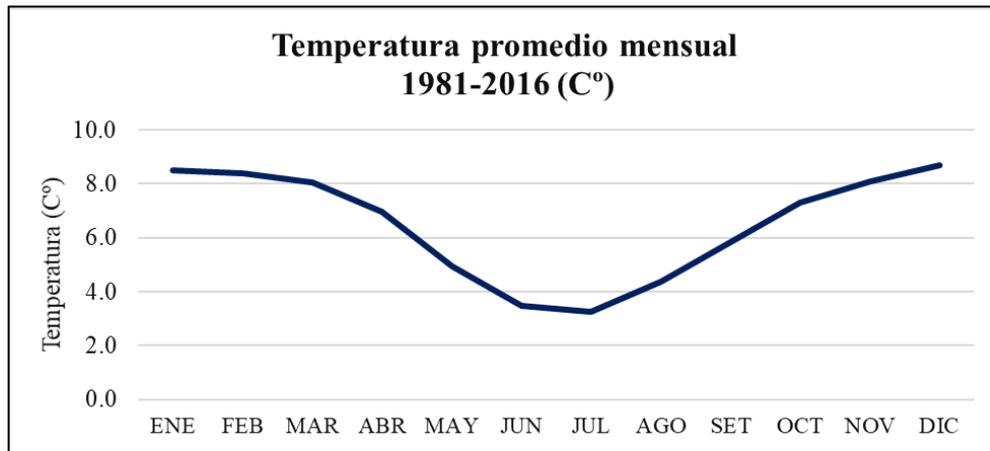
**Tabla 5.** Ubicación de las estaciones meteorológicas de la cuenca

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Variable
Laraqueri	16°8'9.3" S	70°2'45.2" W	3928	P
Ilave	16°5'17.7" S	69°37'33.3" W	3850	P
Juli	16°12'13.6" S	69°27'35.7" W	3830	P
Mazo Cruz	16°44'20" S	69°42'55.6" W	3980	P
Callacame	16°34'20.1" S	69°19'1.1" W	3862	P



**Figura 12.** Variación de precipitación mensual en la cuenca del río Ilave desde 1981-2016

La Figura 13 muestra claramente que, en la cuenca, la temperatura promedio alcanza su nivel más bajo en julio, mientras que registra sus valores más altos durante los meses de noviembre a marzo, siendo enero el mes más cálido.



**Figura 13.** Variación de la temperatura promedio mensual la cuenca del río Ilave de 1981- 2016

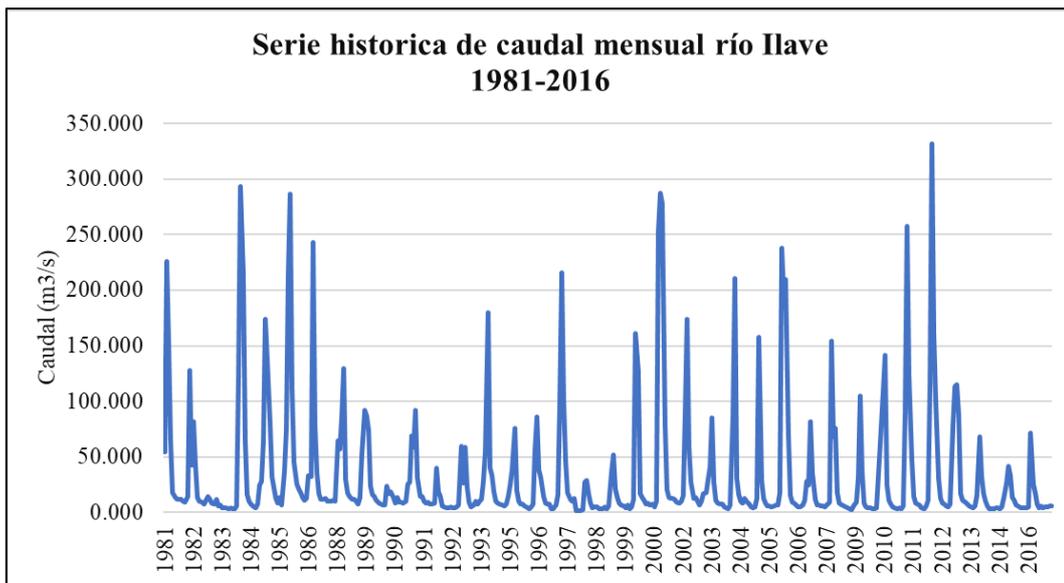
### 3.3.2. Información hidrométrica

Las series de los datos históricos comprende desde 1981 y 2016 (35 años), se recopilaron las mediciones hidrométricas de la estación del puente Ilave. Los resultados se muestran en la tabla 6 y la figura 14 se muestra la serie histórica del caudal. La estación está ubicada a la desembocadura de la cuenca Ilave.

**Tabla 6.** Ubicación de la estación hidrométrica puente Ilave

Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud m.s.n.m	Región
Puente carretera Ilave	Convencional- Hidrológica	16°5'17.68" S	69°37'53.95" W	3840	Puno

*Nota:* Obtenido de SENAMHI



**Figura 14.** Serie histórica de caudales de la estación hidrométrica puente Ilave

*Nota:* Serie histórica de los caudales históricos desde 1981-2016. Obtenido de SENAMHI

### 3.3.3. Información climática futura

En esta investigación, se utilizó GCMs y los pronósticos de contaminación SSP2 4.5 escenario optimista y SSP5 8.5 escenario pesimista, para predecir las precipitaciones futuras hasta el año 2100.

La información de precipitación, temperatura máxima y mínima, se descargó de la plataforma Copernicus Climate Change Service administrado por el IPCC y está disponible en <https://climate.copernicus.eu/>, de manera gratuita, este servidor proporciona datos de proyecciones climáticas globales diarias y mensuales de 32 modelos climáticos globales que es la cantidad de experimentos del CMIP6 para el escenario climático SSP2 4.5 y SSP5 8.5. tal como se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7.** Modelos de climáticos globales utilizados en el presente estudio

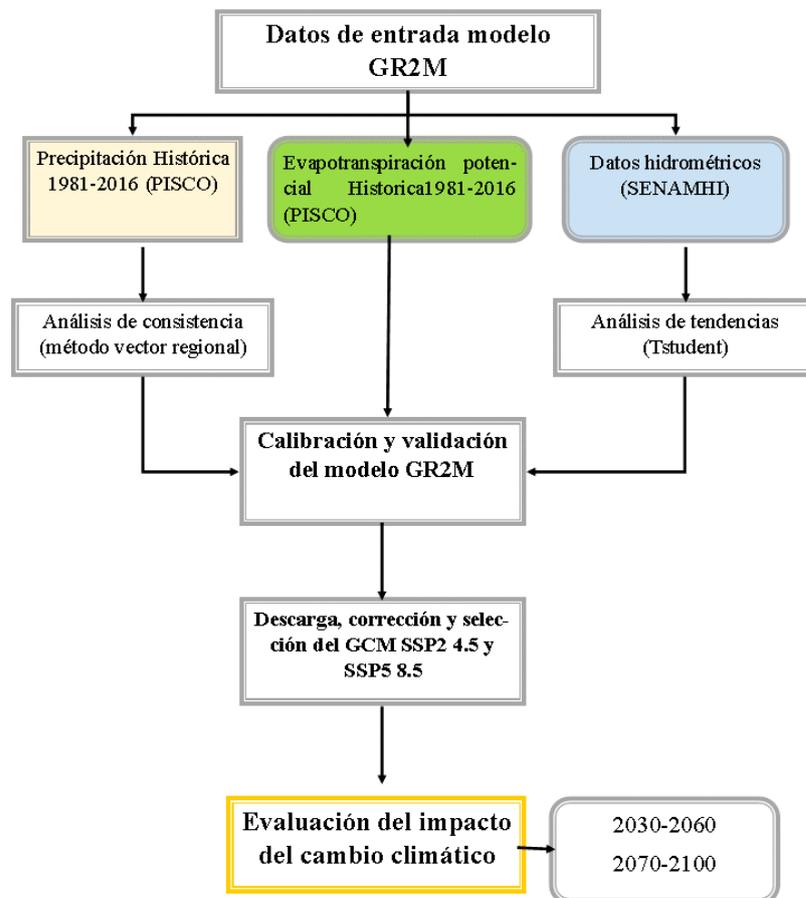
CENTRO DE MODELADO	MODELO	LANZAMIENTO	PAÍS
CSIROARCCSS	ACCESS-CM2	2019	Australia
CSIRO	ACCESS-ESM1-5	2016	Australia
AWI	AWI-CM-1-1-MR	2018	Alemania
BCC	BCC-CSM2-MR	2017	China
CCCMA	CanESM5-P1	2017	Canadá
CCCMA	CanESM5-p2	2019	Canadá
CanESM5-CanOE	CanESM5-CanOE-p2	2019	Canadá
NCAR	CESM2	2018	USA
NCAR	CESM2-WACCM	2018	USA
CMCC	CMCC-CM2-SR5	2016	Europa
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1-HR-f2	2017	USA
CNRM-CERFACS	CMRM-ESM2-1-f2	2017	USA
CNRM/CERFAC	CNRM-CM6-1-p1	2017	USA
Consortio EC-Earth	EC-Earth3-Veg	2019	Europa
CAS	FGOALS-f3-L	2017	China
CCAS	FGOALS-g3	2017	China
FIO-QLNM	FIO-ESM-2-0	2018	Oceanía
NOAA-GFDL	GFDL-ESM4	2018	USA
NASA-GISS	GISS-E2-1-G-p3	2019	USA
MOHC NERC	HadGEM3-GC31-LL-f3	2016	USA
INM	INM-CM4-8	2016	USA
INM	INM-CM5-0	2016	Rusia
IPSL	IPSL-CM6A-LR	2017	Francia
NIMS-KMA	KACE-1-0-G	2018	Corea
MIROC	MIROC6	2017	Japón
MIROC	MIROC-ES-2L-f2	2018	Japón
MPI-M DWD DKRZ	MPI-ES,1-2-HR	2017	Alemania
MPI-M AWI	MPI-ESM1-2-LR	2017	Alemania
MRI	MRI-ESM2-0	2017	Japón
NUIST	NESM3	2016	China
NCC	NorESM2-MM	2017	Noruega
MOHC, NERC, NIMS-KMA, NIWA	UKESM1-0-LL-f2	2018	Corea

*Nota:* Modelos climáticos globales seleccionados del CMIP6 propuestos por el IPCC.

Obtenido [https://climexp.knmi.nl/selectfield\\_cmip6.cgi?id=someone@somewhere](https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip6.cgi?id=someone@somewhere)

### 3.4. METODOLOGÍA

Para determinar la oferta hídrica en la cuenca del río Ilave bajo condiciones de cambio climático en los períodos 2030-2060 y 2070-2100, se aplicó la metodología descrita en la Figura 15. En primer lugar, se llevó a cabo la calibración y validación del modelo hidrológico GR2M. A continuación, se seleccionó el modelo de circulación global (GCM) adecuado mediante el análisis de estadísticas y se corrigió cualquier sesgo en los datos descargados del GCM. Luego, se procedió a realizar el modelado hidrológico de la cuenca utilizando el modelo GR2M, considerando las condiciones de cambio climático. Se evaluaron las variaciones en los caudales utilizando tanto los registros históricos como los resultados obtenidos para los períodos 2030-2060 y 2070-2100 bajo los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 propuestos por el IPCC.



**Figura 15.** Flujograma de la metodología

### 3.4.1. Calibración y validación del modelo hidrológico GR2M

#### a) Datos de entrada al modelo

- **Precipitación**

Esta investigación se basa en el uso de PISCOpm V.2.1 (Aybar et al., 2019), que es una versión grillada del producto PISCO. PISCO combina los datos de las estaciones pluviométricas de SENAMHI con la información satelital de precipitación del proyecto CHIRPS (Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data). Este producto abarca toda la región de Perú y ofrece datos mensuales de precipitación con una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ .

- **Evapotranspiración potencial**

En este estudio, se empleó el producto experimental PISCOpet V.1.0 a nivel mensual. Este producto se obtuvo aplicando el enfoque de Oudin (Oudin et al., 2005) a los datos de temperatura mínima y máxima del producto PISCOtemp V1.1 (Huerta et al., 2019) para estimar la evapotranspiración potencial. Los datos de evapotranspiración potencial de PISCOpet están disponibles para toda la región de Perú con una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ .

#### b) Análisis de consistencia de la información hidrometeorológica

- **Precipitación**

Se utilizó el Método de Vector Regional (MVR) para evaluar los datos del producto PISCO y su correcta aplicación. La hipótesis central se basa en la idea de que los valores pluviométricos totales anuales son

pseudoproporcionales para la misma zona climática sujeta al mismo régimen de precipitaciones, con alguna pequeña fluctuación aleatoria de un año a otro debido al reparto de las precipitaciones dentro de la región. Se compararon las desviaciones estándar de las desviaciones (DED) entre los índices de estación y el Vector Regional (VR).

Para cálculo del vector regional se obtuvo mediante el Software Hidraces, este programa facilita el desarrollo. Y además es ampliamente usado en las investigaciones.

- **Caudales**

Para el caso del caudal se utilizaron pruebas paramétricas con t-student (t) para el análisis de salto para ver si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de dos intervalos de tiempo (Chiew y Siriwardena, 2005).

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

En la fórmula dada, m y n corresponden al número total de observaciones en el primer y segundo período, respectivamente. La letra S representa la desviación estándar de la muestra, calculada utilizando todas las observaciones en los períodos m y n. Además,  $\bar{x} - \bar{y}$  representan las medias de los datos en el primer y segundo período, respectivamente..

Bajo el supuesto de que los datos se distribuyen normalmente, utilizamos la prueba paramétrica de regresión lineal para evaluar si hubo o

no una tendencia lineal en la relación entre el tiempo (x) y la variable dependiente (y).

La estimación del gradiente de regresión se llevó a cabo utilizando el siguiente método, según Chiew y Siriwardena (2005):

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

Y el intercepto es estimado por:  $a = \bar{y} - b\bar{x}$

La estadística de prueba S es:  $S = \frac{b}{\sigma}$

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

El estadístico S se basa en una versión de dos grados de libertad (n-2) de la distribución t de Student. bajo la hipótesis nula.

Debido a su capacidad para realizar análisis estadísticos que evalúen tendencias, cambios en los medios y la preservación de datos hidrológicos y de otras series temporales, se utilizó el software TREND para este fin.

### c) Calibración y validación

Para desarrollar el modelo de GR2M, primeramente, utilizaremos el período de calentamiento que comienza en el año hidrológico 1981, el período intermedio entre 1982 al 2003 para la etapa de calibración y los años 2004 a 2016 para la etapa de validación.

Debido a las disparidades que pueden desarrollarse al comienzo de un período de simulación debido a la selección de las circunstancias iniciales, la fase de calentamiento se usa comúnmente en la evaluación de los caudales

previstos (Mouelhi et al., 2006). Lo cual influirá en las mediciones de eficiencia.

Una vez finalizado el procedimiento de calibración, se utilizarán los años 2004-2016 para la fase de validación. Para evaluar la eficacia del modelo GR2M, esta fase consiste en mantener constantes los parámetros establecidos durante la calibración. El análisis gráfico y los indicadores de eficiencia estadística se utilizan para caracterizar el funcionamiento del modelo.

### **3.4.2. Corrección de sesgo y selección de los GCMs**

Para conocer el comportamiento de las variables meteorológicas, la oferta hídrica superficial que están asociadas al cambio climático. En este estudio se utilizaron los GCMs, estos son modelos grillados de la atmosfera, océano y la superficie terrestre y poseen una resolución de  $0.25 \times 0.25^\circ$ . Para lo cual se siguió los siguientes procedimientos:

#### **a) Descarga de GCM**

Los datos de precipitación y temperatura se adquirirán de la plataforma Copernicus Climate Change Service, disponible en <https://climate.copernicus.eu/>. Esta plataforma ofrece datos de proyecciones climáticas globales diarias y mensuales de diversos experimentos de la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados CMIP6.

#### **b) Reducción de escala espacial**

La reducción de escala estadística, también conocida como downscaling, es una estrategia adquirida para minimizar la escala espacial aproximada de los GCM. Con el enfoque de reducción de escala estadística, los datos de la cuadrícula GCM se refinan desde una escala espacial más



gruesa (25 km x 25 km) a una más fina, más adecuada para la representación en la ubicación de una estación meteorológica. Para lograr este objetivo, son necesarios dos pasos: (1) interpolación a la estación objetivo y (2) corrección de sesgo estadístico, que implica hacer coincidir las medias mensuales con los datos observados.

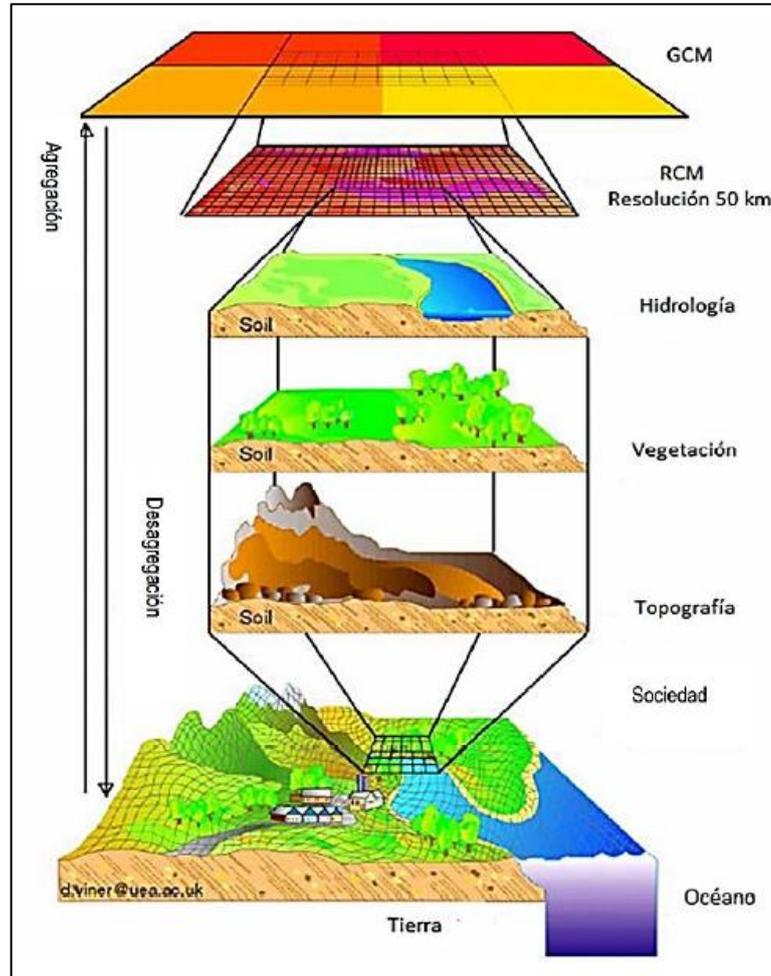
En este estudio, se empleó el método de corrección de sesgo mediante escalamiento lineal para realizar el proceso de downscaled estadístico. Para abordar este problema, se aplicó un factor de ajuste a la media, la varianza y/o los quintiles de la serie temporal del modelo, con el objetivo de acercarla a la variable observada y obtener una serie temporal corregida.

Este proceso se realizó utilizando el programa RS Studio con una serie de códigos proporcionado por Dr. Waldo Lavado. Este escalamiento se realizó para el periodo 1981-2016 para la precipitación, temperatura máxima y mínima para los 31 modelos climáticos globales.

Las salidas de las variables climáticas en los GCM presentan sesgos sistemáticos en su información espacial, lo cual no concuerda con la realidad de una cuenca hidrográfica, según señala Santos (2016). Para lo cual el escalamiento temporal o conocido también como corrección de sesgo, presenta una metodología que consiste en la comparación de las curvas de duración mensual a nivel diario en base al registro histórico de las estaciones meteorológicas y los resultados del proceso de escalamiento espacial, con los cuales se generan funciones de transferencia tanto para la variable de precipitación y temperatura. El propósito es lograr que la función de distribución acumulada de datos del GCM sea igual a la función de distribución acumulada observada (Piani *et al.*, 2010).

$$cdf_{obs}(f(x)) = cdf_{sim}(f(x))$$

Dónde:  $cdf_{obs}$ : Función de distribución acumulada observada,  
 $cdf_{sim}$ : Función de distribución acumulada simulada.



**Figura 16.** Reducción de escala adaptada a los modelos globales

*Nota:* Climate Research Unit (2000).

### c) Selección de GCM

Los GCMs se eligieron en función de su similitud con los datos históricos de PISCO en términos de variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura. Para este propósito se utilizaron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). De ellos, se seleccionó un modelo climático que mejor



coeficiente de determinación y error cuadrático tenga, además que represente mejor el clima de la cuenca llave.

### **3.4.3. Variabilidad de la oferta hídrica superficial en condiciones de cambio climático.**

Las proyecciones de la oferta hídrica superficial para los períodos 2030–2060 y 2070–2100 se basan en un conjunto de simulaciones que utilizan los datos ajustados de precipitación y evapotranspiración del GCM, como datos de entradas. Y se mantienen los parámetros de calibración para el periodo presente.

El modelo utiliza las variables de precipitación y ETP para modelar la escorrentía; sin embargo, debido a que no se cuenta con información de ETP medida en las estaciones, por lo que primero se determina la ETP por el método de Oudin *et al.*, (2005) para el periodo futuro.

#### **a) Determinación de la evapotranspiración para el periodo futuro**

Para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) y utilizarla en un modelo diario de lluvia-escorrentía, se aplicó el método propuesto por Oudin *et al.* (2005). Este enfoque ha sido ampliamente validado en 308 cuencas y ha demostrado ser superior a otros 27 modelos en términos de precisión en la estimación de la ETP.

Este método demuestra que las fórmulas basadas en la temperatura y la radiación tienden a proporcionar las mejores simulaciones de caudal para modelos lluvia-escorrentía (Oudin *et al.*, 2005). Este método ha dado como resultado una propuesta de modelo de ETP basado en la temperatura, que combina simplicidad y eficiencia, y se adapta a cuatro modelos lluvia-escorrentía. Este modelo de ETP solo requiere la temperatura media del aire

y conduce a una mejora leve pero constante en la eficiencia del modelo de lluvia-escorrentía.

**b) Estimación de la oferta hídrica para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5-8.5 para el periodo (2030-2060) y (2070-2100).**

Para estimar la oferta hídrica superficial bajo los escenarios SSP2 4.5 y SSP5-8.5 del IPCC, se empleó el modelo hidrológico GR2M, el cual fue previamente calibrado y validado. Utilizando datos de precipitación y evapotranspiración (derivada de la temperatura), se generaron caudales para el período futuro en estudio.

**c) Efecto del cambio climático en el régimen hidrológico de los caudales en la cuenca del río Ilave**

Para determinar las variaciones de los caudales del régimen hidrológico de la cuenca se realiza considerando el indicador  $\Delta Q_i$  propuesto por Cepeda, (2017) en su metodología empleada.

$$\Delta Q_1 = \frac{Q_{esci}}{Q_{hist}}$$

En donde  $\Delta Q$  es la variación en el caudal medio del mes  $i$ ,  $Q_{esci}$  es el caudal bajo el escenario futuro y  $Q_{histi}$ , es el caudal histórico del mismo mes.

Se analiza el régimen hidrológico mensual y anual de caudales para los escenarios climáticos futuros de SSP2 4.5 y SSP5-8.5 sugeridos por el IPCC, y finalmente se identificaron los meses con mayores y los meses con menores variaciones.



## CAPÍTULO IV

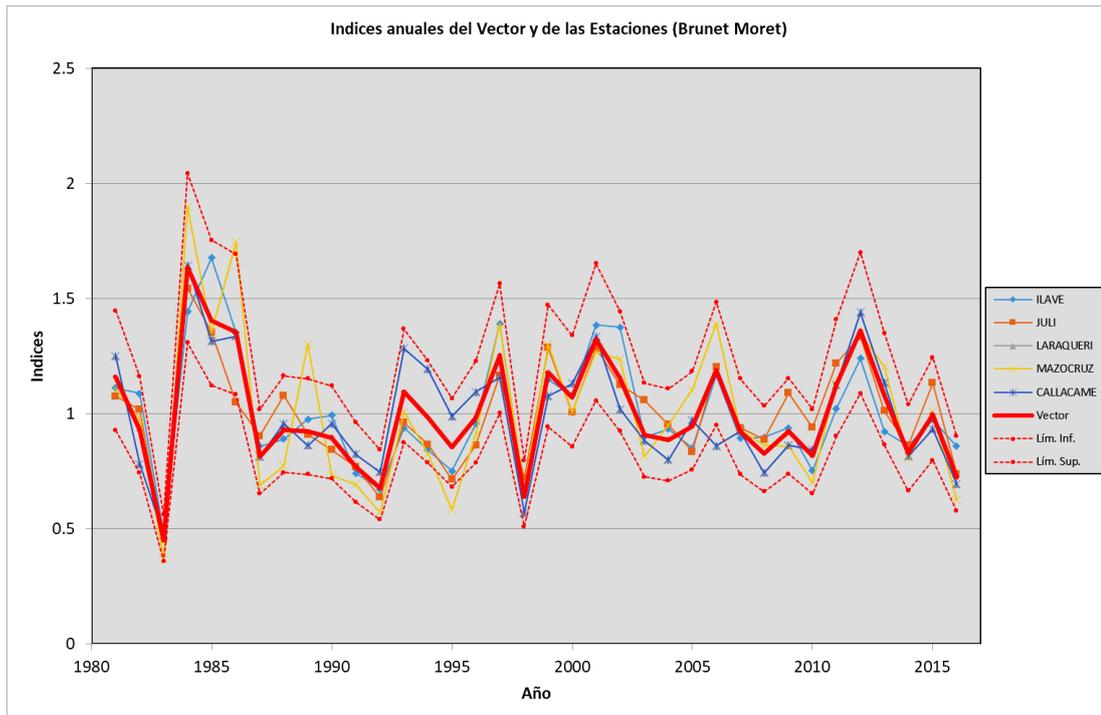
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

Antes de proceder con la calibración y validación del modelo, es fundamental garantizar la calidad de los datos de entrada y comprender los factores clave que afectan a la cuenca. Esto requiere realizar un estudio de consistencia y un análisis exploratorio de los datos para identificar las variables más relevantes. Estos pasos iniciales son fundamentales para asegurar la confiabilidad y precisión del proceso de calibración y validación del modelo.

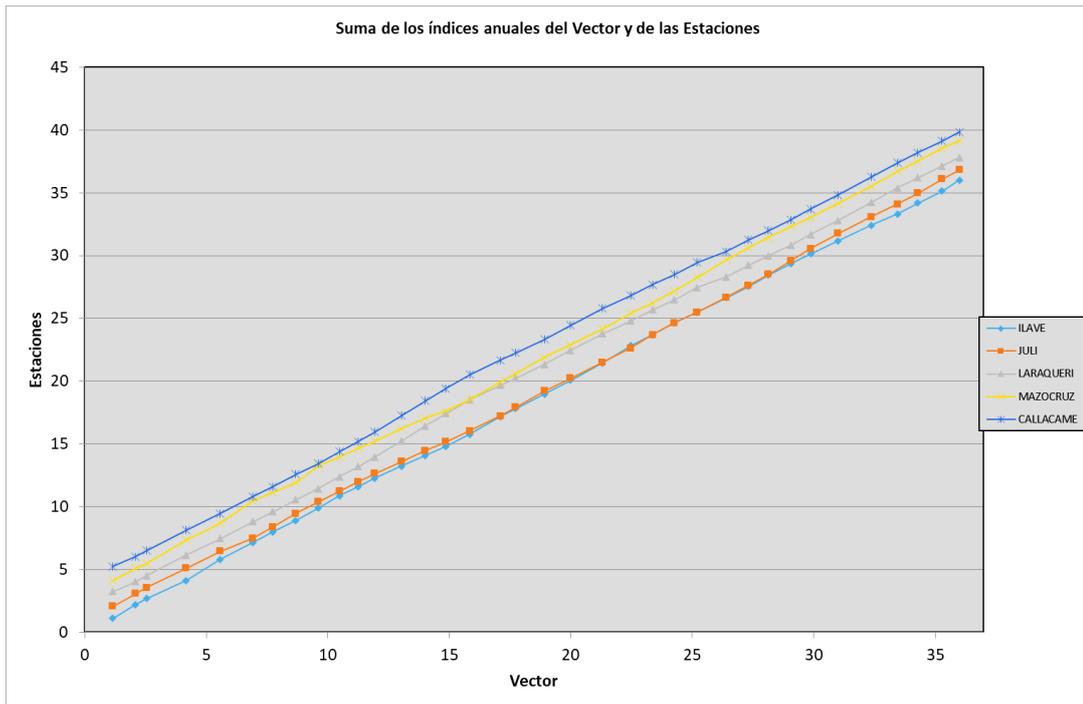
##### 4.1.1. Precipitación

Se llevó a cabo un análisis de consistencia y homogeneidad de los datos Pisco para garantizar su correcta aplicación y validación. Se utilizó el método del vector regional, siguiendo la metodología de Brunet Moret, para evaluar la coherencia y la homogeneidad de los datos. Este proceso aseguró la confiabilidad de los datos utilizados en el análisis y garantizó la precisión de los resultados obtenidos.



**Figura 17.** Índices anuales del vector regional y de las estaciones meteorológicas consideradas en la cuenca del río Ilave

La Figura 17 muestra que el vector regional y los índices estacionales exhiben una variabilidad similar y se encuentran mayormente dentro del intervalo de confianza del vector regional, lo cual indica la precisión de los datos. De manera similar, según se observa en la Figura 18, no se observan caídas significativas en los índices agregados de las estaciones consideradas, lo que sugiere una tendencia casi lineal en su comportamiento.



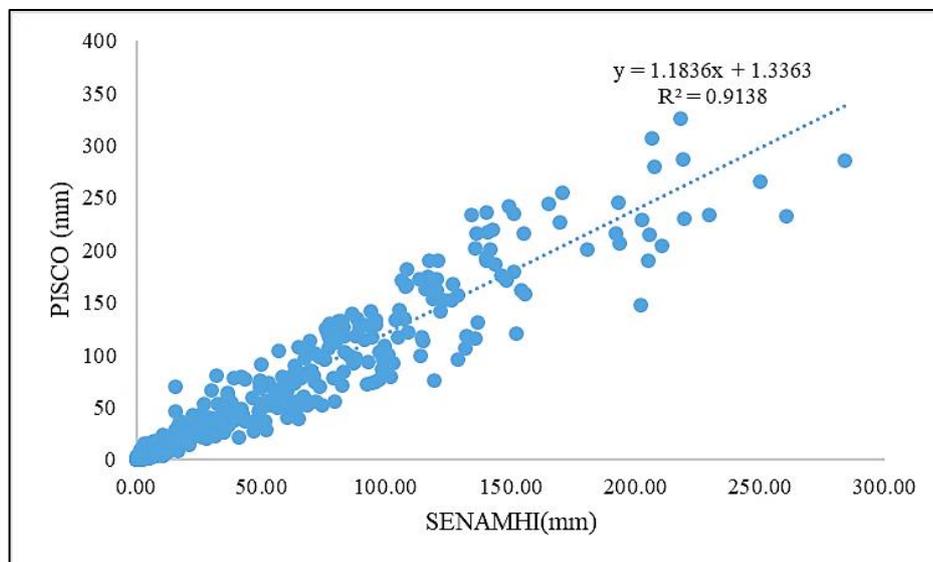
**Figura 18.** Suma de los índices del vector regional anual y de las estaciones

En relación a la evaluación de los datos, los resultados presentados en la Tabla 8 revelan una fuerte correspondencia entre las 5 estaciones, con índices de correlación entre el Vector Regional y las estaciones (Correl/Vector) en un rango de 0.904 a 0.92, y los índices de desviación estándar de las desviaciones (DED) por debajo de 0.144. Esto indica una alta proporcionalidad y consistencia entre los datos de las estaciones en relación al Vector Regional.

**Tabla 8.** Parámetros de análisis de homogeneidad de las estaciones

Id Estación	D.E.	Homogeneidad	Correl.
	Desvíos	B.M.	/Vector
Ilave	0.102	0.586	0.912
Juli	0.101	0.056	0.904
Laraqueri	0.099	0.034	0.917
Mazocruz	0.144	0.55	0.92
Callacame	0.099	0.034	0.917

Finalmente, los datos observados y los datos descargados de Pisco, presentan una buena dispersión y ajuste de datos, tal como lo demuestra el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9138$  lo que significa que existe un 91% de relación y ajuste entre ambos datos entre lo observado y lo simulado tal como se muestra en la figura 19.



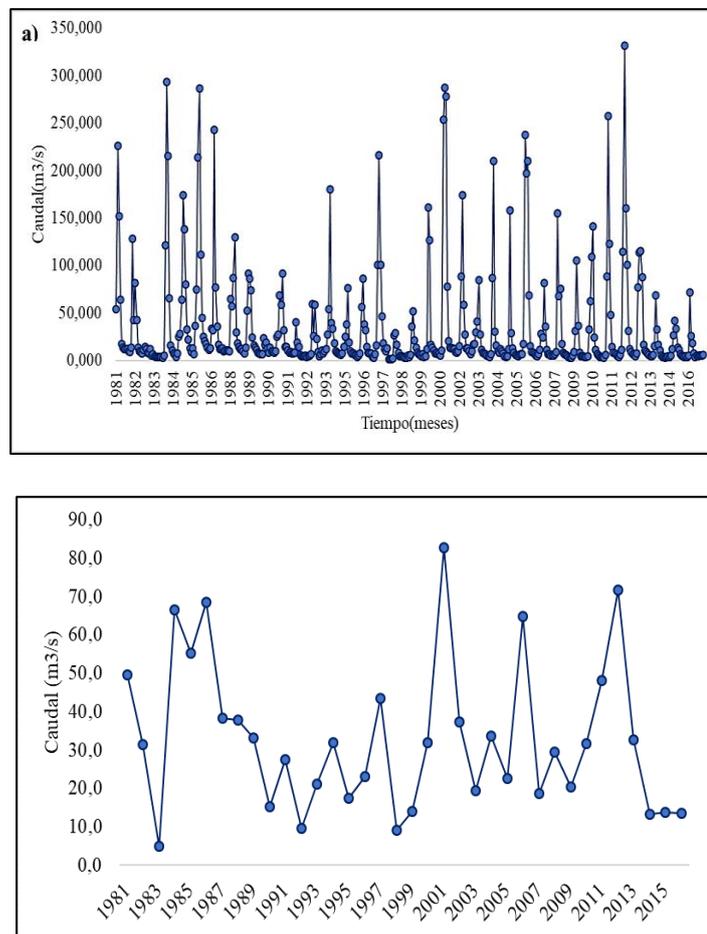
**Figura 19.** Correlación de precipitación entre los datos observados y datos PISCO

*Nota:* Correlación de los datos observados proporcionados por SENAMHI y datos descargados de Pisco.

#### 4.1.2. Caudal medio mensual

##### a) Análisis visual grafico

El patrón estacional, con períodos de avenidas y estiajes, se puede observar claramente en las series de tiempo del caudal medio mensual (Figura 20a) y caudal medio anual (Figura 20b) de la estación hidrométrica de Puente Ilave. No se observan cambios bruscos en los datos, lo que indica que son homogéneos y consistentes en el tiempo.



**Figura 20.** Series temporales del caudal para el periodo histórico 1981-2016

*Nota:* a) caudal medio mensual y b) caudal medio anual de la estación Puente Ilave.

## b) Análisis Estadístico

- **Análisis de saltos**

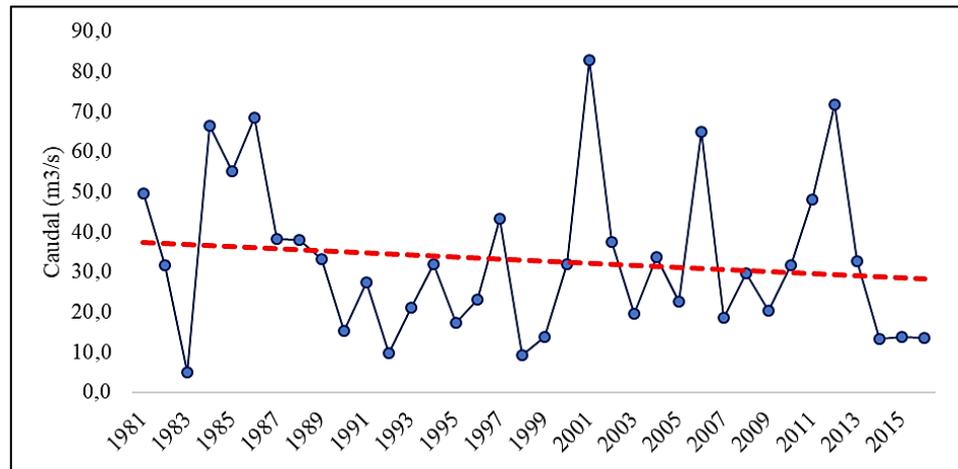
La tabla 9 muestra que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios del primer período 1981-1999 y los valores medios del segundo período 2000-2016, determinados por la prueba t'Student.

**Tabla 9.** Análisis estadístico de saltos del caudal medio anual y la estadística de t Student's

Estación	Estadístico t (Tc)	Valores críticos -Tt			Resultado Tc<Tt
		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Ilave	-0.158	1.796	2.201	3.106	NS

- **Análisis de Tendencias**

Según la Tabla 10, los valores de la estadística t para la tendencia son inferiores a los valores críticos determinados utilizando umbrales de significancia predefinidos (0.1, 0.05, 0.01). En la Figura 21, se observa una tendencia decreciente a lo largo del tiempo, pero esta tendencia no alcanza significancia estadística (NS). Por lo tanto, se puede concluir que los datos de caudal de la estación Puente Ilave no presentan una tendencia estadísticamente significativa.



**Figura 21.** Análisis de tendencias del caudal promedio anual

**Tabla 10.** Tendencia de los caudales anuales y la estadística de regresión lineal

Estación	Estadístico t(Tc)	Valores críticos - Tt			Resultado Tc<Tt
		a=0.1	a=0.05	a=0.01	
Ilave	-0.8	1.692	2.034	2.732	NS

#### 4.1.3. Calibración

Para la aplicación del modelo hidrológico GR2M se siguieron los pasos de calibración y validación del modelo, con el fin de utilizarlo con la información climática futura de los GCM. Para este fin Alcántara *et al.*, (2014), recomiendan dividir la serie histórica en tres partes, siendo que 2/3 de la serie forma parte del proceso de calibración y el 1/3 restante para el periodo de validación.

Los datos de entrada al modelo GR2M en la etapa de calibración se ingresaron el área total de la cuenca de 7832.53 km<sup>2</sup> la información 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 X1 y X2 del modelo, con el fin de maximizar el valor del coeficiente de Nash.

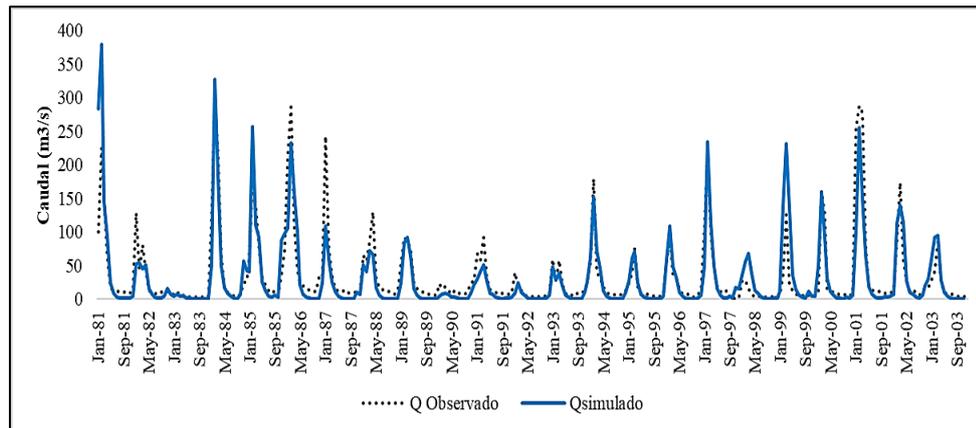
Para el caso de la cuenca del río Ilave los valores de los parámetros optimizados son de X1= 5.84 y X2= 0.71, que obtienen una eficiencia del 74.3% según el coeficiente de Nash, que correspondería a una eficiencia buena, como se indica en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Valores del modelo GR2M para la calibración

<b>Nombre de Cuenca</b>	Cuenca Ilave
<b>Área de Cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	7832.53
<b>Parámetros del Modelo</b>	<b>Transformado</b>
x1: Capacidad de producción almacenada (mm)	5.84
x2: Coeficiente de intercambio de agua (mm)	0.71
<b>Periodo</b>	
Duración del periodo de calentamiento (meses)	12
Duración del periodo de prueba (meses)	263
Fecha de inicio	01/1982
Fecha de fin	12/2003
<b>Criterio de eficiencia (%)</b>	
Nash (Q)	74.3
Nash (VQ)	70.6
Bias	87.7

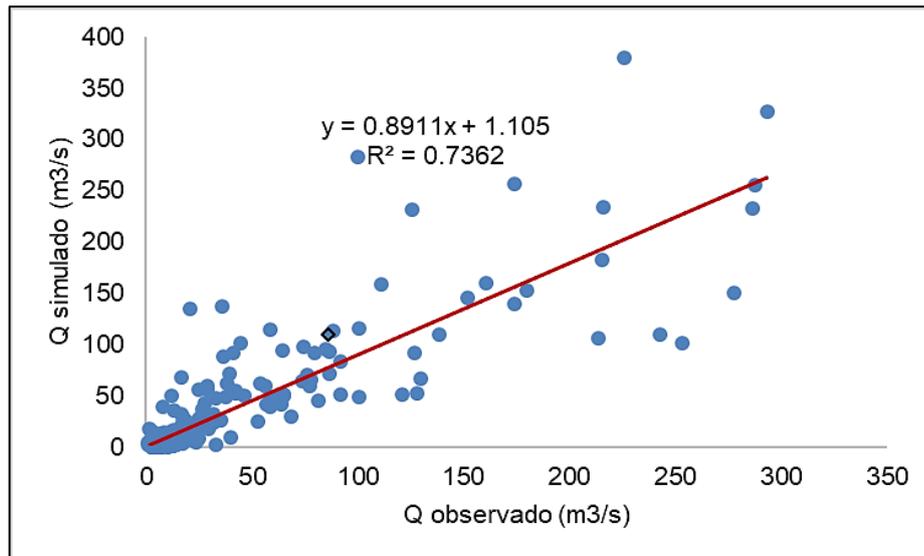
La Figura 22 ilustra la comparación entre la esorrentía observada y la esorrentía simulada por el modelo. La esorrentía simulada se obtiene a partir de

la precipitación y la evapotranspiración utilizando las ecuaciones del modelo y los parámetros óptimos. La precipitación que origina la escorrentía también se muestra en la figura. Se observa que, en general, la escorrentía simulada se aproxima a la escorrentía observada, aunque existen algunas discrepancias, especialmente en los valores máximos durante los períodos de avenida.



**Figura 22.** Caudal observado y simulado diarios para la etapa de calibración (1981-2003)

De manera similar, la Figura 23 muestra un excelente valor de  $r^2$  de 0.74 (coeficiente de determinación), lo que indica que el modelo modela con precisión la escorrentía y se correlaciona muy bien con la escorrentía medida durante el tiempo de calibración.



**Figura 23.** Línea de tendencia y coeficiente R2 para el periodo de calibración

La escorrentía simulada versus la escorrentía observada, presentan una buena dispersión y ajuste de datos, lo que indica que el modelo simula correctamente la escorrentía, así como el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.74$  indica que el modelo representa por lo menos un 74% la relación entre lo observado y lo simulado, valor similar al obtenido por (Zubieta et al., 2018).

#### 4.1.4. Validación

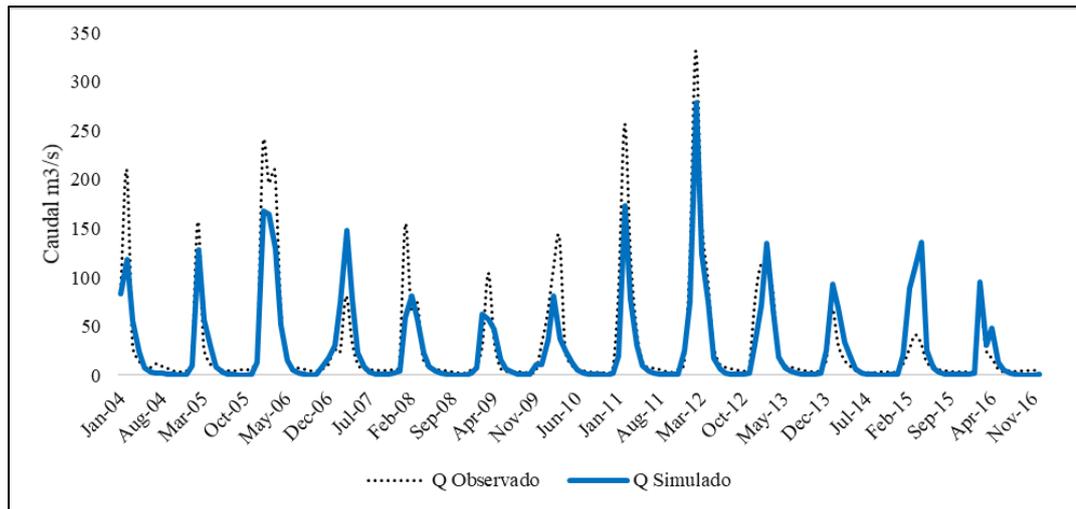
Para validar el modelo se usaron los mismos valores de los parámetros X1 y x2, determinados en el periodo de calibración del modelo, para 1/3 de la serie histórica posterior al periodo de calibración.

Para este proceso se consideró un periodo de 155 meses, iniciando en enero del 2004 y finalizando en diciembre de 2016; lo que produjo un coeficiente de Nash de 75.5%, que corresponde a una eficiencia buena, como se observa en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Parámetros para el periodo de validación del modelo

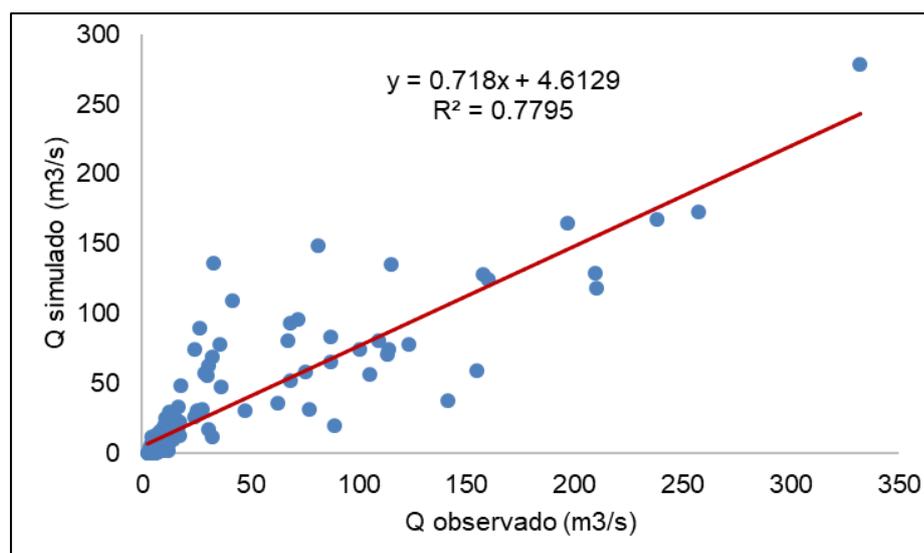
<b>Nombre de Cuenca</b>	<b>Cuenca llave</b>
Área de Cuenca (km <sup>2</sup> )	7832.53
<b>Parámetros del modelo</b>	Transformado
x1: Capacidad del reservorio de producción (mm)	5.84
x2: Parámetro de intercambio (mm)	0.71
<b>Periodo</b>	
Duración del período de puesta en marcha (calentamiento) (meses)	0 155
Duración del período de test (meses)	01/2004
Fecha de inicio de la simulación	12/2016
Fecha de fin	
<b>Criterio de eficiencia (%)</b>	
Nash (Q)	75.5
Nash(raiz(Q))	75.7
Balance	87.5

La Figura 24 muestra que, durante el periodo de validación, el modelo tiende a subestimar la escorrentía, especialmente en los meses de avenidas, donde se observan los valores máximos. Estos resultados indican que el modelo tiene dificultades para capturar adecuadamente los eventos de escorrentía intensa y puede requerir mejoras en su capacidad para simular dichas condiciones extremas.



**Figura 24.** Hidrograma precipitación – escorrentía del periodo de validación

El análisis de los datos de escorrentía en la estación Puente Rio Ilave durante el periodo de validación reveló una correlación significativa entre la escorrentía simulada por el modelo y la escorrentía observada. Con un coeficiente de determinación de 0.78, como se muestra en la Figura 25, se evidencia una sólida relación entre ambas variables. Estos resultados respaldan la capacidad del modelo para representar de manera precisa la dinámica de la escorrentía en la cuenca, lo que brinda confianza en su utilidad para futuros análisis y proyecciones.



**Figura 25.** Línea de tendencia y coeficiente R2 para el periodo de Validación

La adopción del modelo en la cuenca del río Ilave se está probando utilizando datos del sitio de estudio, y sus tiempos de calibración y validación se correlacionan o agrupan la mayor cantidad posible de esos datos.

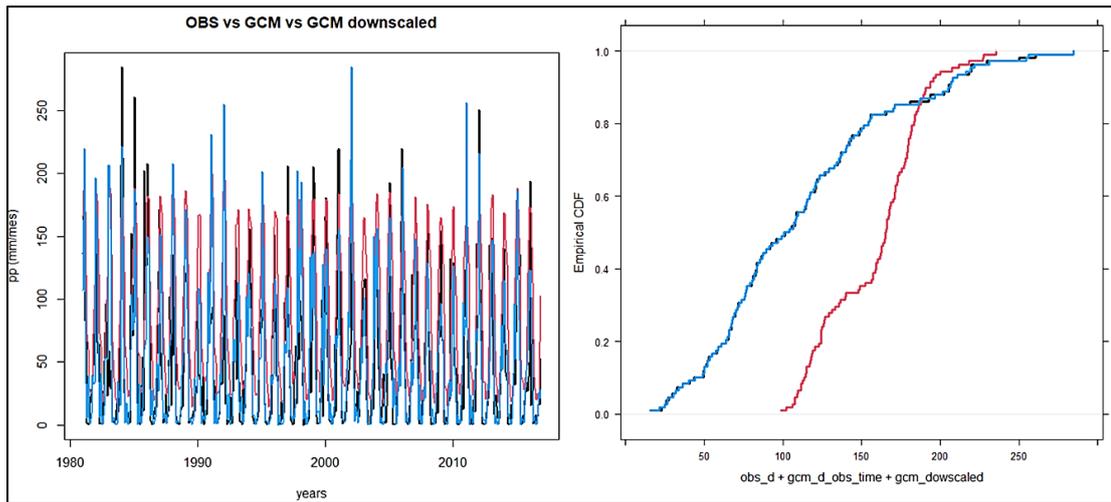
## **4.2. REDUCCIÓN DE ESCALA Y SELECCIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES.**

### **4.2.1. Reducción de escala o downscaling**

La reducción de escala estadística o downscaling estadístico, consistió en interpolar mediante el método Inversa a la Distancia (IDW) la información grillada del GCM para el periodo histórico de 1981-2016, luego de obtener la información puntual para la cuenca. Para tal se procedió a corregir el sesgo para la precipitación y temperatura, esto significa ajustar los estadísticos de la media de los datos del GCM a la media de los datos históricos.

Los valores medios del GCM corregidos de precipitación deberían parecerse a los valores medios mensuales del conjunto de datos observado, como lo señalan Teutschbein & Seibert (2012). Cuando los números de modelo están más en línea con los datos pasados reales, los factores de corrección de sesgo están más cerca de 1 (Lujano et al., 2016).

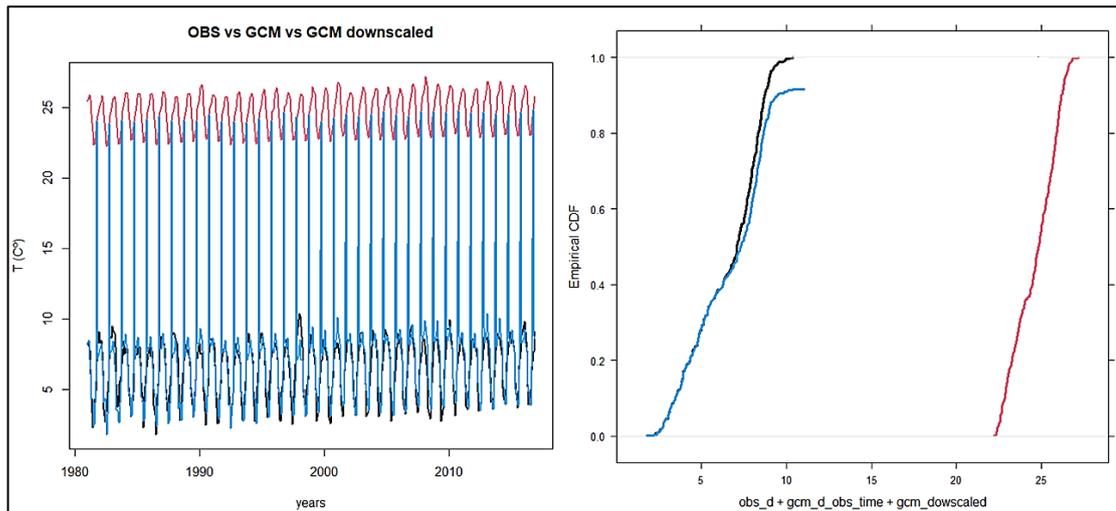
Las funciones de distribución acumulativa (cdf) de la precipitación de la estación Ilave para los 31 modelos climáticos globales se validan con los datos observados tal cuál se muestra en la Figura 26. Las correcciones para los períodos de tiempo 2030-2060 y 2070-2100 se basan en los mismos conjuntos de funciones. Gracias a esta corrección se disminuye los riesgos para que los datos no sean excesivo para los escenarios futuros de SSP2 4.5 y SSP5 8.5.



**Figura 26.** Ajuste probabilístico de los datos observados generados de precipitación mensual para los GCMs

La precipitación escalada por los 31 modelos climáticos globales evidencia la reducción estadística, donde se observa que los datos históricos y los datos de downscaling se ajusta correctamente.

De igual forma, para la temperatura para los 31 modelos climáticos globales se validan con los datos observados tal cuál se muestra en la Figura 27. Las correcciones para los períodos de tiempo 2030-2060 y 2070-2100 se basan en los mismos conjuntos de funciones. Gracias a esta corrección se disminuye los riesgos para que los datos no sean excesivo para los escenarios futuros de SSP2 4.5 y SSP5 8.5.



**Figura 27.** Ajuste probabilístico de los datos observados generados de temperatura promedio mensual para los GCMs

#### 4.2.2. Selección de modelo climático global

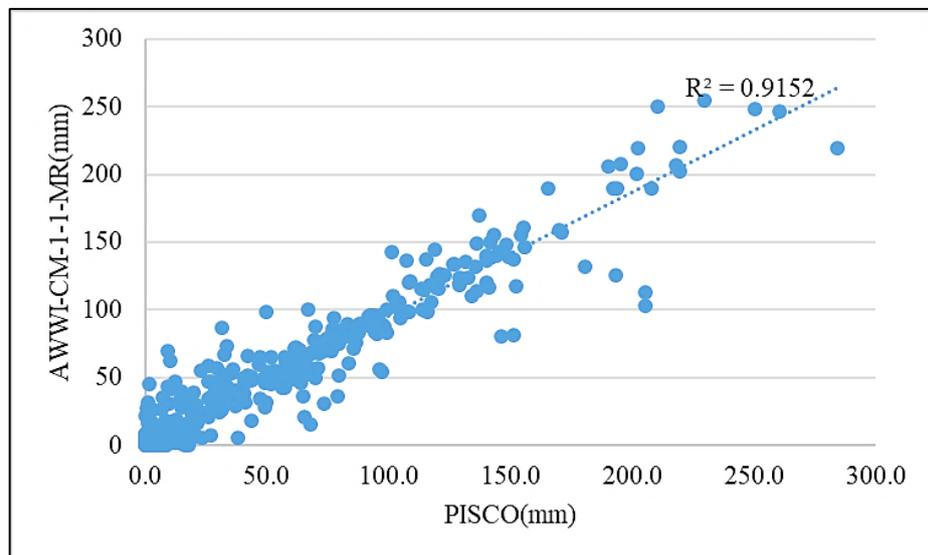
La selección de modelos de circulación general (GCM) es un paso crucial al estudiar el cambio climático y sus impactos regionales. Elegir el GCM que mejor refleje los factores de precipitación y temperatura en el período de control (histórico) solo a partir de un examen visual es una tarea desafiante, por lo que empleamos métodos estadísticos basados en el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), es un enfoque común utilizado para evaluar el desempeño de los modelos en la reproducción de las condiciones climáticas observadas. El análisis del coeficiente de determinación se utilizó para seleccionar un modelo climático global (GCM) que mejor se ajusten entre los treinta tres disponibles para nuestra cuenca del río Ilave. Se seleccionó el modelo que tengan un  $R^2$  más alto, lo que indica una mejor capacidad para reproducir las condiciones climáticas observadas. En la tabla 13 se detalla para todos los modelos tanto para precipitación y temperatura.

**Tabla 13.** Coeficiente de correlación ( $r^2$ ) entre la data histórica Pisco y los GCMs

N°	MODELO CLIMÁTICO GLOBAL (GCM)	PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA
		$R^2$	$R^2$
1	AWWI-CM-1-1-MR	0.915	0.965
2	MIROC-ES-2L-f2	0.904	0.963
3	BCC-CSM2-MR	0.892	0.94
4	MIROC6	0.881	0.938
5	MRI-ESM2-0	0.870	0.921
6	ACCESS-CM2	0.859	0.918
7	CNRM-CM6-1-p1	0.847	0.91
8	NESM3	0.836	0.88
9	NorESM2-MM	0.825	0.82
10	UKESM1-O-LL-f2	0.813	0.871
11	CESM2-WACCM	0.802	0.868
12	CMCC-CM2-SR5	0.791	0.865
13	GFDL-ESM4	0.779	0.861
14	CanESM5-P1	0.768	0.857
15	CanESM5- p2	0.757	0.84
16	HadGEM3-GC31-LL-f3	0.746	0.841
17	EC-Earth3-Veg	0.734	0.83
18	FGOAS-f3- L	0.723	0.82
19	MPI-ES1-2-HR	0.712	0.819
20	MPI-ESM1-2-LR	0.7	0.816
21	KACE-1-0-G	0.689	0.81
22	CNRM-CM6-1-HR -f2	0.678	0.80
23	CMRM-ESM2-1-f2	0.66	0.78
24	FGOALS-g3	0.655	0.769
25	CanESM.5-CanOE-p2	0.642	0.762
26	CNRM-CM6-1-p1	0.634	0.75
27	FIO-ESM-2-0	0.627	0.73
28	ACCESS-ESM1-5	0.61	0.70
29	CESM2	0.591	0.64
30	GISS-E2-1-G-p3	0.586	0.64
31	IPSL-CM6A-LR	0.583	0.639
32	INM-CM4-8	0.572	0.631
33	INM-CMS-0	0.57	0.62

La Tabla 13 muestra los 33 GCM del CMIP6, aquí se muestra quienes tienen mejores desempeños que los demás, según el coeficiente de determinación de  $r^2$  nos dice que a partir de 0.8 existe una relación fuerte. Para la variable de precipitación 11 modelos tienen mejores desempeños, para la variable de temperatura 15 modelos tienen mejor desempeño para nuestra cuenca. Es

importante señalar que las evaluaciones deben realizarse para cada GCM por separado; Además, es importante tener en cuenta que no podemos combinar todos los datos de GCM, que están mejor representados en cada estación, en un solo proceso de modelado. Por lo tanto, en esta tesis se optó por utilizar el modelo climático global AWWI-CM-1-1-MR, debido a su capacidad de representar y tener el mejor coeficiente de determinación ( $r^2$ ). En la figura 28 se aprecia la correlación entre los datos del modelo climático global AWWI-CM-1-1-MR y los datos históricos obtenidos de Pisco.



**Figura 28.** Coeficiente de determinación entre el GCM AWWI-CM-1-1-MR y los datos históricos Pisco

*Nota:* coeficiente de determinación entre el modelo y los datos históricos obtenidos de Pisco (1981-2016).

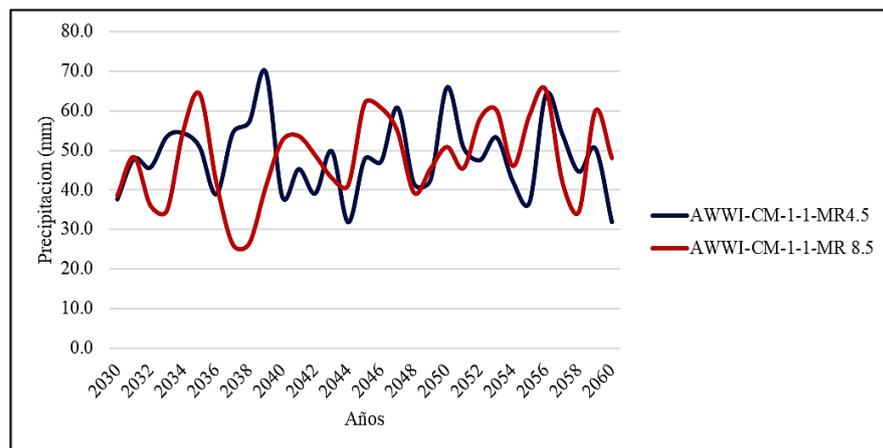
El modelo climático AWI-CM 1.1 MR, lanzado en 2018, incluye los siguientes componentes: atmos: ECHAM6.3.04p1 (T127L95 atmósfera nativa T127 rejilla gaussiana; 384 x 192 longitud/latitud; 95 niveles; nivel superior 80 km), tierra: JSBACH 3.20, ocean: FESOM 1.4 (cuadrícula no estructurada en el

horizontal con 830305 nodos húmedos; 46 niveles; celda de cuadrícula superior 0-5 m), seaIce: FESOM 1.4. El modelo fue ejecutado por el Instituto Alfred Wegener, Centro Helmholtz para la Investigación Polar y Marina, Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Alemania (AWI) en resoluciones nominales nativas: atmósfera: 100 km, tierra: 100 km, océano: 25 km, seaIce: 25 km (Semmler *et al.*, 2019).

#### 4.2.3. Comportamiento de la precipitación y temperatura en el futuro

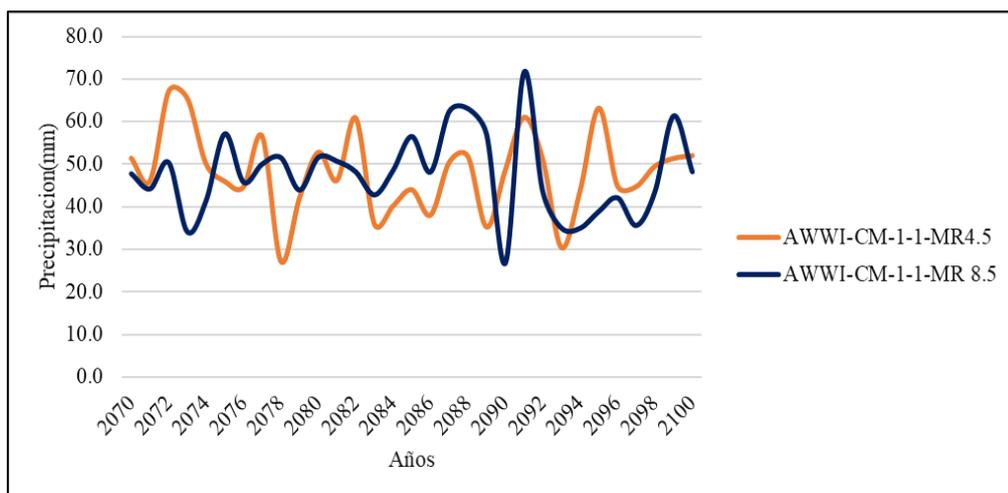
##### a) Precipitación

El comportamiento de la precipitación en condiciones de cambio climático, muestran una variación para los periodos del futuro cercano (2030-2060) en los escenarios de SSP2 4.5 y SSP5 8.5 tal como se muestra en la figura 29. Este comportamiento futuro de la precipitación depende de diversos factores, como las emisiones de gases de efecto invernadero, los escenarios de desarrollo socioeconómico, la variabilidad natural del clima y otros factores climáticos complejos.



**Figura 29.** Variación anual de precipitación para el futuro cercano 2030-2060 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5

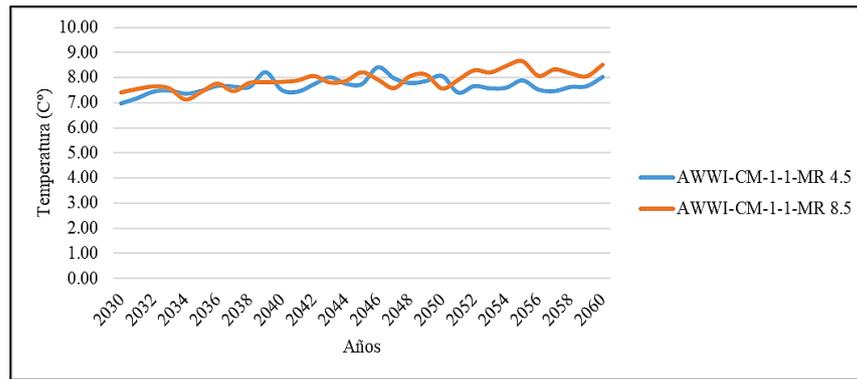
El comportamiento de la precipitación en condiciones de cambio climático, muestran una variación para los periodos del futuro lejano (2070-2100) en los escenarios de SSP2 4.5 y SSP5 8.5 tal como se muestra en la figura 30. Este comportamiento futuro de la precipitación depende de diversos factores, como las emisiones de gases de efecto invernadero, los escenarios de desarrollo socioeconómico, la variabilidad natural del clima y otros factores climáticos complejos.



**Figura 30.** Variación anual de precipitación para el 2070-2100 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5

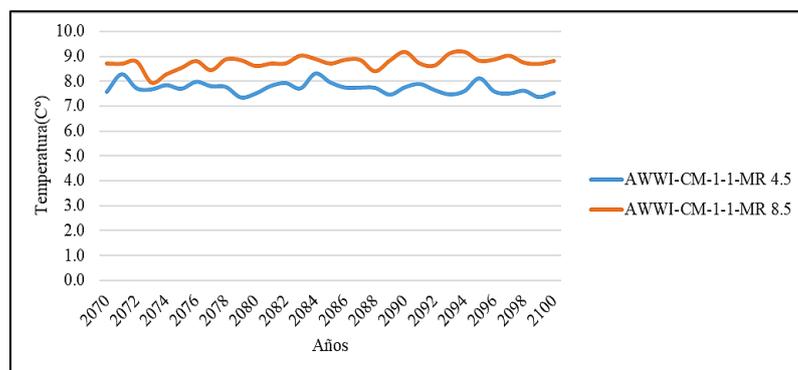
### b) Temperatura

El IPCC prevé un aumento de la temperatura media mundial de entre 2.6 y 4.8 grados centígrados si las emisiones de gases domésticos mejoran sin reducciones importantes (escenario de emisiones altas) C° para 2100, en comparación con el periodo histórico.



**Figura 31.** Variación anual de temperatura para 2070-2100 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5

En condiciones de cambio climático, se observa un aumento en la temperatura tanto para el periodo futuro cercano (2030-2060) como para el futuro lejano (2070-2100) en los escenarios de SSP2 4.5 y SSP5 8.5, como se ilustra en las figuras 31 y 32. Las proyecciones científicas indican que es altamente probable que la temperatura global aumente en el futuro debido al calentamiento global provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la velocidad y la magnitud del incremento de temperatura pueden variar según los diferentes escenarios de emisiones y otros factores.

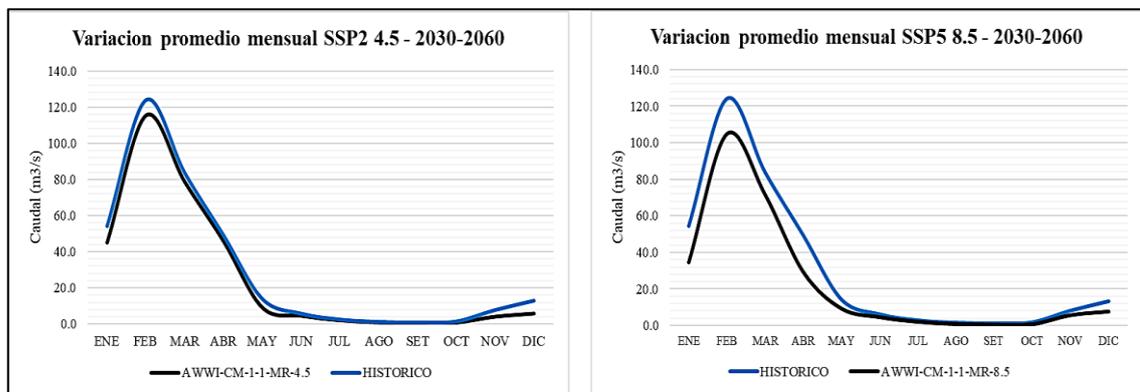


**Figura 32.** Variación anual de temperatura para 2070-2100 para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5

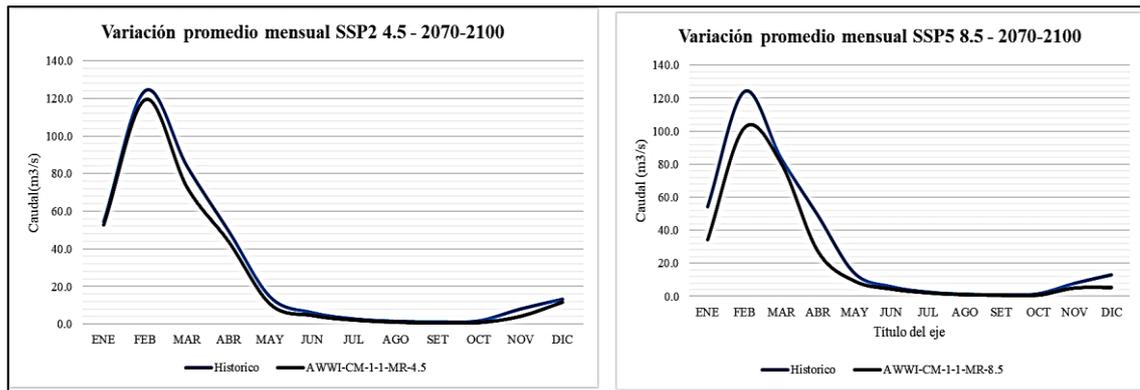
### 4.3. PROYECCIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

#### 4.3.1. Proyección de caudales bajo escenarios de cambio climático futuro ssp2 4.5 y ssp5 8.5.

En condiciones de cambio climático, se observa una reducción en la oferta hídrica para la cuenca llave en comparación con el periodo histórico. Las Figuras 33 y 34 ilustran los resultados de la simulación de caudales utilizando el modelo hidrológico GR2M, donde se evidencia el patrón característico de la cuenca con períodos húmedos y secos. Esta tendencia de disminución se observa en los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 para los periodos futuros de 2030-2060 y 2070-2100. Además, se observa que los caudales más altos registrados, ocurrirán desde febrero hasta el mes de marzo.



**Figura 33.** Caudal promedio mensual simulado para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 en el periodo 2030-2060



**Figura 34.** Caudal promedio mensual simulado para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5 en el periodo 2070-2100

#### 4.3.2. Efecto del cambio climático en la oferta hídrica en la cuenca del río Ilave

Para evaluar los posibles cambios en la oferta hídrica superficial en respuesta a los escenarios de cambio climático, se utilizó el índice de variación porcentual ( $\Delta$  %) de los caudales, tanto a nivel anual como mensual. Este índice se calculó comparando los caudales obtenidos para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5, tanto para el futuro cercano como el futuro lejano, con los caudales históricos. De esta manera, se pudo determinar la diferencia porcentual en los caudales en relación con las condiciones históricas.

##### a) Oferta hídrica promedio anual

La oferta hídrica promedio anual para la cuenca Ilave para los períodos de tiempo 2030-2060 y 2070-2100 en los escenarios de cambio climático de SSP2-4.5 y SSP5-8.5, muestran disminución tal como se muestra en la tabla 14. Donde para el futuro cercano (2030-2060) es de -9.1% para el escenario SSP2 4.5 y -24% para el escenario SSP5 8.5; para el futuro lejano (2070-2100), para el escenario SSP2 4.5 es -24% y para el escenario SSP5

8.5 es de -25.2%. Por lo tanto, los resultados anuales nos muestran una disminución en los caudales para los escenarios pesimista y optimista.

**Tabla 14.** Variación porcentual de la oferta hídrica promedio anual futuro para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5

Periodo	$\Delta$ % Promedio anual	$\Delta$ % Promedio
	SSP2 4.5	anual SSP5 8.5
Futuro cercano (2030 - 2060)	-9.1%	-24%
Futuro lejano (2070 - 2100)	-10.3%	-25.2%

Además, en el caso de la cuenca del río Ilave, se presentan en la Tabla 15 los caudales anuales ( $m^3/s$ ) representativos para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5, tanto para el periodo futuro cercano (2030-2060) como para el periodo futuro lejano (2070-2100).

**Tabla 15.** Caudal promedio anual futuro para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5

Periodo	Caudal promedio anual ( $m^3/s$ )	
	SSP2 4.5	SSP5 8.5
Futuro cercano (2030 - 2060)	27.2	22.8
Futuro lejano (2070 - 2100)	26.9	22.4

De los resultados anuales deducimos que, en el escenario SSP 4.5, se asume que se implementan políticas significativas de mitigación de emisiones y cambios en el uso de la tierra. Esto puede resultar en una disminución gradual de las emisiones y una reducción en el calentamiento global. En consecuencia, la variación del caudal del río Ilave puede verse afectada de manera menos drástica.

Por otro lado, en el escenario SSP 8.5 se espera que las emisiones de gases de efecto invernadero sigan aumentando sin medidas de mitigación significativas. Esto puede llevar a altas concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y un calentamiento global más pronunciado. Los cambios en los patrones de precipitación y eventos climáticos extremos pueden afectar al caudal del río Ilave de manera significativa.

#### **b) Oferta hídrica promedio mensual**

La variación promedio mensual brinda datos más específicos, demostrando que exhibe una variación negativa tanto en los próximos doce meses para el futuro cercano como en el futuro lejano.

Para el futuro cercano (2030-2060) del escenario SSP2 4.5 la menor variación es -4% en el mes de diciembre y la mayor variación es de -51.4% que se presentaría en los próximos meses de setiembre. Para el escenario SSP5 8.5, la menor variación es de -14.3% en los próximos meses de marzo y la mayor variación de -49.1%, esto se presentaría en los meses de octubre. Para el futuro lejano (2070-2100) del escenario SSP2 4.5 la menor variación es de -3.3% esta se presentaría en el mes de enero y la mayor variación de -60% que se presentaría en el mes de octubre. Para el escenario SSP5 8.5 muestran que en el mes de marzo presentarían una menor variación de -3.8% y en el mes de octubre presentaría mayor variación de -66.1%. En la Tabla 16 podemos ver los resultados.

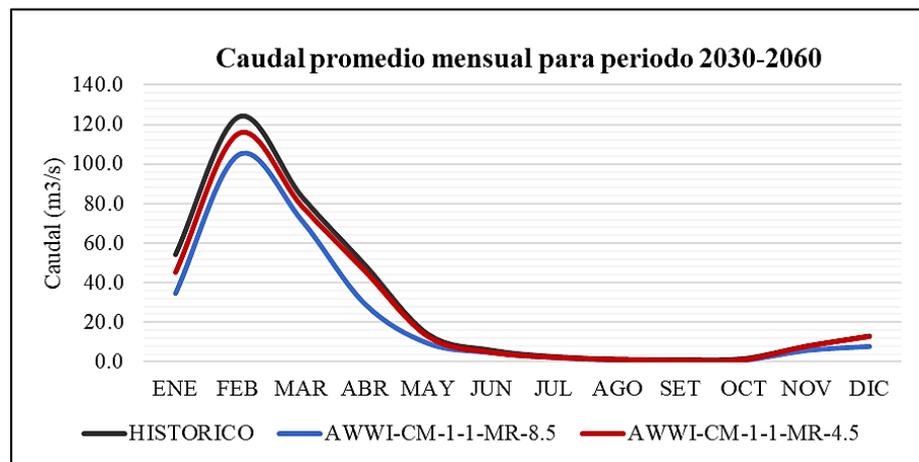
**Tabla 16.** Variación porcentual de caudal promedio mensual a futuro cercano (2030-2060) y futuro lejano (2070-2100)

Periodo	Escenario	Δ % Promedio mensual											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2030-2060	SSP2 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		17.2	7.1	6.1	6.9	10.4	23	23.2	32.1	51.4	46.7	4.6	4
2060	SSP5 8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		36.2	15.4	14.3	40.2	33.1	20.7	20.7	29.5	48.6	49.1	27.2	40.5
2070-2100	SSP2 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		3.3	3.8	13.3	11.4	26.8	26.1	27.5	37.1	57.3	60.0	49.4	12.4
2100	SSP5 8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		37.3	18.9	3.8	44.6	43.8	28.4	29.0	37.3	57.3	66.1	38.5	60.3

Con respecto a los caudales promedio mensuales para futuro cercano (2030-2060) y futuro lejano (2070-2100) en la estación hidrométrica de Puente llave se muestran en la Tabla 17. Para el futuro cercano (2030-2060) en el escenario SSP2 4.5 la menor variación es -0.5 m<sup>3</sup>/s y la mayor variación es de -9.4 m<sup>3</sup>/s; Para el escenario SSP5 8.5, la menor variación es de -0.4 m<sup>3</sup>/s y la mayor variación es de -19.8 m<sup>3</sup>/s. Para el futuro lejano (2070-2100) del escenario SSP2 4.5 la menor variación es de -0.5 m<sup>3</sup>/s y la mayor variación de -11.2 m<sup>3</sup>/s; mientras que para el escenario SSP5 8.5 muestran que la menor variación es de -0.5m<sup>3</sup>/s y la mayor variación es de -23.5m<sup>3</sup>/s. En la Tabla 17 podemos ver los resultados.

**Tabla 17.** Caudal promedio mensual histórico, futuro cercano (2030-2060) y futuro lejano (2070-2100)

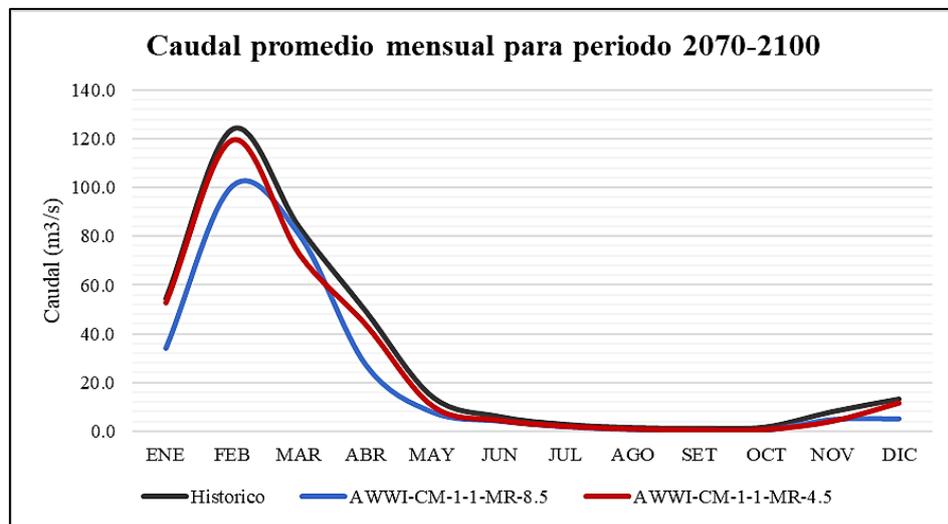
Periodo	Escenario	Caudal promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981-2016	Histórico	54.4	124.1	83.7	49.2	14.1	5.9	2.7	1.4	1.1	1.6	8	13.1
2030-2060	SSP2 4.5	45	115.3	78.6	45.8	12.6	4.6	2.1	0.9	0.5	0.9	7.6	12.6
	SSP5 8.5	34.7	104.9	71.7	29.4	9.4	4.7	2.1	1.0	0.6	0.8	5.8	7.8
2070-2100	SSP2 4.5	52.6	119.3	72.6	43.6	10.3	4.4	1.9	0.9	0.5	0.7	4.0	11.5
	SSP5 8.5	34.1	100.6	80.6	27.3	7.9	4.3	1.9	0.9	0.5	0.6	4.9	5.2



**Figura 35.** Hidrograma del caudal promedio mensual para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5, 2030-2060

La Figura 35 muestra el régimen hidrológico para la cuenca Ilave. Donde para el periodo futuro cercano (2030-2060), se observa que los meses de estiaje (mayo-noviembre) presentarían menor variación, para la época de avenida (diciembre-abril) presentarían mayor variación. En la figura se ve claramente que para escenario SSP5 8.5 presentarían mayores cambios. Esto se debe principalmente a las elevadas tasas de evapotranspiración provocadas por las altas temperatura.

Del mismo modo, en la Figura 36 se ilustra el patrón hidrológico para la cuenca Ilave. Para el periodo futuro cercano (2070-2100), se observa que hay una menor variación en la época de estiaje (mayo-noviembre), mientras que se espera una mayor variación durante la época de avenida (diciembre-abril). En la figura se aprecia claramente que en el escenario SSP5 8.5 se producirán cambios más significativos en comparación con el histórico. Estos cambios se deben principalmente a las altas temperaturas que resultan en tasas de evapotranspiración más elevadas.



**Figura 36.** Histogramas del caudal promedio mensual para los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5, 2070-2100.

Conforme al resultado, se puede ver que para el periodo 2030-2070 en los escenarios SSP2 4.5 y SSP5 8.5, estas claramente nos reportan disminución. De igual manera para el periodo 2070-2100. Por otro lado, para el escenario SSP5 8.5 se observa cambios muy significantes en los caudales medios mensuales, confirmando que las épocas de avenida son los que experimentarían mayores cambios.

#### 4.4. DISCUSIONES

La oferta hídrica es un aspecto crítico relacionado con el cambio climático, ya que afecta directamente la disponibilidad de agua dulce en diferentes regiones del mundo. El cambio climático provoca alteraciones en los patrones de precipitación, el derretimiento de los glaciares, el aumento del nivel del mar y la salinización de los acuíferos, lo que puede tener impactos significativos en la oferta de agua. Varios estudios internacionales como Illbay *et al.*, (2021) menciona que la temperatura aumentara en 2 °C, por lo que se espera cambios en el régimen hidrológico como déficit en la estación seca. De la misma manera Hadour *et al.* (2021) concluye que para el escenario RCP8.5 la precipitación disminuirá en un 38% hasta el 2039, 31% hasta el 2069 y al 2099 una disminución del 40%. Así mismo Pulido *et al.* (2021) menciona que para el escenario pesimista las precipitaciones disminuirán hasta 9.1mm. con respecto a investigaciones nacionales tenemos a Bruno (2023) menciona que en Sudamérica en los periodos 2050 una disminución del 13 % para verano y otoño y 88% para épocas de invierno y primavera.

Sabemos que la oferta hídrica disminuirá en muchos lugares a nivel mundial, en nuestra investigación realizada para la cuenca Ilave llega a los mismos resultados, donde, para el periodo 2030-2060 se presentaría una disminución de -29.1% para el escenario SSP2 4.5 y -24% para el escenario SSP5 8.5, mientras que para el periodo 2070-2100 se presentaría una disminución -10.3% para el escenario SSP2 4.5 y -25.2% para el escenario SSP5 8.5; y las épocas de avenidas serían las más afectadas que las épocas de estiajes. Esto es muy similar a los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas para la cuenca del rio Ilave, entre ellas mencionamos Laura (2019) concluye que la oferta hídrica anual disminuirá desde -3% hasta -24% para el futuro cercano y para el futuro lejano desde -8% hasta 58%. Por otro lado, Ticona (2016), quien concluye en su investigación los meses más afectados sería los meses de febrero y octubre. Así mismo, Lujano *et al.*,



(2016) adquirieron para el período 2070-2100, que en las cuencas de los ríos Ramis e Ilave, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5, pronostican variaciones de caudal de hasta -40% para los meses de crecidas y en época seca hasta un -80%. De la misma manera, Quispe et al., (2022) los resultados de esta investigación pronostican una disminución de agua en un -41.2% a un -40% para las temporadas de lluvia y para la temporada seca una disminución de -33.8% a -0.1% para la cuenca Ilave.

En base a lo anterior, se puede concluir que se nos presenta un futuro con disminución de la oferta hídrica de la cuenca del Ilave, tal como lo pronostican estudios previos evaluados (Laura 2019; Ticona, 2016; Lujano *et al.*, 2016) y la investigación de Quispe *et al.*, 2022. Así mismo, Zubieta et al., (2021) muestra resultados que indican un aumento en la severidad de la sequía en la mayor parte de la región del Altiplano. El impacto de las sequías es más evidente entre septiembre y noviembre. También se proyecta un aumento significativo en la frecuencia de sequías agrícolas e hidrológicas de corta duración (duración de 1 a 2 meses).

Dado que el futuro es desconocido y los GCM son probabilísticos, es imposible decir con precisión cuánto influencia habrá. Sin embargo, se necesita más estudio, ya sea con otros modelos climáticos o modelos hidrológicos que incluyan elementos además del cambio climático, como la alteración del uso del suelo. En ese sentido, la presente investigación contribuye a ver un panorama futuro sobre el régimen hidrológico de los caudales del río Ilave, que ayudará a las autoridades, instituciones y demás interesados en la gestión de los recursos hídricos tomen en cuenta los efectos del cambio climático futuro en los planes de desarrollo para la cuenca Ilave.

## V. CONCLUSIONES

La simulación de la oferta hídrica superficial en la cuenca Ilave bajo los escenarios de cambio climático SSP2 4.5 (pesimista) y SSP5 8.5 (optimista), utilizando el modelo climático global AWWI-CM-1-1-MR, revela una reducción significativa tanto en el futuro cercano (2030-2060) como en el futuro lejano (2070-2100). Estos resultados indican una disminución en la oferta hídrica en la cuenca Ilave en los escenarios considerados:

- Se encontró que el modelo hidrológico GR2M tiene capacidad suficiente para replicar la cuenca tanto para avenidas como para eventos de estiaje con valores de Nash-Sutcliffe de 74.3% y 75.5%, respectivamente, alcanzados durante las fases de calibración y validación de su uso.
- Se realizó la selección de los 33 GCM el que tenga mejor coeficiente de determinación; El modelo climático global AWWI-CM-1-1-MR se desempeñó mejor en el modelado hidrológico, representando con éxito la distribución y la estacionalidad de la precipitación y la temperatura para el período (1981 - 2016) con un coeficiente de determinación de  $r^2=0.915$  para precipitación y  $r^2=0.965$  para temperatura. Por lo mismo se trabajó para la simulación de la oferta hídrica futura.
- Las proyecciones indican una posible disminución anual de entre el -9.1% (2030-2060) y el -10.3% (2070-2100) para el escenario SSP2 4.5, y una disminución de entre el -24.0% (2030-2060) y el -25.2% (2070-2100) para el escenario SSP5 8.5 en la oferta hídrica superficial de la cuenca Ilave. Estas variaciones son más pronunciadas durante los meses de septiembre y octubre. Además, los hidrogramas mensuales muestran que los caudales más altos, ocurrirán desde febrero y podrían desplazarse hacia marzo en el contexto del cambio climático.



## VI. RECOMENDACIONES

- Para estudios similares futuros, se recomienda probar nuevos métodos para la reducción de escala espacial, debido a que el uso de diferentes métodos de escalamiento espacial podría reducir la incertidumbre de los resultados de los Modelos Climáticos Globales.
- Se recomienda evaluar los impactos del cambio climático en el régimen hidrológico de la cuenca a través de la implementación de un enfoque distribuido que tome en consideración el uso del suelo. Se ha observado en otros estudios que las variaciones significativas en los caudales de una cuenca pueden no ser exclusivamente atribuibles al cambio climático, sino también a cambios en el uso del suelo dentro de la misma cuenca. Por lo tanto, es importante analizar ambos factores para comprender de manera integral los efectos en el régimen hidrológico y tomar decisiones informadas sobre la gestión de los recursos hídricos.
- Se debe proponer la implementación de un plan de manejo y gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Ilave, con el objetivo de garantizar una gestión adecuada y sostenible de los recursos hídricos, considerando los desafíos futuros derivados del cambio climático. El plan tiene como finalidad prevenir y mitigar los posibles impactos negativos del cambio climático, asegurando la disponibilidad suficiente y oportuna del agua en la cuenca.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System. Systeme Hydrologique Europeen, "SHE". *History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. Journal of Hydrology*. 87 (1-2) 45-59.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (2006). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. FAO, Rome.
- Allani, M., Mezzi, R., Zouabi, A., Béji, R., Joumade-Mansouri, 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.
- Alcántara, A., Montalvo, N., Mejía, A., y Ingol, E. (2014). Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jequetepeque. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 17(33), 7–17.
- Andrades, M., y Muñes, C. (2012). Fundamentos de climatología. *In Agricultura y alimentacion* (Vol. 12).
- Aparicio, F. (1996). Fundamentos de hidrología de superficie. México: *Editorial Limusa*.
- Arsenault, R., Brissette, F., & Martel, J. L. (2018). The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*, 566, 346–362.
- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E. y Felipe-Obando, 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.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770-785.
- Autoridad Nacional del Agua. (2009). Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Ilave: Estudio Hidrológico.
- Balairon, L. (2009). Gestión de Recursos Hídricos (reimpresa; *Ediciones UPC*, Ed.). Barcelona.
- Belisario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 17(1), 47-52.
- Bruno, J. E. (2023). Análisis de fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos CMIP6 para las proyecciones climáticas de temperatura y precipitación en Sudamérica.
- Buytaert, W., & Bievre, B. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8), 13.
- Cabrera, J. (2017). Modelos hidrológicos: Modelamiento hidrológico. *Retrieved from*.
- Castillo, A. (2018). Estudio de aprovechamiento hídrico para riego en la cuenca del río Lampa - Puno. [*Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano*].
- 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.



- Cifuentes, M. 2010. ABC del cambio climático en Mesoamérica. Informe Técnico N°383. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 71 pp.
- Cieza, L. G., y Mejía, J. A. (2019). Comparación de tres métodos en el análisis de sequías hidrometeorológicas en la cuenca del Río Ilave Puno–Perú. *Revista INGENIERÍA UC*, 26(1), 14-22.
- Cotler, H. (2010). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México*.
- Coulibaly, N., Coulibaly, T., Mpakama, Z., & Savané, I. (2018). The Impact of Climate Change on Water Resource Availability in a Trans-Boundary Basin in West Africa: *The Case of Sassandra. Hydrology*, 5, 12.
- Chávez, E.I., Bazán, C.Y. (2022). Comportamiento de la escorrentía según proyecciones climáticas en la intercuenca alto Huallaga 2020 – 2059. [Tesis pregrado, Universidad Nacional del Callao].
- Chiew, F., & Siriwardena, L. (2005). Trend/change detection software. User guide.
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada (13°; McGraw-Hill, Ed.). Santafé de Bogotá.
- Del Águila, S. (2021). Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la sierra central del Perú. [Tesis doctorado, Universidad Nacional Agraria la Molina]
- Deepthi, B., & Sivakumar, B. (2023). Shortest path length for evaluating general circulation models for rainfall simulation. *Climate Dynamics*, 1-20.
- Devi, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1001–1007.



- Durack, P.J. (2020). CMIP6\_CVs. v6.2.53.5. Disponible en: [https://github.com/WCRP-CMIP/CMIP6\\_CVs](https://github.com/WCRP-CMIP/CMIP6_CVs)
- Estrella, T. (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos (en línea). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España, s.e. 56 p.
- 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.
- Fatichi, S., Vivoni, E., Ogden, F., Ivanov, V., Mirus, B., Gochis, D., Downer, C.W., Camporese, M., Davison, J., Ebel, B., Jones, N., Kim, J., Mascaro, G., Niswonger, R., Restrepo, P., Rigon, R., Shen, C., Sulis, M. & Tarboton, D. (2016). An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. *Journal of Hydrology* 537:45-60.
- Fattorelli, S., y Fernández, P. C. (2011). Diseño Hidrológico (Segunda ed). *España: Biblioteca virtual WASA-GN*.
- Fathi, M. M., Awadallah, A. G., & Aldahshoory, W. (2023). An Improved Monthly Water Balance GR2M Model with a Seasonally Variable Parameter. *Journal of Hydrology*, 129127.
- Felipe, O., Sánchez, T., y Astorayme, M. (2015). Actualización de los escenarios de disponibilidad hídrica en el Perú en contexto de cambio climático
- Feyen, L., Vásquez, R., Christiaens, O., & Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology & Earth System Sciences*, 4(1), 47–6, 17.



- Fiseha, B., Melesse, A., Romano, M., Volpi, E. & Fiori, A. (2012). Statistical Downscaling of Precipitation and Temperature for the Upper Tiber Basin in Central Italy. *International Journal of Water Sciences*; Rijeka Tomo 1.
- Fonkén, M. S. (2015). An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes. *Mires and Peat*, 15.
- Fornace, L., Huguen, A., Shanahan, M., Fritz, C., Baker, A. & Sylva, P. (2014). A60,000-year record of hydrologic variability in the Central Andes from the hydrogen isotopic composition of leaf waxes in Lake Titicaca sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 408(1), 263-271.
- García, F. 2016. ¿Qué es el IPCC? Recuperado de: <http://revistatiempodepaz.org/wp-content/uploads/2019/12/TP-120-%C2%BFY-despu%C3%A9s-de-la-cumbre-de-Par%C3%ADs.pdf#page=10>
- Gorguner, M., Kavvas, M. L., & Ishida, K. (2019). Assessing the impacts of future climate change on the hydroclimatology of the Gediz Basin in Turkey by using dynamically downscaled CMIP5 projections. *Science of the Total Environment*, 648, 481–499.
- Gupta, HV, Sorooshian, S. y Yapo, PO (1999). Estado de la calibración automática para modelos hidrológicos: Comparación con la calibración experta multinivel. *Revista de ingeniería hidrológica*, 4 (2), 135-143.
- Gutiérrez, R. (2015). Eficiencia de la fertilización nitrogenada en el cultivo de papa *solanum tuberosum* cv Yungay en Colpar, distrito de Quilcas-Huancayo. [Tesis de Grado Universidad Nacional del Centro del Perú].



- Guevara, E. (2015). Métodos para el análisis de variables hidrológicas y ambientales. Ministerio de Agricultura y Riego -MINAGRI- Autoridad Nacional del Agua – ANA- Lima, Perú.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2020) Sixth Assessment Report. Available at: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2022). Climate Change. Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for Policymakers. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 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.
- Hernández, Y. (2020). Cambio climático: causas y consecuencias. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 4(1), 38-53.
- Huerta, A., Aybar, C., & Lavado, W. (2019). Piscot: A daily and monthly gridded air temperature dataset for peru. Technical report, SENAMHI.
- Ilbay, 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, 3138.
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature communications*, 11(1), 3044.



- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97.
- Laqui, W., Ocola, J y Laqui, Y. (2022). Comparación de modelos hidrológicos de diferente estructura y complejidad en la región hidrográfica del Titicaca, cuenca del río Huancané. *Revista de Investigación científica de ingenierías*. <http://doi.org/10.47190/nric.v4i1.7>
- Lavado, W., Labat, D., Guyot, J.-L., Ronchail, J. & Ordoñez, J.J. (2009). TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon- Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model. *IAHS-AISH* 245-252.
- Lavado, W. (2020). Estudios Hidrológicos del SENAMHI: Resúmenes Ejecutivos -2020. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Lavado, W. (2015). Generación de una base de datos de caudales grillado y de alta resolución a nivel nacional (1984-2014). SENAMHI.
- Lavado, W., Traverso, K. A., y Gutiérrez, L. (2021). Atlas de hidrología superficial del Perú: una evaluación presente y futura.
- Lavado, W., Calle, J., Ticona, L., y Blacutt, L. (2018). Clima y eventos extremos del Altiplano Perú-boliviano.
- Laura, J. W. (2019). Efecto del cambio climático en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Ilave-Puno. [*Tesis Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano – Puno*].
- León, R. F., Portuguez, D. M., y 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.



- Linares, F. (2020). Efectos del cambio climático en el régimen hidrológico de los caudales de la cuenca del río Lampa. [*Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano –Puno*].
- Lima, N., Escobar, M., Wickel, A. J., von Kaenel, M., & Purkey, D. (2021). Untangling the effects of climate variability and irrigation management on water levels in Lakes Titicaca and Poopó. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100927.
- López, F. (1998). Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión. *Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España: TRAGSA, TRAGSATEC y Mundi-Prensa*.
- Lozano, A., Álvarez, C. E., & Moggiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108.
- Lujano, E., Hidalgo, L. S., Tapia, B., y 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 de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 18(2), 195–204.
- Lujano, E., Felipe, O., Lujano, A., y Quispe, J. (2015). Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú. *Rev. Investig. Altoandina*; vol 17(2):221-228.
- Luna, E., y Lavado, W. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque. *Revista Tecnológica ESPOL*, 28, 42–52.



- Llauca, H., Lavado, W., Montesinos, C., Santini, W. y Rau, P. (2021). PISCO\_HyM\_GR2M: Un modelo de balance hídrico mensual en Perú (1981-2020). *Agua*, 13, 1048.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, 13(3), 1318.
- Mejía, A. (2017). Probabilidad y Estadística en Hidrología. Lima, Perú: *Fondo Editorial UNALM*. 194 pp.
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L., Lamarque, J. & Vuuren, D. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213–241.
- Mendoza, M., Bocco, G., Siebe, C., y Ortiz, M. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas.
- Ministerio del Ambiente. (2013). El Perú y el Cambio Climático, Tercera Comunicación Nacional. Lima.
- Mishra, S.K. & Singh, P.V. (2004). Long-term hydrological simulation based on the soil conservation service curve number. *Hydrological Processes*, 18(7):1291–1313.
- Montealegre, J. E., y Pabón, J. D. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo el niño-la niña–oscilación del sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7–21.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 200–214.



- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Neyra, C., Ugas, M., & Zegarra, J. (2009). Informe final presupuesto evaluado: INDECI. Lima.
- Olivera, E. B. (2019). Impact of climate change on the performance of cañihua production (*Chenopodium pallidicaule*) in the Puno Region. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(2), 100-110.
- Organización Meteorológica Mundial (2023). El informe anual de la OMM pone de relieve el avance continuo del cambio climático. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-informe-anual-de-la-omm-pone-de-relieve-el-avance-continuo-del-cambio>
- 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.
- Ouhamdouch, S., Bahir, M., Carreira, P. M., & Zouari, K. (2018). Climate change impact on future flows in semi-arid environment, case of Essaouira Basin (Morocco). *In Conference of the Arabian Journal of Geosciences* (pp. 305-308). Springer, Cham.
- Padrón, R. S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne, A., Lawrence, D. M., Mao, J., ... & Seneviratne, S. I. (2020). Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nature Geoscience*, 13(7), 477-481.



- Pereira, D., Martínez, M., da Silva, D., & Pruski, F. (2016). Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 5:149-163.
- Pilares, I. (2018). Disponibilidades hídricas reguladas del reservorio Lagunillas y río verde para usos múltiples en la cuenca del río Cabanillas. [Tesis doctoral. Universidad Nacional Agraria La Molina – Lima].
- Pilares, I., Mejía, A., Guevara, E., Fano, G., & Alfaro, R. (2018). Evaluation of water availability in the Cabanillas river basin of the Peruvian Altiplano under regionalized climatic scenarios. *Ingeniería UC*, 25(2), 307–319.
- Piani, C., Haerter, J. O., & Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1–2), 187–192.
- Quispe, K., Huanca, C., Fernández, H., & Lujano, E. (2022). Water availability in the Ilave basin, Puno, Peru: SWAT hydrological model. In *Software Engineering Perspectives in Systems: Proceedings of 11th Computer Science On-line Conference 2022*, Vol. 1 (pp. 469-483).
- Refsgaard, J. C., & Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water resources research*, 32(7), 2189-2202.
- Rau, P., Lavado, W., Bourrel, L., Labat, D., Ruelland, D., Dewitte, B. & Felipe, O. (2019). Assessing multidecadal runoff (1970 – 2010) using regional hydrological modelling under data and water scarcity conditions in Peruvian Pacific catchments. *SI Hydrological Processes - Latin America*: 20–35.



- Reyes, V. R. O., y Arenas, M. A. (2022). Sexto informe de evaluación del IPCC: cambio climático 2022 (impactos, adaptación y vulnerabilidad).
- Riahi, K. Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N. & Rafaj, P. (2016). A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109: 33–57.
- Ridder, N. N., Pitman, A. J., & Ukkola, A. M. (2021). Do CMIP6 climate models simulate global or regional compound events skillfully? *Geophysical Research Letters*, 48(2), e2020GL091152.
- Rodas, F. (2022). Evaluación del cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina-Tacna.
- Rui, X. F. (2004). *Principle of Hydrology*. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press.
- Santos, D. (2016). Oferta hídrica superficial del río Coata-Puno bajo escenarios de cambio climático. Lima-Perú.
- Sanabria, J., Marengo, J., y Valverde, M. (2009). Escenarios de cambio climático con modelos regionales sobre el altiplano peruano (departamento de Puno). *Revista Peruana Geo-Atmosferica*, 149(1), 134–149.
- Stansell, Nathan D., Rodbell, Donald T. & Abbott, Mark B. (2013). Proglacial lake sediment records of Holocene climate change in the western Cordillera of Peru. *Quaternary Science Reviews*, 70(2), 1-14.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2013). Caracterización hidroclimática, modelización hidrológica y eventos extremos en las cuencas de los ríos Coata e Ilave. Dirección regional de Puno.



- Semmler, T., Danilov, S., Rackow, T., Sidorenko, D., Barbi, D., Hegewald, J., Pradhan, H. K., Sein, D., Wang, Q. & Jung, T. (2019): AWI-CM-1.1-MR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP: links to SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585 scenarios, doi: 10.22033/ESGF/CMIP6.376
- Sorooshian, S., Hsu, K., Coppola, E., Tomassetti, B., Verdecchia, M. & Visconti, G. (2008). Hydrological modelling and the water cycle: coupling the atmospheric and hydrological models. *Springer Science & Business Media*.
- Sun, W., & Chen, Z. (2020). Learned image downscaling for upscaling using content adaptive resampler. *IEEE Transactions on Image Processing*, 29, 4027-4040.
- Spruill, C.A., Workman, S.R. & Taraba J.L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model
- Terando, A., Reidmiller, D., Hostetler, S. W., Littell, J. S., Beard Jr, T. D., Weiskopf, S. R., & Plumlee, G. S. (2020). Using Information from Global Climate Models to Inform Policymaking: *The Role of the US Geological Survey*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456, 12-29.
- Ticona, A. (2016). Modelación hidrológica de escenarios futuros de caudales medios con la aplicación del modelo hidrológico Weap en la cuenca del río Ilave - Puno. [Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].
- Torres, S. (2016). Impacto de cambio climático en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) y quinua (*Chenopodium quinoa* Will) en el departamento de Puno [Tesis maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina].



- Tonconi, J. (2015). Producción agrícola alimentaria y cambio climático: un análisis económico en el departamento de Puno, Perú. *Revista IDESIA*, 33(2), 119–136.
- Thibeault, A., Seth, A., y García, M. (2010). Clima cambiante en el Altiplano boliviano: proyecciones CMIP3 para temperaturas extremas y precipitaciones. *Journal of Geophysical Research*, 115(81).
- Thompson, L. G. (2014). Global Climate Change: The Evidence and Our Options Introduction to Climate Change Glaciers as recorders of climate change Glaciers as indicators of climate change Evidence for recent acceleration of the rate of glacier loss Evidence that some glaciers a. *World Future Review*, 4(2114), 122.
- Van Beek, L.P., Wada, Y. y Bierkens, M.F. (2011). Estrés hídrico mensual global: 1. Balance hídrico y disponibilidad de agua. *Investigación de Recursos Hídricos*, 47 (7).
- Vargas, P. (2009). El cambio climático y sus efectos en el Perú. In BCRP - serie de documentos de trabajo julio 2009.
- Vilca, W. L., Salazar, J. O., y Vilca, Y. L. (2022). Comparación de modelos hidrológicos de diferente estructura y complejidad en la región hidrográfica del Titicaca, cuenca del río Huancané. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica*, 4(1).
- Weber, J. Dasso, C. y Jorquera, E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional*, vol XXIX, 4013-4037.
- World Climate Research Programme (2020). CMIP Phase 6 (CMIP6): Overview CMIP6 Experimental Design and Organization. Available at: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>



- Xu, Z., Han, Y., & Yang, Z. (2019). Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. *Science China Earth Sciences*, 62, 365-375.
- Zubieta, R., Laqui, W & Lavado, W. (2018). Hydrological modeling using observed and satellite precipitation datasets for the Ilave River basin, 2011-2015 period, Puno, Peru. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5): 85–101.
- Zubieta, R., Molina-Carpio, 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.



## ANEXOS



## Anexo 1: Información histórica producto Pisco

PRECIPITACION MEDIA MENSUAL PRODUCTO PISCO (mm)												
Cuenca : Ilave			Region : Puno			Latitud : 16°4'59.99"						
Altitud : 3824-5558 msnm			Provincia : Ilave			Longitud : 69°40'0.01"						
Propietario : Senamhi			Distrito : Ilave									
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	136.4	202.6	83.0	66.8	1.8	0.5	0.5	17.5	28.3	35.0	47.1	73.5
1982	155.3	65.9	57.2	64.9	1.1	1.6	0.9	3.5	50.8	73.7	96.0	22.8
1983	30.1	58.7	28.8	33.2	4.9	2.6	1.5	3.5	20.6	9.6	15.1	67.9
1984	206.7	284.3	140.3	25.8	7.0	11.0	1.5	9.6	1.7	94.7	152.2	71.1
1985	81.1	260.5	94.3	97.5	13.9	17.0	0.5	9.3	54.1	11.2	202.1	116.8
1986	126.7	207.9	141.0	98.4	3.3	0.7	4.5	8.2	14.1	13.6	56.4	121.7
1987	170.8	57.9	36.5	20.2	1.7	5.9	24.6	2.0	10.6	51.6	101.9	15.8
1988	136.0	55.0	120.2	91.5	7.2	0.9	1.4	0.2	12.0	26.9	14.2	68.3
1989	117.5	120.6	106.5	71.1	1.6	3.2	5.5	6.2	10.9	10.7	31.6	25.2
1990	86.5	40.7	36.5	31.4	9.7	38.0	0.3	12.0	8.0	49.5	102.7	89.5
1991	79.8	83.6	93.9	36.3	5.1	30.5	2.1	1.0	8.1	31.4	41.1	32.6
1992	82.4	87.5	16.9	19.1	0.1	3.3	3.8	22.7	1.3	26.2	61.3	60.7
1993	141.7	36.3	88.4	34.3	3.0	2.4	0.3	34.8	13.1	42.0	87.9	76.5
1994	108.3	155.9	69.4	63.5	6.4	1.4	0.7	0.6	5.5	10.2	72.2	91.8
1995	77.0	96.0	96.2	17.6	2.5	0.5	0.7	1.7	10.9	7.9	68.5	76.2
1996	151.3	108.7	39.1	39.8	4.8	0.6	2.2	17.8	5.0	9.4	97.3	67.3
1997	134.4	205.6	77.6	29.2	3.8	0.4	0.3	38.3	62.9	17.1	128.9	52.1
1998	99.4	83.1	86.8	31.1	0.1	16.6	0.2	0.5	4.4	36.0	74.4	25.9
1999	107.6	205.4	193.5	92.3	6.5	1.2	1.1	2.1	21.3	99.2	6.7	49.7
2000	165.4	180.8	88.2	19.1	4.4	3.1	0.8	5.4	6.6	63.8	10.6	83.7
2001	218.2	219.7	127.0	57.2	5.2	1.4	4.1	10.3	9.7	43.6	32.2	43.5
2002	63.6	210.6	151.4	113.9	11.6	7.2	27.1	6.5	6.0	60.8	79.4	70.0
2003	108.5	114.9	116.1	20.2	12.1	0.5	1.2	7.4	21.1	12.6	28.0	71.5
2004	149.3	137.1	60.8	27.6	2.0	1.8	27.0	40.9	14.9	1.6	15.0	51.7
2005	80.6	192.5	53.1	35.7	0.6	0.3	0.3	0.3	26.7	33.1	60.4	104.2
2006	219.4	114.2	105.1	37.1	3.2	2.7	0.3	2.5	15.5	52.0	119.3	67.3
2007	75.6	101.1	146.3	56.3	6.7	1.0	3.2	1.5	27.8	22.1	65.2	65.2
2008	170.0	92.8	62.0	7.5	0.6	1.4	1.0	3.7	1.2	28.7	9.4	105.6
2009	69.7	154.3	77.0	57.4	2.6	0.4	6.0	0.2	17.2	20.3	131.8	50.3
2010	120.4	129.1	46.8	43.8	19.4	0.5	0.3	2.2	2.9	32.6	12.4	85.5
2011	123.3	229.7	77.4	29.5	5.7	0.3	6.9	0.2	20.2	10.8	47.1	144.1
2012	140.2	250.3	108.0	78.8	0.8	0.9	0.6	3.2	9.8	20.9	49.2	143.1
2013	120.9	148.1	71.3	8.5	17.2	23.5	5.8	9.0	5.0	42.4	49.7	113.3
2014	140.4	65.6	42.1	35.4	1.1	0.4	1.6	16.2	15.6	40.7	31.7	31.9
2015	115.4	132.5	118.8	135.8	2.0	0.6	7.1	8.1	19.1	31.9	33.7	27.2
2016	49.3	193.6	15.5	82.4	1.0	5.9	8.1	1.7	6.6	25.9	16.4	52.8
<b>Promedio</b>	<b>121.1</b>	<b>141.2</b>	<b>85.4</b>	<b>50.3</b>	<b>5.0</b>	<b>5.3</b>	<b>4.3</b>	<b>8.6</b>	<b>15.8</b>	<b>33.3</b>	<b>62.5</b>	<b>69.9</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Desvest</b>	<b>44.7</b>	<b>68.0</b>	<b>41.1</b>	<b>31.7</b>	<b>4.8</b>	<b>8.9</b>	<b>7.1</b>	<b>10.6</b>	<b>14.4</b>	<b>23.4</b>	<b>45.7</b>	<b>32.9</b>
<b>Maxima</b>	<b>219.4</b>	<b>284.3</b>	<b>193.5</b>	<b>135.8</b>	<b>19.4</b>	<b>38.0</b>	<b>27.1</b>	<b>40.9</b>	<b>62.9</b>	<b>99.2</b>	<b>202.1</b>	<b>144.1</b>
<b>Minima</b>	<b>30.09</b>	<b>36.34</b>	<b>15.51</b>	<b>7.47</b>	<b>0.10</b>	<b>0.33</b>	<b>0.22</b>	<b>0.22</b>	<b>1.23</b>	<b>1.60</b>	<b>6.70</b>	<b>15.82</b>



EVAPOTRANSPIRACION MEDIA MENSUAL PRODUCTO PISCO (mm)												
Cuenca : Ilave			Region : Puno			Latitud : 16°4'59.99"						
Altitud : 3824-5558 msnm			Provincia : Ilave			Longitud : 69°40'0.01"						
Propietario : Senamhi			Distrito : Ilave									
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	33.2	27.3	29.0	37.4	45.9	58.2	67.8	68.9	67.2	69.2	64.0	56.0
1982	46.9	33.3	30.3	30.4	34.8	43.3	57.5	68.8	72.7	73.3	71.7	73.4
1983	65.7	49.9	42.7	36.4	33.2	32.8	46.7	54.2	60.6	65.9	67.9	70.1
1984	66.7	56.9	55.9	43.6	34.6	32.0	32.6	42.6	49.1	58.3	66.7	69.4
1985	69.0	61.9	62.6	57.1	48.8	35.7	32.0	31.3	33.6	48.4	54.9	67.7
1986	71.7	63.4	68.4	66.1	61.7	48.2	43.4	33.8	30.5	35.4	39.4	53.8
1987	63.3	59.9	70.1	68.7	64.3	61.4	54.7	42.5	32.3	32.3	30.8	39.5
1988	49.7	55.8	64.4	66.4	67.7	63.7	65.2	55.8	45.3	35.5	30.8	29.3
1989	36.5	40.1	55.2	61.0	67.4	66.1	70.6	70.3	60.3	50.4	37.5	30.0
1990	30.4	32.4	39.7	51.3	58.6	59.9	69.2	38.1	40.8	57.3	58.5	64.7
1991	65.0	53.9	60.2	54.0	44.8	34.8	28.9	25.0	30.2	44.8	48.7	56.2
1992	59.9	58.8	63.9	58.0	56.1	45.9	34.0	25.6	26.4	28.3	35.8	48.7
1993	53.9	56.2	68.1	64.6	64.3	57.9	53.7	40.7	29.1	28.8	30.0	39.0
1994	47.7	50.7	65.5	67.4	70.7	66.0	64.1	58.4	45.8	37.4	25.9	29.3
1995	37.4	43.8	56.6	60.6	64.2	67.0	65.5	63.6	56.7	50.7	38.2	34.1
1996	32.9	30.2	41.3	52.0	61.8	59.8	68.4	69.1	62.6	61.6	52.4	43.0
1997	37.7	26.1	32.1	37.1	46.6	59.2	67.9	70.7	66.1	70.2	65.0	57.3
1998	47.2	34.1	28.7	29.3	34.6	44.6	55.2	61.2	64.6	68.3	63.9	65.2
1999	58.0	44.6	41.5	31.9	31.3	31.6	38.5	46.4	56.7	62.4	66.3	65.4
2000	63.6	56.5	53.1	42.2	32.7	28.2	31.8	35.6	45.7	56.5	62.5	70.3
2001	67.4	59.3	63.1	53.8	46.5	33.8	26.3	27.8	33.4	46.1	51.6	61.1
2002	64.8	62.4	67.1	60.0	57.7	47.1	35.1	27.7	27.3	31.8	40.5	49.8
2003	57.9	57.7	62.7	62.6	62.7	57.9	52.4	43.2	27.7	25.0	27.9	39.2
2004	45.8	54.3	60.2	63.4	66.6	60.1	61.4	51.7	39.9	31.6	27.1	30.5
2005	35.1	44.9	55.5	62.2	69.6	72.8	78.2	72.7	65.1	54.5	38.5	32.5
2006	32.7	31.0	43.6	51.4	61.0	65.9	72.5	69.1	64.6	61.7	53.2	45.0
2007	33.1	25.6	34.2	39.2	48.2	58.0	61.4	68.0	66.9	67.2	62.6	57.4
2008	48.9	36.2	31.5	26.9	38.0	45.5	55.9	62.0	66.4	69.4	64.4	67.5
2009	61.3	48.3	42.1	33.1	32.5	34.5	43.9	55.3	61.4	69.9	67.6	69.5
2010	68.8	58.4	57.2	45.0	37.9	32.1	32.3	41.7	49.9	62.0	64.5	70.9
2011	74.0	64.1	66.6	57.5	47.4	35.6	29.9	30.5	34.1	43.4	51.9	63.7
2012	69.6	66.9	67.7	62.7	61.6	49.3	36.6	28.4	29.2	33.2	41.5	51.3
2013	61.5	59.7	70.6	65.6	66.2	59.8	54.5	39.7	29.2	26.6	29.3	35.7
2014	45.8	50.0	62.4	65.5	65.7	64.3	63.1	57.1	44.0	31.7	27.9	27.2
2015	37.6	38.6	53.7	64.0	67.3	67.6	71.8	66.2	58.3	50.5	38.8	31.8
2016	30.5	31.4	43.3	52.5	58.4	61.8	67.2	69.2	62.2	58.7	49.6	38.6
<b>Promedio</b>	<b>52.0</b>	<b>47.9</b>	<b>53.1</b>	<b>52.2</b>	<b>53.1</b>	<b>51.2</b>	<b>52.5</b>	<b>50.4</b>	<b>48.2</b>	<b>50.0</b>	<b>48.5</b>	<b>51.0</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Desvest</b>	<b>14.1</b>	<b>12.7</b>	<b>13.5</b>	<b>12.9</b>	<b>13.1</b>	<b>13.4</b>	<b>15.5</b>	<b>15.9</b>	<b>15.1</b>	<b>15.3</b>	<b>14.8</b>	<b>15.3</b>
<b>Maxima</b>	<b>74.0</b>	<b>66.9</b>	<b>70.6</b>	<b>68.7</b>	<b>70.7</b>	<b>72.8</b>	<b>78.2</b>	<b>72.7</b>	<b>72.7</b>	<b>73.3</b>	<b>71.7</b>	<b>73.4</b>
<b>Minima</b>	<b>30.41</b>	<b>25.59</b>	<b>28.65</b>	<b>26.89</b>	<b>31.30</b>	<b>28.16</b>	<b>26.30</b>	<b>24.95</b>	<b>26.41</b>	<b>24.95</b>	<b>25.91</b>	<b>27.19</b>



TEMPERATURA MAX MEDIA MENSUAL PRODUCTO PISCO (C°)												
Cuenca : Ilave			Region : Puno			Latitud : 16°4'59.99"						
Altitud : 3824-5558 msnm			Provincia : Ilave			Longitud : 69°40'0.01"						
Propietario : Senamhi			Distrito : Ilave									
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	13.8	13.4	14.3	14.0	14.6	14.3	14.4	13.7	14.8	16.4	17.4	15.9
1982	13.6	14.7	14.0	14.5	14.6	14.2	14.9	15.3	15.2	16.2	16.8	16.8
1983	16.9	16.0	16.3	16.3	15.7	14.8	15.1	15.8	15.6	17.0	17.9	15.7
1984	12.2	12.8	13.3	14.3	14.8	13.8	14.2	14.3	15.8	15.6	15.9	14.7
1985	13.4	12.9	14.4	13.5	14.3	13.4	13.4	15.2	15.3	17.0	15.3	14.1
1986	13.5	12.3	13.3	14.0	13.7	14.2	12.8	14.7	15.2	16.6	17.1	15.2
1987	13.9	15.6	15.1	15.5	15.1	14.3	14.5	16.1	17.0	17.3	17.5	17.1
1988	14.4	15.4	14.0	14.3	14.6	14.2	14.3	16.4	16.0	17.2	17.6	15.3
1989	13.5	12.9	13.0	13.7	14.3	14.2	13.8	14.8	16.0	17.0	16.8	16.3
1990	14.2	14.4	15.0	15.0	14.8	13.0	13.5	14.8	16.2	16.5	16.7	15.2
1991	14.7	15.0	14.2	14.6	15.2	14.0	14.2	15.5	15.6	16.9	16.7	15.9
1992	14.2	14.8	15.3	15.9	16.2	14.5	13.8	13.7	15.8	16.3	16.6	15.6
1993	13.2	13.9	13.2	14.4	14.5	14.5	14.4	14.4	15.8	16.4	16.8	15.6
1994	14.0	13.8	13.9	14.2	14.7	13.9	14.6	15.6	16.5	17.3	17.0	16.0
1995	15.2	15.2	13.9	15.3	15.3	14.6	14.9	16.3	16.3	17.8	17.2	15.3
1996	13.9	13.9	14.7	14.6	14.5	14.0	14.1	14.9	16.3	17.5	16.2	15.3
1997	13.0	13.1	13.4	13.7	14.5	14.2	15.1	14.5	15.5	17.5	17.2	17.7
1998	16.3	16.7	16.5	16.8	16.3	14.9	15.2	16.1	16.9	17.3	17.1	16.7
1999	14.9	13.3	12.9	13.6	14.5	14.1	13.8	15.4	15.7	15.6	17.3	16.2
2000	13.3	12.9	13.6	15.1	15.3	13.6	13.6	15.0	16.5	15.9	18.0	15.4
2001	12.7	13.2	13.3	14.2	14.3	14.1	14.0	14.6	16.1	17.2	17.8	16.2
2002	15.4	13.6	14.1	13.7	14.6	14.2	12.8	14.7	15.9	16.5	17.1	16.1
2003	15.0	15.1	14.1	14.7	14.8	14.6	14.3	14.9	15.6	17.5	18.0	16.8
2004	13.8	14.7	15.5	15.2	14.9	13.9	13.6	14.1	16.0	17.6	18.1	17.1
2005	15.2	14.3	15.4	15.5	15.6	15.1	15.1	15.9	15.5	16.7	17.4	16.1
2006	13.7	15.0	14.7	14.8	15.1	14.7	15.2	15.8	16.6	17.5	17.3	16.8
2007	16.1	15.1	14.1	15.0	14.9	15.4	14.1	15.8	15.5	17.3	17.2	16.1
2008	13.8	14.7	14.5	15.2	14.8	14.9	15.0	15.8	17.0	17.4	18.4	15.4
2009	15.1	14.5	14.8	15.2	15.4	15.1	14.4	15.9	17.0	18.3	17.8	16.6
2010	15.4	16.2	16.1	16.3	15.6	15.7	15.3	16.6	17.3	17.5	18.1	15.6
2011	15.0	13.2	13.9	15.0	15.4	15.0	14.3	15.8	16.3	17.4	18.3	15.4
2012	13.8	13.3	14.2	14.2	15.1	14.7	15.2	15.6	17.0	17.7	18.0	15.0
2013	14.4	14.5	15.3	15.8	15.3	14.0	14.5	15.1	17.1	17.2	17.9	15.7
2014	14.7	15.8	15.6	15.5	15.5	16.0	14.8	15.3	15.6	17.0	17.9	16.7
2015	14.2	14.7	14.7	14.3	15.1	15.9	15.2	15.9	16.9	17.5	18.4	17.2
2016	17.1	16.0	16.9	15.8	16.1	15.4	15.4	16.3	17.6	17.4	18.0	16.9
<b>Promedio</b>	<b>14.4</b>	<b>14.4</b>	<b>14.5</b>	<b>14.8</b>	<b>15.0</b>	<b>14.5</b>	<b>14.4</b>	<b>15.3</b>	<b>16.1</b>	<b>17.0</b>	<b>17.4</b>	<b>16.0</b>
<b>Nº de Datos</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Desvest</b>	<b>1.1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>0.8</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>
<b>Maxima</b>	<b>17.1</b>	<b>16.7</b>	<b>16.9</b>	<b>16.8</b>	<b>16.3</b>	<b>16.0</b>	<b>15.4</b>	<b>16.6</b>	<b>17.6</b>	<b>18.3</b>	<b>18.4</b>	<b>17.7</b>
<b>Minima</b>	<b>12.17</b>	<b>12.33</b>	<b>12.91</b>	<b>13.53</b>	<b>13.65</b>	<b>12.95</b>	<b>12.79</b>	<b>13.71</b>	<b>14.75</b>	<b>15.63</b>	<b>15.25</b>	<b>14.09</b>



TEMPERATURA MIN MEDIA MENSUAL PRODUCTO PISCO (C°)												
Cuenca :	Ilave		Region :	Puno				Latitud :	16°4'59.99"			
Altitud :	3824-5558 msnm		Provincia :	Ilave				Longitud :	69°40'0.01"			
Propietario :	Senamhi		Distrito :	Ilave								
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	2.6	2.8	1.2	-1.7	-6.0	-9.8	-8.8	-6.2	-5.0	-2.5	-0.9	2.2
1982	3.0	2.3	1.4	-1.8	-7.5	-8.9	-8.1	-7.2	-4.1	-1.9	0.7	0.5
1983	2.1	2.4	1.6	-0.3	-5.0	-7.3	-7.3	-5.1	-3.8	-3.5	-3.2	1.1
1984	2.9	2.9	2.5	-0.8	-4.5	-6.1	-8.1	-7.1	-6.3	-0.6	0.3	1.2
1985	1.6	2.6	1.7	0.4	-3.3	-5.1	-8.8	-6.3	-3.5	-3.9	-1.1	1.9
1986	2.7	2.4	2.1	-0.3	-6.0	-7.8	-9.2	-6.9	-4.5	-4.1	-1.4	2.3
1987	3.6	1.6	0.7	-1.7	-5.0	-7.5	-7.4	-7.0	-5.1	-3.0	0.1	1.0
1988	3.5	1.9	2.5	0.2	-3.9	-8.6	-8.1	-7.2	-3.7	-3.1	-2.5	1.1
1989	2.2	2.3	1.5	-0.3	-4.3	-6.3	-7.6	-6.7	-4.7	-2.7	-2.5	-0.1
1990	2.4	0.6	-0.1	-2.0	-5.1	-6.0	-8.6	-7.2	-5.8	-1.3	0.5	1.8
1991	2.2	2.2	1.9	-1.3	-5.6	-8.9	-9.1	-7.7	-4.8	-3.1	-2.1	-0.2
1992	1.8	1.0	-0.5	-2.9	-5.7	-6.7	-8.3	-7.3	-6.3	-3.0	-2.4	0.9
1993	2.3	1.0	1.2	-0.5	-4.7	-8.8	-8.2	-6.8	-4.7	-2.0	-0.1	2.3
1994	2.6	2.7	1.3	-0.1	-5.0	-8.5	-8.3	-7.0	-4.2	-3.1	-0.6	2.0
1995	2.8	1.2	2.0	-1.8	-6.3	-8.5	-8.1	-6.6	-3.7	-3.4	-1.4	0.4
1996	2.0	2.7	0.9	-0.4	-4.3	-8.3	-8.7	-5.3	-5.1	-3.0	-1.2	1.7
1997	3.2	2.6	1.2	-2.1	-5.5	-9.2	-7.5	-5.5	-2.0	-1.9	0.3	2.3
1998	4.4	3.7	2.4	-0.8	-6.2	-6.1	-7.4	-6.1	-5.6	-2.2	-1.1	1.2
1999	2.0	3.2	2.9	-0.1	-4.5	-8.7	-7.3	-6.4	-4.9	-1.7	-3.1	0.8
2000	3.1	2.8	1.8	-0.9	-4.8	-7.6	-8.4	-5.8	-5.0	-1.7	-2.9	1.3
2001	3.1	3.4	2.7	0.0	-4.1	-6.4	-7.9	-6.4	-3.6	-2.0	-1.0	0.9
2002	1.6	3.3	2.5	0.5	-3.1	-5.6	-6.4	-5.7	-3.4	-1.1	-0.5	1.7
2003	3.0	2.9	2.2	-1.1	-4.1	-8.5	-7.8	-6.6	-5.2	-3.3	-2.0	1.5
2004	3.2	2.3	1.7	-0.8	-6.6	-7.8	-6.6	-4.6	-3.5	-2.3	-1.2	1.4
2005	2.6	2.8	1.4	-0.9	-6.1	-9.6	-7.4	-8.1	-4.5	-2.6	-1.5	1.9
2006	2.7	2.4	2.6	-0.7	-6.5	-7.0	-8.7	-5.5	-5.0	-2.1	0.0	1.3
2007	2.8	2.2	2.3	-0.5	-4.1	-6.6	-7.4	-6.3	-2.7	-2.7	-2.1	0.7
2008	3.3	1.6	0.5	-3.2	-7.6	-8.2	-9.2	-7.8	-6.2	-2.0	-1.4	1.2
2009	2.0	2.6	1.1	-1.4	-5.2	-9.6	-7.4	-8.5	-4.3	-2.7	0.9	1.9
2010	3.2	3.6	2.0	-0.5	-4.0	-6.0	-9.1	-6.9	-4.7	-2.8	-2.9	1.5
2011	2.1	3.1	1.5	-0.9	-4.6	-7.4	-7.1	-6.1	-3.7	-3.2	-1.0	1.5
2012	2.4	2.6	1.9	0.4	-5.5	-7.8	-8.2	-7.8	-4.5	-2.1	-0.6	2.7
2013	2.6	2.9	1.3	-2.8	-3.5	-5.8	-5.8	-6.4	-5.4	-1.7	-1.0	2.2
2014	2.6	1.4	0.7	-0.6	-5.3	-7.0	-6.8	-5.3	-1.8	-1.1	-1.2	1.5
2015	2.2	2.8	2.4	1.1	-4.1	-6.5	-7.7	-6.2	-3.6	-2.2	-0.8	0.8
2016	2.0	3.6	1.3	-0.4	-5.7	-7.6	-6.7	-6.3	-4.9	-2.2	-2.6	1.3
<b>Promedio</b>	<b>2.6</b>	<b>2.4</b>	<b>1.6</b>	<b>-0.9</b>	<b>-5.1</b>	<b>-7.6</b>	<b>-7.9</b>	<b>-6.5</b>	<b>-4.4</b>	<b>-2.4</b>	<b>-1.2</b>	<b>1.4</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Desvest</b>	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>1.0</b>	<b>1.1</b>	<b>1.3</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>0.8</b>	<b>1.1</b>	<b>0.7</b>
<b>Maxima</b>	<b>4.4</b>	<b>3.7</b>	<b>2.9</b>	<b>1.1</b>	<b>-3.1</b>	<b>-5.1</b>	<b>-5.8</b>	<b>-4.6</b>	<b>-1.8</b>	<b>-0.6</b>	<b>0.9</b>	<b>2.7</b>
<b>Minima</b>	<b>1.59</b>	<b>0.62</b>	<b>-0.54</b>	<b>-3.21</b>	<b>-7.59</b>	<b>-9.80</b>	<b>-9.23</b>	<b>-8.51</b>	<b>-6.34</b>	<b>-4.09</b>	<b>-3.23</b>	<b>-0.21</b>



## Anexo 2: Caudal simulado histórica en la cuenca Ilave

CAUDAL SIMULADO CUENCA ILAVE (m3/s)												
Cuenca : Ilave			Region : Puno			Latitud : 16°4'59.99"						
Altitud : 3824-5558 msnm			Provincia : Ilave			Longitud : 69°40'0.01"						
Propietario Senamhi			Distrito : Ilave									
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	283.3	379.1	145.5	94.2	24.2	8.8	3.4	1.9	1.5	1.4	1.9	5.3
1982	52.2	54.4	45.2	51.8	16.7	7.1	3.0	1.4	2.0	4.8	15.6	7.9
1983	5.0	7.3	5.1	5.2	2.5	1.3	0.7	0.3	0.3	0.2	0.1	0.6
1984	51.2	327.5	183.1	50.5	17.7	9.6	4.4	2.5	1.2	7.4	56.2	43.1
1985	41.6	256.1	110.0	91.4	26.1	13.3	5.5	3.1	6.7	3.8	87.6	98.0
1986	106.4	232.7	158.7	101.0	21.7	7.6	3.3	1.6	1.1	0.8	2.4	24.3
1987	109.1	59.4	25.7	11.6	4.1	1.9	1.2	0.5	0.3	0.8	10.9	7.0
1988	50.6	41.4	71.8	67.2	17.5	6.1	2.4	1.0	0.5	0.4	0.3	1.9
1989	24.5	82.9	92.7	63.8	15.7	5.8	2.5	1.1	0.6	0.3	0.3	0.3
1990	4.2	7.8	8.5	8.0	3.9	4.0	1.7	0.9	0.5	0.9	8.6	22.1
1991	30.0	41.9	51.2	26.8	9.4	7.6	3.5	1.6	1.1	1.4	2.4	2.7
1992	9.5	24.6	10.1	5.6	2.2	1.0	0.5	0.4	0.2	0.3	1.8	5.9
1993	48.9	29.3	38.8	20.3	6.8	2.8	1.2	1.0	0.7	1.2	10.2	25.8
1994	62.1	152.3	71.9	47.5	13.5	4.9	2.0	0.8	0.4	0.2	1.0	10.2
1995	27.1	61.3	70.8	24.4	7.9	3.1	1.3	0.6	0.3	0.2	0.6	4.4
1996	59.5	109.0	49.1	32.5	10.8	4.2	1.8	1.0	0.5	0.3	2.1	6.6
1997	49.0	234.3	115.7	49.5	16.4	6.3	2.5	2.3	4.2	2.4	18.1	16.6
1998	36.4	55.4	68.4	38.7	13.4	8.7	3.5	1.5	0.7	0.7	2.5	2.1
1999	12.4	137.7	230.9	135.0	35.3	14.2	6.3	2.8	2.3	11.7	5.1	5.5
2000	49.8	160.0	91.4	31.5	11.8	5.6	2.7	1.4	0.9	2.7	1.7	6.0
2001	100.9	255.9	149.9	65.8	18.5	7.4	3.6	2.2	1.5	2.7	3.2	4.2
2002	7.7	113.3	139.8	114.2	27.6	10.6	7.5	3.7	2.1	6.0	20.1	29.7
2003	59.4	92.2	95.2	29.3	10.8	4.1	1.7	0.8	0.6	0.4	0.6	3.9
2004	83.54	118.30	55.78	23.96	7.59	3.05	2.02	2.02	1.33	0.63	0.49	1.51
2005	9.50	128.30	57.29	29.33	8.70	3.33	1.37	0.58	0.37	0.32	1.11	12.87
2006	167.53	164.86	129.17	52.06	14.89	5.70	2.25	0.95	0.54	0.74	10.20	17.77
2007	31.10	74.35	148.49	77.53	22.83	8.30	3.46	1.44	1.08	0.73	1.84	4.53
2008	59.26	80.74	58.46	22.70	8.82	4.03	1.80	0.84	0.40	0.32	0.19	2.66
2009	7.14	62.31	56.63	47.62	15.99	6.85	3.53	1.51	1.06	0.74	11.37	11.46
2010	36.11	80.91	37.41	25.70	12.84	5.40	2.43	1.15	0.60	0.67	0.44	2.61
2011	20.05	172.98	77.77	30.17	10.24	4.16	2.15	0.97	0.87	0.57	1.34	25.27
2012	74.67	278.23	124.52	74.61	17.19	6.23	2.57	1.18	0.73	0.64	1.76	31.28
2013	70.97	135.36	65.51	18.56	8.00	4.70	2.10	1.04	0.55	0.86	2.59	25.46
2014	93.15	68.64	33.53	19.50	6.32	2.53	1.09	0.58	0.36	0.51	0.84	1.43
2015	20.84	89.40	109.46	136.01	25.04	8.11	3.40	1.51	0.90	0.75	0.90	1.01
2016	2.71	95.67	30.22	48.13	13.33	5.57	2.56	1.07	0.54	0.36	0.25	0.64
<b>PROM</b>	<b>54.38</b>	<b>124.06</b>	<b>83.72</b>	<b>49.21</b>	<b>14.07</b>	<b>5.94</b>	<b>2.69</b>	<b>1.37</b>	<b>1.10</b>	<b>1.63</b>	<b>7.96</b>	<b>13.12</b>
<b>MAX</b>	<b>283.27</b>	<b>379.08</b>	<b>230.87</b>	<b>136.01</b>	<b>35.35</b>	<b>14.19</b>	<b>7.55</b>	<b>3.72</b>	<b>6.67</b>	<b>11.68</b>	<b>87.57</b>	<b>97.99</b>
<b>MIN</b>	<b>2.71</b>	<b>7.29</b>	<b>5.14</b>	<b>5.15</b>	<b>2.17</b>	<b>1.03</b>	<b>0.50</b>	<b>0.33</b>	<b>0.21</b>	<b>0.15</b>	<b>0.12</b>	<b>0.32</b>



### Anexo 3: Información hidrometeorológica para escenario futuro SSP2 4.5

PRECIPITACION MEDIA MENSUAL GCM AWWI-CM-1-1-MR4.5 (mm)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2030	115.6	87.0	77.5	28.9	1.1	3.6	1.3	0.4	10.2	50.3	29.6	46.3
2031	126.3	164.6	65.9	61.5	1.0	21.8	2.3	0.0	1.4	37.5	30.3	61.7
2032	85.3	219.6	66.5	28.3	3.2	3.3	0.5	0.5	1.3	30.0	43.2	67.0
2033	74.6	123.9	119.7	39.7	11.7	32.5	3.4	1.7	19.7	54.7	84.5	76.2
2034	80.0	206.7	141.2	36.5	2.7	8.9	1.3	0.3	1.2	36.2	62.9	74.6
2035	114.6	202.2	83.1	14.5	1.0	22.3	0.4	0.4	0.0	38.7	64.4	67.9
2036	121.1	83.5	73.7	41.2	1.6	5.8	2.8	0.3	1.6	41.7	35.0	59.0
2037	85.5	220.2	64.4	15.9	5.0	10.6	1.4	0.4	20.9	70.6	86.8	71.4
2038	113.6	186.2	207.3	59.7	1.8	1.5	0.3	0.2	0.0	32.9	32.3	51.1
2039	209.0	210.5	90.1	28.3	0.3	0.3	0.3	0.3	8.0	49.4	171.5	70.7
2040	101.8	120.7	62.8	60.0	3.3	7.2	0.5	0.2	1.4	43.0	33.4	26.2
2041	81.5	219.3	61.7	29.3	1.9	8.1	0.6	0.3	13.1	44.9	31.6	51.5
2042	114.5	85.9	64.9	19.9	0.0	7.3	1.4	0.5	16.6	46.2	42.8	69.9
2043	76.2	235.3	109.0	29.4	1.4	23.9	1.9	0.3	0.0	36.1	52.5	32.4
2044	80.1	126.4	68.8	35.4	11.9	3.2	0.3	0.9	1.3	25.7	28.2	0.0
2045	58.7	205.4	69.2	31.6	2.0	7.1	1.5	1.3	10.4	53.3	58.3	74.4
2046	83.9	135.9	77.4	63.9	5.1	7.3	3.4	0.8	8.1	54.9	68.8	57.3
2047	210.8	214.6	97.6	36.5	1.7	7.7	0.2	0.4	1.5	37.1	45.6	76.3
2048	87.1	205.1	75.4	19.8	0.0	0.9	0.3	0.2	0.0	25.8	37.6	46.4
2049	79.0	130.4	68.8	17.1	2.7	4.0	2.5	0.4	4.7	51.8	73.5	76.4
2050	84.3	235.1	116.4	35.8	10.3	17.2	1.0	0.2	9.7	52.0	160.2	69.5
2051	84.7	218.5	118.4	32.0	6.6	1.3	0.5	0.2	5.0	43.4	31.6	66.8
2052	123.6	172.4	124.5	17.3	0.0	4.0	0.9	0.4	1.4	33.6	45.9	46.8
2053	98.9	216.4	88.2	29.8	0.7	17.6	1.8	0.5	10.5	48.3	50.2	76.5
2054	206.8	140.5	95.5	6.6	0.7	0.9	0.7	0.0	5.3	27.7	21.2	0.0
2055	76.4	79.7	63.8	7.0	0.3	8.8	1.7	1.6	11.5	52.9	63.1	76.2
2056	199.1	219.2	120.3	61.7	2.7	7.9	0.5	0.3	5.1	40.3	41.1	72.2
2057	207.3	170.9	113.0	17.2	6.9	3.2	1.3	0.2	1.5	34.4	23.8	68.9
2058	82.8	153.0	84.6	26.6	5.2	7.2	0.5	0.0	5.9	34.1	67.5	68.3
2059	95.2	212.6	118.8	23.4	4.9	1.5	0.7	0.4	10.9	38.6	48.3	51.0
2060	71.3	83.2	75.3	16.8	1.1	5.3	1.3	0.4	5.4	33.8	49.6	39.3
<b>Promedio</b>	<b>110.6</b>	<b>170.5</b>	<b>92.4</b>	<b>31.4</b>	<b>3.2</b>	<b>8.5</b>	<b>1.2</b>	<b>0.5</b>	<b>6.2</b>	<b>41.9</b>	<b>55.3</b>	<b>57.8</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>
<b>Desvest</b>	<b>46.0</b>	<b>51.9</b>	<b>31.4</b>	<b>16.0</b>	<b>3.3</b>	<b>7.8</b>	<b>0.9</b>	<b>0.4</b>	<b>5.9</b>	<b>10.2</b>	<b>34.2</b>	<b>20.7</b>
<b>Maxima</b>	<b>210.8</b>	<b>235.3</b>	<b>207.3</b>	<b>63.9</b>	<b>11.9</b>	<b>32.5</b>	<b>3.4</b>	<b>1.7</b>	<b>20.9</b>	<b>70.6</b>	<b>171.5</b>	<b>76.5</b>
<b>Minima</b>	<b>58.74</b>	<b>79.73</b>	<b>61.66</b>	<b>6.58</b>	<b>0.00</b>	<b>0.35</b>	<b>0.23</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>25.73</b>	<b>21.20</b>	<b>0.00</b>



TEMPERATURA MEDIA MENSUAL GCM AWWI-CM-1-1-MR (C°) 4SSP2 4.5												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2030	8.55	9.2	8.07	7.7	5.21	5.43	3.88	4	6.71	7.77	8.78	8.42
2031	8.97	9.21	8.04	7.4	5.22	5.39	4.02	4.03	7.09	8.79	9.41	8.6
2032	9.23	10.27	9.05	8.2	5.85	5.51	4.07	4.36	7.09	8.26	8.93	8.51
2033	9.23	10.31	9.2	8.27	6.48	5.48	4.37	4.37	7.06	7.94	8.78	8.39
2034	8.97	9.23	8.55	8.09	6.41	5.59	4.34	4.38	6.74	8.54	9	8.49
2035	9.05	9.23	8.46	8.14	6.44	5.51	4.38	4.53	7.18	8.67	9.42	8.68
2036	9.16	10.36	9.49	8.65	6.49	5.64	4.39	4.76	7.13	8.23	9.28	8.52
2037	9.26	10.79	9.38	8.68	6.44	5.54	4.39	4.39	7.09	8.66	8.77	8.32
2038	9.19	10.22	9.01	8.08	5.82	5.46	4.68	4.36	7.1	8.82	9.55	9.29
2039	10.38	10.76	9.63	9.32	6.92	5.91	4.98	4.98	7.6	9.4	9.68	9.05
2040	9.24	10.44	9.12	8.61	5.85	5.37	4.09	4.38	7.1	8.36	9.01	8.55
2041	8.88	10.13	9.19	8.27	5.75	5.5	4.03	4.6	7.06	8.29	9.05	8.54
2042	9.95	10.4	9.01	8.41	6.41	5.58	3.92	4.5	7.06	8.46	9.86	9.24
2043	9.3	10.51	9.78	9.27	7.07	5.9	4.6	4.64	7.2	9.07	9.74	9.08
2044	9.86	10.63	9.47	8.7	6.47	5.53	4.5	4.37	7.1	8.55	9.43	8.55
2045	9.24	10.35	9.2	8.28	6.51	5.66	4.18	4.34	7.06	9.37	9.67	9.06
2046	10.19	10.83	9.71	9.49	7.27	5.97	4.85	4.94	7.95	9.39	10.1	10.32
2047	10.37	10.8	9.87	9.62	6.82	5.95	4.86	4.67	6.91	8.77	8.78	8.28
2048	10.11	10.56	9.43	8.2	6.45	5.69	4.35	4.35	7.11	8.74	9.83	8.61
2049	9.24	10.52	9.32	8.26	6.68	5.7	4.65	4.47	7.21	9.37	9.76	9.24
2050	10.35	10.77	9.6	9.07	7.07	6.02	4.49	4.79	7.29	9.45	9.31	8.6
2051	9.07	9.69	9.22	8.12	6.37	5.52	4.16	4.32	7.09	8.45	8.43	8.42
2052	9.17	10.27	9.38	8.27	6.47	5.61	4.38	4.62	7.22	8.86	9.16	8.55
2053	9.23	10.02	9.06	8.53	6.52	5.61	4.39	4.35	7.11	8.34	9.08	8.62
2054	9.16	10.35	9.2	8.59	5.88	5.46	4.36	4.39	7.13	8.77	9.4	8.54
2055	9.24	10.76	9.66	9.19	7.09	5.79	4.6	4.64	7.15	8.6	9.49	8.52
2056	9.24	10.29	9.16	8.28	5.89	5.45	4.47	4.5	7.11	8.3	9.09	8.51
2057	9.24	9.24	9.18	8.26	6.13	5.47	4.35	4.48	7.06	8.25	9.38	8.52
2058	9.17	10.41	9.24	8.54	6.5	5.58	4.38	4.31	7.13	8.3	9.46	8.55
2059	9.24	10.52	9.45	8.28	6.44	5.66	4.38	4.12	6.68	8.25	9.63	9.24
2060	10.02	10.77	9.6	9.18	6.93	6.03	4.4	4.8	7.11	8.71	9.72	9.05
<b>Promedio</b>	<b>9.4</b>	<b>10.3</b>	<b>9.2</b>	<b>8.5</b>	<b>6.4</b>	<b>5.6</b>	<b>4.4</b>	<b>4.5</b>	<b>7.1</b>	<b>8.6</b>	<b>9.3</b>	<b>8.7</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>31</b>											
<b>Desvest</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>
<b>Maxima</b>	<b>10.4</b>	<b>10.8</b>	<b>9.9</b>	<b>9.6</b>	<b>7.3</b>	<b>6.0</b>	<b>5.0</b>	<b>5.0</b>	<b>8.0</b>	<b>9.5</b>	<b>10.1</b>	<b>10.3</b>
<b>Minima</b>	<b>8.55</b>	<b>9.20</b>	<b>8.04</b>	<b>7.40</b>	<b>5.21</b>	<b>5.37</b>	<b>3.88</b>	<b>4.00</b>	<b>6.68</b>	<b>7.77</b>	<b>8.43</b>	<b>8.28</b>



TEMPERATURA MEDIA MENSUAL GCM AWWI-CM-1-1-MR (C°) SSP2 4.5												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2070	9.2	9.24	9.01	8.09	6.47	5.49	4.38	4.36	7.12	8.78	9.6	9.21
2071	10.37	10.88	9.66	9.36	7.38	6.07	4.79	4.99	7.8	9.31	9.74	9.07
2072	9.77	10.43	9.37	8.27	5.87	5.48	4.35	4.51	7.2	8.75	9.64	9.04
2073	9.25	9.29	9.28	9.01	6.48	5.48	4.23	4.53	7.58	8.5	9.59	8.94
2074	10.21	10.44	9.25	8.81	6.71	5.78	4.45	4.74	7.2	8.65	9.45	8.48
2075	9.07	10.2	9.28	8.31	6.75	5.63	4.37	4.35	7.09	8.79	9.66	8.96
2076	9.24	10.61	9.78	8.75	6.95	5.77	4.67	4.6	7.15	9.22	9.97	9.08
2077	10.26	10.43	9.3	8.43	6.45	5.62	4.36	4.62	7.14	8.71	9.46	8.89
2078	9.26	10.48	9.4	9.09	6.76	5.72	4.39	4.41	7.09	8.75	9.38	8.55
2079	8.97	10.16	8.72	7.96	6.44	5.38	4.31	4.11	7.06	8.03	8.78	8.37
2080	8.96	10.36	8.72	8.09	6.49	5.4	4.12	4.48	7.09	8.43	9.57	8.48
2081	9.12	10.41	8.74	8.61	6.1	5.69	4.39	4.73	7.6	9.39	9.87	9.14
2082	10.36	10.65	9.69	9.25	6.49	5.86	4.37	4.37	7.1	8.77	9.36	8.94
2083	9.2	10.45	9.29	8.65	6.32	5.47	4.25	4.4	7.09	8.78	9.67	9.07
2084	10.51	10.73	9.78	9.31	7.42	6.06	5.05	5	7.63	9.47	9.6	9.18
2085	10.4	10.64	9.38	9.11	6.5	5.91	4.65	4.49	7.16	8.73	9.58	8.94
2086	9.47	10.12	9.02	8.71	6.46	5.67	4.39	4.49	7.14	8.77	9.64	9.16
2087	9.21	10.54	9.48	8.75	6.7	5.78	4.49	4.54	6.91	8.14	9.37	9.09
2088	9.55	10.54	9.39	8.71	6.49	5.6	4.5	4.6	7.09	8.24	9.52	8.65
2089	8.98	9.24	8.62	8.08	6.5	5.63	4.37	4.49	7.13	8.53	9.39	8.68
2090	9.27	10.47	9.11	8.5	6.49	5.86	4.39	4.39	7.05	8.72	9.81	9.08
2091	9.48	10.69	9.56	9.24	6.61	5.81	4.88	4.85	7.17	8.68	9.23	8.55
2092	9.24	10.54	9.3	8.58	6.48	5.55	4.39	4.65	7.09	8.46	9	8.55
2093	9.2	10.18	8.62	8.26	5.88	5.64	4.39	4.36	7.29	8.54	8.78	8.61
2094	9.25	10.36	8.68	8.34	6.3	5.71	4.42	4.35	7.09	8.39	9.5	8.96
2095	10.16	10.48	9.66	9.29	7.24	5.97	4.6	4.99	7.32	9	9.81	8.95
2096	9.24	10.66	9.1	8.25	6.47	5.69	4.53	4.33	7.08	8.42	8.86	8.54
2097	8.98	10.44	9.27	8.05	5.72	5.39	4.19	4.16	7.06	8.74	9.63	8.55
2098	9.25	9.95	9.15	8.28	5.87	5.54	4.38	4.67	7.14	8.79	9.48	8.98
2099	9.17	10.23	8.57	8.27	5.81	5.57	4.05	4.3	7.08	8.36	8.79	8.3
2100	9.17	10.24	9.12	8.49	6.44	5.82	4.39	4.26	7.09	8.04	8.9	8.55
<b>Promedio</b>	<b>9.5</b>	<b>10.3</b>	<b>9.2</b>	<b>8.6</b>	<b>6.5</b>	<b>5.7</b>	<b>4.4</b>	<b>4.5</b>	<b>7.2</b>	<b>8.7</b>	<b>9.4</b>	<b>8.8</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>31</b>											
<b>Desvest</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>
<b>Maxima</b>	<b>10.5</b>	<b>10.9</b>	<b>9.8</b>	<b>9.4</b>	<b>7.4</b>	<b>6.1</b>	<b>5.1</b>	<b>5.0</b>	<b>7.8</b>	<b>9.5</b>	<b>10.0</b>	<b>9.2</b>
<b>Minima</b>	<b>8.96</b>	<b>9.24</b>	<b>8.57</b>	<b>7.96</b>	<b>5.72</b>	<b>5.38</b>	<b>4.05</b>	<b>4.11</b>	<b>6.91</b>	<b>8.03</b>	<b>8.78</b>	<b>8.30</b>



### Anexo 4: Información hidrometeorológica para escenario futuro SSP5 8.5

PRECIPITACION MEDIA MENSUAL GCM AWWI-CM-1-1-MR (mm)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2030	82.2	205.0	69.8	19.1	0.0	0.7	0.0	0.2	0.0	26.4	28.1	32.3
2031	93.8	125.0	89.2	17.3	4.8	8.1	0.6	0.3	9.7	52.5	111.6	67.8
2032	79.1	210.6	78.2	16.5	0.3	3.3	0.4	0.3	0.0	24.2	21.1	0.0
2033	65.5	209.2	68.6	34.1	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	16.9	23.0	0.0
2034	71.3	130.8	108.1	17.1	0.2	31.3	9.6	3.0	21.2	66.4	131.1	71.3
2035	208.3	209.1	95.2	64.6	6.4	22.8	1.2	0.3	9.7	35.1	50.1	69.6
2036	82.0	157.0	95.1	36.2	6.2	3.2	0.5	0.3	4.2	38.2	32.2	50.3
2037	80.7	81.0	73.8	17.0	5.5	1.2	0.2	0.3	1.7	33.1	20.9	0.0
2038	66.9	81.2	45.5	16.0	0.1	1.2	1.2	0.3	1.6	38.0	33.9	32.3
2039	85.9	205.2	105.8	29.2	8.0	7.1	1.8	1.2	0.0	22.5	22.6	0.0
2040	81.9	117.7	110.8	41.5	3.1	7.2	7.9	0.5	13.8	45.0	125.2	76.3
2041	251.7	218.7	77.5	17.6	8.5	3.4	3.3	0.2	5.2	32.2	26.5	0.0
2042	71.3	78.5	88.6	16.9	0.0	6.0	7.2	2.4	20.9	50.9	174.2	69.4
2043	149.3	201.9	94.9	20.1	3.3	3.9	1.3	0.0	0.0	21.1	22.4	0.0
2044	76.5	144.1	77.4	37.6	0.0	1.7	3.4	0.5	5.4	40.4	28.1	80.1
2045	168.0	210.2	150.9	47.2	1.7	10.4	0.6	1.2	6.5	48.5	40.5	57.9
2046	116.9	172.3	155.1	57.3	5.0	26.2	0.5	0.5	1.9	40.8	77.0	76.6
2047	169.2	204.4	114.8	29.1	0.1	12.5	0.9	0.3	10.8	30.0	28.0	58.4
2048	76.3	157.4	88.3	25.9	0.0	1.1	0.3	0.2	10.8	35.0	50.4	26.7
2049	79.3	100.2	96.8	17.3	0.0	1.4	0.2	0.3	5.2	43.6	129.4	71.8
2050	143.1	214.5	154.8	24.4	0.1	7.2	0.2	0.2	8.0	33.6	25.4	0.0
2051	81.9	198.1	114.7	55.0	0.3	5.9	0.7	0.2	0.0	35.0	28.2	27.3
2052	115.7	151.0	116.6	28.8	12.9	5.9	1.2	0.4	12.5	58.9	72.7	121.5
2053	171.1	191.3	195.2	25.1	0.0	2.9	0.5	0.3	2.0	37.6	44.4	53.5
2054	83.4	209.0	93.3	29.1	0.0	1.4	1.4	0.0	3.5	44.3	31.6	56.8
2055	135.4	113.7	111.2	57.2	5.8	26.0	1.4	0.2	5.2	51.6	124.3	76.0
2056	132.3	221.2	128.4	77.0	5.5	9.6	0.6	2.2	15.6	30.8	88.3	72.7
2057	72.4	219.3	68.0	44.5	0.0	2.4	1.4	0.2	0.0	31.1	39.0	26.0
2058	103.8	146.9	64.3	20.1	3.1	1.4	0.3	0.0	0.0	30.4	29.0	15.8
2059	80.7	208.3	77.2	49.5	3.2	1.3	0.3	0.3	4.3	40.8	178.9	76.4
2060	121.2	190.2	74.1	25.1	6.2	1.4	0.2	0.0	0.0	48.1	49.9	61.7
2061	143.4	188.9	72.7	29.1	6.5	3.5	3.0	0.2	1.3	29.6	31.6	0.0
2062	115.8	187.1	77.3	20.1	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	21.6	20.6	0.0
2063	76.4	84.3	63.1	10.2	0.0	2.6	0.2	1.2	11.3	51.5	32.1	76.3
2064	121.7	219.4	107.6	34.0	8.5	22.5	1.4	0.3	7.8	44.1	121.1	76.5
2065	144.7	144.7	225.4	30.4	3.0	1.7	2.2	0.5	0.0	31.0	29.1	76.6
2066	88.9	115.2	77.2	9.5	0.1	0.7	1.2	0.4	1.3	26.4	26.8	0.0
2067	76.3	167.3	150.3	62.2	1.7	20.5	17.0	0.8	14.9	64.7	108.7	72.1
2068	77.5	267.1	226.7	64.8	9.0	38.4	0.3	0.3	0.0	32.9	28.5	34.6
2069	150.2	223.1	64.7	17.1	5.0	27.2	3.1	0.5	12.7	40.1	39.6	57.8
2070	80.6	240.5	99.0	28.9	13.6	3.4	1.4	0.3	13.1	44.7	32.0	16.0
2071	145.2	154.5	77.8	36.4	5.2	0.5	0.0	0.2	0.0	26.7	27.2	57.6
2072	82.1	251.9	63.3	20.0	5.0	8.1	0.7	0.3	5.3	34.2	75.1	58.7
2073	149.3	121.3	64.2	16.4	3.1	1.4	0.3	0.2	5.5	24.8	23.6	0.0
2074	69.1	136.5	62.2	19.4	9.3	9.4	2.0	2.9	11.0	38.9	68.0	69.7
2075	212.4	218.0	96.2	19.8	0.0	6.0	0.9	0.2	15.5	26.6	38.6	51.2
2076	74.5	181.4	131.6	29.2	4.2	23.6	1.8	0.3	9.7	37.8	29.1	26.7
2077	118.6	150.4	63.8	17.2	4.8	16.9	0.3	0.0	1.4	39.7	111.4	76.3
2078	119.9	135.0	186.6	29.1	8.5	10.6	0.9	0.0	0.0	23.3	32.5	72.2
2079	183.3	84.1	68.9	29.1	3.2	0.5	1.4	0.2	10.5	52.0	44.3	50.2
2080	212.2	214.4	48.3	16.1	0.0	1.2	0.0	0.3	0.0	26.5	31.9	68.4
2081	121.9	156.9	121.9	18.6	0.0	0.7	0.4	0.2	7.8	35.6	75.2	69.2
2082	142.7	166.4	101.0	45.7	2.2	2.3	1.2	0.2	14.9	44.3	29.4	28.4
2083	115.5	208.7	82.4	16.4	5.0	1.5	1.4	0.5	4.5	23.2	21.2	33.9
2084	114.0	81.0	62.5	16.0	3.2	1.4	0.7	1.2	9.6	41.6	206.3	45.8
2085	204.8	229.7	115.6	20.1	0.0	0.8	0.2	0.0	0.0	39.9	31.9	35.2
2086	86.1	195.2	62.1	16.1	0.0	1.4	0.3	0.5	1.9	26.8	130.7	57.4
2087	150.7	157.1	167.8	28.0	5.2	10.8	1.4	0.0	2.3	39.3	111.3	74.4
2088	192.6	144.1	195.5	29.2	5.1	1.4	0.9	0.2	8.1	30.5	75.4	73.2
2089	143.1	232.5	213.0	45.3	11.5	5.9	0.4	0.5	0.0	15.5	15.8	0.0
2090	69.5	76.4	90.0	7.5	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	33.9	21.2	23.4
2091	90.0	208.6	210.9	18.0	0.7	7.8	0.5	0.0	0.0	45.6	206.7	69.9
2092	121.6	92.4	142.2	16.1	0.3	26.8	0.2	0.3	0.0	36.8	28.7	57.8
2093	121.5	85.3	115.7	12.8	2.8	1.4	0.3	0.2	0.0	34.5	28.5	18.3
2094	121.2	81.6	69.0	18.6	1.5	6.1	2.8	1.2	3.8	36.4	49.7	28.7
2095	80.7	142.7	95.3	46.1	5.5	5.7	0.3	0.2	1.4	28.0	33.8	28.1
2096	80.1	188.8	88.1	63.9	0.0	2.6	1.5	0.3	0.0	27.1	27.8	25.8
2097	82.3	152.6	68.5	36.9	0.2	1.3	1.4	0.2	0.0	27.2	28.2	29.5
2098	74.8	209.4	92.4	36.9	8.6	1.2	0.4	0.2	1.5	27.0	31.3	39.7
2099	210.3	156.5	103.7	28.1	0.0	0.3	0.5	0.5	0.0	38.7	129.1	68.3
2100	122.1	208.9	109.9	26.7	5.2	0.7	0.5	0.3	1.9	30.5	31.9	40.5
<b>Promedio</b>	<b>116.7</b>	<b>168.2</b>	<b>104.5</b>	<b>29.6</b>	<b>3.4</b>	<b>7.0</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>	<b>5.1</b>	<b>36.1</b>	<b>58.5</b>	<b>45.3</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>	<b>71</b>
<b>Desvest</b>	<b>44.5</b>	<b>50.0</b>	<b>43.6</b>	<b>15.5</b>	<b>3.5</b>	<b>8.9</b>	<b>2.5</b>	<b>0.6</b>	<b>5.6</b>	<b>10.4</b>	<b>47.6</b>	<b>28.6</b>
<b>Maxima</b>	<b>251.7</b>	<b>267.1</b>	<b>226.7</b>	<b>77.0</b>	<b>13.6</b>	<b>38.4</b>	<b>17.0</b>	<b>3.0</b>	<b>21.2</b>	<b>66.4</b>	<b>206.7</b>	<b>121.5</b>
<b>Minima</b>	<b>65.49</b>	<b>76.42</b>	<b>45.49</b>	<b>7.48</b>	<b>0.00</b>	<b>0.22</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>15.47</b>	<b>15.85</b>	<b>0.00</b>



TEMPERATURA MEDIA MENSUAL GCM AWWI-CM-1-1-MR (C°)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2030	8.55	9.2	8.07	7.7	5.21	5.43	3.88	4	6.71	7.77	8.78	8.42
2031	8.97	9.21	8.04	7.4	5.22	5.39	4.02	4.03	7.09	8.79	9.41	8.6
2032	9.23	10.27	9.05	8.2	5.85	5.51	4.07	4.36	7.09	8.26	8.93	8.51
2033	9.23	10.31	9.2	8.27	6.48	5.48	4.37	4.37	7.06	7.94	8.78	8.39
2034	8.97	9.23	8.55	8.09	6.41	5.59	4.34	4.38	6.74	8.54	9	8.49
2035	9.05	9.23	8.46	8.14	6.44	5.51	4.38	4.53	7.18	8.67	9.42	8.68
2036	9.16	10.36	9.49	8.65	6.49	5.64	4.39	4.76	7.13	8.23	9.28	8.52
2037	9.26	10.79	9.38	8.68	6.44	5.54	4.39	4.39	7.09	8.66	8.77	8.32
2038	9.19	10.22	9.01	8.08	5.82	5.46	4.68	4.36	7.1	8.82	9.55	9.29
2039	10.38	10.76	9.63	9.32	6.92	5.91	4.98	4.98	7.6	9.4	9.68	9.05
2040	9.24	10.44	9.12	8.61	5.85	5.37	4.09	4.38	7.1	8.36	9.01	8.55
2041	8.88	10.13	9.19	8.27	5.75	5.5	4.03	4.6	7.06	8.29	9.05	8.54
2042	9.95	10.4	9.01	8.41	6.41	5.58	3.92	4.5	7.06	8.46	9.86	9.24
2043	9.3	10.51	9.78	9.27	7.07	5.9	4.6	4.64	7.2	9.07	9.74	9.08
2044	9.86	10.63	9.47	8.7	6.47	5.53	4.5	4.37	7.1	8.55	9.43	8.55
2045	9.24	10.35	9.2	8.28	6.51	5.66	4.18	4.34	7.06	9.37	9.67	9.06
2046	10.19	10.83	9.71	9.49	7.27	5.97	4.85	4.94	7.95	9.39	10.1	10.32
2047	10.37	10.8	9.87	9.62	6.82	5.95	4.86	4.67	6.91	8.77	8.78	8.28
2048	10.11	10.56	9.43	8.2	6.45	5.69	4.35	4.35	7.11	8.74	9.83	8.61
2049	9.24	10.52	9.32	8.26	6.68	5.7	4.65	4.47	7.21	9.37	9.76	9.24
2050	10.35	10.77	9.6	9.07	7.07	6.02	4.49	4.79	7.29	9.45	9.31	8.6
2051	9.07	9.69	9.22	8.12	6.37	5.52	4.16	4.32	7.09	8.45	8.43	8.42
2052	9.17	10.27	9.38	8.27	6.47	5.61	4.38	4.62	7.22	8.86	9.16	8.55
2053	9.23	10.02	9.06	8.53	6.52	5.61	4.39	4.35	7.11	8.34	9.08	8.62
2054	9.16	10.35	9.2	8.59	5.88	5.46	4.36	4.39	7.13	8.77	9.4	8.54
2055	9.24	10.76	9.66	9.19	7.09	5.79	4.6	4.64	7.15	8.6	9.49	8.52
2056	9.24	10.29	9.16	8.28	5.89	5.45	4.47	4.5	7.11	8.3	9.09	8.51
2057	9.24	9.24	9.18	8.26	6.13	5.47	4.35	4.48	7.06	8.25	9.38	8.52
2058	9.17	10.41	9.24	8.54	6.5	5.58	4.38	4.31	7.13	8.3	9.46	8.55
2059	9.24	10.52	9.45	8.28	6.44	5.66	4.38	4.12	6.68	8.25	9.63	9.24
2060	10.02	10.77	9.6	9.18	6.93	6.03	4.4	4.8	7.11	8.71	9.72	9.05
2061	9.25	10.59	9.6	9.27	7.09	5.97	4.39	4.48	7.12	8.53	9.62	9.24
2062	9.92	10.14	9.11	8.59	6.16	5.43	4.69	4.56	7.18	8.32	9.44	8.54
2063	9.16	10.37	8.67	8.43	6.43	5.42	4.06	4.33	7.06	8.77	9.6	8.92
2064	9.77	10.36	9.37	8.48	6.41	5.6	4.38	4.39	7.14	8.02	9.38	8.52
2065	9.21	10.44	9.28	9.02	6.73	5.83	4.85	4.83	7.54	8.69	9.52	8.94
2066	9.68	10.39	9.41	8.69	7.07	5.98	4.39	4.6	7.29	8.54	8.77	8.64
2067	9.24	10.42	9.36	8.74	6.2	5.81	4.6	4.77	7.22	8.54	9.42	8.55
2068	9.1	10.22	9.12	8.49	6.66	5.75	4.8	4.6	7.12	8.77	9.48	8.92
2069	9.21	10.43	9.32	8.65	6.78	5.78	4.69	4.46	7.21	8.73	9.37	8.65
2070	9.2	9.24	9.01	8.09	6.47	5.49	4.38	4.36	7.12	8.78	9.6	9.21
2071	10.37	10.88	9.66	9.36	7.38	6.07	4.79	4.99	7.8	9.31	9.74	9.07
2072	9.77	10.43	9.37	8.27	5.87	5.48	4.35	4.51	7.2	8.75	9.64	9.04
2073	9.25	9.29	9.28	9.01	6.48	5.48	4.23	4.53	7.58	8.5	9.59	8.94
2074	10.21	10.44	9.25	8.81	6.71	5.78	4.45	4.74	7.2	8.65	9.45	8.48
2075	9.07	10.2	9.28	8.31	6.75	5.63	4.37	4.35	7.09	8.79	9.66	8.96
2076	9.24	10.61	9.78	8.75	6.95	5.77	4.67	4.6	7.15	9.22	9.97	9.08
2077	10.26	10.43	9.3	8.43	6.45	5.62	4.36	4.62	7.14	8.71	9.46	8.89
2078	9.26	10.48	9.4	9.09	6.76	5.72	4.39	4.41	7.09	8.75	9.38	8.55
2079	8.97	10.16	8.72	7.96	6.44	5.38	4.31	4.11	7.06	8.03	8.78	8.37
2080	8.96	10.36	8.72	8.09	6.49	5.4	4.12	4.48	7.09	8.43	9.57	8.48
2081	9.12	10.41	8.74	8.61	6.1	5.69	4.39	4.73	7.6	9.39	9.87	9.14
2082	10.36	10.65	9.69	9.25	6.49	5.86	4.37	4.37	7.1	8.77	9.36	8.94
2083	9.2	10.45	9.29	8.65	6.32	5.47	4.25	4.4	7.09	8.78	9.67	9.07
2084	10.51	10.73	9.78	9.31	7.42	6.06	5.05	5	7.63	9.47	9.6	9.18
2085	10.4	10.64	9.38	9.11	6.5	5.91	4.65	4.49	7.16	8.73	9.58	8.94
2086	9.47	10.12	9.02	8.71	6.46	5.67	4.39	4.49	7.14	8.77	9.64	9.16
2087	9.21	10.54	9.48	8.75	6.7	5.78	4.49	4.54	6.91	8.14	9.37	9.09
2088	9.55	10.54	9.39	8.71	6.49	5.6	4.5	4.6	7.09	8.24	9.52	8.65
2089	8.98	9.24	8.62	8.08	6.5	5.63	4.37	4.49	7.13	8.53	9.39	8.68
2090	9.27	10.47	9.11	8.5	6.49	5.86	4.39	4.39	7.05	8.72	9.81	9.08
2091	9.48	10.69	9.56	9.24	6.61	5.81	4.88	4.85	7.17	8.68	9.23	8.55
2092	9.24	10.54	9.3	8.58	6.48	5.55	4.39	4.65	7.09	8.46	9	8.55
2093	9.2	10.18	8.62	8.26	5.88	5.64	4.39	4.36	7.29	8.54	8.78	8.61
2094	9.25	10.36	8.68	8.34	6.3	5.71	4.42	4.35	7.09	8.39	9.5	8.96
2095	10.16	10.48	9.66	9.29	7.24	5.97	4.6	4.99	7.32	9	9.81	8.95
2096	9.24	10.66	9.1	8.25	6.47	5.69	4.53	4.33	7.08	8.42	8.86	8.54
2097	8.98	10.44	9.27	8.05	5.72	5.39	4.19	4.16	7.06	8.74	9.63	8.55
2098	9.25	9.95	9.15	8.28	5.87	5.54	4.38	4.67	7.14	8.79	9.48	8.98
2099	9.17	10.23	8.57	8.27	5.81	5.57	4.05	4.3	7.08	8.36	8.79	8.3
2100	9.17	10.24	9.12	8.49	6.44	5.82	4.39	4.26	7.09	8.04	8.9	8.55
<b>Promedio</b>	<b>9.4</b>	<b>10.3</b>	<b>9.2</b>	<b>8.6</b>	<b>6.5</b>	<b>5.7</b>	<b>4.4</b>	<b>4.5</b>	<b>7.2</b>	<b>8.6</b>	<b>9.4</b>	<b>8.8</b>
<b>N° de Datos</b>	<b>71</b>											
<b>Desvest</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.3</b>
<b>Maxima</b>	<b>10.5</b>	<b>10.9</b>	<b>9.9</b>	<b>9.6</b>	<b>7.4</b>	<b>6.1</b>	<b>5.1</b>	<b>5.0</b>	<b>8.0</b>	<b>9.5</b>	<b>10.1</b>	<b>10.3</b>
<b>Mínima</b>	<b>8.55</b>	<b>9.20</b>	<b>8.04</b>	<b>7.40</b>	<b>5.21</b>	<b>5.37</b>	<b>3.88</b>	<b>4.00</b>	<b>6.68</b>	<b>7.77</b>	<b>8.43</b>	<b>8.28</b>



**Anexo 5: Caudales mensuales en condiciones de cambio climático**

<b>CAUDALES MEDIOS MENSUALES 2030-2060 AWWI-CM-1-1-MR - 4.5(m3/s)</b>												
Cuenca : Ilave			Region : Puno			Latitud : 16°4'59.99"						
Altitud : 3824-5558 msnm			Provincia : Ilave			Longitud : 69°40'0.01"						
			Distrito : Ilave									
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2030	213.6	123.7	69.6	29.0	9.5	4.3	2.0	0.9	0.6	1.2	1.2	1.8
2031	16.1	84.5	46.1	35.1	10.7	7.1	3.2	1.4	0.7	0.9	1.0	2.3
2032	8.0	119.1	55.8	23.9	8.2	3.7	1.7	0.8	0.4	0.4	0.7	2.2
2033	6.3	31.4	55.2	28.3	11.1	9.2	4.2	1.9	1.6	3.1	10.6	17.3
2034	24.3	142.4	132.3	46.1	14.2	7.1	3.3	1.5	0.7	0.9	2.7	7.0
2035	26.8	144.8	74.3	23.3	7.8	5.4	2.4	1.1	0.5	0.7	2.3	5.4
2036	26.0	35.6	30.4	19.2	6.7	3.2	1.5	0.7	0.3	0.5	0.7	1.7
2037	6.9	115.3	52.9	18.8	7.0	3.7	1.7	0.8	0.7	2.7	10.7	16.0
2038	38.8	139.7	214.4	75.9	19.4	7.7	3.4	1.5	0.7	0.8	0.9	1.5
2039	58.1	193.6	88.0	31.3	9.6	4.0	1.8	0.8	0.5	0.9	32.9	32.0
2040	46.4	75.5	40.2	30.8	10.0	4.7	2.1	0.9	0.5	0.7	0.9	0.8
2041	3.2	92.8	45.9	21.0	7.2	3.6	1.6	0.7	0.5	0.8	1.0	1.7
2042	12.4	24.1	20.7	9.9	3.6	1.8	0.9	0.4	0.3	0.6	1.0	3.2
2043	8.1	134.5	94.3	33.7	10.5	7.3	3.3	1.5	0.7	0.8	1.7	1.6
2044	5.1	28.7	25.6	15.3	6.7	3.0	1.4	0.6	0.3	0.3	0.3	0.1
2045	0.4	44.8	34.3	17.6	6.1	3.0	1.4	0.6	0.4	0.9	2.3	6.2
2046	13.9	52.2	40.1	32.7	10.8	5.1	2.4	1.1	0.6	1.4	4.3	6.3
2047	90.1	227.8	103.0	39.8	12.1	5.8	2.6	1.2	0.6	0.7	1.3	4.3
2048	12.5	115.8	60.3	21.5	7.0	3.0	1.3	0.6	0.3	0.2	0.4	0.7
2049	3.3	26.2	24.2	10.6	4.1	1.9	0.9	0.4	0.2	0.5	2.5	7.2
2050	15.6	157.7	106.9	39.9	14.3	8.4	3.7	1.6	1.0	2.0	35.8	32.7
2051	37.1	176.4	113.1	38.5	12.8	5.3	2.3	1.1	0.6	0.9	1.0	2.6
2052	18.5	93.5	93.4	27.1	8.5	3.8	1.7	0.8	0.4	0.4	0.8	1.3
2053	7.5	110.6	68.4	27.3	8.7	5.2	2.4	1.1	0.7	1.2	2.2	5.9
2054	83.8	118.0	74.7	19.8	6.6	2.8	1.3	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1
2055	0.6	3.4	5.9	2.8	1.2	0.6	0.3	0.2	0.1	0.3	1.4	4.8
2056	74.9	218.6	123.2	60.4	16.6	7.7	3.3	1.5	0.8	1.1	1.5	4.0
2057	76.1	151.6	100.1	28.3	10.0	4.3	2.0	0.9	0.4	0.5	0.4	1.5
2058	5.9	47.8	42.8	18.8	6.9	3.3	1.5	0.7	0.4	0.4	1.7	4.4
2059	14.4	127.8	100.4	31.3	10.5	4.4	2.0	0.9	0.6	0.8	1.4	2.3
2060	5.5	13.1	16.1	7.3	2.7	1.3	0.6	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5
<b>PROM</b>	<b>45.00</b>	<b>115.30</b>	<b>78.62</b>	<b>45.80</b>	<b>12.60</b>	<b>4.58</b>	<b>2.06</b>	<b>0.93</b>	<b>0.53</b>	<b>0.87</b>	<b>7.60</b>	<b>12.60</b>
<b>MAX</b>	<b>213.65</b>	<b>227.80</b>	<b>214.45</b>	<b>75.86</b>	<b>19.37</b>	<b>9.16</b>	<b>4.22</b>	<b>1.94</b>	<b>1.59</b>	<b>3.14</b>	<b>35.80</b>	<b>32.72</b>
<b>MIN</b>	<b>0.41</b>	<b>3.44</b>	<b>5.93</b>	<b>2.81</b>	<b>1.18</b>	<b>0.65</b>	<b>0.31</b>	<b>0.15</b>	<b>0.10</b>	<b>0.11</b>	<b>0.24</b>	<b>0.11</b>



CAUDALES MEDIOS MENSUALES 2070-2100 AWWI-CM-1-1-MR-4.5 (m3/s)												
Cuenca : Ilave			Region : Puno			Latitud : 16°4'59.99"						
Altitud : 3824-5558 msnm			Provincia : Ilave			Longitud : 69°40'0.01"						
			Distrito : Ilave									
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2070	264.3	327.8	116.0	32.5	10.0	4.3	1.9	0.8	0.4	0.7	0.7	1.2
2071	8.6	36.5	97.0	27.7	8.6	5.1	2.2	1.0	0.5	0.5	0.4	1.1
2072	11.8	123.6	70.7	30.2	9.3	4.6	2.1	0.9	0.5	1.0	43.2	38.9
2073	59.7	209.4	120.4	57.2	17.2	9.5	4.1	1.8	0.9	1.6	19.4	18.0
2074	104.8	80.5	79.5	32.4	10.1	7.3	3.2	1.4	0.8	0.9	0.9	1.6
2075	6.0	117.7	126.4	31.1	9.6	4.0	1.8	0.8	0.4	0.6	0.6	0.3
2076	1.0	14.0	14.8	16.1	5.5	2.5	1.1	0.5	0.3	0.3	3.4	6.9
2077	86.2	135.7	54.6	35.2	11.5	5.1	2.2	1.0	0.6	0.8	2.5	5.8
2078	13.7	22.1	19.0	7.2	2.7	1.3	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
2079	0.8	15.3	11.4	5.2	2.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.3	4.5	10.0
2080	21.1	66.1	83.8	48.2	14.4	7.6	3.3	1.4	0.9	1.9	3.2	6.1
2081	22.1	70.3	55.8	22.8	7.4	3.4	1.5	0.7	0.3	0.5	1.2	3.1
2082	26.6	151.4	210.3	41.7	13.9	6.6	2.8	1.2	0.8	1.1	1.0	1.9
2083	6.0	38.1	39.4	18.9	6.4	2.8	1.3	0.6	0.3	0.4	0.5	0.2
2084	8.1	19.0	17.7	12.2	4.3	2.0	1.0	0.4	0.2	0.3	0.7	1.1
2085	20.0	95.2	46.5	23.2	8.3	3.6	1.6	0.7	0.3	0.4	0.4	0.4
2086	2.0	24.5	35.5	14.8	5.2	2.3	1.0	0.5	0.2	0.2	0.2	0.7
2087	4.9	48.8	32.3	12.9	5.8	2.8	1.3	0.6	0.4	0.8	13.7	12.7
2088	20.8	137.9	86.2	59.4	15.9	7.6	3.2	1.4	0.7	0.7	0.8	1.9
2089	6.2	49.7	38.8	14.3	5.0	2.2	1.0	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2
2090	0.7	11.2	23.3	12.5	4.5	3.1	1.4	0.6	0.3	0.4	9.8	15.1
2091	36.2	94.1	182.4	68.3	17.0	10.8	5.4	2.3	1.1	1.0	3.6	5.4
2092	39.8	161.8	107.4	35.4	10.5	4.4	1.9	0.9	0.5	0.6	0.7	0.6
2093	2.5	32.9	25.5	10.9	3.9	1.7	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
2094	0.4	11.6	13.7	8.4	3.5	1.8	0.9	0.4	0.3	0.6	1.9	5.3
2095	35.1	159.8	218.6	42.5	12.2	5.2	2.3	1.0	0.5	0.6	1.7	4.7
2096	12.0	123.4	91.3	30.2	10.3	4.2	1.8	0.8	0.5	0.7	0.8	0.3
2097	1.6	56.1	45.6	16.1	5.4	3.2	1.4	0.6	0.3	0.3	0.4	1.5
2098	13.6	39.2	42.8	16.7	6.1	3.0	1.5	0.7	0.5	1.2	4.5	9.1
2099	23.2	127.5	74.2	22.9	8.1	5.1	2.2	1.0	0.5	0.5	2.3	5.4
2100	11.9	104.7	68.4	36.4	10.0	8.1	3.3	1.4	0.8	1.0	1.1	1.1
<b>PROM</b>	<b>52.60</b>	<b>119.30</b>	<b>72.55</b>	<b>43.60</b>	<b>10.30</b>	<b>4.39</b>	<b>1.95</b>	<b>0.86</b>	<b>0.47</b>	<b>0.65</b>	<b>4.03</b>	<b>11.50</b>
<b>MAX</b>	<b>264.34</b>	<b>327.84</b>	<b>218.62</b>	<b>68.33</b>	<b>17.17</b>	<b>10.82</b>	<b>5.36</b>	<b>2.30</b>	<b>1.06</b>	<b>1.85</b>	<b>43.20</b>	<b>38.91</b>
<b>MIN</b>	<b>0.39</b>	<b>11.20</b>	<b>11.36</b>	<b>5.18</b>	<b>2.04</b>	<b>0.96</b>	<b>0.45</b>	<b>0.22</b>	<b>0.13</b>	<b>0.11</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>



<b>CAUDALES MEDIOS MENSUALES 2030-2060 AWWI-CM-1-1-MR-SSP5 8.5 (m3/s)</b>												
Cuenca : Ilave			Region : Puno			Latitud : 16°4'59.99"						
Altitud : 3824-5558 msnm			Provincia : Ilave			Longitud : 69°40'0.01"						
			Distrito : Ilave									
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2030	158.2	303.6	90.6	29.6	9.6	4.2	1.9	0.9	0.4	0.4	0.5	0.5
2031	4.1	28.7	37.4	15.6	6.2	3.3	1.5	0.7	0.4	1.0	10.5	14.9
2032	21.5	140.4	68.2	22.5	7.5	3.4	1.6	0.7	0.3	0.3	0.3	0.1
2033	0.5	51.7	37.6	20.1	6.8	2.9	1.3	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1
2034	0.5	13.1	34.3	14.6	5.2	4.6	2.7	1.3	1.2	3.6	28.3	28.9
2035	139.8	247.2	106.1	60.9	18.2	11.7	5.0	2.2	1.4	1.5	2.6	5.6
2036	12.6	67.6	58.7	27.6	9.8	4.3	1.9	0.9	0.5	0.6	0.7	1.4
2037	5.2	13.3	16.8	8.1	3.4	1.6	0.7	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1
2038	0.4	3.2	3.9	2.4	1.0	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
2039	2.4	73.8	70.5	27.6	10.0	4.7	2.2	1.0	0.5	0.4	0.3	0.1
2040	0.9	12.0	32.3	21.0	7.5	3.8	2.1	0.9	0.7	1.2	14.9	21.8
2041	183.5	279.5	90.0	27.6	10.5	4.7	2.3	1.0	0.6	0.6	0.6	0.3
2042	1.0	4.5	12.2	6.5	2.6	1.3	0.7	0.4	0.3	0.9	34.5	31.1
2043	79.5	196.5	92.7	28.3	9.4	4.2	1.9	0.8	0.4	0.3	0.3	0.1
2044	0.7	18.4	23.6	15.4	5.4	2.4	1.2	0.5	0.3	0.5	0.5	2.6
2045	43.1	180.4	152.4	56.4	15.7	7.9	3.5	1.6	0.9	1.6	2.1	3.5
2046	18.2	92.0	123.7	56.3	16.2	10.9	4.5	2.0	1.0	1.2	4.4	9.3
2047	60.8	182.5	109.1	35.5	10.5	5.6	2.5	1.1	0.7	0.7	0.7	1.6
2048	5.3	48.5	45.9	20.0	6.7	2.9	1.3	0.6	0.4	0.5	1.1	1.0
2049	3.7	16.0	28.5	12.4	4.5	2.0	0.9	0.4	0.2	0.4	9.8	15.4
2050	55.0	190.2	157.2	40.9	11.9	5.6	2.5	1.1	0.6	0.7	0.7	0.3
2051	1.4	58.7	73.1	42.7	12.4	5.8	2.6	1.2	0.6	0.7	0.7	0.6
2052	7.6	54.6	69.8	27.7	11.2	5.2	2.4	1.1	0.7	1.8	5.6	26.7
2053	99.5	196.9	217.3	49.2	13.9	6.0	2.7	1.2	0.6	0.8	1.3	2.4
2054	7.8	105.5	71.9	28.3	9.0	3.9	1.8	0.8	0.4	0.7	0.8	1.8
2055	20.3	49.4	60.2	38.0	12.3	8.6	3.7	1.6	0.9	1.7	16.8	22.8
2056	58.4	207.9	131.8	76.5	21.0	10.0	4.3	2.0	1.5	1.5	6.9	12.3
2057	17.2	143.2	62.3	33.3	10.2	4.5	2.0	0.9	0.4	0.5	0.7	0.6
2058	5.7	45.5	31.8	13.9	5.2	2.3	1.1	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2
2059	1.5	68.7	48.5	30.3	10.0	4.3	1.9	0.9	0.5	0.7	32.9	33.9
2060	59.3	159.4	65.3	23.0	7.7	3.1	1.3	0.6	0.3	0.3	0.7	1.9
<b>PROM</b>	<b>34.70</b>	<b>104.93</b>	<b>71.73</b>	<b>29.43</b>	<b>9.41</b>	<b>4.71</b>	<b>2.13</b>	<b>0.97</b>	<b>0.56</b>	<b>0.83</b>	<b>5.80</b>	<b>7.81</b>
<b>MAX</b>	<b>183.53</b>	<b>303.63</b>	<b>217.33</b>	<b>76.48</b>	<b>21.01</b>	<b>11.70</b>	<b>5.04</b>	<b>2.22</b>	<b>1.49</b>	<b>3.56</b>	<b>34.55</b>	<b>33.85</b>
<b>MIN</b>	<b>0.43</b>	<b>3.23</b>	<b>3.86</b>	<b>2.40</b>	<b>1.04</b>	<b>0.51</b>	<b>0.25</b>	<b>0.12</b>	<b>0.06</b>	<b>0.10</b>	<b>0.18</b>	<b>0.09</b>



CAUDALES MEDIOS MENSUALES 2070-2100 AWWI-CM-1-1-MR - SPP4 8.5 (m <sup>3</sup> /s)												
Cuenca : Ilave				Region : Puno				Latitud : 16°4'59.99"				
Altitud : 3824-5558 msnm				Provincia : Ilave				Longitud : 69°40'0.01"				
				Distrito : Ilave								
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2070	153.5	364.6	126.2	40.7	15.7	6.8	3.1	1.4	0.9	1.5	1.6	1.0
2071	15.0	71.1	47.7	23.7	8.3	3.5	1.5	0.7	0.3	0.3	0.3	0.8
2072	4.0	136.8	56.7	21.0	7.7	3.9	1.8	0.8	0.5	0.5	2.5	4.6
2073	37.1	72.3	41.4	15.7	5.8	2.5	1.2	0.5	0.3	0.3	0.2	0.1
2074	0.5	13.9	15.4	8.0	3.6	2.0	1.0	0.5	0.3	0.5	2.0	5.2
2075	90.7	234.4	102.0	30.6	9.5	4.5	2.0	0.9	0.7	0.6	0.9	1.6
2076	4.8	65.6	88.3	31.8	10.5	7.1	3.2	1.4	0.9	1.1	1.1	0.9
2077	8.6	54.2	34.7	14.0	5.4	3.4	1.5	0.7	0.3	0.5	6.9	13.6
2078	39.2	83.6	156.6	43.7	14.7	7.3	3.2	1.4	0.7	0.6	0.6	2.3
2079	50.1	52.8	36.4	18.1	6.6	2.8	1.3	0.6	0.4	0.9	1.6	2.6
2080	73.1	216.8	57.9	20.3	6.8	3.0	1.4	0.6	0.3	0.3	0.3	1.4
2081	15.1	76.6	85.6	26.9	8.6	3.7	1.7	0.7	0.4	0.5	2.5	5.8
2082	36.7	111.9	78.1	37.4	11.5	4.9	2.2	1.0	0.7	1.1	1.2	1.0
2083	9.0	112.0	64.8	21.5	7.8	3.4	1.6	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3
2084	5.5	13.9	14.1	6.8	2.8	1.3	0.6	0.3	0.2	0.3	39.9	23.7
2085	122.7	262.7	125.8	34.2	10.4	4.3	1.9	0.9	0.4	0.6	0.7	0.8
2086	4.0	75.1	41.6	15.8	5.5	2.4	1.1	0.5	0.3	0.2	7.6	9.9
2087	51.0	117.7	150.6	42.3	13.5	6.8	3.1	1.4	0.7	0.9	9.4	15.6
2088	98.6	131.9	192.5	48.8	15.1	6.2	2.8	1.2	0.7	0.8	3.2	7.6
2089	42.8	212.9	252.2	69.9	22.4	9.7	4.2	1.9	0.9	0.6	0.4	0.2
2090	0.6	3.3	10.7	4.8	2.0	0.9	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
2091	1.7	72.5	185.1	40.3	12.0	5.8	2.5	1.1	0.5	0.9	53.2	40.8
2092	67.0	64.4	94.9	27.2	8.7	6.5	2.9	1.3	0.6	0.8	0.8	1.7
2093	15.3	27.9	49.4	17.1	6.3	2.8	1.3	0.6	0.3	0.3	0.4	0.3
2094	6.0	15.6	17.6	8.8	3.4	1.7	0.9	0.4	0.2	0.3	0.8	0.8
2095	3.4	32.9	41.5	25.7	9.0	4.2	1.8	0.8	0.4	0.4	0.5	0.5
2096	2.4	59.6	51.8	39.4	11.6	5.0	2.3	1.0	0.5	0.5	0.5	0.4
2097	2.5	35.8	29.8	17.9	6.2	2.8	1.3	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3
2098	1.7	72.7	61.4	29.3	10.9	4.6	2.1	0.9	0.5	0.4	0.5	0.7
2099	49.4	120.0	85.3	31.4	9.8	4.1	1.9	0.9	0.4	0.6	11.4	16.4
2100	44.8	175.2	101.9	31.7	9.9	3.8	1.6	0.7	0.3	0.3	0.3	0.4
<b>PROM</b>	<b>34.09</b>	<b>101.95</b>	<b>80.57</b>	<b>27.26</b>	<b>9.10</b>	<b>4.25</b>	<b>1.91</b>	<b>0.86</b>	<b>0.47</b>	<b>0.55</b>	<b>4.90</b>	<b>5.21</b>
<b>MAX</b>	<b>153.54</b>	<b>364.61</b>	<b>252.20</b>	<b>69.87</b>	<b>22.37</b>	<b>9.73</b>	<b>4.21</b>	<b>1.89</b>	<b>0.95</b>	<b>1.51</b>	<b>53.21</b>	<b>40.77</b>
<b>MIN</b>	<b>0.50</b>	<b>3.25</b>	<b>10.66</b>	<b>4.83</b>	<b>1.95</b>	<b>0.91</b>	<b>0.43</b>	<b>0.20</b>	<b>0.10</b>	<b>0.12</b>	<b>0.12</b>	<b>0.11</b>



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

Por el presente documento, Yo 202 Karina Coaquira Rayta  
identificado con DNI 73513414 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:

“ Estimación de la oferta hídrica en la cuenca del río Ilave en condiciones de cambio climático ”

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 10 de Julio del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Luz Karina Coaquira Mayta  
identificado con DNI 93813414 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:  
" Estimación de la oferta hídrica en la cuenca del río  
Flave en condiciones de cambio climático "

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 **suyas 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 10 de julio del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella