



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA



**INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA
DISPONIBILIDAD HIDRICA EN LA CUENCA DEL RIO NUÑO A**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JOSE LUIS LARICO PARI

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRICOLA

PUNO – PERÚ

2024



JOSE LUIS LARICO PARI

INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD HIDRICA EN LA CUENCA DEL RIO NUÑO

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:416564888

Fecha de entrega
16 dic 2024, 11:07 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
16 dic 2024, 11:14 a.m. GMT-5

Nombre de archivo
00.00 TESIS DE LARICO corregido (final).pdf

Tamaño de archivo
3.6 MB

83 Páginas

13,986 Palabras

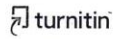
76,279 Caracteres



M.Sc. Percy Alcántara Guzmán Choque
Esp. Gestión de Ciencias Hidrográficas
CIP-N° 54418



D.Sc. EDUARDO VELARDE COAQUIRA
Director Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería Agrícola - UVA - Puno



16% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Fuentes principales

- 15% Fuentes de Internet
- 3% Publicaciones
- 7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

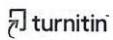
Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



M. Sc. Percy Asturo Gámez Choque
Esp. Sesión de Ciencias Hidrográficas
CIP N° 54418



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
UNIDAD DE INVESTIGACION
D. Sc. GILBERTO VELARDE COAGUIRA
Director Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería Agrícola - UNA - Puno





DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de llegar este momento tan importante de mi formación profesional y lograr uno de mis sueños mas anelados en mi vida.

A mis padres, **Jose Larico Ccachura** y **Catalina Pari Mayta**, por su amor, orientación y apoyo continuo, quienes con su sacrificada e invaluable labor hicieron posible mi deseo de ser profesional.

A mis hermanas **Rubi** y **Sheyla**, por su apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento.

Jose Luis Larico Pari



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceras palabras de agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano, por ser el Alma Mater de mi formación y una fuente de conocimientos para poder realizar este proyecto de investigación.

Al M.sc. Percy Arturo Ginez Choque por su orientación, asesoramiento y su continuo apoyo en la elaboración de este trabajo de investigación.

A los miembros del jurado: M.sc. Oscar Raul Mamani Luque, Dr. Isidro Alberto Pilares Hualpa, M.sc. Melania Mabel Zapana Quispe por sus correcciones y comprensión en la evaluación durante la elaboración del presente estudio.

Jose Luis Larico Pari



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRONIMOS	
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA	17
1.2.1. Problema general.....	18
1.2.2. Problemas específicos	19
1.3. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA.....	19
1.4. HIPÓTESIS	21
1.4.1. Hipótesis general.....	21
1.4.2. Hipótesis específicas	21
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.....	21
1.5.1. Objetivo general.....	21
1.5.2. Objetivos específicos	21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1.	ANTECEDENTES	23
2.2.	MARCO CONCEPTUAL	25
2.2.1.	El ciclo hidrológico	25
2.2.2.	Cuenca hidrográfica	27
2.2.3.	Precipitación.....	29
2.3.	MODELO HIDROLÓGICO SWAT.....	30
2.4.	INDICES DE PERFORMANCE.....	30

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	AREA DE ESTUDIO.....	33
3.2.	MATERIALES.....	34
3.2.1.	Información Geografica	34
3.2.2.	Información Climatica.....	35
3.3.	MÉTODO	37

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	VARIABLES NECESARIAS PARA EL MODELO SWAT	39
4.2.	CALIBRACIÓN DEL MODELO	45
4.3.	CARACTERIZAR LOS ESCANERIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	46
4.4.	DISCUSION DE LOS RESULTADOS.....	55
4.4.1.	Variables de Entrada del Modelo SWAT	55
4.4.2.	Uso del Suelo	55
4.4.3.	Tipo de Suelo	56
4.4.4.	Análisis de Pendientes del Terreno	56
4.4.5.	Tendencias de Precipitaciones	56



4.4.6. Impacto del Cambio Climático	57
4.4.7. Disponibilidad hídrica	57
V. CONCLUSIONES.....	59
VI. RECOMENDACIONES	61
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS.....	69

Área: Hidrología Aplicada.

Tema: Recursos Hídricos.

FECHA DE SUSTENTACION: 20 de diciembre de 2024.



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Información geográfica suministrada al modelo.....	35
Tabla 2 Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrográficas del estudio.	36
Tabla 3 Parámetros para la calibración del modelo	45
Tabla 4 Indicadores de la Calibración del modelo.....	46
Tabla 5 Indicadores de la Validación del modelo.....	46
Tabla 6 Comportamiento del escenario RCP 4.5 (mm).....	47
Tabla 7 Comportamiento del escenario RCP 8.5 (mm).....	49
Tabla 8 Disponibilidad hídrica en las subcuencas involucradas para el escenario RCP 4.5.....	51
Tabla 9 Disponibilidad hídrica en las subcuencas involucradas para el escenario RCP 8.5.....	52



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Proceso del ciclo hidrológico del agua	27
Figura 2 Representación geográfica de la cuenca hidrográfica.....	28
Figura 3 Representación de la precipitación pluvial	29
Figura 4 Ubicación de la cuenca nuñoa.....	34
Figura 5 Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	37
Figura 6 Mapa de Ecosistemas	40
Figura 7 Mapa de Tipo de Suelo	41
Figura 8 Mapa de Pendientes	42
Figura 9 Mapa de HRUs.....	43
Figura 10 Comportamiento estacional de las estaciones pluviométricas.	44
Figura 11 Comportamiento del escenario RCP 4.5	48
Figura 12 Comportamiento del escenario RCP 8.5	49
Figura 13 Subcuencas del área de estudio.....	50
Figura 14 Script para el Desescalada estadístico.....	70
Figura 15 Representación lineal	71
Figura 16 Representación de dispersión de puntos	72
Figura 17 CFD de la data observada vs data climática	72
Figura 18 Representación lineal de la data corregida.....	73
Figura 19 Representación por dispersión de puntos de la data corregida	74
Figura 20 CFD de la data observada vs climática vs desescalada.....	74



ACRÓNIMOS

AGC:	Agencia de Gestión de Cuencas
AAA:	Autoridades Administrativas del Agua
ALA:	Administración Local del Agua
ANA:	Autoridad Nacional del Agua
DGCRH	Dirección de Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos
DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental - Ministerio de Salud
EPS	Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento
IGP	Instituto Geofísico del Perú
MINAM	Ministerio del Ambiente
MINEM	Ministerio de Energía y Minas
MINSA	Ministerio de Salud
MVCS	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
PAVER	Programa de Adecuación de Vertimientos y Reuso de Agua Residual
PCM	Presidencia del Consejo de Ministros
PLANAA	Plan Nacional de Acción Ambiental
PMGRH	Proyecto de Modernización de la Gestión de los Recursos Hídricos
P y ENRH	Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SNGA	Sistema Nacional de Gestión Ambiental
SNGRH	Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
OMM	Organización Mundial de Meteorología



ONU Organización de las Naciones Unidas

RH Recursos Hídricos



RESUMEN

El agua es el factor principal para el desarrollo de una población, este recurso cada vez se ve afectado por el incremento de la población y sus actividades productivas y económicas, modificando el clima y afectando el recurso hídrico, el clima y el ciclo hidrológico están estrechamente vinculados; de tal suerte que el incremento de la temperatura y la variación en la precipitación esperados para los escenarios planteado en el modelo SWAT fue calibrado y validado para un periodo total de 23 años (1986 - 2008) obteniendo valores de Nash-Sutcliffe (NSE) igual a 64% y coeficientes de determinación (R^2) igual a 65 por ciento en ambas proyecciones detalladas sobre las posibles variaciones en los patrones de precipitación a lo largo del tiempo. Los resultados indican un aumento gradual en las precipitaciones mensuales a partir del año 2020, con incrementos más pronunciados en los años 2030, 2040 y 2050. En particular, se observa un notable incremento en la precipitación durante los meses de marzo, abril y noviembre, mientras que los meses de estiaje (mayo a septiembre) presentan una disminución en las precipitaciones.

Palabras clave, (disponibilidad hídrica, cambio climático, Nuñoa, modelo semidistribuido, SWAT)



ABSTRACT

Water is the main factor for the development of a population, this resource is increasingly affected by the increase in the population and its productive and economic activities, modifying the climate and affecting the water resources, the climate and the hydrological cycle are closely related. linked; in such a way that the increase in temperature and variation in precipitation expected for the scenarios proposed in the SWAT model was calibrated and validated for a total period of 23 years (1986 - 2008) obtaining Nash-Sutcliffe (NSE) values equal to at 64% and coefficients of determination (R²) equal to 65 percent in both show detailed projections on possible variations in precipitation patterns over time. The results indicate a gradual increase in monthly precipitation starting in 2020, with more pronounced increases in the years 2030, 2040 and 2050. In particular, a notable increase in precipitation is observed during the months of March, April and November, while the dry months (May to September) present a decrease in precipitation.

Keywords, (water availability, climate change, Nuñoa, semi-distributed model, SWAT).



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La disponibilidad de recursos hídricos es esencial para la sostenibilidad de la vida humana y el progreso económico. Sin embargo, el cambio climático está alterando los patrones de precipitación y escurrimiento en muchas regiones del mundo, lo que puede afectar la disponibilidad hídrica en el futuro. La cuenca del río del río Nuñoa es una de las regiones más vulnerables a los impactos del cambio climático en la disponibilidad hídrica.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), en su quinto informe (AR5) ha definido cuatro nuevos escenarios de emisión de carbono, denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), hacia el año 2100. Las predicciones del clima señalan incrementos en la temperatura en toda América Latina; en los contextos de emisiones moderadas y altas (RCP 4.5 y 8.5), el calentamiento oscila entre $+1,7^{\circ}\text{C}$ y $+6,7^{\circ}\text{C}$ en América del Sur. Y, las variaciones de las precipitaciones tienen un incremento del 25% en el sureste (IPCC, 2013).

Datos históricos revelan que, entre 1990 y 2020, el caudal medio anual en la cuenca del río Nuñoa ha disminuido en un 15%, según registros de la estación hidrométrica local. Asimismo, eventos extremos como sequías severas e inundaciones han aumentado en frecuencia y magnitud, afectando las actividades económicas de la región. Por ejemplo, durante el fenómeno de El Niño de 2017, las inundaciones causaron



pérdidas superiores a 10 millones de soles en la producción agrícola y ganadera, según datos del Ministerio de Economía y Finanzas.

La cuenca del río Nuñoa se halla expuesta a diversos eventos extremos, incluyendo el fenómeno de El Niño, sequías e inundaciones, lo que la hace altamente vulnerable a los impactos del cambio climático. Su relevancia para la economía local se fundamenta en las actividades de agricultura y ganadería.

La cuenca del río Nuñoa abastece a más de 20,000 habitantes y riega alrededor de 5,000 hectáreas de cultivo. Su relevancia para la economía local se fundamenta en las actividades de agricultura y ganadería, sectores que dependen directamente de la disponibilidad hídrica. Sin embargo, la región se halla expuesta a diversos eventos extremos, incluyendo el fenómeno de El Niño, sequías e inundaciones, lo que la hace altamente vulnerable a los impactos del cambio climático.

Actualmente, los modelos hidrológicos se han convertido en una valiosa herramienta para hacer frente a los diversos problemas en los sistemas hidrológicos. Además, el SIG ha promovido la utilización de modelos hidrológicos para estudiar los impactos de la variación climática en el equilibrio hídrico. Estos modelos simulan el comportamiento hidrológico de una cuenca y su vínculo directo con el clima, la topografía, la geología y la utilización del suelo, además del impacto de las actividades humanas.

Por lo tanto, en la presente investigación se evaluó la disponibilidad hídrica en la cuenca Nuñoa con el modelo SWAT y los modelos de circulación global (MCG) HadGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0 en las rutas de concentración representativa RCP 4.5 y 8.5. Además, se simularon valores de evapotranspiración referencial (ET_o) en futuros



contextos bajo condiciones de cambio climático para proyectar escenarios que permitan una mejor gestión de los recursos hídricos de la cuenca.

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

La disponibilidad hídrica en la cuenca del río Nuñoa se enfrenta a un futuro incierto debido al cambio climático, lo que puede afectar la capacidad de la cuenca para satisfacer las demandas de agua de la población, la agricultura y la ganadería. Sin embargo, no se conoce con precisión cómo afectarán los cambios climáticos futuros la disponibilidad hídrica en la cuenca, ni qué estrategias pueden ser implementadas para mejorar la disponibilidad hídrica y reducir la vulnerabilidad a la escasez de agua en la región. La sequía representa uno de los peligros naturales más calamitosos, ya que provoca la incapacidad de la producción de alimentos, el agotamiento de los pastos, la perturbación de los mercados y, en los casos más graves, provoca la mortalidad tanto de los seres humanos como del ganado; este fenómeno se manifiesta en varias zonas ecológicas de regiones elevadas, pero sus atributos muestran una variabilidad considerable entre las diferentes zonas ecológicas, lo que lo convierte en un fenómeno caracterizado tanto por dimensiones temporales como espaciales.

La sequía no presenta epicentro ni trayectorias definidas, sino que tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio, provocando que el agua disponible sea insuficiente para satisfacer las distintas necesidades humanas y de los ecosistemas, considerándose como uno de los fenómenos naturales que afecta a más personas en el mundo (Ortega, Velasco, Guitron, Arreguin, & Lopez, 2014).

El fenómeno de la sequía en la región de Puno representa una consideración primordial en la planificación estratégica para la asignación óptima de los recursos hídricos, debido a la naturaleza impredecible de este fenómeno ambiental tanto en su



dimensión temporal como espacial. En consecuencia, las sequías son manifestaciones de variaciones y anomalías climáticas que precipitan un déficit de precipitaciones, particularmente en las laderas occidentales de los Andes, a una altura de 2200 metros sobre el nivel del mar, en los valles interandinos y en la cuenca del lago Titicaca, a una altitud de 3820 metros sobre el nivel del mar. Nuestro enfoque en estos lugares está justificado por el importante impacto en los medios de vida humanos y económicos; sin embargo, las sequías se manifiestan en casi todas las zonas climáticas, aunque las características específicas inherentes a cada región pueden variar sustancialmente. Las sequías se desarrollan en un periodo largo de tiempo (Meses, Años) por diferentes causas que dependen de las características climáticas propias de cada región, inclusive del uso del agua, del uso del suelo y de las actividades agrícolas que se desarrollan (Ticona, 2017).

En áreas con restricciones o escasez de agua y gran variabilidad climática, los agricultores se encuentran cada día con el desafío de producir al menos para mantener a sus familias en vida; el cambio climático intensifica aún más esta circunstancia. Para subsistir en este entorno socioecológico y biofísico, utilizan diversas tácticas, prácticas y tecnologías. Por ejemplo, los agricultores se ajustan mediante la modificación de las fechas de plantación, la utilización de variedades con ciclos distintos, la aplicación de cultivos tolerantes o resistentes, el riego y la gestión de las cosechas. Se han propuesto las siguientes cuestiones:

1.2.1. Problema general

¿De que manera influye el cambio climático en la disponibilidad hídrica de la sub cuenca del rio Nuñoa?



1.2.2. Problemas específicos

¿De qué manera influye las variables climatológicas en un modelo hidrológico?

¿ de que manera influye una buena calibración y ajuste de parametro del modelo SWAT para la disponibilidad hidrica?

¿De qué manera influye los escenarios de cambio climático para la disponibilidad hídrica futura?

1.3. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

Según la Declaración General de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), el Perú se considera vulnerabilidad para los efectos negativos del cambio climático, dado que cuenta con seis de las cinco características de vulnerabilidad establecidas por la convención (MINAM, 2010). Esto indica que nuestro país está altamente expuesto a amenazas porque, según la Convención de las Naciones Unidas para la Prevención de la Desertificación, el 90% de los peruanos vive en regiones áridas, semiáridas y subhúmedas. De hecho, los riesgos del cambio climático no han sido tomados en consideración durante el desarrollo urbano y agrícola del país (UNCCD, 2007).

Según el estudio "Escenarios de Cambio Climático a Nivel Nacional" realizado por el Centro de Predicciones y Estadísticas del SENAMHI, existe una fuerte correlación entre el cambio climático y la disponibilidad de agua, la cual se espera que aumente en un 4% para el año 2020, particularmente en la región norte del Perú. Este estudio propone una representación verosímil del clima futuro bajo escenarios definidos por bandejas de concentración representativas (RCPs), las cuales muestran diversas variaciones en la



concentración de CO₂ producto de la radiación solar, conformando así distintos escenarios de cambio climático (SENAMHI, 2008; IPCC, 2013).

La escasez y calidad del agua puede ser la amenaza más dura para las personas que residen en zonas donde se originan las sequías, además de amenazar los ecosistemas.. Es precisamente por esta razón que resulta difícil proporcionarle un enfoque genérico que contemple todos los aspectos y satisfaga todas las expectativas, por lo que la sequía responde más bien a una particularidad del clima y del medio ambiente, lo que la convierte en un fenómeno con carácter relativo y elusivo (Velasco, Ochoa, & Gutierrez, 2005). En general, las sequías intensas aun con pequeñas o medianas duraciones pueden tener fuertes impactos en la agricultura, mientras sequías de mediana intensidad con largas duraciones pueden tener serios efectos en la provisión de agua (Ge & Cai, 2016); así, las proyecciones globales presentan indicios de una intensificación de las sequías, incremento en la duración y aumento de las áreas bajo sequías a nivel mundial (Trenberth et al., 2014).

Como consecuencia de las influencias climáticas, existe una correlación negativa entre la temperatura y la altitud, mientras que las precipitaciones muestran un gradiente latitudinal y longitudinal, que disminuye de las regiones del norte a las del sur, así como de los sectores del este al oeste. La región de Puno se caracteriza por dos estaciones climáticas claramente identificables: (i) un período de verano, que va de abril a octubre, marcado por días predominantemente despejados, noches significativamente frías y ausencia de precipitaciones; (ii) una estación lluviosa, que va de noviembre a marzo, durante la cual los valles interandinos situados a alturas por debajo de los 3000 metros sobre el nivel del mar experimentan una precipitación anual promedio de menos de 500 mm, mientras que las regiones por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar reciben una precipitación media anual superior a 700 mm.



1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

Disponibilidad hídrica es influenciada por el cambio climático en la cuenca del río Nuñoa.

1.4.2. Hipótesis específicas

El modelo SWAT exige variables climáticas fundamentales como la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración, además de ser señales del efecto del cambio climático en la cuenca del río Nuñoa.

Calibrar los parámetros del modelo SWAT para la disponibilidad hídrica futura con la actual, en la cuenca del río Nuñoa son positivas.

Existe escenarios de cambio climático para la disponibilidad hídrica futura de la cuenca del río Nuñoa.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.5.1. Objetivo general

Determinar disponibilidad hídrica bajo influenciada por el cambio climático en la cuenca del río Nuñoa.

1.5.2. Objetivos específicos

Determinar las variables que son necesarias para el modelo SWAT y que ayuden a predecir, los impactos.

Determinar y calibrar los parámetros del modelo SWAT para la disponibilidad hídrica.



Caracterizar los escenarios de cambio climático para la disponibilidad
hídrica futura de la sub cuenca del río Nuñoa.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Saade, Atieh, Ghanimeh y Golmohammadi (2021) demostraron que el modelo SWAT semidistribuido de base física pudo simular satisfactoriamente el flujo mensual de la cuenca de El Kalb en el Líbano, empleando escenarios de cambio climático para tres RCP y cuatro períodos de 20 años.

Chakilu, Sandor y Zoltan (2020) evaluaron el clima futuro y su impacto en el flujo de la corriente en la subcuenca de la cuenca del Alto Nilo Azul (cuenca de Gumara) utilizando el modelo climático CanESM2 y el modelo de reducción de escala estadística. Sus hallazgos revelaron un incremento en la temperatura máxima y mínima en todos los escenarios para los años 2020, 2050 y 2080, con una mayor tasa de aumento hacia el final del siglo.

Anand y Oinam (2019) calibraron el modelo SWAT entre los años 2010 y 2014 y lo validaron entre 2015 y 2017 en la cuenca del río Manipur, proporcionando un período de calentamiento de 2 años (2008-2009) para la calibración, con el objetivo de desarrollar condiciones adecuadas de agua, suelo y uso de la tierra/cubierta terrestre.

Emam y Koch (2019) investigaron los impactos del cambio climático en los flujos de entrada en la presa de Boukan y la disponibilidad general de agua en la cuenca del río Zarrine, utilizando el modelo hidrológico SWAT. Utilizaron predictores climáticos GCM reducidos por la reducción de escala estadística (temperaturas) y una técnica de corrección de sesgo (precipitación) de mapeo de cuantiles (QM) de coincidencia de CDF no estacionaria para diferentes escenarios climáticos (RCP).



Eromo, Abebe y Murlidhar (2016) utilizaron el modelo SWAT semidistribuido de base física para evaluar el impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de la cuenca del río Omo-Gibe en Etiopía, delineando la cuenca en 21 subcuencas y 270 unidades de respuesta hidrológica (HRU). Identificaron siete parámetros fundamentales (Cn2, ESCO, GWQMN, ALPHA_BF, Revapmn, Ch_K2, SOL_AWC) que controlan los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos.

Bhatta, Shrestha, Shrestha y Talchabhadel (2019) utilizaron el modelo SWAT para cuantificar el impacto del cambio climático en el caudal de la cuenca del río Tamor de Nepal, creando veintisiete escenarios de configuración del modelo con una complejidad variada en función de la población de la subcuenca, las HRU y las EB.

González (2012) realizó una contribución metodológica al estudio del impacto del cambio climático sobre los usos de agua en Europa, centrándose en la agricultura y utilizando diferentes modelos agrícolas y de agua para determinar indicadores de impacto basados en la productividad de cultivos, analizando los escenarios climáticos actuales (1961-1990) y futuros (2071-2100).

Urbay (2022) concluyó que para predecir los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca del río Yauca, es necesario calibrar y aplicar el modelo SWAT utilizando el algoritmo SUFI-2 y evaluando el rendimiento del modelo con el estadístico de Nash. León (2017) investigó la disponibilidad hídrica del río Piura bajo la influencia del cambio climático utilizando el modelo SWAT, calibrándolo y validándolo para un periodo total de 23 años, obteniendo valores de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficientes de determinación (R^2) superiores al 75%. León y Huarhua (2015) evaluaron la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Piura bajo condiciones de cambio climático,



utilizando el modelo STREAM para simular los caudales de descarga del río en tres periodos de tiempo: histórico (1971-2000), presente (2000-2010) y futuro (2016-2099).

Olivera (2019) investigó la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca del río Shullcas para fines agrícolas frente al cambio climático, determinando la oferta y demanda hídrica en la región. Quispe y Huanca (2021) evaluaron la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Ilave bajo escenarios de cambio climático, utilizando el modelo SWAT y adaptando los datos climáticos futuros de los modelos MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR en los escenarios de trayectoria SSP4.5 y SSP8.5. Laqui et al. (2024) compararon el modelo hidrológico en la plataforma Hidrobid considerando las variaciones de temperatura y precipitación en la cuenca Huancané. Tapara (2018) estudió las incidencias de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas en la generación de caudales máximos en la cuenca del río Nuñoa, aplicando el modelo hidrológico Hec HMS para identificar las zonas de riesgo de inundación y concluyendo la vulnerabilidad del distrito de Nuñoa al río.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico representa el intrincado mecanismo de circulación del agua en la esfera terrestre de la Tierra. Este proceso constituye uno de los ciclos biogeoquímicos más críticos, en el que el agua experimenta desplazamientos y transformaciones físicas (atribuibles a variables como la energía térmica y el enfriamiento) y pasa por los tres estados de la materia: líquido, sólido y gaseoso. El término ciclo hidrológico se refiere al movimiento continuo del agua en sus fases sólida, líquida y vaporosa. Como consecuencia de la radiación solar, el agua se evapora de los océanos, lagos, ríos, superficies terrestres y organismos

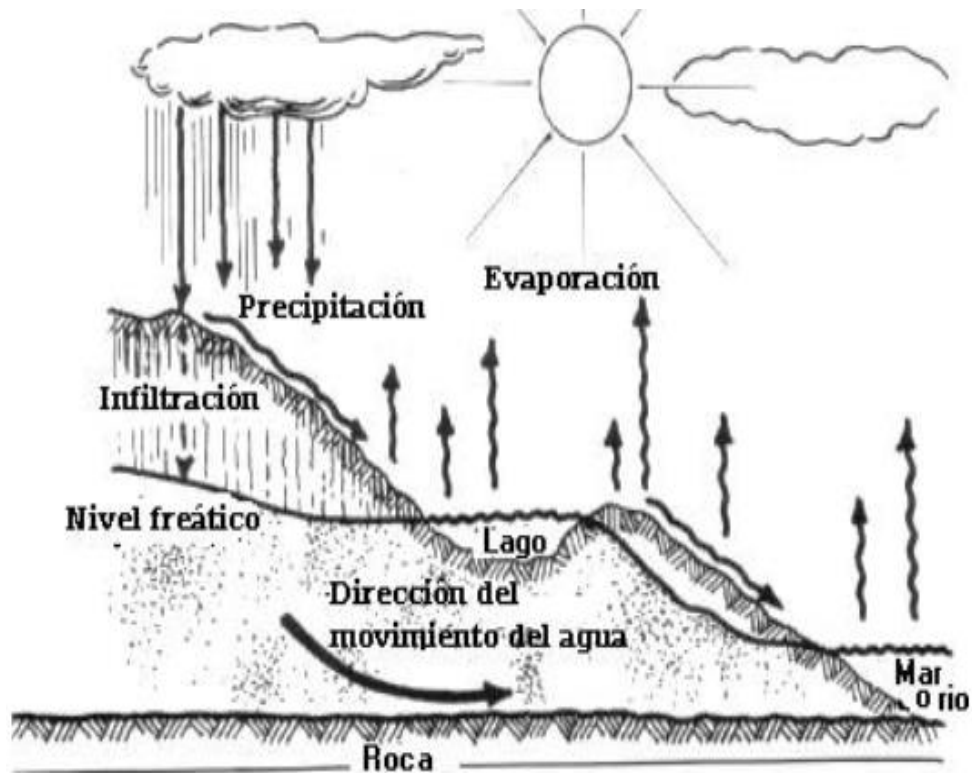


biológicos. En consecuencia, el agua se transporta a la atmósfera. Los vientos atmosféricos facilitan la distribución del vapor de agua en todo el planeta. Al enfriarse, el agua vuelve a su estado líquido y, en última instancia, regresa a la superficie terrestre en forma de precipitación (en forma de lluvia, nieve o granizo), reponiendo los mares, los ríos y los ecosistemas terrestres. Una parte de esta agua se infiltra y se convierte nuevamente en agua freática (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Libro vente chow

Las ciencias hídricas tienen un vínculo con las aguas del planeta: su ubicación y circulación, sus características físicas y químicas, su relación con el entorno y con los organismos vivos, especialmente con los humanos. Se podría afirmar que la hidrología incluye todas las disciplinas relacionadas con el agua. En una definición más rigurosa, podría describirse como el análisis del ciclo hidrológico. Este es el eje principal de la hidrología. No tiene principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua: el agua se evapora desde los océanos y de la superficie terrestre para volver a la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva hasta que condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos (Mijares, 1989).

Figura 1

Proceso del ciclo hidrológico del agua



Fuente: Fattorelli & Fernandez (2011).

La vegetación puede interceptar el agua precipitada, transformarla en un flujo superficial en el suelo, infiltrarse en él, escurrir por el suelo como flujo subsuperficial y descargarla en ríos como escorrentía superficial. El agua infiltrada puede percolar **profundamente** para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial y finalmente fluye hacia el mar o se evapora y por tal dándose una retroalimentación del ciclo (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

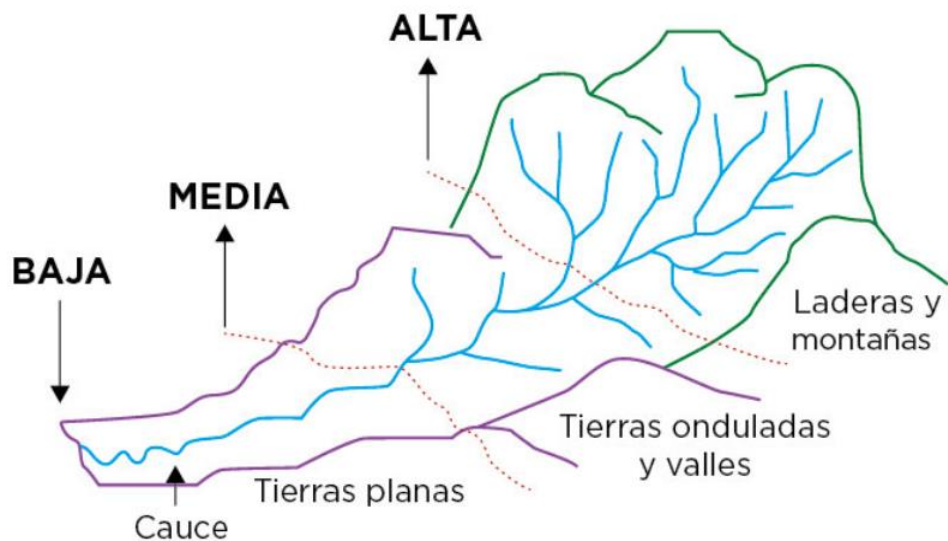
2.2.2. Cuenca hidrográfica

Es un espacio geográfico cuyos aportes de agua son alimentados exclusivamente por precipitaciones que caen en el interior y el excedente de agua

o en materia sólida transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura, una estación de aforo, o un punto arbitrario (Llamas, 1993).

Figura 2

Representación geográfica de la cuenca hidrográfica



Fuente: Chow et al. (1994).

Se define como una entidad hidrológica caracterizada como un marco fisicobiológico y, al mismo tiempo, como una construcción sociopolítica para la planificación estratégica y la gobernanza de los recursos naturales. En el interior de la cuenca se pueden delimitar subcuencas o microcuencas. Las divisorias que delimitan las subcuencas se conocen como parte aguas secundarios. Las cuencas pueden sub dividirse en tres zonas de funcionamiento hídrico principales: Zona de cabecera; Zona de captación - transporte; y Zona de emisión (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Para una definición más precisa de una cuenca, se la categoriza según el tipo de agua que fluye. Por lo tanto, se percibe una cuenca hidrográfica como una unidad morfográfica en la que solo se toman en cuenta las aguas

superficiales, mientras que la cuenca hidrológica se considera un concepto más amplio, que abarca tanto las aguas superficiales como las subterráneas.

2.2.3. Precipitación

La precipitación se refiere al volumen de agua que se precipita a la superficie de la Tierra y se origina de la humedad atmosférica, ya sea en forma líquida (lluvia y llovizna) o en forma sólida (escarcha, nieve, granizo). La precipitación es uno de los procesos meteorológicos más importantes para la Hidrología, y junto a la evaporación constituyen la forma mediante la cual la atmósfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico (Mijares, 1989).

Figura 3

Representación de la precipitación pluvial



Fuente: Mijares (1989).



2.3. MODELO HIDROLÓGICO SWAT

El SWAT es un modelo de cuenca fluvial semidistribuido y basado en procesos, desarrollado por Arnold et al. (1998) en nombre del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) para predecir el impacto de las prácticas de gestión de la tierra en el agua, los sedimentos y los rendimientos químicos agrícolas en grandes cuencas complejas con una variedad de suelos, uso de la tierra y condiciones de gestión.

La cuenca se divide en múltiples subcuencas en función de la topografía. A continuación, cada subcuenca se divide conceptualmente en varias Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), que tienen una combinación de suelo, uso de la tierra y pendiente. En SWAT, la simulación de la hidrología o del ciclo hidrológico se separa en dos fases:

La fase terrestre, se ocupa de la cantidad de flujos de agua, sedimentos y nutrientes hacia el canal principal en cada subcuenca de la cuenca. La fase de enrutamiento se ocupa del movimiento del agua, los sedimentos y los nutrientes a través de los afluentes del canal hasta la salida de la cuenca.

El cambio climático produce modificaciones en las respuestas hidrológicas en las cuencas hidrográficas, además de cambios proporcionales en simulaciones hidrológicas. Se menciona que el clima futuro, no solamente dependerá del sistema terrestre a los cambios de forzamiento radiactivo; sino más bien de las respuestas humanas en términos de tecnología y política.

2.4. INDICES DE PERFORMANCE

Para analizar la precisión de los modelos hidrológicos y evaluar el desempeño de la simulación de caudales, se utilizan varios índices estadísticos, como el índice de

eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (PBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2). A continuación, se presenta la teoría y las ecuaciones de estos índices, junto con una explicación de los procesos de calibración y validación en el contexto de los caudales simulados y observados.

Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) mide cuán bien las predicciones de un modelo simulan los datos observados. Sus valores varían entre $-\infty$ y 1, donde 1 indica una predicción perfecta. Se evalúa la precisión de las predicciones del modelo en comparación con la media de los datos observados. Se calcula así:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=t_j}^{t_f} (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{t=t_j}^{t_f} (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

El NSE puede tomar valores desde $-\infty$ hasta 1:

- Un NSE de 1 indica una predicción perfecta.
- Un NSE de 0 indica que el modelo predice tan bien como la media de los datos observados.
- Un NSE menor que 0 indica que el modelo es peor que simplemente usar la media de los datos observados.

Porcentaje del Sesgo (PBIAS),

Mide la tendencia promedio del modelo a sobrestimar o subestimar las observaciones. Se calcula de la siguiente manera:

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})}$$



Un PBIAS de 0 indica que no hay sesgo, valores positivos indican una subestimación y valores negativos indican una sobreestimación.

Coefficiente de determinación R²

Es un indicador estadístico que muestra el porcentaje de la varianza en la variable dependiente (caudales observados) que se anticipa a partir de la variable independiente (caudales simulados). La ecuación se define de la siguiente manera:

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

R² toma valores entre 0 y 1: Un R² cercano a 1 indica que una gran proporción de la varianza en los caudales observados es explicada por los caudales simulados.

Un R² cercano a 0 indica que los caudales simulados no explican bien la varianza en los caudales observados.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. AREA DE ESTUDIO

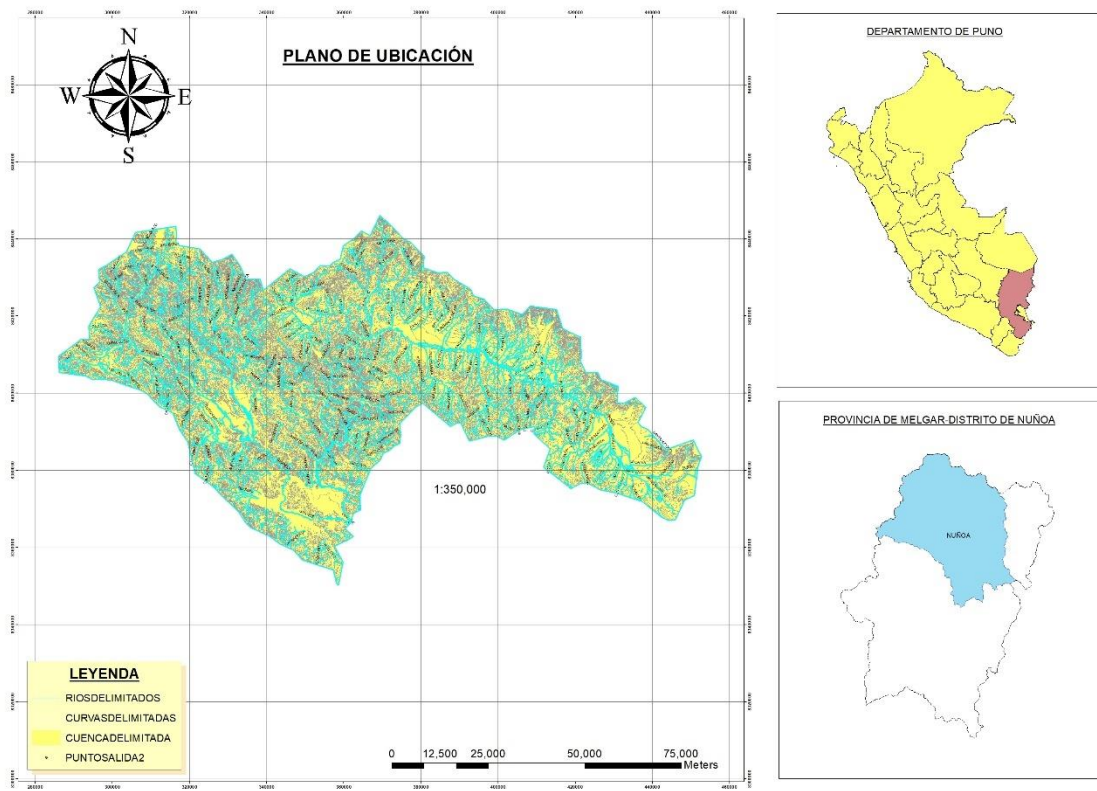
El presente proyecto de investigación se realizó en la subcuenca del río Nuñoa o Grande, ubicada en el distrito de Nuñoa, provincia de Melgar, departamento de Puno. La subcuenca tiene un área de 2,763 km² y un perímetro de 325 km. Su punto más alto es el casquete en Junurana, a 5,553 msnm, y el punto más bajo está a 3,869 msnm, donde converge con el río Crucero. Esta subcuenca forma parte del estudio integral de los recursos hídricos de la cuenca del río Ramis. La longitud total del río principal es de 150 km, con una pendiente mínima de 0.08% en la parte baja y máxima de 4% en las partes más altas, lo que indica una dirección hacia el suroeste.

La subcuenca del río Nuñoa corresponde a la cuenca del río Ramis, que tiene una superficie total de 14,704.30 km². De las unidades hidrográficas de nivel 5 (subcuencas), la subcuenca del río Nuñoa es la de mayor área, representando el 18.84% del total. Se sitúa en la región de Puno, al sureste del Perú, entre los 3,810 y 4,050 msnm, abarcando parte de la provincia de Carabaya, con los distritos de Ajoyani y Crucero.

Geográficamente, se encuentra entre las coordenadas 271,888 (71°07'4.7") Este a 454,337 (69°25'26.4") Oeste y de los 8,290,627 (15°27'33.7") Sur a los 8,445,589 (14°03'26.6") Norte. Su altitud varía desde los 3,802 msnm, en la desembocadura al lago, hasta los 5,750 msnm en el nevado Ananea Chico (ANA, 2019).

Figura 4

Ubicación de la cuenca nuñoa



La densidad poblacional varía de 22.4 hab/km² en la provincia de Melgar a 48.4 hab/km² en la provincia de Huancané. Este rango clasifica a la región de estudio como una zona de densidad media, caracterizada por áreas que fundamentan su desarrollo en la actividad agropecuaria. Las densidades más elevadas se observan en provincias donde el comercio es el principal sector económico, como San Román, Azángaro, Huancané y Melgar.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Información Geográfica

La información cartográfica recopilada y presentada en la tabla ha sido sometida a un minucioso proceso de clasificación y análisis. Este procedimiento es fundamental para asegurar su adecuada adaptación y uso en el modelo en

desarrollo. Cabe destacar que cada dato ha sido cuidadosamente examinado para garantizar que cumpla con los criterios necesarios para su implementación eficaz.

Tabla 1

Información geográfica suministrada al modelo

Información	Fuente	Descripción	Resolución
Topografía	ASTER/GDEM (NASA)	Modelo digital de elevación (DEM)	30 metros
Suelos	FAO	Mapa de suelos	10 kilómetros
Ecosistemas	MINAM	Mapa de ecosistemas del Perú	5 kilómetros
Pendientes	Generado en GIS	Mapa de pendientes	30 metros

Fuente: (Leon,2017) El Mapa de topografía

3.2.2. Información Climática

Los datos climatológicos utilizados en esta investigación provienen de las estaciones de monitoreo meteorológico e hidrológico ubicadas dentro de la cuenca, como se describe en la Tabla 2. Estas estaciones mantienen registros diarios de variables como precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa y radiación solar.

De manera similar, se recopiló información mensual de la estación hidrológica de Nuñoa, ubicada dentro de la cuenca, con registros proporcionados por el SENAMHI que abarcan el periodo de 1981 hasta fines de 2019.



Tabla 2

Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrográficas del estudio.

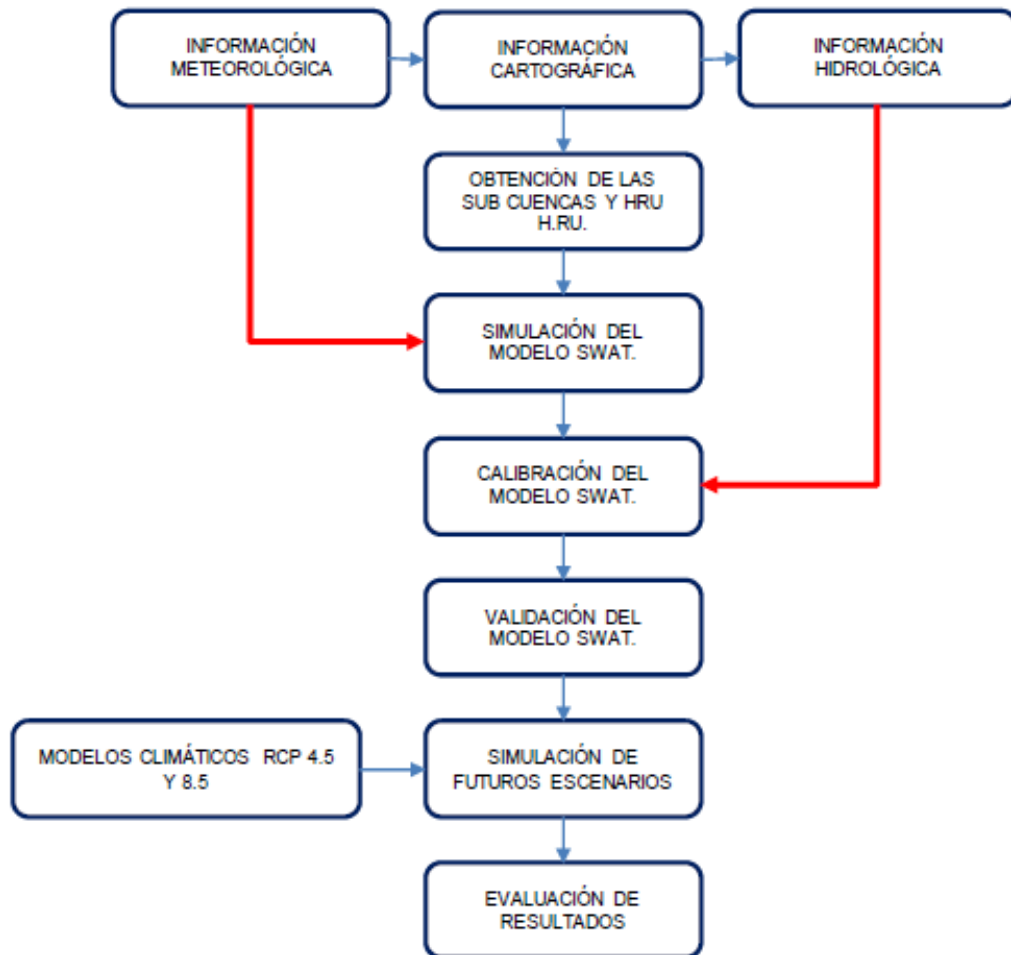
Estacion	Tipo	Ubicacion			Periodo de registro diarios	Coord.		Altitud (m.s.n.m.)
		Dpto	Prov.	Dist		UTM		
						Lat.	Long.	
Antauta	Conv.	Puno	Melgar	Antauta	1969-1976	-14.3	-70.3	4400
Ananea	Conv.	Puno	Sandia	Cuyocuyo	1963-2018	-14.6	-69.5	4660
Crucero	Conv.	Puno	Carabaya	Crucero	1970-2018	-14.3	-70.0	4183
Azangaro	Conv.	Puno	Azangaro	Azangaro	1963-2018	-14.9	-70.1	3863
Progreso	Conv.	Puno	Azangaro	Asillo	1964-2018	-14.7	-70.3	3905
Nuñoa	Conv.	Puno	Melgar	Nuñoa	1963-1992	-14.5	-70.6	4135

Fuente: SENAMHI

3.3. MÉTODO

Figura 5

Diagrama de flujo de la metodología empleada



El análisis hidrológico se realizó utilizando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), comenzando con la recopilación e ingreso de datos meteorológicos, cartográficos e hidrológicos. Se delimitó la cuenca de estudio mediante un modelo digital de elevación, lo que permitió definir con precisión sus límites geográficos.

Se generaron las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) utilizando datos espaciales sobre uso del suelo, tipo de suelo y pendientes. Esta etapa fue clave para dividir



la cuenca en unidades más pequeñas y manejables, lo que permitió una simulación más precisa de los procesos hidrológicos.

A continuación, se ingresaron los datos de precipitación en formato CSV, asegurando que estuvieran debidamente formateados y alineados con los requisitos del modelo SWAT. Con estos datos, se realizó una simulación inicial para obtener los primeros resultados y evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo las condiciones actuales.

Se procedió a la calibración del modelo utilizando datos históricos de caudales. Para ello, se dividió el conjunto de datos en dos partes: los primeros dos tercios se emplearon para calibrar el modelo, ajustando los parámetros para que los resultados simulados se aproximaran a los datos observados. El tercio restante se utilizó para la validación, verificando la precisión del modelo con datos que no se emplearon en la calibración.

Una vez calibrado y validado el modelo, se realizaron simulaciones para proyectar caudales futuros. Para esto, se descargaron los datos climáticos proyectados del NASA NEX mediante Google Earth Engine, considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, que representan diferentes trayectorias de gases de efecto invernadero.

Se aplicaron técnicas de desescalado (downscaling) a estos datos, ajustándolos a una resolución más adecuada para el modelo SWAT. Luego, se ingresaron estos datos ajustados al modelo para simular caudales futuros. Las simulaciones permitieron obtener proyecciones sobre la disponibilidad hídrica en la cuenca para las próximas décadas, lo que facilitó un análisis detallado de las posibles variaciones en los recursos hídricos bajo diferentes escenarios climáticos.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. VARIABLES NECESARIAS PARA EL MODELO SWAT

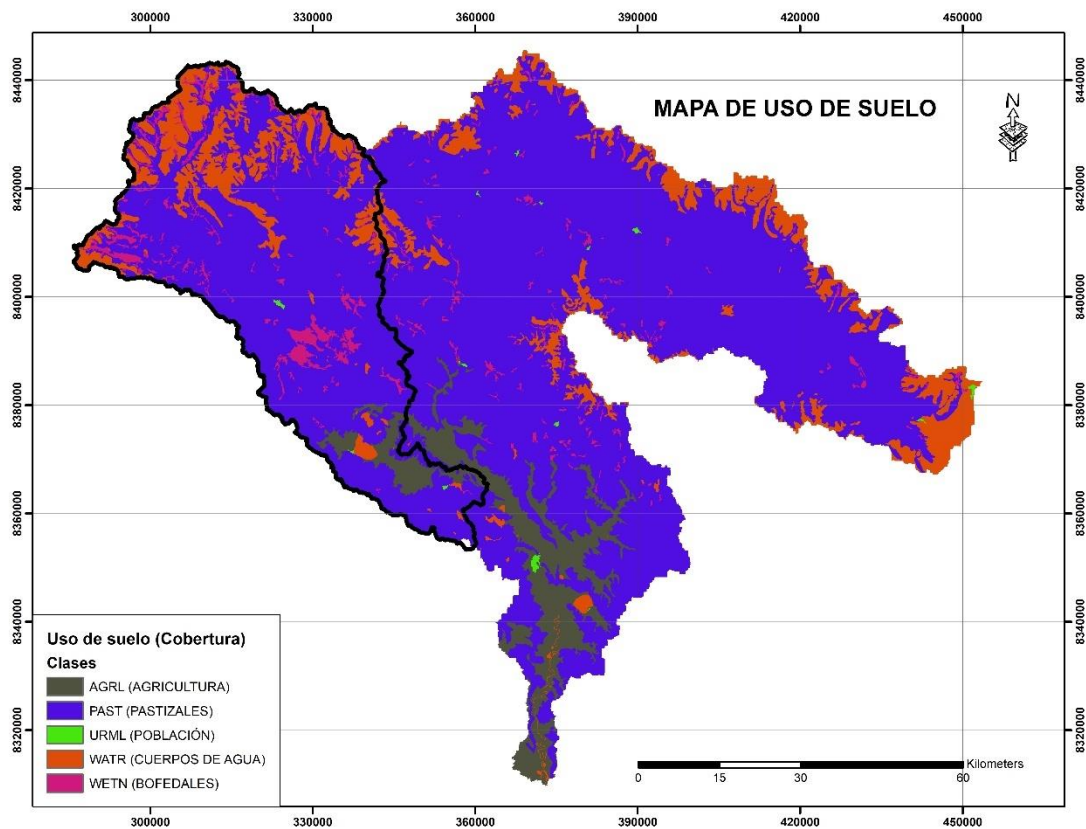
Las principales variables de entrada para el modelo SWAT incluyen precipitación, temperatura máxima y mínima, uso del suelo, tipo de suelo, topografía, datos hidrológicos de caudales y parámetros meteorológicos adicionales, como humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Estas variables son fundamentales para simular con precisión el ciclo hidrológico de la cuenca y evaluar los efectos de diferentes prácticas de manejo del suelo y condiciones climáticas en la disponibilidad y calidad del agua.

En cuanto al uso del suelo, se ha considerado la representación espacial de la cobertura y utilización del suelo en la zona de estudio, obtenida del Mapa de Ecosistemas elaborado por el Ministerio del Ambiente (MINAM), correspondiente al año 2015. Estos datos están disponibles en formato Shapefile y, tras su procesamiento, se ha determinado la distribución específica del uso del suelo, como se muestra en la imagen adjunta.

En la figura, se observa que la cobertura predominante es "PAST" (pastizales), que ocupa un 77.52% del área. Le sigue la cobertura "WATR" (cuerpos de agua), con un 12.36%, y la cobertura de agricultura general, identificada como "AGRL", que cubre un 7.09% del área. Además, se encuentran los ecosistemas clasificados como "WETN" (bofedales), con un 2.88%, y una pequeña zona demográfica, que representa un 0.14%.

Figura 6

Mapa de Ecosistemas

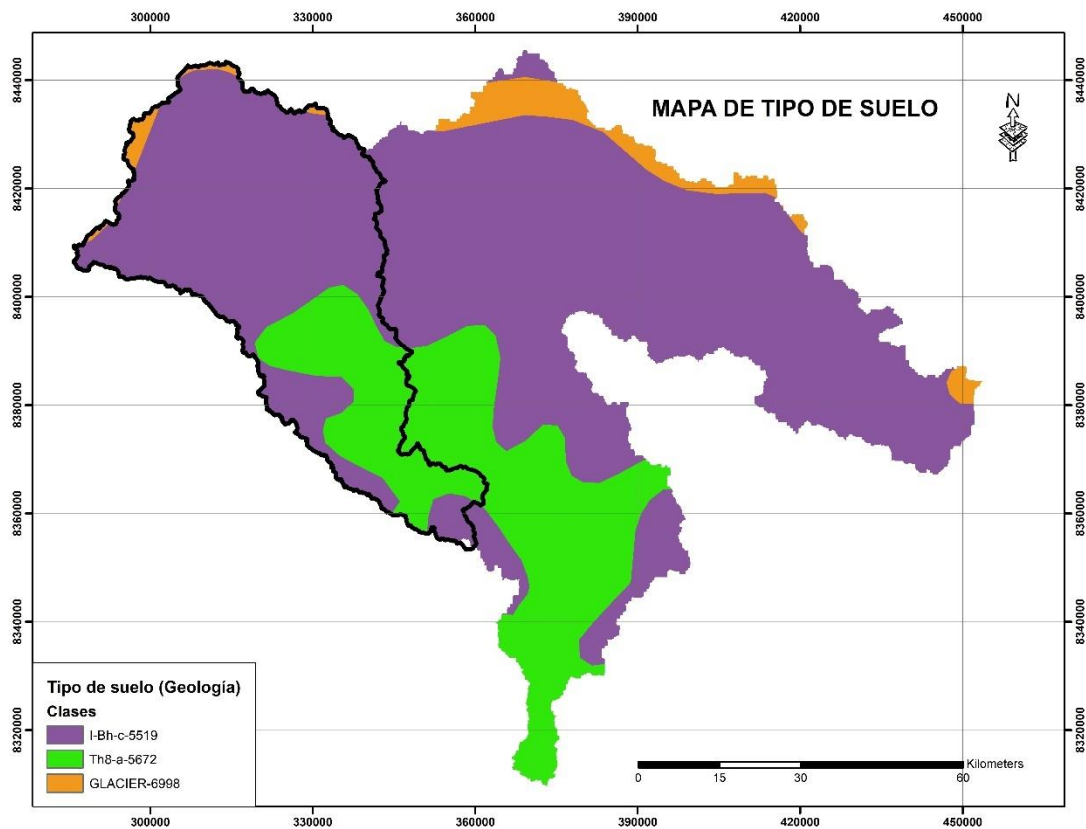


En cuanto al tipo de suelo, se utilizó el producto del Mapa de Suelo proporcionado por la FAO, disponible en formato Shapefile. Cabe destacar que el modelo SWAT se ajusta adecuadamente a la nomenclatura empleada por la FAO, lo que facilita la integración precisa de los datos de suelo en la simulación hidrológica.

En la distribución espacial, que se muestra en la Figura X, se identifican tres tipos de suelo. El tipo "I – Bh – c" (Inceptisoles con un horizonte B húrico y una textura específica) cubre el 72.42% del área, seguido por "Th8 – a" (Thionic Fluvisols con la subcategoría 8 y una textura arenosa o característica particular) que abarca el 23.81%. Por último, el tipo "Glacier" (Glaciar) ocupa el área más pequeña, con un 3.77%.

Figura 7

Mapa de Tipo de Suelo



Para el análisis de pendientes del terreno, se utilizó la herramienta ArcToolbox de ArcGIS junto con un Modelo Digital de Elevación (DEM) de 30 metros de resolución, descargado desde la plataforma ASF VERTEX. A partir de estos datos, se generó una clasificación de las pendientes en cuatro rangos distintos.

El primer rango, de 0 a 5%, abarca el 17.65% del área y corresponde a terrenos con inclinaciones muy suaves, ideales para la agricultura y el desarrollo urbano, debido a la facilidad de construcción y el menor riesgo de erosión.

El segundo rango, de 5 a 12.5%, cubre el 18.60% del área y representa terrenos con pendientes moderadas, adecuados para ciertos tipos de cultivos y construcciones, siempre que se maneje adecuadamente el agua.

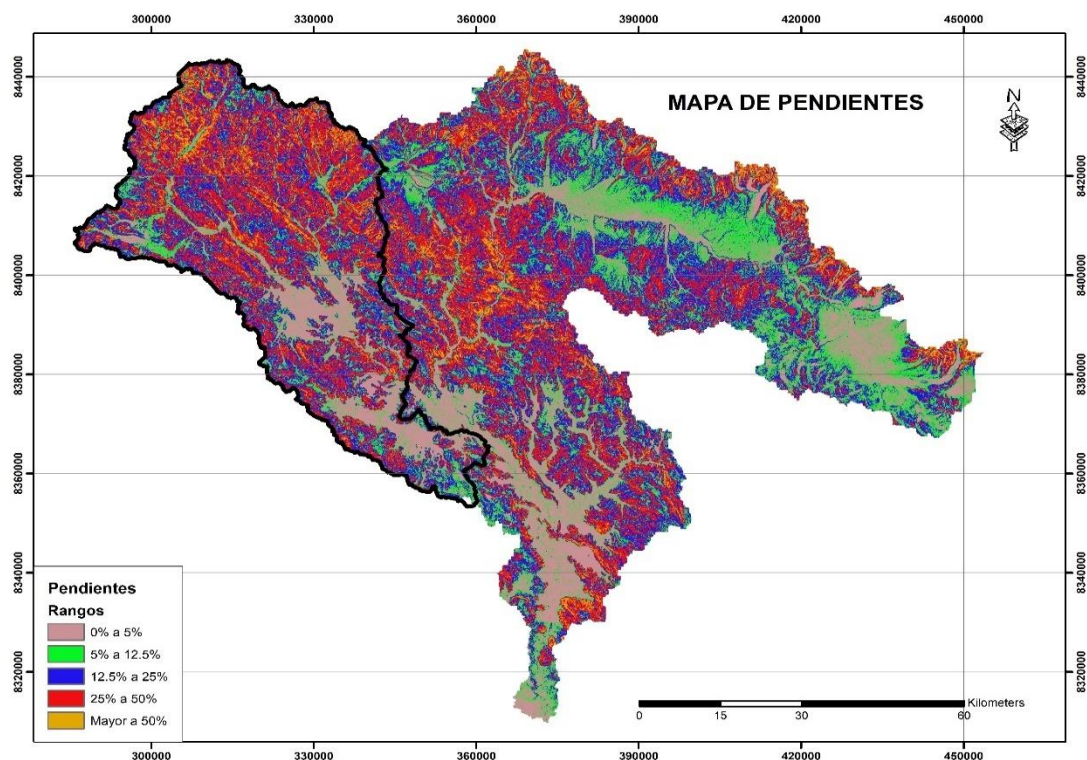
El tercer rango, de 12.5 a 25%, comprende el 28.77% del área y está asociado con terrenos más inclinados, que pueden presentar desafíos para el uso agrícola y la construcción debido al mayor riesgo de erosión, exigiendo prácticas de manejo más rigurosas.

El cuarto rango, de 25 a 50%, ocupa el 29.87% del área, representando terrenos escarpados que requieren técnicas avanzadas de manejo del suelo y construcción.

Finalmente, el rango de pendientes mayores al 50% cubre el 5.10% del área, caracterizando zonas muy empinadas que son inadecuadas para la mayoría de los usos agrícolas y de desarrollo debido a su dificultad de acceso y alto riesgo de erosión.

Figura 8

Mapa de Pendientes

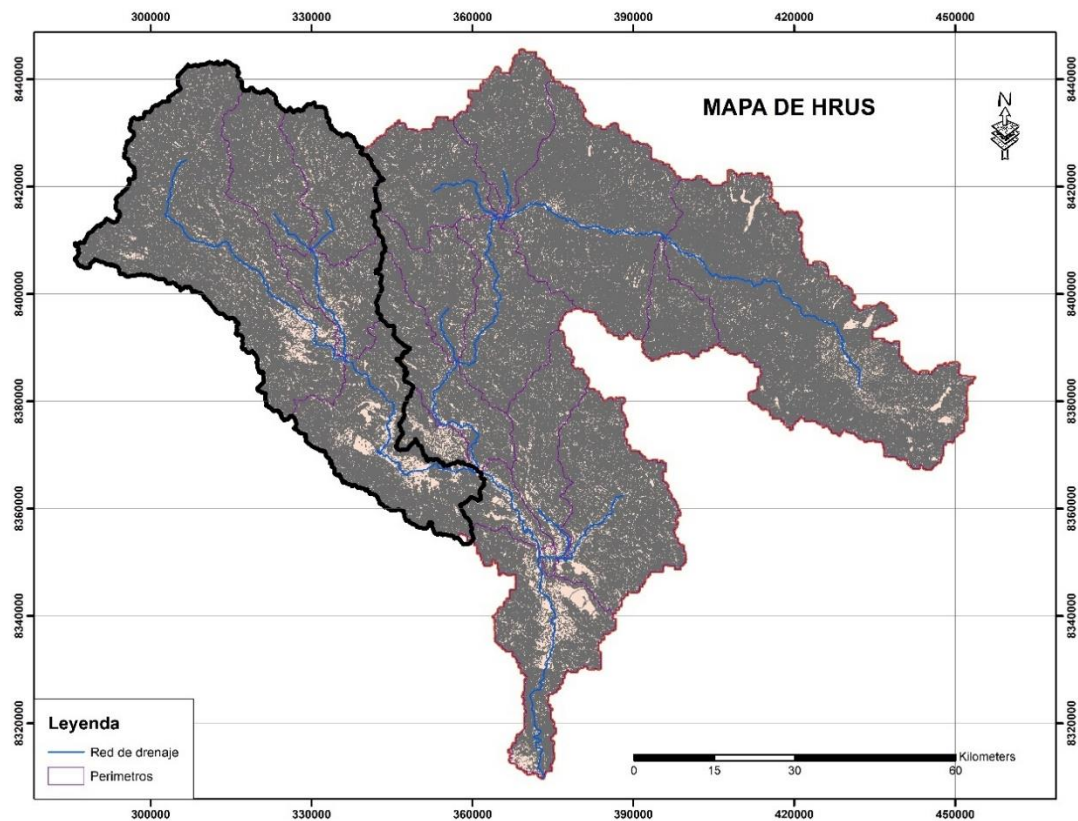


Después de combinar los mapas de ecosistemas, suelo y pendientes, se generan las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs, por sus siglas en inglés) para el modelo

SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Este proceso es fundamental para mejorar la precisión del modelo, ya que permite una representación más detallada de las características hidrológicas y del uso del suelo en la cuenca de estudio. Al generar las HRUs, el modelo puede simular con mayor exactitud las respuestas hidrológicas de la cuenca, facilitando la identificación de áreas críticas que requieren atención especial en términos de manejo del agua y recursos naturales.

Figura 9

Mapa de HRUs



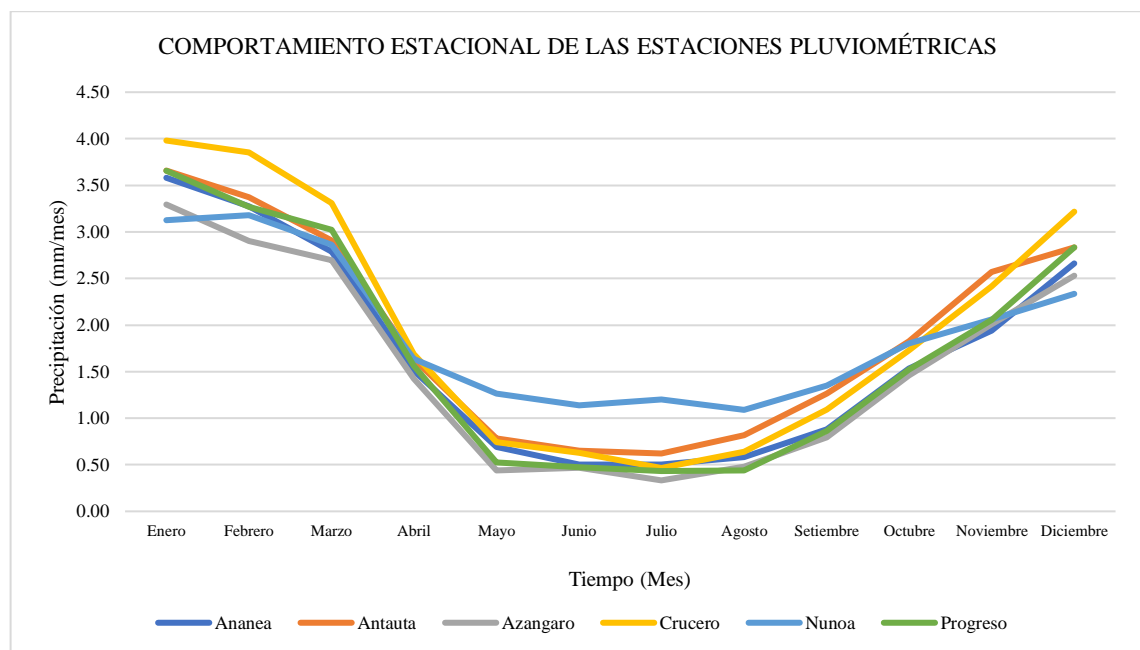
En el ámbito meteorológico, para analizar los datos de temperatura máxima y mínima se utilizará el producto gridded PISCO, que proporciona información desde 1981 hasta 2016. La cobertura temporal de este producto permite una evaluación detallada del

comportamiento térmico a lo largo de los años, aunque para obtener una serie temporal continua y completa, se llevará a cabo una interpolación de los datos.

Además, para las variables meteorológicas adicionales como la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento, se ha recurrido a un motor climático especializado. Este motor climático genera datos que son interpolados utilizando la información histórica disponible, asegurando así una integración coherente con los datos existentes. En cuanto a la precipitación, se han considerado las estaciones listadas en la tabla 2. Estos datos se encuentran a nivel diario, permitiendo una visualización detallada del comportamiento estacional de las estaciones pluviométricas.

Figura 10

Comportamiento estacional de las estaciones pluviométricas.



Se observa que la estación de Nuñoa registra los mayores promedios de precipitación durante el período de estiaje, que abarca desde mayo hasta septiembre. Este patrón indica que, a pesar de ser la temporada de menor lluvia, Nuñoa experimenta un

nivel de precipitaciones relativamente más alto en comparación con otras estaciones durante estos meses secos.

4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para la calibración del modelo, se dividió el período hidrométrico del punto de aforo de la cuenca integral, que abarca el río de estudio, utilizando los datos correspondientes desde 1981 hasta 2006, lo que representa 2/3 del período total. En primera instancia, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más sensibles del modelo y, a su vez, determinar sus valores más aproximados. A continuación, se presenta un resumen de los parámetros sensibles y sus valores ajustados:

Tabla 3

Parámetros para la calibración del modelo

N	Parámetro	Descripción	Valor Aceptado
1	CN2	SCS runoff curve number	-0.366
2	ALPHA BF	Baseflow alpha factor (days).	0
3	GW DELAY	Groundwater delay (days).	78.3
4	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	1.33
5	GW REVAP	Groundwater "revap" coefficient.	0.095
6	ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor.	0.0125
7	CH N2	Manning's "n" value for the main channel.	0.1845
8	CH K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium.	0
9	ALPHA BNK	Baseflow alpha factor for bank storage.	0.975
10	SOL AWC	Available water capacity of the soil layer.	1.95
11	SOL K	Saturated hydraulic conductivity.	0.392
12	SOL BD)	Moist bulk density.	0.3635
13	OVN	Manning's "n" value for overland flow.	-0.099

Donde se tiene los siguientes resultados de los índices para el periodo de calibración para el punto de aforo de la cuenca integral.

Tabla 4

Indicadores de la Calibración del modelo

Indicadores de la Calibración			
Nash	NASH	0.69	-
Percentage of Bias	PBIAS	-18.85	%
Coefficient of determination	r ²	0.81	-

La validación del modelo consiste en probarlo con un conjunto de datos distinto al utilizado en la calibración para evaluar su capacidad de predicción. En este estudio, la validación se realizará para el período de 2007 a 2016. A continuación, se presentan los resultados de los índices de desempeño obtenidos para este período de validación:

Tabla 5

Indicadores de la Validación del modelo

Indicadores de la Validación			
Nash	NASH	0.64	-
Percentage of Bias	PBIAS	-17.99	%
Coefficient of determination	r ²	0.65	-

4.3. CARACTERIZAR LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Basado en el análisis de los datos obtenidos de los modelos de cambio climático global de la fase 5 (CMIP5), se presentan los resultados para el escenario de Concentración Representativa de Gases de Efecto Invernadero (RCP) 4.5. Este escenario, que simula un futuro con un aumento moderado en las concentraciones de gases de efecto

invernadero, ofrece proyecciones detalladas sobre las posibles variaciones en los patrones de precipitación a lo largo del tiempo.

Los resultados indican un aumento gradual en las precipitaciones mensuales a partir del año 2020, con incrementos más pronunciados en los años 2030, 2040 y 2050. En particular, se observa un notable incremento en la precipitación durante los meses de marzo, abril y noviembre, mientras que los meses de estiaje (mayo a septiembre) presentan una disminución en las precipitaciones. Estos cambios generan una intensificación de los eventos de precipitación en los períodos no secos y un posible agravamiento de la sequía durante el estiaje, como se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 6

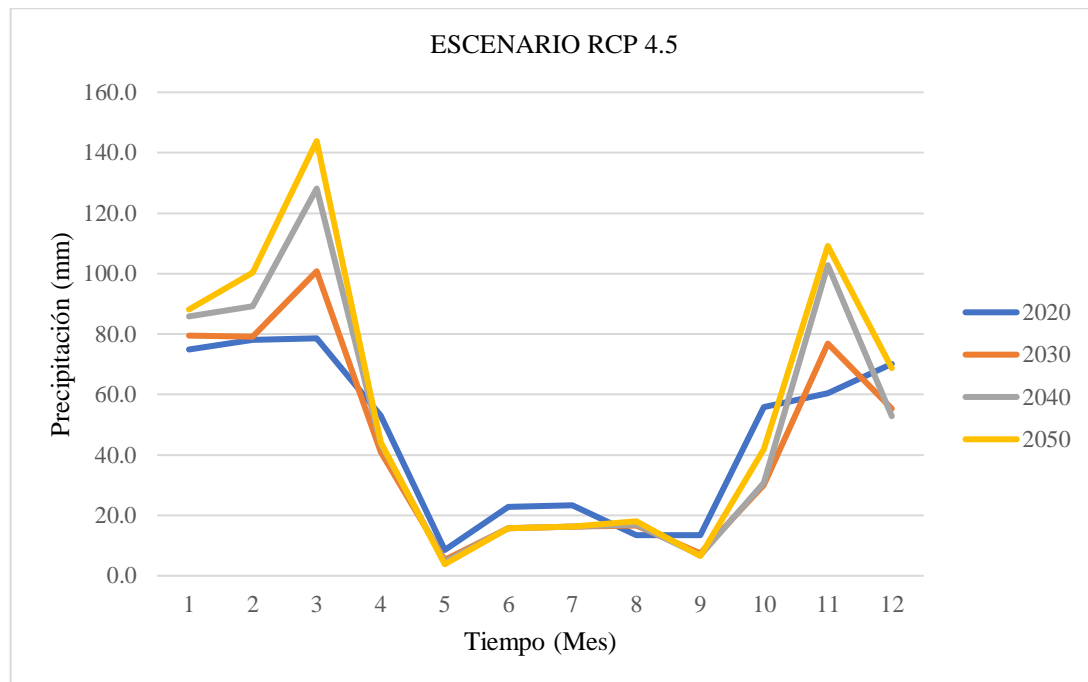
Comportamiento del escenario RCP 4.5 (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2020	74.9	78.1	78.6	53.0	8.5	22.8	23.3	13.4	13.5	55.8	60.4	70.1
2030	79.4	79.1	100.8	41.0	5.3	15.7	16.2	16.6	7.5	30.1	76.8	55.3
2040	85.8	89.2	128.2	43.6	4.6	15.7	16.2	16.9	6.7	30.8	102.8	52.7
2050	88.0	100.3	143.8	44.2	3.8	15.7	16.2	18.0	6.6	41.9	109.1	68.7

Igual se muestra el comportamiento estacional mensual del escenario RCP 4.5, donde se visualiza los cambios en las proyecciones, ya mencionadas anteriormente.

Figura 11

Comportamiento del escenario RCP 4.5



Se observa una tendencia general de aumento en la precipitación mensual a lo largo de las décadas, con proyecciones para los años 2030, 2040 y 2050 que indican incrementos significativos en comparación con el año 2020.

En particular, los meses de marzo, abril y noviembre muestran los mayores aumentos en precipitación, mientras que los meses de estiaje (mayo a septiembre) presentan una reducción en la precipitación, lo que sugiere que las proyecciones del modelo climático para un RCP 4.5 anticipan un aumento en la intensidad y frecuencia de eventos de precipitación fuera del período seco, mientras que el período seco podría volverse más extremo.

Tabla 7

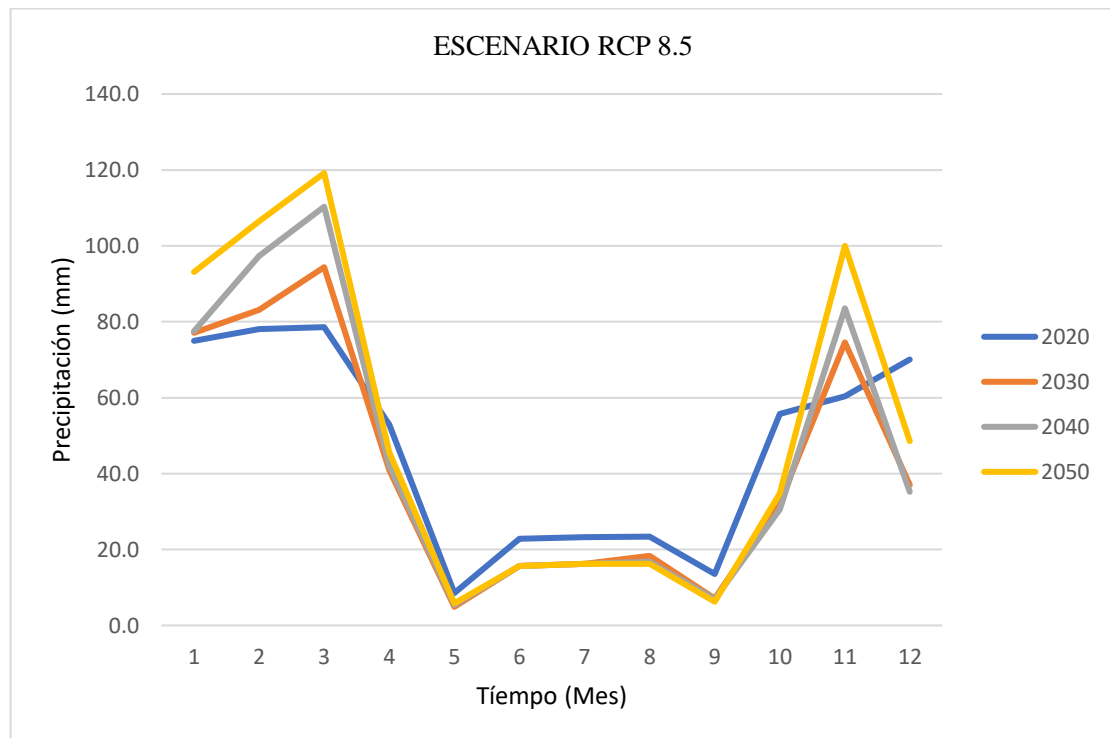
Comportamiento del escenario RCP 8.5 (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2020	74.9	78.1	78.6	53.0	8.5	22.8	23.3	23.4	13.5	55.8	60.4	70.1
2030	77.1	83.1	94.4	41.0	4.9	15.7	16.2	18.3	7.0	32.4	74.6	37.0
2040	77.5	97.4	110.3	42.1	5.4	15.7	16.2	16.9	7.0	30.6	83.6	35.1
2050	93.1	106.5	119.2	45.6	5.8	15.7	16.2	16.2	6.2	34.8	100.0	48.5

Igual se muestra el comportamiento estacional mensual del escenario RCP 8.5, donde se visualiza los cambios en las proyecciones, ya mencionadas anteriormente.

Figura 12

Comportamiento del escenario RCP 8.5



Muestran una tendencia general de aumento en las precipitaciones mensuales a lo largo de las décadas, con una clara proyección hacia valores más altos en el futuro bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5. Comparando con el año 2020, para 2050 se prevé un incremento notable en las precipitaciones anuales, especialmente durante los meses de invierno y primavera. Caracterizar los escenarios de cambio climático.

Finalmente se procede a obtener los resultados de las subcuencas o unidades hidrológicas de la Cuenca del río Nuñoa, que en el modelo SWAT tiene el código de 3 unidades principales de dicha cuenca, que son la numero 8, 9 y 14. Con ello se puede exportar los resultados y visualzia los cambios para los años 2020 (histórico) y los proyectados 2030, 2040 y 2050.

Figura 13

Subcuencas del área de estudio

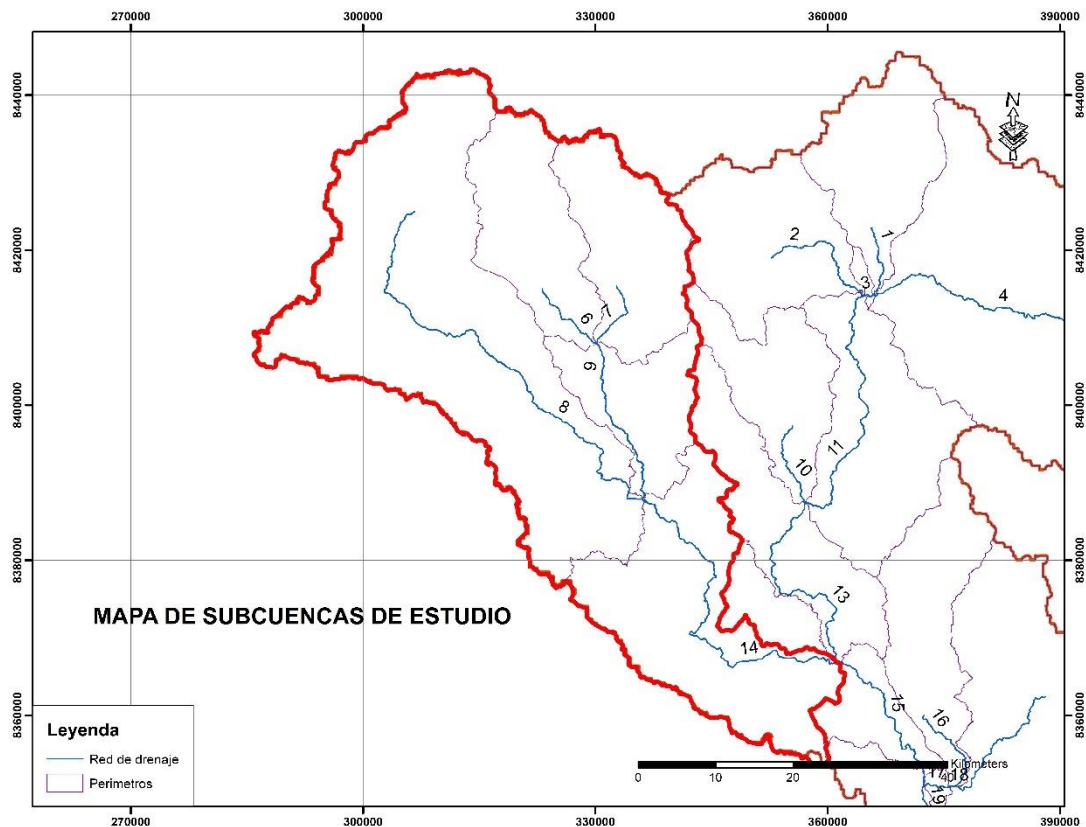


Tabla 8

Disponibilidad hídrica en las subcuencas involucradas para el escenario RCP 4.5

MES / AÑO	SUBCUENCA 8				SUBCUENCA 9				SUBCUENCA 14			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
ENE	9.55	10.12	10.94	11.22	10.29	10.9	11.8	12.1	31.34	33.20	35.90	36.80
FEB	12.78	12.94	10.90	12.26	13.64	13.8	15.6	17.5	43.81	44.40	50.00	56.30
MAR	12.96	16.62	15.57	17.46	14.01	18	22.9	25.6	42.36	54.30	69.10	77.50
ABR	11.28	8.72	7.85	7.96	11.24	8.7	9.25	9.37	30.77	23.80	25.30	25.70
MAY	14.17	8.84	5.17	4.27	10.87	6.78	5.88	4.86	29.35	18.30	15.90	13.10
JUN	11.09	7.64	6.57	6.57	8.90	6.13	6.13	6.13	20.37	14.00	14.00	14.00
JUL	19.51	13.57	6.64	6.64	13.62	9.47	9.47	9.47	31.69	22.00	22.00	22.00
AGO	13.42	16.62	12.04	12.83	8.78	10.9	11.1	11.8	23.12	28.60	29.20	31.10
SET	8.77	4.87	4.74	4.67	5.88	3.27	2.92	2.88	14.56	8.09	7.23	7.12
OCT	8.53	4.60	5.27	7.17	4.99	2.70	2.76	3.75	14.89	8.03	8.22	11.20
NOV	5.57	7.08	16.25	17.25	2.88	3.66	4.91	5.21	8.188	10.40	13.90	14.80
DIC	2.47	1.95	7.18	9.36	1.41	1.12	1.07	1.39	4.359	3.44	3.28	4.27

Tabla 9

Disponibilidad hídrica en las subcuencas involucradas para el escenario RCP 8.5

MES / AÑO	SUBCUENCA 8					SUBCUENCA 9					SUBCUENCA 14					
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
ENE	9.55	9.83	9.88	11.87	10.29	10.59	10.65	12.79	31.34	32.26	32.43	38.96				
FEB	12.78	13.60	11.91	13.02	13.64	14.51	17.01	18.60	43.81	46.61	54.64	59.74				
MAR	12.96	15.57	13.40	14.48	14.01	16.83	19.66	21.25	42.36	50.88	59.44	64.24				
ABR	11.28	8.73	7.58	8.21	11.24	8.70	8.93	9.67	30.77	23.80	24.44	26.47				
MAY	14.17	8.17	6.07	6.52	10.87	6.27	6.91	7.42	29.35	16.92	18.65	20.03				
JUN	11.09	7.64	6.57	6.57	8.91	6.13	6.13	6.13	20.37	14.03	14.03	14.03				
JUL	19.51	13.56	6.64	6.64	13.62	9.47	9.47	9.47	31.69	22.03	22.03	22.03				
AGO	13.42	10.50	6.90	6.61	8.78	6.87	6.34	6.08	23.12	18.08	16.70	16.01				
SET	8.77	4.55	4.95	4.39	5.88	3.05	3.05	2.70	14.56	7.55	7.55	6.69				
OCT	8.53	4.95	5.24	5.95	5.00	2.90	2.74	3.12	14.89	8.65	8.17	9.29				
NOV	5.57	6.87	13.22	15.81	2.88	3.56	3.99	4.77	8.19	10.11	11.33	13.56				
DIC	2.47	1.30	4.78	6.61	1.42	0.75	0.71	0.98	4.36	2.30	2.18	3.02				



Para el caso de la Subcuenca 8, para el escenario RCP 4.5 se tiene lo siguiente.

- Los valores de precipitación tienden a aumentar con el tiempo en la mayoría de los meses.
- Los meses de verano (ENE-MAR) muestran un aumento notable, especialmente en MAR, con un incremento de 12.96 en 2020 a 17.46 m³/s en 2050.
- Los meses de invierno (JUN-AGO) tienen un descenso inicial seguido de una estabilización o ligero aumento hacia 2050.
- En Marzo Aumento significativo de 12.96 en 2020 a 17.46 m³/s en 2050.
- En Julio, hay una caída de 19.51 en 2020 a 6.64 m³/s en 2040, se mantiene constante en 6.64 hasta 2050.
- En Diciembre, incremento de 2.47 en 2020 a 9.36 m³/s en 2050.

Para el caso de la Subcuenca 9, para el escenario RCP 4.5 se tiene lo siguiente.

- Similar a la Subcuenca 8, hay un incremento general en la precipitación a lo largo de los años, con algunas fluctuaciones.
- Los meses de verano también muestran incrementos importantes.
- Hay meses que se mantienen relativamente estables, como JUN y JUL.
- En febrero, aumento de 13.64 m³/s en 2020 a 17.5 m³/s en 2050.
- En marzo, incremento considerable de 14.01 en 2020 a 25.6 m³/s en 2050.
- En noviembre, se da unrecimiento de 2.88 en 2020 a 5.21 m³/s en 2050.

Para el caso de la Subcuenca 9, para el escenario RCP 4.5 se tiene lo siguiente.



- A diferencia de las otras subcuencas, esta muestra un aumento más pronunciado y consistente en la disponibilidad hídrica.
- Los meses de invierno también muestran incrementos, aunque más moderados comparados con los de verano.
- En marzo, aumento drástico de 42.36 en 2020 a 77.50 m³/s en 2050.
- En mayo, comienza en 29.35 en 2020 y desciende a 13.10 m³/s en 2050.
- En noviembre, incremento de 8.188 en 2020 a 14.80 m³/s en 2050.

Para el caso de la Subcuenca 8, para el escenario RCP 8.5 se tiene lo siguiente.

- Los valores de disponibilidad hídrica tienden a fluctuar, con algunos meses mostrando aumentos y otros disminuciones a lo largo del tiempo.
- Los meses de invierno (JUN-AGO) presentan una disminución notable en la disponibilidad hídrica
- En Marzo disminuye de 12.96 en 2020 a 14.48 m³/s en 2050.
- En julio baja drásticamente de 19.51 en 2020 a 6.64 m³/s en 2050.
- En diciembre incrementa de 2.47 en 2020 a 6.61 m³/s en 2050. drica con el paso de los años.

Para el caso de la Subcuenca 9, para el escenario RCP 8.5 se tiene lo siguiente.

- Similar a la Subcuenca 8, hay fluctuaciones en la disponibilidad hídrica, pero con un incremento general en algunos meses.
- Los meses de verano muestran incrementos importantes hacia 2050.



- En febrero aumento de 13.64 m³/s en 2020 a 18.60 m³/s en 2050.
- En marzo incremento significativo de 14.01 m³/s en 2020 a 21.25 m³/s en 2050.
- En diciembre se da una ligera disminución de 1.42 m³/s en 2020 a 0.98 m³/s en 2050.

Para el caso de la Subcuenca 14, para el escenario RCP 8.5 se tiene lo siguiente.

- La Subcuenca 14 muestra un patrón más consistente de incremento en la disponibilidad hídrica en la mayoría de los meses.
- En marzo destaca con un incremento muy notable.

4.4. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

4.4.1. Variables de Entrada del Modelo SWAT

Las variables clave de entrada del modelo SWAT, como precipitación, temperatura, uso del suelo, tipo de suelo y topografía, son esenciales para simular con precisión el ciclo hidrológico de una cuenca. Estas variables permiten evaluar los efectos de las prácticas de manejo del suelo y las condiciones climáticas en la disponibilidad y calidad del agua, en línea con los estudios de Saade et al. (2021) y Eromo et al. (2016), quienes también destacaron la importancia de estas variables en sus investigaciones sobre el flujo de la cuenca de El Kalb y Omo-Gibe, respectivamente.

4.4.2. Uso del Suelo

La representación espacial del uso del suelo en tu estudio se obtuvo del Mapa de Ecosistemas del MINAM (2015), destacando la predominancia de pastizales (77.52%) y cuerpos de agua (12.36%). Esto es comparable a los estudios de Anand y Oinam (2019), quienes también consideraron el uso del suelo

como un factor crucial en la calibración del modelo SWAT para la cuenca del río Manipur. La especificidad y el detalle en la cobertura del uso del suelo aseguran una simulación precisa, alineándose con las prácticas observadas en estudios similares.

4.4.3. Tipo de Suelo

El uso del Mapa Mundial Digital de Suelo de la FAO en tu estudio para integrar datos de suelo en la simulación hidrológica coincide con los métodos de Emam y Koch (2019), quienes utilizaron el mismo mapa de tipo de suelo. La cual resalta sobre la precisión en la integración de datos de suelo es crucial para obtener resultados confiables en la modelación hidrológica.

4.4.4. Análisis de Pendientes del Terreno

El análisis de pendientes del terreno utilizando ArcGIS y un DEM de 30 metros de resolución proporciona una clasificación detallada de las pendientes, lo cual es fundamental para evaluar el riesgo de erosión y la idoneidad del terreno para diferentes usos. Esto es similar al enfoque de Chakilu et al. (2020), quienes también utilizaron herramientas de reducción de escala para evaluar los impactos del cambio climático en la subcuenca del Alto Nilo Azul.

4.4.5. Tendencias de Precipitaciones

Los resultados que muestran un aumento gradual en las precipitaciones mensuales a partir del año 2020, con incrementos más pronunciados en las décadas de 2030, 2040 y 2050, son consistentes con los hallazgos de Bhatta et al. (2019) y González (2012), quienes también proyectaron incrementos en la precipitación bajo escenarios de cambio climático. En particular, el aumento



notable durante los meses de marzo, abril y noviembre, junto con la disminución durante el estiaje, refleja una intensificación de la variabilidad climática y un posible agravamiento de la sequía en períodos secos, como se observó en los estudios de Anand y Oinam (2019).

4.4.6. Impacto del Cambio Climático

La tendencia general de aumento en las precipitaciones mensuales y la proyección hacia valores más altos en el futuro bajo el escenario RCP 8.5 está en línea con las conclusiones de Chakilu et al. (2020) y Urbay (2022), quienes destacaron el impacto significativo del cambio climático en los flujos de corriente y la disponibilidad de agua en sus respectivas cuencas. La caracterización de los escenarios de cambio climático en tu estudio aporta una visión integral sobre los posibles impactos futuros, similar a los enfoques utilizados por León (2017) y Quispe y Huanca (2021) en sus estudios sobre la cuenca del río Piura y la cuenca de Ilave, respectivamente.

4.4.7. Disponibilidad hídrica

Los resultados del usuario muestran tendencias que son consistentes con los hallazgos de estudios anteriores, especialmente en lo que respecta a los incrementos en la disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático. Los patrones estacionales, como el aumento en marzo y las fluctuaciones en los meses de invierno, reflejan los cambios esperados en la disponibilidad hídrica debido al cambio climático. Saade et al. (2021) confirmaron el modelo SWAT puede simular satisfactoriamente los flujos mensuales bajo de escenarios de cambio climático, reflejando patrones estacionales.



Los estudios previos también apoyan la observación de que los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 pueden llevar a incrementos en los caudales y disponibilidad hídrica en los meses de verano, mientras que los meses de invierno pueden mostrar comportamientos más variables. Chakilu et al. (2020) y Emam y Koch (2019) encontraron que el cambio climático tiende a aumentar los caudales en los meses de verano, mientras que los patrones en invierno son más variables. Esto concuerda con los patrones observados en las subcuencas del estudio, donde los meses de verano tienden a mostrar aumentos más pronunciados en la disponibilidad hídrica, mientras que los meses de invierno presentan una mayor variabilidad.

El análisis de las fluctuaciones en la disponibilidad hídrica, como la caída en julio y el aumento en diciembre, también es consistente con las observaciones de otros estudios. Bhatta et al. (2019) y González (2012) destacaron variaciones estacionales en la disponibilidad hídrica, alineándose con los cambios observados en los patrones de precipitación y disponibilidad hídrica en el estudio del usuario.



V. CONCLUSIONES

Los resultados indican un aumento gradual en las precipitaciones mensuales a partir del año 2020, con incrementos más pronunciados en las décadas de 2030, 2040 y 2050. En particular, se observa un notable incremento en la precipitación durante los meses de marzo, abril y noviembre, mientras que los meses de estiaje (mayo a septiembre) presentan una disminución en las precipitaciones. Estos cambios generan una intensificación de los eventos de precipitación en los períodos no secos y un potencial agravamiento de la sequía durante el estiaje. La proyección hacia el futuro bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 es el que tiene un aumento significativo en las precipitaciones anuales, especialmente durante los meses de invierno y primavera. Estos cambios en los patrones de precipitación tendrán implicaciones importantes para la gestión de los recursos hídricos y la planificación de infraestructuras en la cuenca.

Se concluyó que las variables necesarias para el modelo hidrológico SWAT y que ayuden a predecir, los impactos resaltantes del cambio climático sobre la cuenca del río Nuñoa son las variables: precipitación, temperatura máxima y mínima, uso del suelo, tipo de suelo, topografía, datos hidrológicos de caudales, y parámetros meteorológicos adicionales como humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar en el modelo SWAT permitió una simulación precisa del ciclo hidrológico de la cuenca. Estas variables son fundamentales para evaluar con precisión los efectos de diversas prácticas de manejo del suelo y condiciones climáticas en la disponibilidad y calidad del agua.

Se concluye que la calibración del modelo, se dividió el período hidrométrico del punto de aforo de la cuenca integral, que abarca el río de estudio, utilizando los datos correspondientes desde 1981 hasta 2006, lo que representa 2/3 del período total. En primera instancia, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para identificar los



parámetros más sensibles del modelo y, a su vez, determinar sus valores más aproximados.

Los resultados del análisis de disponibilidad hídrica en las subcuencas bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 indican un patrón de incremento en los caudales durante los meses de verano y una mayor variabilidad en los meses de invierno. En general, los meses estivales muestran aumentos significativos en la disponibilidad hídrica, mientras que los meses invernales presentan fluctuaciones notables. Estos hallazgos sugieren que el cambio climático podría intensificar la disponibilidad hídrica durante el verano, con un aumento notable en meses como marzo, mientras que los meses de invierno podrían experimentar mayores variaciones.



VI. RECOMENDACIONES

Es necesario que los gobiernos locales y regionales implementen programas y proyectos a fin de atenuar los impactos negativos de cambios relativos en los componentes hidrológicos de la región de Puno.

Recomendamos a los técnicos especialistas del ministerio de agricultura para que con su experiencia puedan realizar las capacitaciones técnicas respectivas al tema del cambio climático y su impacto en los recursos hídricos en el altiplano de Puno.

Recomendamos a las Escuelas Profesionales de Ingeniería Agrícola e Ingeniería Agronómica a continuar haciendo investigación relacionado con los diferentes aplicaciones de las herramientas computacionales en los recursos hídricos.

Recomendar a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno crear un grupo de investigación para que se realice le monitoreo de las cuencas involucradas en Puno.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. (2019). Estudio Hidrologico de la Unidad Hidrografica del rio ramis. Lima Peru: Ministerio de Agricultura y Riego (Autoridad Nacional del Agua).
- Antunez de Mayolo. (1983). Será posible pronosticar las variaciones de nivel del lago titicaca. In: Bol. de la Soc. Geogr. de Lima, T CIII , pp 26-34.
- Aquise, J. E. (1987). Meteorologia Generla y Agricola. Puno Peru: Universidad nacional del Altiplano Facultad de Ciencias Agrarias.
- Aramayo, A. W. (2019). Distribucion Espacial del Riesgo de Sequia en la Region andina de Puno. Lima Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina Maestria en Recursos Hidricos.
- Box, P. G., & Jenkins, G. (1970). Series Temporales, Modelo Arima Metodologia de Box - Jenkins. Madrid: Instrumentos estadisticos Avanzados Facultad de Ciencias Economicas y Empresariales.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Applied Hydrology. McGraw-Hill. 582 p. International Edition.
- Curi, T. S. (2017). Caracterizacion de las Sequias Hidrologicas en la Vertiente del Oceano Pacifico. Puno: Escuela de pos Grado Universidad Nacional Agraria la Molina de Lima.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: A review. Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang. 2, 45–65, doi:10.1002/wcc.81.
- Dai, A. (2012). Increasing drought under global warming in observations and models. Nat. Clim. Chang. 3, 52–58. doi:10.1038/nclimate1633.



- Dai, A., Trenberth, K. E., & Qian, T. (2004). A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *J. Hydrometeorol.* 5, 1117–1130, doi:10.1175/JHM-386.1.
- Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., & Kunkel, K. E. (2000). Observed variability and trends in extreme climate events. A brief review. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 417–425, doi:10.1175/15200477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2.
- Fernandez, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile. Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. 4(4), 37-46 p.
- Flores, Q. E., Silva, D. C., & Flores, C. E. (2015). Modelacion de la Evapotranspiracion Potencial en el Altiplano de Puno. *Ciencia y Desarrollo*, 20. 83-90 / ISSN 23048891.
- Galvez, A. P. (2017). Caracterizacion de la sequias Historicas y Proyectadas Bajo Esenarios de Cambio Climatico en la Cuenca del Rio Mantaro. Lima Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina, Maestria en Recursos Hidricos.
- GCCIP. (1997). Global Climate Change Information Programme.
- Ge, Y., Apurv, T., & Cai, X. (2016). Spatial and Temporal Patterns of Drought in the Continental U.S. during the Past Century. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL069660.
- Gilford, M. (1992). South America South of the Amazon River: A Climatological Study (en línea). USAF Enviromental Technical Applications Center.
- Guerrero, V. P., & Yevjevich. (1975). analysis of Drought Caracteriscas by the theory of run. Hydrology paper N° 80, Colorado State University Fort Collins, Colorado, U.S.A.



- Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: a Calculation Algorithm1. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 35, 311–322
doi:10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x.
- Hayes, M. (2006). Drought Indices. *Van Nostrand's Sci. Encycl.* 13 pp,
doi:10.1002/0471743984.vse8593.
- INRENA. (2008). Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del río Ramis. Ayaviri Melgar Puno: Ministerio de Agricultura Instituto Nacional de Recursos Naturales Intendencia de Recursos Hídricos Administración Técnica del Distrito de Riego Ramis .
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013.*
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general. Principios y aplicaciones.* Quebec, Canadá: Universidad del País Vasco.
- McKee, MacKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the Eight Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA.* American Meteorological Society, pp 179-184.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conf. Appl. Climatol*, 179–184.
doi:citeulikearticle-id:10490403.
- Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie.* Limusa.
- Navarro, L. (2002). *Aproximación metodológica al estudio de secuencias secas de larga duración: el caso de las Islas Baleares.* Grupo de Climatología. Departamento de Geografía. Universidad de Barcelona.



- Niemeyer, S. (2008). New drought indices. *Options Méditerranéennes* 80, 267–274.
doi:10.1017/CBO9781107415324.004 .
- OMM. (1992). *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Ginebra, Suiza: Publicación No. 182.
- OMM. (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía, Información meteorologica y climatica para el desarrollo agricola sostenible*.
- OMM-No 1090. (2012). *Índice normalizado de precipitación: Guía del usuario*. CH-1211 Ginebra 2, Suiza: Organizacion Meteorologica Mundial: Tiempo-Clima-Agua METEOTERM, base terminológica de la OMM, está disponible en la página web: <http://www.wmo>.
- ONU. (1994). *Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación en los Países afectados por Sequía Grave o desertificación, en Particular en África*. Doc. A/AC.241/15/Rev 17. París.
- Organizacion Meteorologica Mundial. (2012). *Índice normalizado de precipitación Guia del Usuario*. CH-1211 Ginebra 2, Suiza: OMM-No 1090.
- Ortega, D., Velasco, I., Guitron, A., Arreguin, F., & Lopez, M. (2014). *La Gestión de Sequías en México: Avances y Retos*. Puerto Vallarta, México: XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought*. U.S. Weather Bur. Res, Pap. No. 45.
- Paredes, F., Millano, J. L., & Guevara, E. (2008). *Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996*. *Revista de Climatología*, Vol. 8 : pp 15-27.



- Salas, J. (1986). State of the art of statistical techniques for describing drought characteristics. International seminar on drought analysis, Perugia, Italia.
@@págs?
- Salas, J. (2000). Hidrología de Zonas Áridas y Semiáridas. *Ingeniería del Agua*, 7(4), 409-429.
- Salas, J., Fu, C., Cancelliere, A., Dustin, D., Bode, D., Pineda, A., & Vicent, E. (2005). Characterizing the Severity and Risk of Drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management*.(131) 5, pp. 383-393.
- Shanahan, T. M., Overpeck, J. T., Anchukaitis, K. J., Beck, J., Cole, J. E., Dettman, D. L., . . . King, J. W. (2009). Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa. *Science* (80-.). 324, 377–380, doi:10.1126/science.1166352.
- Subrahmanyam, V. (1967). Incidence and spread of continental drought. WMO/THD Report No 2, Ginebra.
- Tarazona, R. H. (2016). Modelamiento Hidrológico de la Cuenca del Río Ica con Fines de Prevención De Inundaciones En La Ciudad De Ica. Lima Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina Facultad de Ingeniería Agrícola.
- TDPS, T.-D. P.-S. (2011). *Perspectivas del Medio Ambiente*. Impreso en Colombia por Panamericana Formas e Impresos, S.A.: Publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, pp 55–94.
- Ticona, A. A. (2017). Determinación de las frecuencias de sequías en la sub cuenca del río huenque con fines de planeamiento de los recursos hídricos para uso en



- actividades agropecuarias . Puno Peru: Universidad Nacional del Altiplano Puno
Facultad de ingeniería Agrícola Tesis.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Chang.* 4, 17–22.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the 83 Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resour. Manag.* 21, 821–833. doi:10.1007/s11269-006-9105-4.
- Vasiliades, L., Loukas, A., & Liberis, N. (2011). A Water Balance Derived Drought Index for Pinios River Basin, Greece. *Water Resour. Manag.* 25, 1087–1101. doi:10.1007/s11269-010-9665-1 .
- Vega, J. F. (2018). Variabilidad Espacio-temporal de la sequia en el Peru y el Peligro Asociado al fenomino del Niño. Lima Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina Maestria en Recursos Hidricos.
- Velasco, I., Ochoa, L., & Gutierrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Revista Región y Sociedad XVII (34)*, 35-71.
- Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J. I., Begueria, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azurin-Molina, C., & Moran-Tejeda, E. (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *J. Hydrol. Eng.* 17, 318–332, doi:10.1061/(ASCE)HE.19435584.0000433.
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *J. Clim.* 17, 2335–2351. doi:10.1175/15200442(2004)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2.



- Wilhite, D. (2000). Drought as a natural hazard. En: Wilhite, D.A. (Ed.). Drought: A Global Assessment: London, UK: Routledge Publishers, (pp: 3-18) .
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* 10(3), 111-120 p.
- Wilhite, D., & Glantz, M. (1985). Understanding the drought phenomenon; the role of definitions. *Water International* 10:111-120.
- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought. Colorado State University, Hydrologic Paper No 23.
- Zapana , Q. M. (2019). Análisis de la Sequía Meteorológica de la Intercuenca de Apurímac y las Cuencas Alto Urubamba y Yavero Utilizando el Método de L momentos. Universidad Nacional Agraria la Molina Escuela de Posgrado Maestría en Recursos Hídricos, ps.112.
- Zavala. (2015). Determinacion de las frecuencias de sequias en la sub cuenca del río Huenque con fines de planeamiento de los recursos hídricos para uso en actividades agropecuarias. Puno Peru: Universidad Nacional del Altiplano de Puno.



ANEXOS

ANEXO 1: Desescalado de datos de modelos climáticos globales

Los datos climáticos de alta resolución que se han descargado pueden generar sesgos superiores al 5% en relación a los registros históricos del clima. Para contrarrestar este efecto, se utiliza la técnica estadística de DOWNSCALING, que se fundamenta en el enfoque de mapeo de cuartiles. El propósito principal de esta metodología es minimizar las discrepancias observadas tanto en las variables relacionadas con la temperatura como en las vinculadas a la precipitación. Es relevante señalar que, en el caso de la precipitación, es probable que persista un nivel de error más significativo en comparación con la temperatura, ya que su estimación se fundamenta en parametrizaciones en lugar de procesos termodinámicos directos. Para facilitar la implementación de este método estadístico, se pueden utilizar scripts o algoritmos disponibles en línea. Estos recursos, que se pueden encontrar en el siguiente enlace: (<https://github.com/Hydroenvironment/Statdownscaling>), ayudan a agilizar los cálculos y el procesamiento computacional, lo que ahorra tiempo en el análisis de los datos. Donde se realizará en la plataforma RSTUDIO.

Figura 14

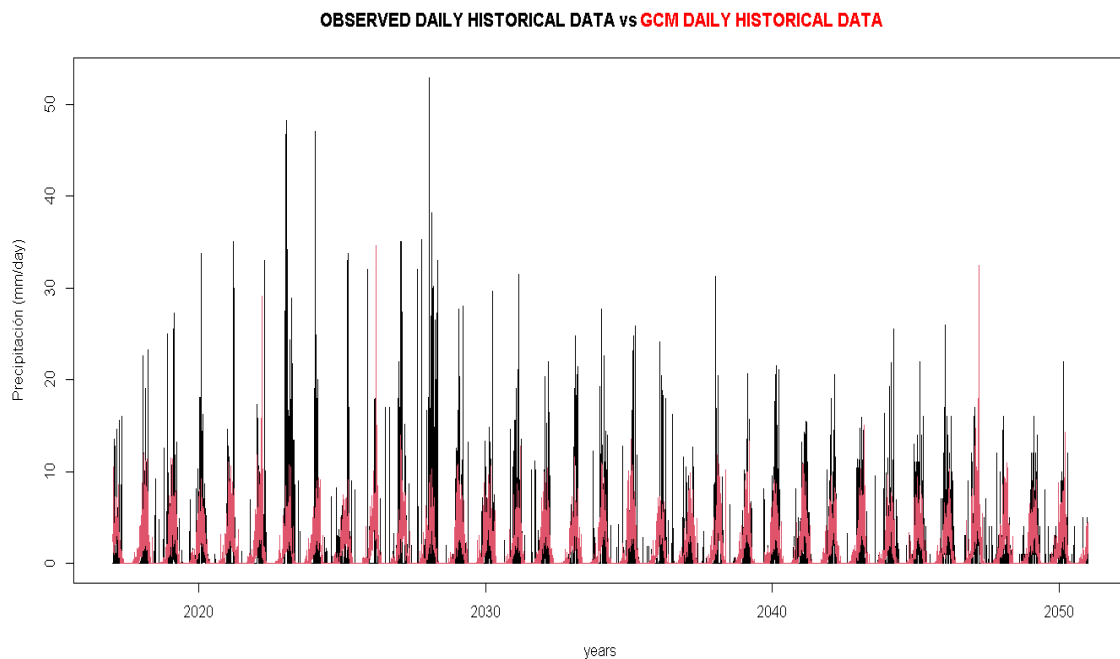
Script para el Desescalado estadístico

```
1 #####
2 #DOWNSCALING ESTADÍSTICO DE DATOS CLIMÁTICOS USANDO MAPEO DE CUANTILES (QMAP)#
3 #####
4 #Referencias#
5 #Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods
6 #https://www.hydroclimath-systems.com/2012/
7 #Qmap package information - README#
8 #https://cran.r-project.org/web/packages/qmap/qmap.pdf
9 #####
10 # INSTALAR Y CARGAR LOS PAQUETES NECESARIOS
11 setwd("C:/Users/Julia/Documents/INVESTIGACION/R SCRIPTS/downscaling/Darior")
12 getdat()
13 lat()
14 rm(list=ls())
15 #map = jmelola
16 #install.packages(c("qmap", "zoo", "latticeExtra"))
17
18 # CARGAR LAS LIBRERIAS
19 library(qmap)
20 library(zoo)
21 library(latticeExtra)
22
23 #####
```

Un aspecto importante del análisis implica la comparación entre datos históricos (color negro) y los datos climáticos proyectados (color rojo).

Figura 15

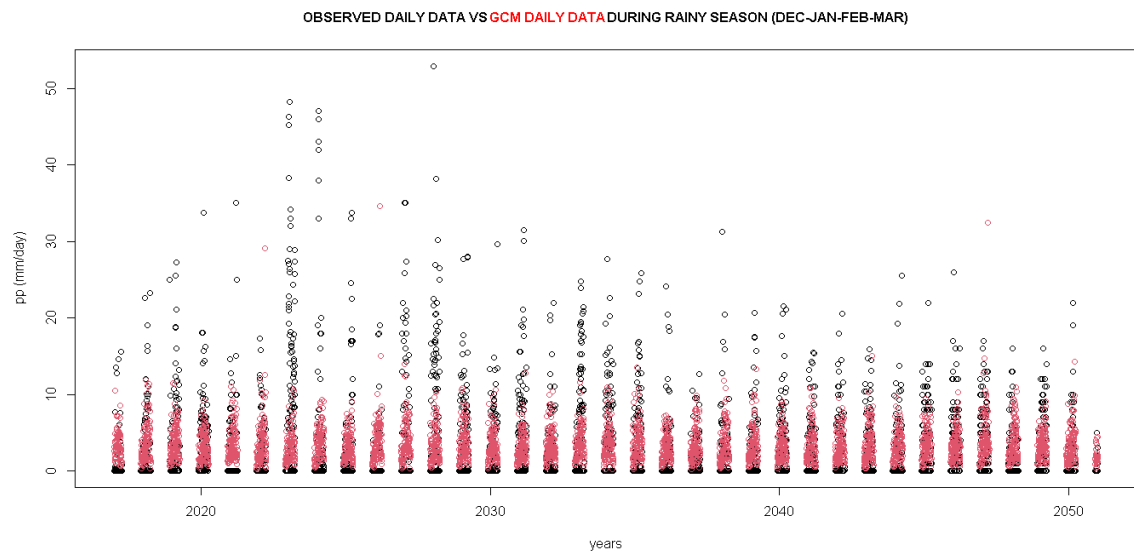
Representación lineal



Se evidencia que, en las regiones con menos lluvias durante la época seca, existe una propensión a una sobrevaloración en contraste con los datos reales observados. Mientras que, en las zonas con mayores precipitaciones durante la temporada de lluvias, se observa una tendencia a la subestimación de las proyecciones en comparación con los registros históricos. Y ello se visualiza:

Figura 16

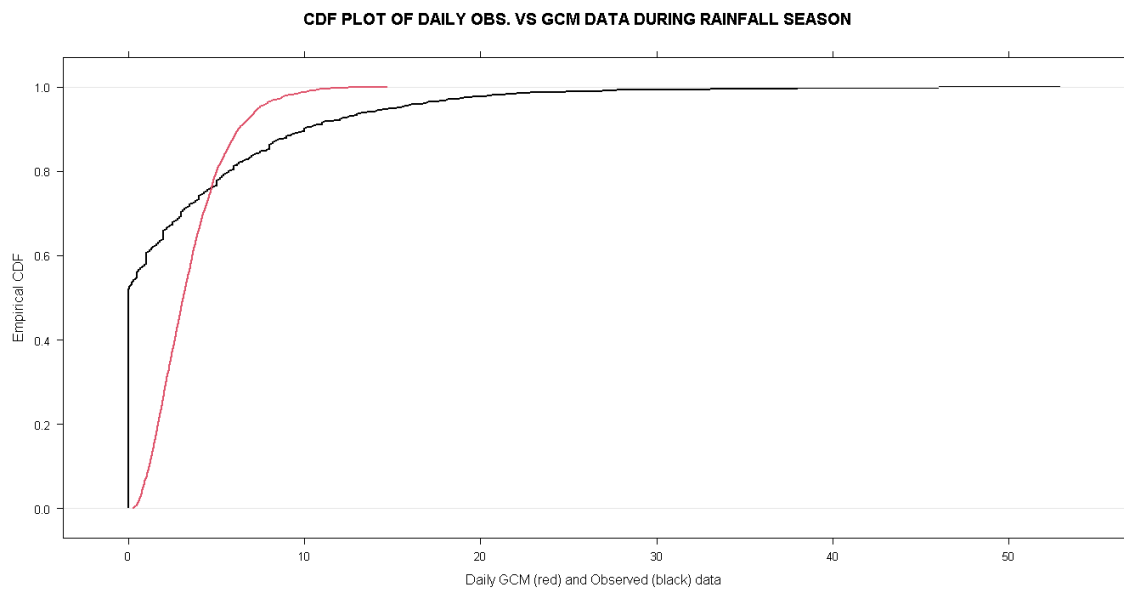
Representación de dispersión de puntos



Después de esto, se emplea la curva de distribución acumulativa (CDF) para observar que las curvas históricas no coinciden con las condiciones climáticas actuales, lo que motiva la aplicación del método estadístico de mapeo de cuartiles para la desescalada.

Figura 17

CFD de la data observada vs data climática



Y luego, al visualizar que no se acopla el comportamiento de la distribución de la data de los modelos climáticos globales, con la serie de datos observados de la estación. Se procede a ejecutar la desescalada estadística, que se basa en ajustar el patrón del comportamiento de dichas series.

Como resultado, se obtienen gráficos que representan la serie corregida de precipitación, donde se observa la información corregida en color azul, la información observada en color negro y los datos de los modelos climáticos globales en color rojo. Esto proporciona una interpretación que indica un mejor ajuste y una mejora sustancial, lo que aumenta la confiabilidad de las proyecciones. Al realizar este ajuste en el período histórico, se extiende el mismo ajuste y la tendencia hacia el crecimiento debido al cambio climático para todos los datos hasta el año 2050.

Figura 18

Representación lineal de la data corregida

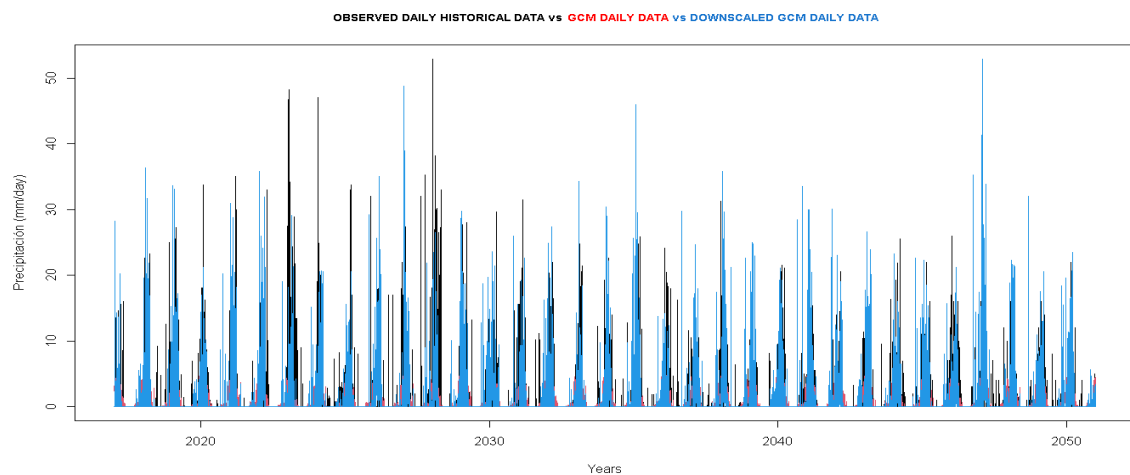
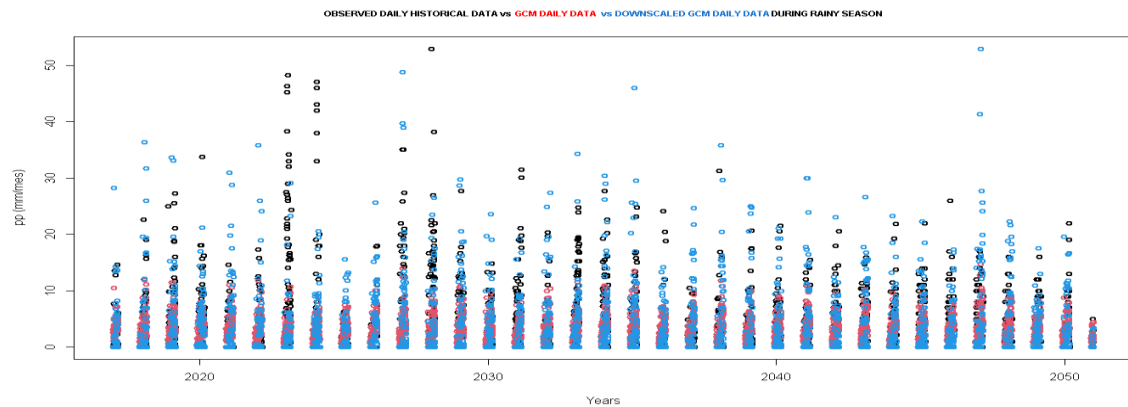


Figura 19

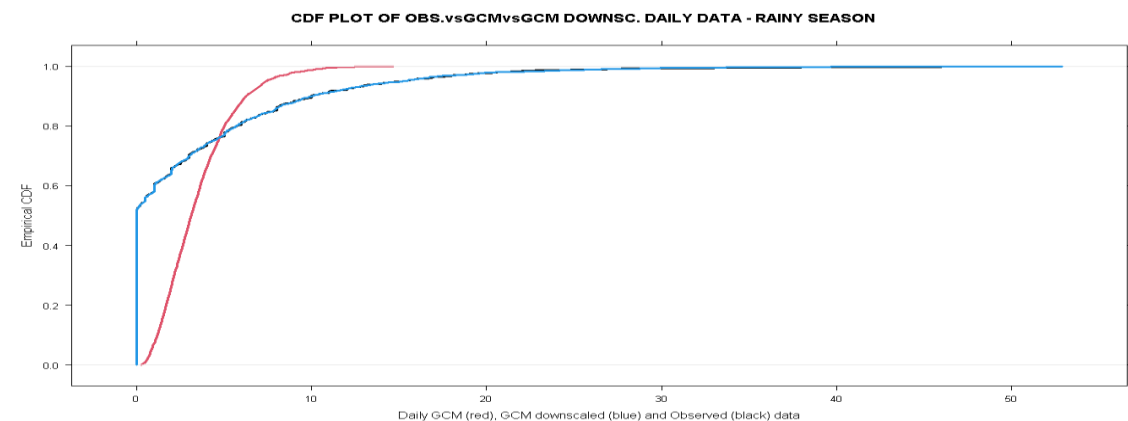
Representación por dispersión de puntos de la data corregida



Al final del proceso, se recurre nuevamente a la curva de distribución acumulativa (CDF) y se observa que las curvas históricas concuerdan de manera adecuada con la información desescalada, donde el color azul se superpone al color negro. Por lo tanto, se puede concluir que este método demuestra ser eficaz en la reducción del sesgo en nuestros datos climáticos.

Figura 20

CFD de la data observada vs climática vs desescalada



Una vez que se ha corregido la información mediante el proceso de desescalada, se procedió a calcular los valores promedio en un intervalo de varios meses tanto para el período histórico como para el proyectado en 2050, lo que condujo a los resultados que se presentan a continuación:



ANEXO 02: Desescalado de datos – forma automática

Este código en R realiza un proceso del Desescalado Estadístico usando datos históricos y proyecciones climáticas modeladas. A continuación, se describe paso a paso el propósito y funcionamiento de cada sección clave del script:

1. Cargar librerías necesarias

```
library(dplyr)
```

```
library(lubridate)
```

```
library(qmap)
```

```
library(zoo)
```

```
library(latticeExtra)
```

```
library(readxl)
```

- Se cargan las librerías requeridas para:
- Manipulación de datos (dplyr y lubridate).
- Mapas de cuantiles (Quantile Mapping, qmap).
- Series temporales y datos ordenados (zoo).
- Lectura de archivos Excel (readxl).

2. Configurar la carpeta de trabajo

```
setwd('D:/JoseLarico/regionalizacion/')
```

- Se establece el directorio de trabajo donde están los archivos climáticos históricos y modelados.

3. Leer datos históricos

```
data_pr_his <- read_excel("Histórico_Est.xlsx")
```

```
data_tmax_his <- read_excel("Tmáx_esta.xlsx")
```



```
data_tmin_his <- read_excel("Tmín_esta.xlsx")
```

- Se leen los archivos históricos de precipitación

4. Configuración inicial

- Se define información general sobre las variables y rangos de fechas:

Número de variables y nombres

```
n_var <- 3
```

```
vec_var_2 <- c('TASMAX','TASMIN','PR')
```

```
vec_var_3 <- c('MAX','MIN','PR')
```

Fechas históricas y modeladas

Para Data Historica Observada

```
fecha_in_his_pr <- as.Date('1981-01-01')
```

```
fecha_fin_his_pr <- as.Date('2016-12-31')
```

Para la Data GCM

```
fecha_in_pr <- as.Date('1950-01-01')
```

```
fecha_fin_pr <- as.Date('2099-12-31')
```

- Se establecen los periodos de datos históricos y modelados para cada variable.

5. Definición de la función ds()

- La función **ds()** realiza el ajuste de datos modelados a datos históricos usando **Quantile Mapping (QM)**. Esto ajusta las distribuciones de los datos modelados para que coincidan con los datos observados históricos.



Entrada:

- Fechas de inicio/fin de los periodos históricos y modelados.
- Datos históricos (data_his) y modelados (data_model y data_model_his).
- Variable climática (var).

Salida:

- Un marco de datos ajustado a nivel diario.

Desglose del flujo interno:

1. Preparar datos históricos y modelados

- Se seleccionan y filtran columnas relevantes para los periodos de interés.
- Se rellenan fechas faltantes.

2. Completar valores faltantes

```
OBS_hist <- OBS_hist %>%
```

```
mutate(OBS_hist = ifelse(is.na(OBS_hist), 0.1, OBS_hist))
```

- Se completan datos faltantes con valores mínimos: 0.1 para precipitación y 15°C para temperaturas.

3. Aplicación de Quantile Mapping

```
qm_fit <- fitQmapQUANT(...)
```

```
mod_sl_qmapped <- doQmapQUANT(...)
```

- fitQmapQUANT(): Ajusta las distribuciones observadas y modeladas para cada mes.



- `doQmapQUANT()`: Aplica el ajuste a los datos modelados.
4. **Combinar resultados** Los resultados ajustados para cada modelo climático se agrupan en un único marco de datos.

5. Iteración sobre estaciones y variables

- El código procesa todas las estaciones climáticas disponibles y ajusta las proyecciones para cada una de las tres variables: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación.

Selección de archivos

```
files_eliminar <- c("down.R", "down2.R", "down3.R", ...)
```

```
estaciones <- setdiff(dir(), files_eliminar)
```

- Se excluyen archivos irrelevantes para identificar únicamente carpetas de estaciones.

Bucle principal

```
for (estacion in 1:n_estacion) {
```

```
  for (z in 1:3) { ... }
```

- Se procesa cada estación (`estaciones[estacion]`).
- Se regionalizan todas las variables (`vec_var_3[z]`).

Cargar y transformar datos modelados

- Por ejemplo, para la temperatura máxima:

```
var_model <- read.csv(paste0(estaciones[estacion], '/RCP4585TASMAX.csv'))
```

```
%>%
```

```
  mutate_if(is.numeric, dif.273, na.rm=FALSE) %>%
```

```
  mutate(isodate = as.Date(isodate))
```

- Se convierten las temperaturas de Kelvin a Celsius.



Aplicar regionalización

- Se llama a la función `ds()` para ajustar datos modelados a datos históricos:

```
list_time <- ds(time_ini_his = fecha_in_his_max, ...)
```

6. Exportar resultados

- Los datos ajustados por estación y variable se guardan en archivos separados. Aunque esta parte no se muestra explícitamente en el fragmento proporcionado, se intuye que los resultados se guardan al final de cada iteración.



INTERPRETACIÓN

En el contexto de la modelización climática y el uso de proyecciones de modelos de circulación general (GCM), se puede justificar el desescalado de la siguiente manera:

Consistencia temporal entre el histórico observado y el GCM: Aunque la serie histórica observada cubra el período 1981-2016, y el GCM tenga datos desde 1950 hasta 2099, se puede justificar el desescalado porque los GCM son modelos globales que simulan el clima a nivel global, y sus resultados pueden ajustarse para representar condiciones locales o regionales.

- En este caso, la correspondencia entre los períodos históricos del GCM (1950-2005) y la serie histórica observada (1981-2016) proporciona una base de comparación válida para aplicar un ajuste o desescalado, dado que el GCM refleja una tendencia global que se puede correlacionar con los datos locales, permitiendo adaptar las proyecciones a las condiciones observadas en la serie histórica.

Proceso de escalado y desescalado: El desescalado implica ajustar los valores de las proyecciones del GCM para que reflejen más fielmente las condiciones observadas, en lugar de utilizarlas directamente. Esto se hace para corregir cualquier posible sesgo en las proyecciones del modelo y para que se alineen mejor con los datos históricos observados en la región de estudio.

- Si el GCM tiene un período histórico de 1950-2005, se pueden usar los datos observados de 1981-2016 para comparar las tendencias de variabilidad climática (como la temperatura y precipitación) y ajustar las proyecciones futuras del GCM. De esta manera, el desescalado permite la integración de las proyecciones futuras del GCM con las observaciones históricas locales, sin perder de vista los cambios climáticos globales representados en el modelo.



Ajuste de las proyecciones futuras: El desescalado también se justifica cuando se desea usar las proyecciones del GCM para escenarios futuros (después de 2005). Aunque los datos del GCM son históricos hasta 2005, se puede ajustar el modelo para extender las proyecciones futuras utilizando el comportamiento de las variables climáticas en los períodos coincidentes (1950-2005 para el GCM y 1981-2016 para las observaciones).

- Este enfoque se utiliza en muchos estudios climáticos y permite realizar análisis de vulnerabilidad, adaptación y mitigación basados en las proyecciones de los GCM ajustadas a condiciones locales observadas.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JOSE LUIS LARICO PARI,
identificado con DNI 70222222 en mi condición de egresado de:

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

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO SOBRE
LA DISPONIBILIDAD HIDRICA EN LA
CUENCA DEL RIO NUÑOA "

Es un tema original.

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

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

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

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

Puno 15 de DICIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo JOSE LUIS LARICO PARI,
identificado con DNI 70282828 en mi condición de egresado de:

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

INGENIERIA AGRICOLA

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

" INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO
SOBRE LA DISPONIBILIDAD HIDRICA EN LA CUENCA
DEL RIO NUÑOA "

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 13 de DICIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella