



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



**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DATOS DE REANÁLISIS
ERA5 EN EL MODELADO HIDROLÓGICO
MENSUAL DEL RÍO RAMIS**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. CHRISTIAN EULER PAREDES CONDORI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO - PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DATOS DE REANÁLISIS ERA5 EN EL MODELA DO HIDROLÓGICO MENSUAL DEL RÍO RAMIS

AUTOR
CHRISTIAN EULER PAREDES CONDORI

RECuento DE PALABRAS
26882 Words

RECuento DE CARACTERES
123112 Characters

RECuento DE PÁGINAS
108 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO
2.3MB

FECHA DE ENTREGA
May 14, 2024 1:19 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME
May 14, 2024 1:22 PM GMT-5

● 15% de similitud general

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

- 15% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

José A. Mamani Gomez
CIP: 86409



Resumen



DEDICATORIA

A mis padres Andres Avelino Paredes Ticona y Valentina Condori Mamani, por su apoyo incondicional, amor y sacrificio inquebrantable en cada etapa de mi formación académica, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye esta tesis.

A mis Docentes, por haberme formado y guiado profesionalmente e impartido enseñanzas.

A la Universidad Nacional del Altiplano, a la Facultad de Ingeniería Agrícola por haberme brindado las herramientas para crecer profesionalmente.

A mis hermanos Jhon Wilner, Tony Mirko y Edaly Yamileth por haberme acompañado en lograr mis objetivos y metas de mi vida.

A mi compañera de vida Kathia Anali que estuvo siempre presente apoyándome acompañándome en cada paso para lograr este objetivo.

Christian Euler Paredes Condori



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme estar presente en este mundo y por iluminarme el camino para lograr todos mis objetivos.

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional Del Altiplano a la Facultad De Ingeniería Agrícola por haberme convertido en un profesional en lo que tanto me apasiona.

Mi gratitud especial a mis jurados; Ph.D Lorenzo Gabriel Cieza Coronel, Dr. Edilberto Huaquisto Ramos y al M.Sc. Yony Angel Laqui Vilca que me brindaron sus conocimientos y formaron parte de la tesis.

Agradezco profundamente a mi Asesor Dr. Jose Antonio Mamani Gomez que siempre estuvo apoyándome y guiándome en la elaboración de la tesis.

Christian Euler Paredes Condori



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1.1. Problema general.....	15
1.1.2. Problemas específicos	15
1.2. HIPÓTESIS	15
1.2.1. Hipótesis general	15
1.2.2. Hipótesis específicas	16
1.3. OBJETIVOS.....	16
1.3.1. Objetivo general	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.4. JUSTIFICACIÓN	16



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.1.1.	Internacionales	19
2.1.2.	Nacionales	25
2.1.3.	Regionales	28
2.2.	MARCO TEÓRICO	30
2.2.1.	Datos hidrometereológicos.....	30
2.2.2.	Datos hidrometereológicos SENAMHI	31
2.2.3.	Datos de reanálisis ERA5.....	33
2.2.4.	Precipitación.....	35
2.2.5.	Evapotranspiración.....	37
2.2.6.	Modelo hidrológico	40
2.2.7.	Modelo hidrológico GR2M.....	42

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	ZONA DE ESTUDIO.....	46
3.1.1.	Localización política	46
3.1.2.	Localización geográfica	46
3.1.3.	Localización hidrológica	47
3.1.4.	Diseño de investigación	48
3.1.5.	Enfoque de investigación	48
3.1.6.	Nivel de investigación.....	49
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	49
3.2.1.	Población.....	49



3.2.2. Muestra.....	49
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	50
3.3.1. Técnicas.....	50
3.3.2. Instrumentos	50
3.4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	51
3.4.1. Objetivo específico 1.....	52
3.4.2. Objetivo específico 2.....	54
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN SENAMHI Y ERA5	58
4.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GR2M	61
4.2.1. Calibración del modelo GR2M - SENAMHI.....	61
4.2.2. Validación del modelo GR2M - SENAMHI.....	64
4.2.3. Calibración del modelo GR2M – ERA5	66
4.2.4. Validación del modelo GR2M – ERA5	68
4.2.5. Eficiencia del modelo GR2M.....	70
4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	72
V. CONCLUSIONES	77
VI. RECOMENDACIONES	79
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS.....	88

Área: Ingeniería y Tecnología

Línea: Recursos Hídricos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 21 de mayo del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Datos disponibles en la base de datos de ECMWF..... 35
Tabla 2	Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio 49
Tabla 3	Radiación extraterrestre 53
Tabla 4	Rango del criterio Nash-Sutcliffe 56
Tabla 5	Rango del criterio Coeficiente de correlación “r”..... 56
Tabla 6	Rango del criterio PBIAS 57
Tabla 7	Datos anuales promedio de SENAMHI y ERA5 58
Tabla 8	Indicadores estadísticos de eficiencia 70
Tabla 9	Matriz de consistencia..... 89
Tabla 10	Precipitación del sector de estudio – SENAMHI 91
Tabla 11	Precipitación del sector de estudio – ERA5..... 92
Tabla 12	Temperatura mínima del sector de estudio – SENAMHI..... 93
Tabla 13	Temperatura máxima del sector de estudio – SENAMHI 94
Tabla 14	Temperatura mínima del sector de estudio – ERA5 95
Tabla 15	Temperatura máxima del sector de estudio – ERA5 96
Tabla 16	Evapotranspiración del sector de estudio – SENAMHI 97
Tabla 17	Evapotranspiración del sector de estudio – ERA5..... 102



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Datos hidrometeorológicos SENMAHI..... 32
Figura 2	Mapas globales de parámetros de datos ERA5..... 34
Figura 3	Precipitación 36
Figura 4	Radiación Solar hemisferio norte y sur..... 40
Figura 5	Modelo GR2M 43
Figura 6	Cuenca del sector de estudio..... 48
Figura 7	Diagrama de flujo 51
Figura 8	Datos anuales promedio de precipitación 59
Figura 9	Datos anuales promedio de temperatura..... 60
Figura 10	Datos anuales promedio de evapotranspiración..... 60
Figura 11	Calibración del modelo GR2M - SENAMHI 62
Figura 12	Hidrograma - Calibración del modelo GR2M - SENAMHI..... 63
Figura 13	Correlación R2 – Calibración del modelo GR2M - SENAMHI..... 63
Figura 14	Validación del modelo GR2M - SENAMHI 64
Figura 15	Hidrograma - Validación del modelo GR2M - SENAMHI..... 65
Figura 16	Correlación R2 – Validación del modelo GR2M - SENAMHI..... 65
Figura 17	Calibración del modelo GR2M – ERA5..... 66
Figura 18	Hidrograma - Calibración del modelo GR2M – ERA5 67
Figura 19	Correlación R2 – Calibración del modelo GR2M – ERA5 67
Figura 20	Validación del modelo GR2M – ERA5..... 68
Figura 21	Hidrograma - Validación del modelo GR2M – ERA5 69
Figura 22	Correlación R2 – Validación del modelo GR2M – ERA5 69



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Matriz de consistencia.....	89
ANEXO 2 Datos de precipitación SENAMHI – ERA5 del sector de estudio.....	91
ANEXO 3 Datos de temperatura SENAMHI – ERA5 del sector de estudio	93
ANEXO 4 Datos de evapotranspiración SENAMHI – ERA5.....	97



ACRÓNIMOS

ANA:	Autoridad Nacional del Agua
MIDAGRI:	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú
MINSA:	Ministerio de Salud
INDECI:	Instituto Nacional de Defensa Civil
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
ECMWF:	Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio
ERA5:	Reanálisis Atmosférico del clima global del ECMWF de quinta generación
BDHM:	Banco de Datos Hidrometeorológicos
GR2M:	Génie Rural – Modelo de Ingeniería Rural
ET:	Evapotranspiración
ETP:	Evapotranspiración potencial
ETO:	Evapotranspiración del cultivo de referencia
CC. PP.:	Centro Poblado
NSE:	El coeficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe
PBIAS:	Porcentaje de Sesgo
RMSE:	Raíz del Error Cuadrático Medio



RESUMEN

La investigación tiene como objetivo evaluar el desempeño de datos de reanálisis ERA5 en el modelado hidrológico mensual del Río Ramis, la metodología de la cuenca del Río Ramis ubicada en el departamento de Puno es de tipo no experimental, cuantitativo y descriptivo, el método fue la recopilación de información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ERA5), empleando el modelo hidrológico GR2M para la simulación de caudales, evaluando su eficiencia mediante Nash Sutcliffe (NSE), el Coeficiente de correlación (r), el Sesgo relativo (BIAS) y la Raíz de error medio cuadrático (RMSE). Los resultados indican que el modelo GR2M con datos del SENAMHI en el indicador “NSE” es 0.90 para la calibración, y 0.85 para la validación, con datos de ERA5 el “NSE” es 0.79 para la calibración, y 0.69 para la validación, el indicador “ r ” es 0.94 para la calibración, y 0.92 para la validación, con datos de ERA5 el “ r ” es 0.90 para la calibración, y 0.89 para la validación, el indicador “PBIAS” es -4.43 para la calibración, y 0.57 para la validación, con datos de ERA5 el “PBIAS” es -10.26 para la calibración, y -33.28 para la validación, el indicador “RMSE” es 5.41 para la calibración, y 6.07 para la validación, con datos de ERA5 el “RMSE” es 7.06 para la calibración, y 8.79 para la validación. Las conclusiones indican que el modelo hidrológico GR2M con los datos del SENAMHI y ERA5 para simular caudales mensuales de la cuenca del Río Ramis mediante los parámetros de eficiencia en el modelo según “NSE” presenta un muy buen ajuste y desempeño, según “ r ” presenta una fuerte correlación, según “PBIAS” presenta una sobrestimación, pero es aceptable, según “RMSE” presenta un buen ajuste y aceptable a los datos observados.

Palabras clave: ERA5, Modelado hidrológico, Río Ramis.



ABSTRACT

The research has the objective evaluate the performance of the ERA5 reanalysis data in the monthly hydrological modeling of the Ramis River, the methodology of The Ramis River basin located in the department of Puno is non-experimental, quantitative and descriptive, the method was the collection of information from the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru (SENAMHI) and the European Center for Medium-Term Meteorological Prediction . (ERA5), using the GR2M hydrological model for flow simulation, evaluating its efficiency using Nash Suftcliffe (NSE), the Measurement Coefficient (r), the Relative Bias (BIAS) and the Root Mean Squared Error (RMSE). The results indicate that the GR2M model with SENAMHI data in the “NSE” indicator is 0.90 for calibration, and 0.85 for validation, with ERA5 data the “NSE” is 0.79 for calibration, and 0.69 for validation, the indicator “ r ” is 0.94 for calibration, and 0.92 for validation, with ERA5 data the “ r ” is 0.90 for calibration, and 0.89 for validation, the “PBIAS” indicator is -4.43 for calibration, and 0.57 for validation, with ERA5 data the “PBIAS” is -10.26 for calibration, and -33.28 for validation, the “RMSE” indicator is 5.41 for calibration, and 6.07 for validation, with ERA5 data the “RMSE ” is 7.06 for calibration and 8.79 for validation. The conclusions indicate that the GR2M hydrological model with SENAMHI and ERA5 data to simulate monthly flows of the Ramis River basin using the efficiency parameters in the model according to “NSE” presents a very good fit and performance, according to “ r ” presents a strong estimate, according to “PBIAS” presents an overestimation but is acceptable, according to “RMSE” it presents a good and acceptable fit to the observed data.

Keywords: ERA5, Hydrological Modeling, Rio Ramis.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El inconveniente más conocido para la utilización de modelos hidrológicos es la información escasa o incompleta de datos hidrológicos y meteorológicos, además de que en ciertas zonas y áreas del Perú no se tiene disponibilidad de estaciones hidrometeorológicas por lo tanto no se cuenta con esta información, asimismo los datos de precipitación, temperatura, etc. tienen registros incompletos. En ese sentido para complementar y/o emplear la información hidrometeorológica se tiene los datos de reanálisis ERA5 que posee información global con una resolución temporal y espacial adecuada, lo que puede ser óptimo para modelar fenómenos hidrológicos a escala local, como la cuenca del río Ramis.

El modelado hidrológico es una herramienta fundamental para la predicción de caudales, el análisis de la dinámica de los ríos y la evaluación de impactos en el ciclo hidrológico (Hersbach et al., 2019). Mientras que los datos de reanálisis ERA5 proporcionado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo Medio (ECMWM), ofrece estimaciones por hora para numerosas variables climáticas atmosféricas, planetarias y oceánicas. (Copernicus Climate Change Service [C3S], 2022).

En este sentido, el uso de datos climáticos precisos y confiables es esencial para garantizar la precisión de los modelos hidrológicos y ERA5 es una base de datos climáticos globales de alta resolución producida por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo que proporciona información detallada sobre variables atmosféricas, como temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, entre otros



(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2023). Por lo tanto según lo expuesto la investigación se plantea el objetivo de evaluar el desempeño con los datos de reanálisis ERA5 en el modelado hidrológico mensual del Río Ramis (modelo hidrológico GR2M), así mismo comparando con los datos hidrológicos y meteorológicos brindados y de estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI evaluando los modelos hidrológicos mediante los parámetros de eficiencia Nash Sutcliffe (NSE), el Coeficiente de correlación (r), el Sesgo relativo (BIAS) y la Raíz de error medio cuadrático (RMSE).

1.1.1. Problema general

¿Cuál es la calidad de los datos de reanálisis ERA5 para el modelado hidrológico mensual del Río Ramis?

1.1.2. Problemas específicos

PE1: ¿Cuál es la precisión de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial de ERA5 en comparación con las mediciones de estaciones meteorológicas del SENAMHI?

PE2: ¿Cuál es la precisión del modelo hidrológico GR2M en la simulación de caudales medios mensuales del río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5?

1.2. HIPÓTESIS

1.2.1. Hipótesis general

El modelado hidrológico mensual del Río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5 con el modelo GR2M presenta un buen ajuste y es aceptable.



1.2.2. Hipótesis específicas

HE1: La precisión de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial de ERA5 es bueno así como las mediciones de estaciones meteorológicas del SENAMHI.

HE2: El modelo hidrológico GR2M presenta una precisión adecuada en la simulación de caudales medios mensuales del Río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de datos de reanálisis ERA5 en el modelado hidrológico mensual del Río Ramis.

1.3.2. Objetivos específicos

OE1: Determinar los datos de precipitación y evapotranspiración potencial de ERA5 y con mediciones de estaciones meteorológicas del SENAMHI para su uso en el modelado hidrológico.

OE2: Evaluar la capacidad del modelo hidrológico GR2M para simular caudales medios mensuales del Río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5.

1.4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica debido la importancia de herramientas como los modelamientos hidrológicos que se emplean para simular y entender los procesos del ciclo del agua en una cuenca hidrográfica o sistema hidrológico. Los modelos hidrológicos permiten representar y predecir cómo interactúan y se comportan los



distintos componentes del ciclo hidrológico, como la precipitación, la escorrentía, la infiltración, la evaporación, entre otros. (Lujano et al., 2023).

Las estaciones meteorológicas sirven para medir temperatura, humedad, precipitaciones, viento, entre otros (SENAMHI, 2023). Si bien se cuenta con una gran cantidad de estaciones hidrológicas y meteorológicas en todo el Perú, aun es insuficiente para cubrir lugares específicos, de acuerdo a (Huaman, 2023) menciona que uno de los inconvenientes más conocidos para emplear la modelación hidrológica distribuida para las regiones alto-andinas, es la escasa información hidrometeorológica, geológica, cobertura vegetal y uso de suelos; en esta circunstancia, la utilización de modelos simplificados o agregados se muestra como una opción útil para estimar la disponibilidad hídrica a nivel mensual, ya que la modelación hidrológica es la base para la gestión integral del recurso hídrico, en ese sentido el uso de ERA5 para el modelado hidrológico puede mejorar la precisión de los resultados y proporcionar una mejor comprensión de los procesos hidrológicos en una cuenca, además, el uso de datos de alta resolución puede permitir una mejor comprensión de la variabilidad espacio-temporal de los procesos hidrológicos, lo que puede ser útil en la identificación de tendencias y la evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos (Dhawan et al., 2023).

Asimismo para evaluar el desempeño de datos de reanálisis ERA5 en el modelado hidrológico mensual del Río Ramis con el modelo hidrológico GR2M se emplean los parámetros de eficiencia, que se utilizan para evaluar qué tan bien un modelo hidrológico simula los procesos hidrológicos y reproduce los datos observados, la eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), que es empleado como criterio para evaluar el poder reproductivo del modelo hidrológico, que consiste en la comparación de la magnitud relativa de la varianza residual de los datos de medición. (Ocampo, 2012), el Coeficiente de correlación (r), que es una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel



por intervalos o de razón. (Hernández et al., 2010); el Sesgo relativo (BIAS), es el índice de frecuencia de sesgo, que representa la relación entre la frecuencia de eventos simulados y la de los observados. (Kim et al., 2015) y la Raíz de error medio cuadrático (RMSE), mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, además es uno de los dos indicadores de rendimiento principales para un modelo predictivo de regresión. (Gonzalez, 2018).



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Internacionales

Dhawan et al. (2023) en su artículo el objetivo fue evaluar la demanda de agua potable por medio del modelado de la base de datos de reanálisis ERA5-Land Data, comparando y analizando los rendimientos del modelo, en la región montañosa de Trentino Alto Adige en la parte norte de Italia, la metodología empleada fue la recolección de la demanda de agua y los datos meteorológicos de estaciones del sector comparando con los datos de reanálisis ERA5. Los resultados indican un valor medio es del 72% frente al 66% de las mediciones, la temperatura con ERA5 es significativamente más frío que los valores de la estación terrestre (10 °C frente a 13 °C). La última variable utilizada es la radiación, donde se presenta un ligero patrón a lo largo del año, con ERA5 que sobreestima las mediciones reales con una media de 542.88 kJ m⁻² contra el valor real de 520.69 kJ m⁻². Concluyendo que, aunque los datos de ERA5 son una buena representación de las condiciones climáticas, existen algunos sesgos con respecto a las mediciones, lo que genera inexactitud en las entradas del algoritmo de pronóstico de la demanda de agua.

Almonacid et al. (2019) en su investigación tuvo como objetivo, crear una base de datos de precipitación en la zona de estudio (Argentina) con datos de reanálisis ERA5, la metodología empleada fue la recolección de registros mensuales de precipitación de las estaciones del sector (Banco de Datos



Hidrometeorológicos - BDHM) e información de la base de datos de ERA5 asimismo midiendo los parámetros estadísticos “r”, “BIAS”, “RMSE”, los resultados se obtuvieron a partir de la comprobación de las calidades y homogeneidades de las precipitaciones, además realizando las validaciones independientes con estaciones de pluviómetros, esta base de datos de precipitación demostró buenos desempeños en su estimación obteniendo valores de la precipitación de entre 150 mm, 300 mm y 700 mm al año en el sector de estudio contando con un índice de correlación (r) de $r > 0.5$, RMSE de 0.31 y PBIAS de 16.47, por lo tanto las conclusiones indican un óptimo desempeño de la base de datos ERA5 pero subestimando los datos de validación en un 21%.

Nogueira (2020) en su estudio con el objetivo de realizar la comparación de bases de datos de precipitaciones ERA-5, ERA-interim y GPCP en los últimos 40 años, realizado en la ciudad de Lisboa – Portugal, empleando la metodología de recolección de información de la base de datos del Proyecto Global de Climatología de Precipitaciones (GPCP), ERA5 y ERA-Interim del ECMWF, asimismo midiendo los parámetros estadísticos “p”, “BIAS” y “RMSE”, los resultados indican que la precipitación desde 1979-2018 fue de 2.69 mm/día en GPCP, 2.91 mm/día en ERA-5, esto corresponde a una reducción del sesgo muy pequeña (0.2 mm/día), los valores de p de 0.04 y < 0.01 y el RMSE relativamente bajo, concluyendo que los datos de ERA-5 muestra un sesgo más bajo y un error cuadrático medio imparcial, además de genera valores de precipitaciones excesivas.

Pelosi et al. (2020) en su estudio con el objetivo de la comparación de ERA5 y UERRA MESCAN-SURFEX Reanálisis de Datos evaluando la evapotranspiración como Referencia, asimismo evalúa el rendimiento de las



estimaciones de ET_0 basados en datos meteorológicos, en el área de estudio (Campania - Italia), empleando la metodología de recolección de datos de reanálisis meteorológicos UERRA MESCAN-SURFEX y ERA5 del ECMWF, además de realizar el análisis de desempeño estadístico BIAS y RMSE, los resultados indican que el cálculo de la evapotranspiración con las variables de temperatura y radiación de la base de datos, donde el BIAS de temperatura varía en la región de $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un RMSE medio de $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un RMSE máximo de $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, el BIAS de radiación solar varía de -30 W m^{-2} a 20 W m^{-2} , con un RMSE medio igual a 30 W m^{-2} y un RMSE máximo de 53 W m^{-2} , concluyendo en la región de estudio el BIAS fue inferior al 5 % para todas las bases de datos y el RMSE para ET_0 calculado con datos de ERA5 fue del 17%, mientras que con datos de UMS fue del 22%, lo que el estudio confirma que los datos de reanálisis puede sustituir la falta de disponibilidad de datos meteorológicos observados para la evaluación regional de ET_0 .

Vanella et al. (2022) en su estudio cuyo objetivo fue la comparación del uso del conjunto de datos de reanálisis ERA5 y datos agrometeorológicos terrestres bajo diferentes climas y topografía en ciudades del territorio de Italia, se empleó el método de recolección de datos de las estaciones terrestres italianas, analizando los datos con los parámetros de RMSE y PBIAS, los resultados de temperatura de ERA5 se estimaron con buena precisión mediante el conjunto de datos de reanálisis ERA5 en todos los distritos, mostrando valores promedio de RMSE de $1.46\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.76\text{ }^{\circ}\text{C}$, los valores de PBIAS variaron entre el 0.38 %, 6.62 %, $-9.22\text{ }%$, concluyendo que estos parámetros indica una subestimación específica del sitio del 9% y una sobreestimación del 4% en los sitios de estudio de Campania y Emilia-Romaña pero asimismo indica buenos rendimientos en las



estimaciones de ETo por parte de la base datos de ERA5 lo que confirma el potencial de usar conjuntos de datos de reanálisis como una fuente de datos alternativa para calcular la ET0 y superar la falta de disponibilidad de datos observados.

Hormazábal et al. (2021) en su estudio con el objetivo de realizar la simulación hidrológica empleando el modelo hidrológico weap, utilizando datos de una variedad de fuentes, incluidos datos recopilados en el lugar, análisis realizados cerca del área de estudio (Chile) y datos de consumo (ciudadanos y cultivos), la metodología empleada fue la recolección de la base de datos meteorológica y climatológica (26 estaciones) requeridas para el modelo hidrológico, base de datos de Atlas de Riesgo Climático (Center for Climate and Resilience Research) y del producto climatológico ERA5 de Climate Copernicus, los resultados de la simulación efectuada constituye una primera aproximación a las tendencias que manifiesta la microcuenca Batuco y podrá ser calibrada y validada en la medida que se disponga de datos de caudal observado con un R2 de ≈ 0.57 y de ≈ 0.88 , concluyendo que la varianza compartida (R2) entre la precipitación y el caudal simulado fue de ≈ 0.46 , mientras que la correlación entre la temperatura y el caudal simulado fue de ≈ -0.84 lo cual no existe mucha diferencia entre los datos de estudio.

Xu et al. (2022) en su estudio con el objetivo de determinar el rendimiento hidrológico empleando la base de datos de precipitación ERA5 y MERRA-2 sobre la cuenca de los Grandes Lagos (América del Norte – Estados Unidos), el método aplicado fue la recolección de datos de reanálisis del producto ERA5 y MERRA-2 (datos de precipitación y temperatura), y la evaluación de la eficiencia con los parámetros de “r” y “RMSE” los resultados promedios de los valores de “r” van



desde 0.40 a 0.70, los resultados promedios de los valores de “RMSE” van desde 3.0 a 9.0, concluyendo con la sobreestimación de las precipitaciones por ERA5, especialmente en invierno y primavera, como era de esperar, debido a la discrepancia en las fuentes de datos, ERA5 TP y MERRA-2 PRECTOTCORR tuvieron un desempeño diferente, el rendimiento relativo de los dos productos de precipitación también varía espacialmente. PRECTOTCORR tiende a superar a ERA5 en la estimación de precipitación en las áreas densas en pluviómetros. En cuanto a las influencias en el modelado hidrológico, los errores y sesgos en los productos de precipitación tienden a manifestarse en el desempeño de la simulación del flujo fluvial. La simulación hidrológica impulsada por MERRA-2 PRECTOTCORR tiende a tener un rendimiento inferior en relación con la simulación ERA-5.

Gomis et al. (2023) en su estudio cuyo objetivo fue la evaluación de base de datos de precipitación de reanálisis ERA5 y ERA5-Land en el país de España desde el año 1951 hasta 2020, empleando la metodología de recolección de información de la base de datos del Centro Europeo (ERA5) debido a su alto uso por los campos de meteorología e hidrología en términos físicos, espaciales y temporales a escala mundial, asimismo evaluando los parámetros estadísticos de BIAS y RMSE, los resultados de la evaluación reveló que ERA5-Land/ERA5 tendía a sobrestimar las categorías de precipitación ligera (≥ 1 y < 5 mm/día) y moderada (≥ 5 y < 20 mm/día), mientras que subestimaba las categorías de precipitación intensa (≥ 20 y < 40 mm/día). mm/día) y violentas (≥ 40 mm/día) categorías, la correlación reveló un gradiente espacial noroeste (valores más altos) sureste (valores más bajos), mientras que el sesgo relativo (RBIAS) y los patrones espaciales RMSE se correlacionaron positivamente con la pendiente ($\rho =$



0.41/0.35, 0.69/0.70, respectivamente, concluyendo los datos ERA5 para la precipitación mostró una buena capacidad para reproducir los patrones espaciales y las tendencias temporales de las observaciones.

Jiang et al. (2023) en su estudio tuvo el objetivo sobre la evaluación de los productos de precipitación IMERG, TMPA, ERA5 y CPC en un área de China continental, la metodología aplicada fue la recopilación de datos de los productos de reanálisis tales como ERA 5 obtenido del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio – ECMWF y empleando los parámetros estadísticos tales como la Raíz del Error Cuadrático Medio – RMSE, los resultados indican en cuanto al RMSE los errores de todos los productos de precipitación aumentaron gradualmente desde la región XJ, con un clima árido o semiárido, hasta la región del Sudeste de China (SE), con un clima monzónico subtropical, ERA5 también mostró una buena correlación en la región NE con un valor medio de 0.703 y sobreestimó significativamente las observaciones in situ, mientras que los valores RMSE para todos los productos de precipitación fueron los mayores en la región del Sudeste de China (SE) y los más bajos en la región XJ, las conclusiones indican que clasificación según su precisión, en orden descendente fue CPC, IMERG, TMPA y ERA5 en la escala de tiempo diaria e IMERG, CPC, TMPA y ERA5 en las escalas de tiempo mensuales y estacionales.

Pelosi y Chirico (2021) en su estudio cuyo objetivo fue la evaluación regional de la evapotranspiración de referencia diaria por medio del reanálisis meteorológico ERA5 y CM-SAF, en Sicilia – Italia, empleando la metodología de recolección de registros de datos de evapotranspiración, temperatura y radiación de 38 estaciones hidrometeorológicas automáticas del sector (AWS) y desde el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio para los



datos de ERA 5 desde el periodo de 2003 hasta el 2020 asimismo mediante los indicadores estadísticos de sesgo PBIAS y RMSE, los resultados indican que los datos de ERA5 y CM-SAF primero se redujeron y se corrigieron el sesgo con un conjunto de datos de calibración, los datos de temperatura del aire u ETo de ERA5 también se redujeron en la validación, asimismo mostraron un RMSE normalizado del 12%, las conclusiones indican que los productos de reanálisis representan importantes fuentes de datos para la evaluación regional de las variables hidrológicas relevantes para la planificación de los recursos hídricos y los estudios climáticos.

2.1.2. Nacionales

Lavado et al. (2022) en su investigación cuyo objetivo fue el modelamiento hidrológico con una base de datos del SENAMHI y los datos de reanálisis ERA5-Land, el área de estudio fue la vertiente del Pacífico, la metodología aplicada fue la recolección de información de los productos satelitales de estudio PISCO, ERA5-Land, además realizando la evaluación con parámetros estadísticos de NSE, KGE, RMSE, BIAS, r , empleando un modelo hidrológico GR4J, los resultados indican que se evaluó cuencas que se encuentran dispersas a lo largo de la vertiente del Pacífico en el Perú, y según estas métricas la mayoría de las cuencas mostraron valores por encima de satisfactorios (>0.5) valores desde 0.5, 0.6, 0.7 y 0.75 y asimismo se evidencia una clara disminución de valores en la etapa de calibración, al periodo total y a la validación, en la métrica de BIAS los resultados del producto estuvieron cerca del 0 en la etapa de calibración, pero en la etapa de validación el producto presentó una mayor variación, concluyendo que, según el tamaño de cuenca, con extensión menor a 1000km² se puede trabajar con la base de datos ERA5.



Arias et al. (2022) en su investigación donde la finalidad fue aplicar un modelo hidrológico para estimar caudales diarios utilizando un conjunto de datos ERA5 en la cuenca de estudio ubicado en Lambayeque – Perú, para ello aplico la metodología de recolección de datos de los registros de precipitación, y temperaturas desde una estación hidrométrica cercana, recopilando información de caudales desde la plataforma de datos grillados ERA5 y realizando la evaluación por medio de los parámetros de NCE y r^2 , los resultados de la evaluación mediante el modelo GR4J presento un valor de NCE de 64.21% considerado como ajuste muy bueno, mientras que la correlación r^2 fue de 0.6599, concluyendo que según los valores en la calibración y validación, se afirma que el modelo hidrológico según los datos de ERA5 presenta un buen desempeño en la estimación de caudales.

Bonshoms et al. (2022) en su artículo donde el objetivo fue la validación de ERA5-Temperatura terrestre y humedad relativa en cuatro glaciares peruanos (Cordillera Blanca, Cordillera Central, Nevado Coropuna y Cordillera Vilcanota), empleando la metodología de recolección de datos, utilizando observaciones y evaluando la capacidad del reanálisis ERA5 para reproducir la temperatura del aire y la humedad relativa, obteniendo como resultado, un mejor desempeño en el rendimiento de reanálisis de la temperatura y comparando con las estaciones automáticas del sector, asimismo empleando los parámetros de estadísticos RMSE y BIAS, los resultados indican un mejor desempeño del reanálisis para T2m ($r > 0.80$) que para Rh2m ($\sim 0.4 < r < \sim 0.6$) en los cuatro glaciares, la validación ERA5L para ambos parámetros es mejor en sitios tropicales exteriores húmedos (RMSE entre $\pm 0.2^\circ\text{C}$ para T2m y entre 3%-7% para Rh2m) que en sitios tropicales exteriores secos (RMSE entre $\pm 0.2^\circ\text{C}$ para T2m y entre 3%-7% para Rh2m).



Entre todos los sitios considerados en el estudio, el Rh2m Pbias es el más alto en el glaciar Cavalca (correlación de 0.81; RMSE 13%, MAE 11% y Pbias 8.3%) y el más bajo en el glaciar Artesonraju. (correlación de 0.96; RMSE 3%; MAE 2.3% y sesgo - 0.8%). Las conclusiones indican que, en base a los datos obtenidos, es apropiado utilizar ERA5 para caracterizar las condiciones de temperatura T2m y humedad relativa Rh2m en los glaciares peruanos.

Subauste et al. (2022) en su estudio donde el objetivo fue determinar los caudales diarios usando el Método GR4j y la información climática ERA5 en la cuenca Huaura que comprenden los departamentos Ancash, Lima y Huánuco, se empleo el método de recolección de información de la base de datos de ERA5 del Centro Europeo y extraído de una plataforma denominada Google Earth Engine, empleando variables como área, precipitación diaria, evapotranspiración y los promedios diarios de los caudales, aplicando el modelo hidrológico GR4J y mediante la evaluación de métricas como NCE y r2, obteniendo como resultado según estos indicadores de Nash de 61% a un 100% y r2 de 0.69, concluyendo que se muestra el potencial del modelo a la hora de calibrar, los valores aceptables y la eficiencia que posee.

Alfaro et al. (2022) en su artículo cuyo objetivo es la generación de caudales diarios y mensuales con información climática de la cuenca Pachachaca (Apurímac), para ello se empleó el método de recolección de los datos pluviométricos y de temperatura media, con la base de datos de reanálisis ERA5 y los registros de medición de caudales de la estación Santa Rosa, además se empleó el modelo hidrológico GR4J y evaluando el modelo según los parámetros estadísticos “r2” y “NCE”, los resultados indican que se obtuvo un valor de correlación de $r^2=0.8814$; mientras que NCE presenta un porcentaje de 80% a



100%, concluyendo que el modelo hidrológico presenta un buen desempeño y resultados satisfactorios por lo que puede ser integrado como una de las alternativas para los pronósticos hidrológicos de este sector de estudio.

2.1.3. Regionales

Lujano et al. (2020) en su investigación cuyo objetivo es evaluar el desempeño por 3 modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales en la cuenca del Río Ramis, siendo los valores de datos de entrada la precipitación, temperaturas, caudal, aplicando la metodología de recolección de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, se aplicó el método de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o), para la evaluación se aplicaron los parámetros estadísticos NSE, PBIAS, MAE y RMSE, el resultado indica que los valores de ET_o presentan un valor de NSE entre 0.58 y 0.93, sesgo porcentual (PBIAS) entre -0.58 y 1.34%, media absoluta error (MAE) entre -0.02 y 0.05 mm/d, y error cuadrático medio (RMSE) entre 0.14 y 0.25 mm/d, por lo que se concluye que, ante la falta de datos meteorológicos y/o disponibilidad de datos climáticos observados podría afectar su confiabilidad en áreas alejadas de las estaciones meteorológicas utilizadas para la calibración.

Birkel et al. (2022) en su estudio cuyo objetivo fue la evaluación del reanálisis de temperatura y precipitación para el altiplano andino y cordilleras adyacentes, comparando 6 productos de reanálisis, entre ellos la base de datos ERA5, en alturas que van desde los 2500 msnm y 4900 msnm, se aplicó la metodología de recolección de datos meteorológicos del producto ERA5 del Centro Europeo ECMWF, MERRA2, CHIRPS2, DECADE, entre otros, los



resultados indican que los productos de reanálisis están validados con observaciones de estaciones meteorológicas automáticas, asimismo se concluye que los datos de ERA5 proporciona la descripción general más sólida de la temperatura y la precipitación en todo el dominio de estudio, y el conjunto de datos es particularmente útil para su extensión hasta 1950.

Sulca et al. (2022) en su artículo cuyo objetivo fue explicar sobre el patrón oceánico-atmosférico asociado a las sequías meteorológicas extremas en la Sierra Sur del Perú que comprende los departamentos de Cusco, Puno, Arequipa, Apurímac, Moquegua y Tacna, se aplicó la metodología de recolección de información trabajando con los valores de precipitación en base a información de estaciones meteorológicas convencionales del SENAMHI, información climática atmosférica del ERA5 e información oceánica de la temperatura superficial del mar del ERSST en los años 1980 – 2019, los resultados presenta un déficit superior al 46% del promedio de temperatura de +3 °C, propiciando la intensificación de vientos del Oeste en la tropósfera baja (850 hPa), concluyendo que la base de datos de ERA5 permite obtener datos climatológicos diarios desde el año 1980 hasta la actualidad, superando a la información de las estaciones del Perú.

Lujano et al. (2023) en su artículo sobre las estimaciones de evapotranspiración de referencia de Hargreaves-Samani en el altiplano peruano - Puno, donde se empleó el método que permite la estimación del ETo, aplicando modelos hidrológicos y los parámetros de eficiencia NCE y RMSE, obteniendo resultados de NCE que van desde 0.86 a 0.86 para la etapa de calibración y 0.80 a 0.84 para la validación, mientras que RMSE va desde 0.45 a 0.48 en la etapa de calibración y 0.49 a 0.55 para la validación, las conclusiones del estudio muestran



la mejora de la estimación de evapotranspiración por medio de la calibración del coeficiente de radiación KRS, mejorándose la eficiencia de Nash NSE, el porcentaje de sesgo PBIAS y error cuadrático medio RMSE, por lo que los datos utilizados en las mediciones hidrometeorológicas de precipitación, temperatura y caudales del modelo hidrológico son aceptables.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Datos hidrometeorológicos

Los datos hidrometeorológicos son información recopilada a través de mediciones y observaciones que se centran en variables relacionadas con la hidrología y la meteorología. Estos datos son fundamentales para comprender y monitorear los patrones climáticos, las condiciones hidrológicas y los fenómenos asociados con el agua en la atmósfera y la superficie terrestre (Lujano et al., 2020).

Los datos hidrometeorológicos se recopilan mediante una red de estaciones meteorológicas e hidrológicas ubicadas estratégicamente en diferentes regiones. Los registros a largo plazo de estos datos permiten analizar tendencias climáticas, evaluar la disponibilidad de recursos hídricos y mejorar la comprensión de los fenómenos meteorológicos y climáticos. Además, estos datos son esenciales para la toma de decisiones en áreas como la gestión del agua, la agricultura, la predicción de eventos climáticos extremos y la investigación científica (Ministerio de Agricultura - Autoridad Nacional del Agua, 2010).

De acuerdo a Lujano et al. (2020) los datos de meteorología, hidrología y climatología son: La temperatura que comprende la medición de la energía térmica en la atmósfera, la precipitación que es la cantidad de agua (lluvia, nieve, etc.) que cae en un área específica durante un período de tiempo determinado, la



humedad relativa siendo el porcentaje de humedad en el aire en relación con la cantidad máxima que el aire podría contener a esa temperatura, la velocidad y dirección del viento la cual comprende información sobre la velocidad del viento y la dirección desde la cual sopla, los caudales que es el volumen de agua que fluye por un punto específico de un río o arroyo en un momento dado, el nivel del agua que se define como la altura del agua en ríos, embalses, lagos u otros cuerpos de agua, la calidad del agua cuyos parámetros que describen la composición química y la calidad del agua, como concentraciones de nutrientes, sólidos disueltos, pH, etc, la radiación solar siendo la medición de la energía solar recibida en la superficie terrestre asimismo la evapotranspiración que es la cantidad de agua que se evapora de la superficie del suelo y se transpira de las plantas.

2.2.2. Datos hidrometeorológicos SENAMHI

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) es la entidad encargada de monitorear y proporcionar información meteorológica e hidrológica en el país. Los datos hidrometeorológicos del SENAMHI incluyen información sobre variables climáticas y condiciones hidrológicas, y son esenciales para entender y gestionar los recursos hídricos y prever eventos climáticos extremos.

Estos datos pueden abarcar diversas variables, algunas de las cuales son:

Datos Meteorológicos:

- Temperatura
- Precipitación
- Humedad relativa

- Velocidad y dirección del viento

Datos Hidrológicos:

- Caudal de ríos
- Niveles de embalses
- Datos de calidad del agua

Datos Climáticos Específicos:

- Radiación solar
- Evapotranspiración

Figura 1

Datos hidrometeorológicos SENMAHI



Nota. En la figura se muestra la plataforma virtual del SENAMHI (2023) para extraer los datos hidrometeorológicos.



2.2.3. Datos de reanálisis ERA5

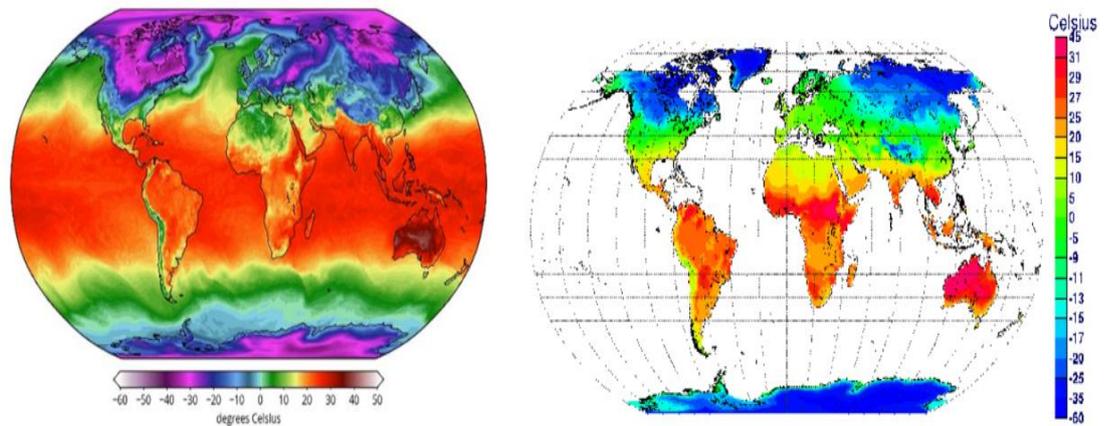
Los datos de reanálisis atmosférico proporcionado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo Medio (ECMWM), que ofrece estimaciones por hora para numerosas variables climáticas atmosféricas, planetarias y oceánicas. La base de datos de ERA5 proporcionados se encuentran en la página Climate change Service - Servicio de Cambio Climático (Copernicus Climate Change Service [C3S], 2022).

Los productos de ERA5, son datos de reanálisis atmosférico proporcionado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo Medio (ECMWM), que ofrece estimaciones por hora para numerosas variables climáticas atmosféricas, planetarias y oceánicas (Hersbach et al., 2019). Estos datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 30 kilómetros desde el año 1979 hasta el presente y resuelven la atmósfera en 137 niveles de superficie hasta una altitud de 80 kilómetros (Cloud Storage, 2022). Los datos de reanálisis permiten la mejor comprensión del clima anterior, lo que ocurrió durante un evento climático específico y por qué, y la conexión entre los eventos climáticos actuales e históricos (Martín, 2019).

Parámetros meteorológicos extraídos de reanálisis climatológicos se utilizan como datos de entrada en modelos globales de radiopropagación desarrollados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, para analizar y cuantificar la atenuación en sistemas de comunicaciones satelitales, producida por la atmósfera y sus elementos naturales constitutivos (Siles, 2022).

Figura 2

Mapas globales de parámetros de datos ERA5



Nota. En la figura se muestra el alcance de los datos de reanálisis ERA 5 que se pueden obtener a través de la plataforma de ECMFW según lo indicado por Siles (2022).

El Servicio de Cambio Climático del programa Copernicus (Copernicus Climate Change Service, C3S) de la Unión Europea es implementado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). En términos generales, su misión es dar acceso a datos climatológicos globales que sirvan de apoyo a las tareas de mitigación del cambio climático. Se trata de datos autoritativos que pasan controles rigurosos de calidad (quality controled data) antes de ser diseminados para su uso. El acceso a todos los datos generados por C3S es gratuito se realiza a través del portal Climate Data Store (CDS), como punto único de descarga. Entre los productos más populares disponibles en esta plataforma se encuentran los reanálisis ERA5 y ERA5-Land, las Variables Esenciales del Clima (Siles Soria, 2022).

Los reanálisis climatológicos o “reconstrucciones” del clima, son el resultado de la combinación de observaciones meteorológicas globales de diferentes fuentes, como pueden ser estaciones convencionales en tierra,

marítimas y aéreas, radiosondeos, imágenes satelitales, y datos meteorológicos modelados, obtenidos mediante predicciones numéricas (NWP, Numerical Weather Predictions). El propósito final de esta combinación, también conocida como asimilación de datos, es la estimación de las condiciones meteorológicas para un instante de tiempo en el pasado, y para un determinado punto sobre la Tierra, definido sobre una grilla global geográfica. ECMWF tiene un largo historial en el desarrollo de reanálisis climáticos (Siles Soria, 2022).

Tabla 1

Datos disponibles en la base de datos de ECMWF

Características ERA5	
Periodo	1950 – a la fecha
Resolución horizontal	31 km, 0.28125° grilla gaussiana
Resolución vertical (Model Level)	137 niveles
Resolución vertical (Pressure Level)	37 niveles
Resolución temporal	1 hora
Asimilación de datos	4D-VAR
Modelo ECMWF	CY41R2

Nota. En la tabla se muestra los datos ofrecidos de ECMWF en el estudio de Siles (2022).

2.2.4. Precipitación

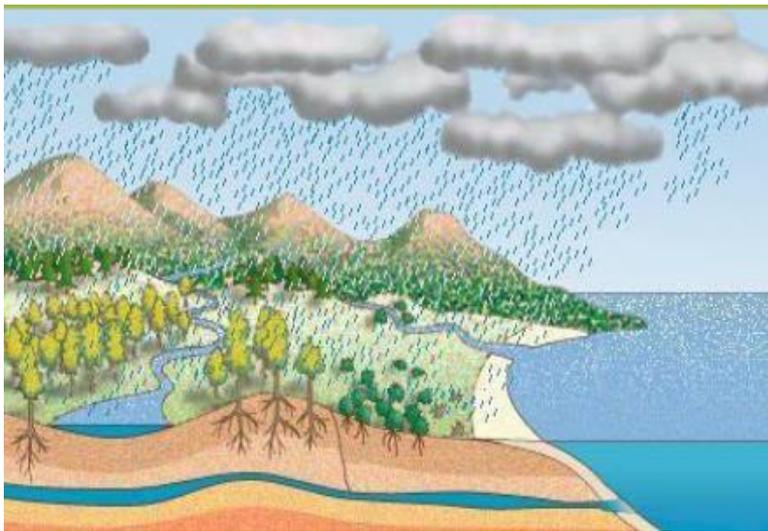
La precipitación se refiere a cualquier forma de agua, líquida o sólida, que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno es una parte fundamental del ciclo del agua y desencadena procesos importantes en el clima y la hidrología. La precipitación ocurre cuando las gotas de agua o cristales de hielo en las nubes se agrupan lo suficiente como para superar las fuerzas ascendentes del aire y caen hacia la Tierra (Organización de las Naciones Unidas para la

Alimentación y la Agricultura - Oficina Regional De La FAO Para America Latina Y El Caribe, 2013).

La precipitación es cualquier producto de la condensación del vapor atmosférico que se deposita en la superficie de la tierra. Ocurre cuando la atmosfera (que es una gran solución gaseosa) se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y cae de la solución. El aire se satura a través de dos procesos: por enfriamiento y añadiendo humedad (Gutierrez, 2020).

Figura 3

Precipitación



Nota. Gutierrez (2020).

De acuerdo a la FAO (2013) Los siguientes caminos son posibles para el agua que se convierte en lluvia:

- Quedan depositados en la superficie de la planta. Esto sucede cuando hay muy pocas gotas de lluvia o poca precipitación en general, y cuando hay mucha vegetación. Sin llegar nunca a la tierra, el agua se evapora de la superficie vegetal y vuelve a la atmósfera



- Llegar a la superficie del suelo y colarse. Dado que la tierra es porosa y, por lo tanto, permeable, el perfil de infiltración de agua muestra diferentes tasas de infiltración. Es mejor para la utilización del agua si se filtra más durante una tormenta porque las rutas que puede tomar son beneficiosas: el crecimiento de las plantas y la reposición del nivel freático.
- Drenar a la superficie del suelo. La escorrentía superficial ocurre cuando la cantidad de precipitación es mayor que la tasa de infiltración del suelo. La escorrentía puede resultar en erosión y no es deseable ya que desperdicia agua y tiene un impacto negativo tanto localmente como río abajo (inundaciones, contaminación, sedimentación).

2.2.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un proceso natural en el ciclo del agua que representa la pérdida de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera en forma de vapor de agua. Este término combina dos procesos relacionados pero distintos: la evaporación y la transpiración (Nogueira, 2020).

El concepto de evaporación: Es el proceso mediante el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua en la atmósfera. Se produce principalmente desde la superficie de cuerpos de agua, suelos húmedos y vegetación, mientras que el concepto de transpiración: Es el proceso mediante el cual las plantas absorben agua a través de sus raíces y luego liberan agua en forma de vapor a través de pequeñas aberturas en sus hojas, conocidas como estomas. La transpiración es un componente importante de la evapotranspiración y está directamente relacionada con la actividad de las plantas (Nogueira, 2020).



Método de Hargreaves

La fórmula de Hargreaves y Samani (1985) para evaluar la Evapotranspiración Potencial necesita solamente datos de temperaturas y de Radiación Solar.

La radiación solar incidente, R_s , se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera), el método de Hargreaves es un enfoque empírico utilizado para estimar la evapotranspiración potencial (ETP), que representa la cantidad máxima de agua que podría evaporarse y transpirarse desde una superficie vegetada si hubiera suficiente agua disponible. Este método fue desarrollado por J. H. Hargreaves en 1985 (Sánchez, 2003).

La fórmula básica del método de Hargreaves para calcular la evapotranspiración potencial diaria (ETP) es:

$$ETP = 0.34Ra * (0.40 + 0.024T) * (1.35 * \sqrt{1 - RH}) * \left(1 + 0.04 * \frac{EL}{1000}\right) * n \dots\dots \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

ETP es la evapotranspiración potencial diaria,

R_a es la radiación extraterrestre

T_{media} es la temperatura media diaria en grados Celsius

T_{maxima} y T_{minima} son las temperaturas máxima y mínima diarias respectivamente.



El método de Hargreaves utiliza la radiación extraterrestre y las temperaturas diarias para proporcionar una estimación de la evapotranspiración potencial. Es especialmente útil en lugares donde no se dispone de una cantidad significativa de datos climáticos, ya que no requiere la medición directa de la radiación solar (Sánchez, 2003).

La irradiancia solar total extraterrestre (TSI, por sus siglas en inglés) es la cantidad de energía proveniente del sol, por unidad de área, que recibe todo punto por encima de la atmósfera terrestre, en cada instante de tiempo; por lo tanto, es una cantidad que varía tanto espacial como temporalmente, de acuerdo a la posición de un punto en particular sobre la Tierra y de la posición de ésta respecto del Sol (Plasencia et al., 2007).

Cabe destacar que, aunque el método de Hargreaves es una herramienta práctica, también tiene sus limitaciones y su precisión puede variar según las condiciones climáticas locales. Por lo tanto, su aplicación debe realizarse con precaución y considerando las características específicas de la región en la que se utiliza (Sánchez, 2003).

Figura 4

Radiación Solar hemisferio norte y sur

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5	0.0	0.0
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2	0.3	0.0
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0	0.6	0.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9	1.0	0.2
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9	1.4	0.5
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9	1.8	0.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0	2.2	1.3
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0	2.7	1.7
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1	3.2	2.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1	3.7	2.6
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2	4.2	3.1
48	4.1	6.4	9.5	13.1	15.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2	4.7	3.6
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2	5.1	4.0
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2	5.7	4.5
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2	6.2	5.1
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2	6.7	5.6
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2	7.1	6.0
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1	7.6	6.6
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1	8.1	7.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0	8.6	7.6
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9	9.1	8.1
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8	9.5	8.6
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7	10.0	9.1
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6	10.4	9.5
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4	10.9	10.0
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2	11.3	10.4
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0	11.7	10.9
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8	12.1	11.4
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6	12.5	11.8
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3	12.9	12.2
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1	13.2	12.7
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8	13.6	13.1
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5	13.9	13.4
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2	14.2	13.8
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9	14.5	14.2
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	14.5

Nota. En la figura se muestran los valores de la radiación solar de los hemisferios norte y sur según lo indicado por Allen et al. (1998).

2.2.6. Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico permite describir y analizar de los distintos enfoques del análisis espacial de la distribución del agua en especial sectores donde existen escasez de datos hidrometeorológicos. Los modelos pueden ser conceptuales y puede ser presentado por un modelo matemático o físico, este último se elabora en base a prototipos, además que este modelo puede ser empírico o teórico (Mendoza et al., 2001).

Por ello, el modelo empleado es el GR2M, debido a que este modelo trabaja con datos mensuales de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (E) para generar caudales mensuales (Q) a la salida de la cuenca, siendo desarrollado por (Mouelhi et al., 2006).



Para Cabrera (2014) la base del estudio de la Hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales y subsuperficiales, y esta comprensión implica “medir”. Si bien los métodos y técnicas de medición de caudales y precipitaciones has evolucionado en el tiempo, también es cierto que otras componentes del ciclo hidrológico no han corrido la misma suerte pues se presentan bajo el suelo. La infiltración, la percolación profunda, el flujo subsuperficial, el flujo subterráneo, entre otros, son procesos que se miden usualmente de manera indirecta y/o remota, lo que conlleva a una fuerte incertidumbre respecto al funcionamiento del ciclo hidrológico. Bajo este marco, los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Como consecuencia de ello, los modelos hidrológicos se usan:

- Como herramienta para la gestión y planeamiento.
- Para una mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca.
- Para extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.
- Como base para la modelación de otros procesos, como la calidad de agua, erosión, etc.

Modelación de cuencas

Entender el ciclo hidrológico implica entender la “respuesta” de la cuenca de manera continua en el tiempo y en el espacio, por este motivo la base de la modelación hidrológica es la modelación de cuencas. Los modelos de cuenca son un reflejo de cómo entendemos el sistema cuenca y su respuesta. Su capacidad predictiva depende de cómo los construimos y cómo los aplicamos, y la calidad de las predicciones es generalmente consistente con la calidad de nuestra comprensión del sistema y del modelo que lo representa. Esto significa que no



existe el modelo perfecto aplicable a todas las cuencas del planeta: cada cuenca tiene condiciones muy particulares de clima, geografía, geología, etc que incrementan la importancia de un proceso por sobre otros y condicionan la estructura del modelo (Cabrera, 2014).

2.2.7. Modelo hidrológico GR2M

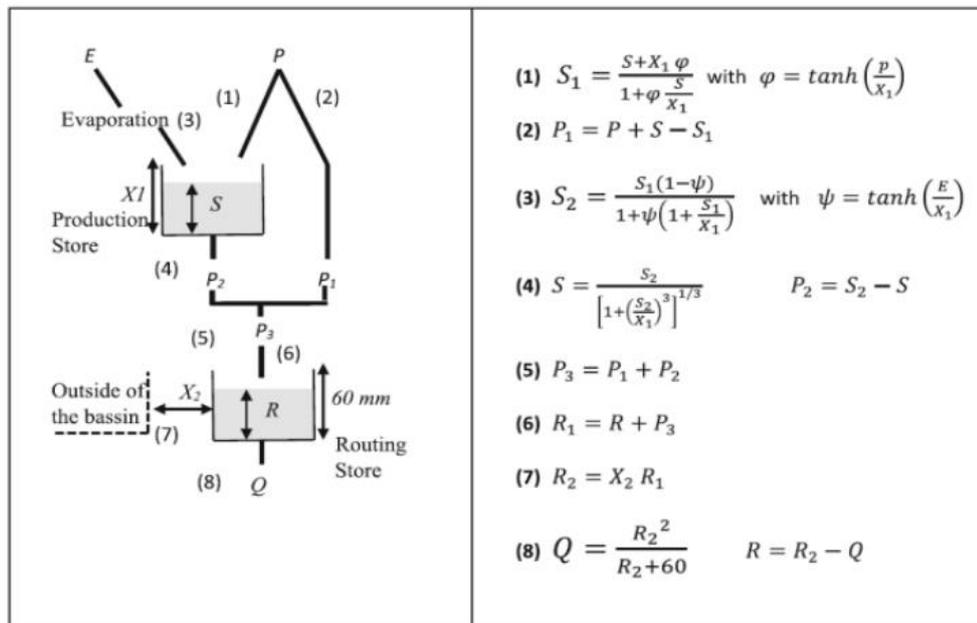
El modelo parsimonioso GR2M, desarrollado por Mouelhi et al. (2006), este modelo conceptualiza la cuenca como un par de estanques, uno de producción y otro de rastreo.

GR2M tiene dos parámetros, X_1 y X_2 que definen la capacidad máxima del estanque de producción y el intercambio de agua entre la superficie y aguas subterráneas en el estanque de rastreo, respectivamente. El modelo GR2M es forzado con datos mensuales de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (E) para generar caudales mensuales (Q) a la salida de la cuenca. Considera también variables de estado en el estanque de producción (S) y rastreo (R). Teniendo en cuenta la incertidumbre en las forzantes, se incorporaron factores de corrección para la precipitación (f_{precip}) y evapotranspiración potencial (f_{pet}) (Takahashi et al., 2019).

GR2M es un modelo agregado que simula caudales en intervalos mensuales. El modelo transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia. (Cabrera, 2012).

Figura 5

Modelo GR2M



Nota. Representación del modelo hidrológico GR2M adaptado por Mouelhi et al. (2006).

Su estructura consta de dos reservorios: el reservorio suelo y el reservorio de agua gravitacional. La Figura muestra la arquitectura del modelo GR2M con los principales procesos hidrológicos que producen escorrentía y que son tomados en cuenta por el modelo. De acuerdo a este esquema, P es la precipitación media de la cuenca, P1 es la escorrentía superficial, E es la evapotranspiración actual, P2 la percolación profunda, S el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, R el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y Q el caudal a la salida de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo es X1 y la del reservorio gravitacional es asumida como 60mm (Cabrera, 2012).

De acuerdo a la figura 9, parte de la precipitación es absorbida por el reservorio suelo y otra (P1) se dirige al reservorio de agua gravitacional. El nuevo volumen de agua en el reservorio suelo (S1) se calcula de la siguiente manera.

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}}$$

Donde: X_1 es la capacidad del reservorio suelo; y φ se define como:

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

Asumiendo que no hay pérdidas, el volumen de agua antes de la infiltración debe ser el mismo después de ésta; entonces:

$$P_1 = P + S - S_1$$

En una segunda instancia, el reservorio suelo será afectado por la evapotranspiración, reduciendo su volumen a S_2 . El nuevo volumen se calcula de la siguiente manera.

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)}$$

donde: ψ es igual a

$$\psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

Parte de este nuevo volumen S_2 será transferido al reservorio de agua gravitacional y el remanente se convertirá en el volumen inicial S para el siguiente período de análisis. El nuevo valor de S será:

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



Luego, el volumen de agua que percola P2 se estimará como la diferencia entre S2 y S

$$P_2 = S_2 - S$$

Conocido el volumen de agua que percola, la precipitación efectiva que ingresa al reservorio de agua gravitacional (P3), será:

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Debido a que el reservorio de agua gravitacional contaba con un volumen inicial R, su nuevo volumen será:

$$R_1 = R + P_3$$

Sin embargo, debido a que existe un intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial, el volumen del reservorio se corrige por el factor X2:

$$R_2 = X_2 R_1$$

Finalmente, el reservorio de agua gravitacional se vacía siguiendo una función cuadrática, dándonos como resultado el caudal de salida:

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

donde:

$$R = R_2 - Q$$



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Localización política

Políticamente, la cuenca del Río Ramis, limita y comprende las provincias de Carabaya, Azangaro, Melgar, San Antonio de Putina y Lampa, de la Región Puno – Perú (Autoridad Nacional del Agua, 2019).

3.1.2. Localización geográfica

Coordenadas Geográficas:

Latitud Sur:

14°03'26.6" - 15°27'33.7"

Longitud Oeste:

69°25'26.4" - 71°07'4.7"

Coordenadas UTM (WGS84)

Norte:

8'445,867.41 – 8'289,725.28

Este:

454,221 – 272,732.8

Variación Altitudinal:



3.800 – 5.334 m.s.n.m

3.1.3. Localización hidrológica

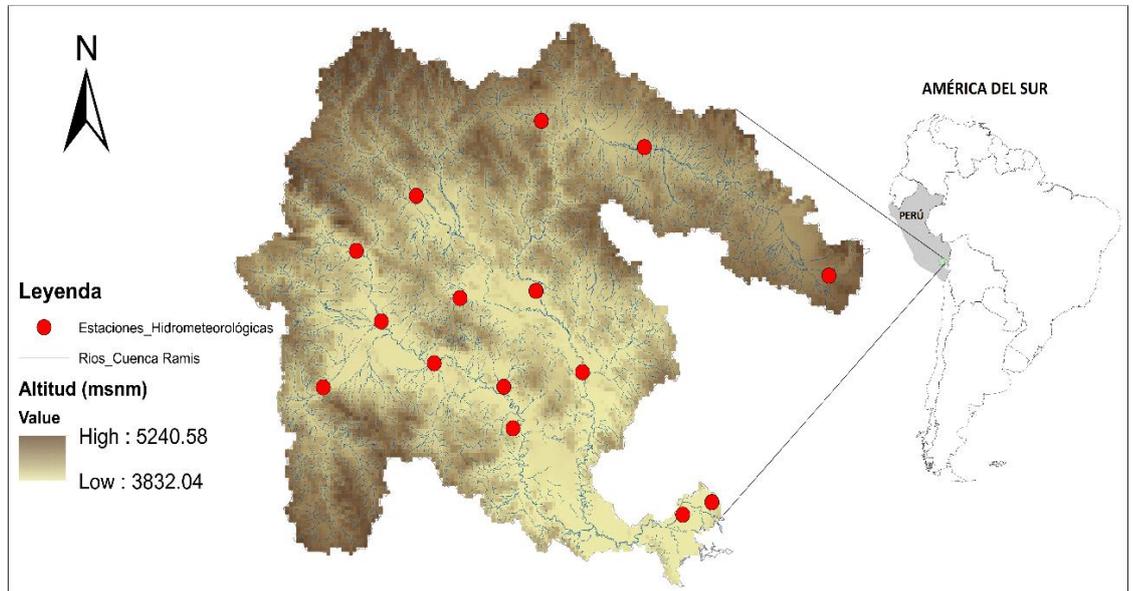
La cuenca del río Ramis ubicada en la Región hidrográfica del Titicaca y pertenece al Sistema TDPS Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar de Coipasa con una extensión superficial de 15408.027 Km². El Río Ramis es el río más largo de la cuenca del Titicaca. Nace en las cercanías del nevado Ananea Grande y la laguna La Rinconada a 5828 msnm., con el nombre de Río Carabaya (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi, 2023).

En la cuenca del Río Ramis, la temperatura media anual espacialmente varía desde 3°C a 11 °C, mientras la temperatura máxima varía desde 8.5°C a 17°C, y la temperatura mínima oscila entre -4°C y 6°C. La humedad relativa media anual varía entre 44% y 63%, la evaporación total media anual oscila entre 400 mm a 2000 mm, la velocidad media anual varía desde 2 m/s a 18 m/s, y la variación de horas de sol media anual está comprendido entre 6.46 horas a 7.06 horas, respectivamente (ANA, 2019).

Asimismo, los caudales medios anuales de la cuenca del Río Ramis, para los años secos, año normal, año húmedo, promedio histórico y al 75% de persistencia es la siguiente: 43.76, 74.47, 101.82, 73.62 y 47.96 m³/s, cuyos volúmenes correspondientes son de 1365.15, 2323.82, 3173.29, 2296.09 y 1494.37 hm³, respectivamente. El caudal mínimo medio mensual histórico de la cuenca es de 2.52 m³/s ocurrido en el mes de noviembre de 1983 y el caudal máximo medio mensual es de 431.96 m³/s ocurrido en el mes de febrero de 1971 (ANA, 2019, p. 3).

Figura 6

Cuenca del sector de estudio



Nota. En la figura se muestra la cuenca del Rio Ramis elaborado en el programa Arc Gis, ubicando las estaciones hidrometeorológicas dentro de la cuenca.

3.1.4. Diseño de investigación

Es no experimental, debido a que no se manipulara las variables y se trabajara con los datos tal cual se encuentren en la base de datos del ERA5 y SENAMHI. De acuerdo a Hernández et al. (2014), los estudios no experimentales son realizados sin manipulación de forma deliberada de variables.

3.1.5. Enfoque de investigación

Es cuantitativo porque se trabajar con valores numéricos, De acuerdo a Borja (2012) los estudios cuantitativos son estudios caracterizados por la confiabilidad en el momento de conocer los hechos reales por medio de recolectar y analizar datos e información numérica.

3.1.6. Nivel de investigación

Es descriptivo, de acuerdo a Hernández et al. (2014), menciona que este nivel se emplea para buscar y especificar las características de fenómenos, objetos, etc. que son partes del estudio.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

La población para la presente investigación será la cuenca del Río Ramis. De acuerdo al libro de Borja (2012) “Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros”, la población se denomina al elemento, sujeto u objeto que se quiere estudiar.

3.2.2. Muestra

La muestra está conformada por los datos obtenidos de las estaciones hidrológicas, meteorológicas y/o pluviométricas del sector de estudio correspondientes a 20 años, las estaciones de estudio son:

Tabla 2

Estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio

N°	Estación	Latitud	Longitud
1	Ananea	14°41'	69°32'
2	Arapa	15°08'	70°07'
3	Azángaro	14°55'	70°12'
4	Chuquibambilla	14°48'	70°44'
5	Crucero	14°20'	70°02'
6	Huancané	15°12'	69°45'
7	Juliaca	15°29'	70°09'
8	Lampa	15°22'	70°22'



N°	Estación	Latitud	Longitud
9	Muñani	14°46'	29°58'
10	Nuñoa	14°29'	70°38'
11	Progreso	14°42'	70°22'
12	Pucará	15°03'	70°22'
13	Putina	14°55'	69°52'
14	Santa Rosa	14°37'	70°47'

Nota. En la tabla se presenta las estaciones hidrometeorológicas comprendidas en la cuenca del Río Ramis, información proporcionada por el SENAMHI, 2023.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

3.3.1. Técnicas

Se empleará el análisis documental porque se recolectará información (libros, tesis, artículos, etc.) para comprender sobre los conceptos y metodologías que se utilizarán en el modelado hidrológico. De acuerdo a Ortega (2017) el análisis documental es una técnica de investigación que se encarga de recopilar y seleccionar información a través de la lectura de documentos, libros.

3.3.2. Instrumentos

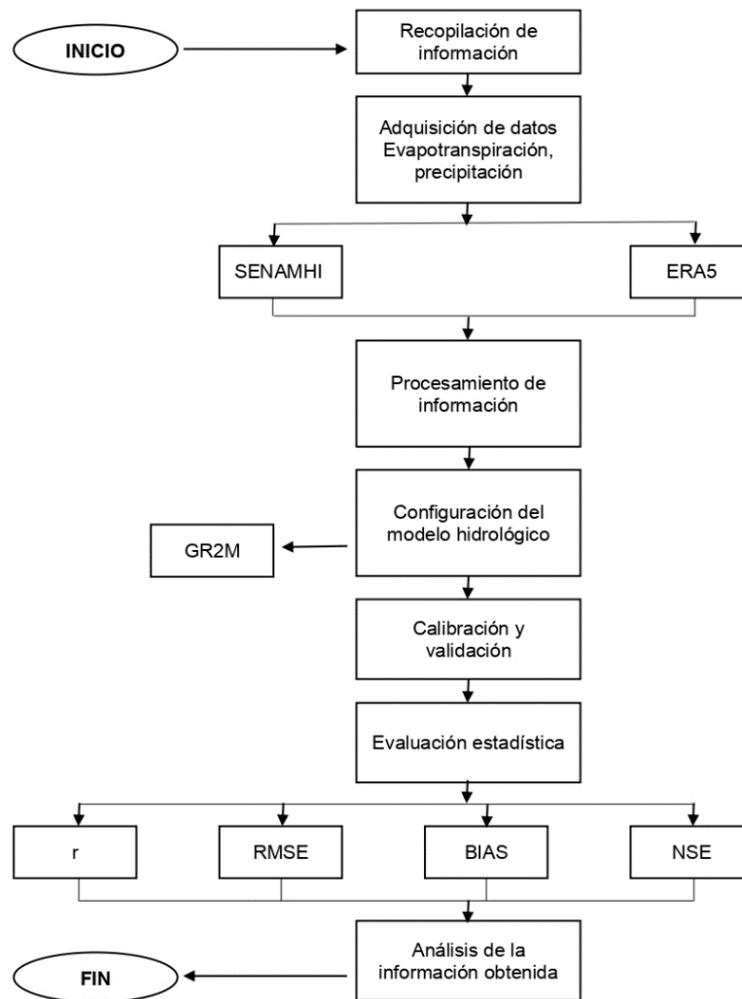
Se empleará la observación, porque se trabajará con toda información disponible y registrada de las precipitaciones y evapotranspiración de las bases de datos de ERA5 y SENAMHI del sector de estudio. La observación es la técnica de investigación básica, sobre las que se sustentan todas las demás, ya que establece la relación básica entre el sujeto que observa y el objeto que es observado, que es el inicio de toda comprensión de la realidad (Hernández et al., 2014).

3.4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

La presente investigación se desarrolla mediante el siguiente Diagrama de flujo

Figura 7

Diagrama de flujo



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo elaborado de acuerdo a los objetivos de la presente investigación.

3.4.1. Objetivo específico 1

1) Determinar los datos de precipitación y evapotranspiración potencial de ERA5 y con mediciones de estaciones meteorológicas del SENAMHI para su uso en el modelado hidrológico.

Los datos de precipitación se han obtenido de la base de datos de ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo Medio. (Copernicus Climate Change Service - C3S, 2022) (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overviewse>) de igual forma se obtienen los datos del SENAMHI es decir de estaciones que brinda el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – Senamhi (<https://www.senamhi.gob.pe/>) en el sector de la cuenca del Rio Ramis, la información es procesada en el programa Microsoft Excel agrupando y elaborando tablas de los datos mensuales, totales y/o promedios de precipitación, que requiere el modelo hidrológico.

Los datos de precipitación de SENAMHI y ERA5 se encuentran anexados en el Anexo 2.

Los datos de evapotranspiración se han calculado mediante la fórmula Hargreaves y Samani (1985), el que nos permite estimar la evapotranspiración potencial (ETP), que representa la cantidad máxima de agua que podría evaporarse y transpirarse desde una superficie vegetada si hubiera suficiente agua disponible. Este método fue desarrollado por J. H. Hargreaves en 1985 (Sánchez, 2003), y de acuerdo a la ecuación (1)

$$ETP = 0.34Ra * (0.40 + 0.024T) * (1.35 * \sqrt{1 - RH}) * \left(1 + 0.04 * \frac{EL}{1000}\right) * n$$



Donde:

ETP es la evapotranspiración potencial diaria,

Ra es la radiación extraterrestre

Tmedia es la temperatura media diaria en grados Celsius

Tmaxima y Tminima son las temperaturas máxima y mínima diarias respectivamente.

Con los datos de temperatura máxima, temperatura media y temperatura media de la base de datos del SENAMHI y ERA5 se determina los datos faltantes, y se aplica la fórmula de evapotranspiración.

Los datos de temperatura de SENAMHI y ERA5 se encuentran anexados en el Anexo 3.

Los datos de radiación extraterrestre se determinaron de acuerdo a la latitud de la cuenca del Rio Ramis en el departamento de Puno se encuentra entre los valores de 14 y 16, por lo tanto, se toman los valores de la siguiente tabla de radiación.

Tabla 3

Radiación extraterrestre

Latitud	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
16	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	16.6	16.2	15.3	13.6	12	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6

Nota. Allen et al. (1998).

Los datos de Evapotranspiración calculados con los datos de SENAMHI y ERA5 se encuentran anexados en el Anexo 4.



3.4.2. Objetivo específico 2

2) Evaluar la capacidad del modelo hidrológico GR2M para simular caudales medios mensuales del Río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5.

Para la evaluación, se empleó el modelo hidrológico GR2M (Gridded Runoff Model), de acuerdo a (Cabrera, 2012) GR2M es un modelo agregado que simula caudales en intervalos mensuales. El modelo transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia.

Para el primer caso se emplean los datos del SENAMHI donde se introducen los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración en el modelo hidrológico GR2M para la generación de caudales, donde se trabaja con un periodo de calibración (13 años) y un periodo de validación (7 años), del mismo modo para el segundo caso se emplean los datos de ERA5 donde se introducen los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración en el modelo hidrológico GR2M para la generación de caudales, donde se trabaja con un periodo de calibración (13 años) y un periodo de validación (7 años), luego se aplican las métricas y/o parámetros de eficiencia “NSE”, “r”, “BIAS” y “RMSE”, para la comparación los resultados obtenidos según los rangos de criterio de cada métrica.

La eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), que es empleado como criterio para evaluar el poder reproductivo del modelo hidrológico, que consiste en la comparación de la magnitud relativa de la varianza residual de los datos de medición. (Ocampo, 2012), el Coeficiente de correlación (r), que es una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por

intervalos o de razón. (Hernández et al., 2010); el Sesgo relativo (BIAS), es el índice de frecuencia de sesgo, que representa la relación entre la frecuencia de eventos simulados y la de los observados. (Kim et al., 2015) y la Raíz de error medio cuadrático (RMSE), mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, además es uno de los dos indicadores de rendimiento principales para un modelo predictivo de regresión. (Gonzalez, 2018).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$BIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)}{\sum_{i=1}^N y_i} \right] * 100 \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

y_i Es el valor observado,

\hat{y}_i Es el valor calculado,

\bar{y} Es el valor promedio

Asimismo, se emplea el modelo hidrológico GR2M para la simulación de caudales en Microsoft Excel se ha obtenido mediante la plataforma digital francesa de INRAE.



El modelo es evaluado según los rangos de valores de los parámetros estadísticos de eficiencia:

Nash-Sutcliffe NSE

Se tiene la tabla:

Tabla 4

Rango del criterio Nash-Sutcliffe

Valor	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Nota. Cabrera (2014)

Coefficiente de correlación “r”

Se tiene la tabla:

Tabla 5

Rango del criterio Coeficiente de correlación “r”

Valor	Correlación
$0.00 \leq x \leq 0.10$	Nula
$0.10 \leq x \leq 0.30$	Débil
$0.30 \leq x \leq 0.50$	Moderada
$0.50 \leq x \leq 1.00$	Fuerte

Nota. Hernández et al. (2018)

PBIAS

Se tiene la tabla:



Tabla 6

Rango del criterio PBIAS

Valor	Desempeño
$PBIAS < \pm 10$	Muy bueno
$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	Bueno
$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	Satisfactorio
$PBIAS \geq \pm 25$	Insatisfactorio

Nota. Moriasi et al. (2007)

RMSE

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo).

El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste (Cabrera, 2012).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN SENAMHI Y ERA5

Los datos de precipitación y evapotranspiración se han determinado para el modelo hidrológico GR2M, los datos extraídos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ERA 5) se encuentran en el Anexo 2, 3 y 4.

En la siguiente tabla se presenta los datos anuales promedio de SENAMHI y ERA5:

Tabla 7

Datos anuales promedio de SENAMHI y ERA5

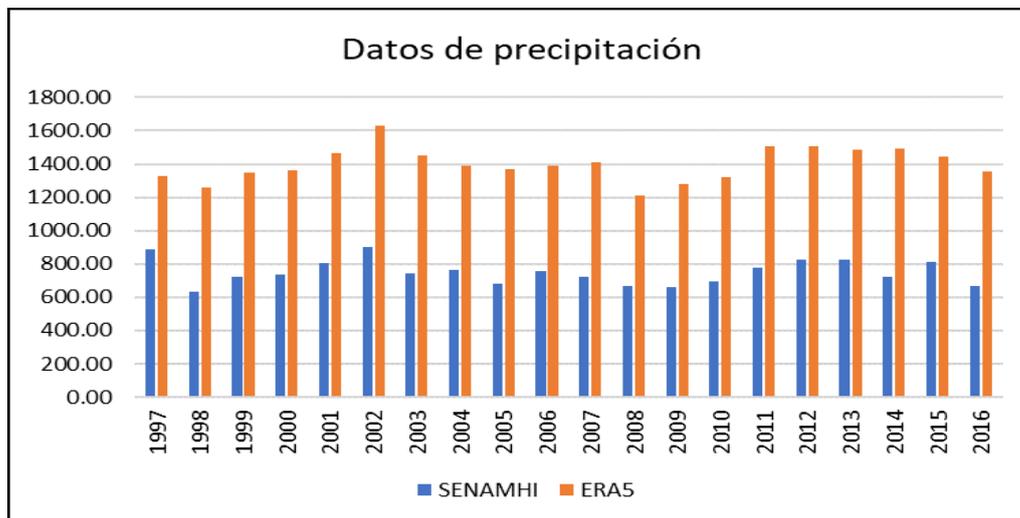
AÑO	SENAMHI			ERA5		
	Prec. total	Tem. promedio	Evap. potencial	Prec. total	Tem. promedio	Evap. potencial
1997	886.07	7.43	611.00	1328.54	5.63	955.39
1998	630.05	8.35	671.95	1257.95	6.81	1059.06
1999	725.14	7.39	601.58	1350.73	5.17	931.17
2000	733.81	7.38	690.66	1363.86	5.21	949.29
2001	802.71	7.55	618.91	1467.55	5.16	918.31
2002	901.35	7.85	672.84	1629.60	5.16	913.09
2003	743.86	7.69	707.97	1449.10	5.56	970.99
2004	764.46	7.73	754.16	1389.13	5.30	952.31
2005	678.63	7.77	682.67	1370.78	5.86	999.92
2006	756.31	7.77	705.90	1387.92	5.59	964.56
2007	722.98	7.98	693.09	1412.61	5.64	967.77
2008	665.16	7.39	671.64	1209.79	5.60	971.58
2009	659.13	7.81	673.85	1280.11	6.00	1015.24
2010	692.55	8.36	650.33	1317.91	6.55	1010.33
2011	776.01	7.80	709.66	1505.48	5.47	962.70

AÑO	SENAMHI		ERA5		ERA5	
	Evap. potencial	Prec. total	Evap. potencial	Prec. total	Evap. potencial	Prec. total
2012	823.29	7.65	624.74	1505.53	5.50	931.67
2013	828.21	7.97	621.70	1488.55	5.55	932.92
2014	720.93	8.19	730.45	1494.82	5.60	937.52
2015	809.92	8.13	730.81	1446.73	5.68	946.11
2016	664.13	8.22	676.02	1355.01	6.23	991.92

Nota. Los datos anuales promedio de los valores de precipitación obtenidos en base a los datos de SENAMHI y ERA 5 son:

Figura 8

Datos anuales promedio de precipitación

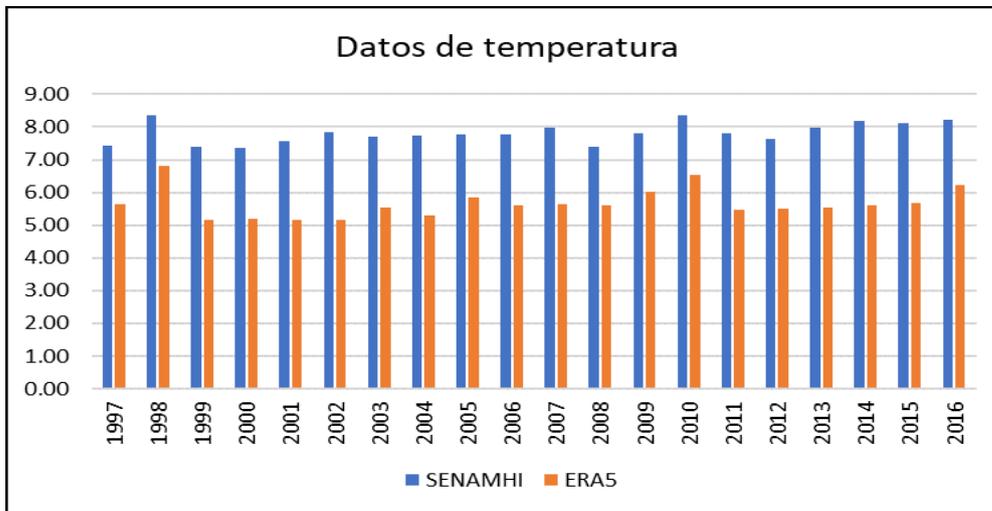


Nota. De acuerdo a los datos de SENAMHI se tiene una precipitación promedio anual de 749.2 mm, mientras que los datos de ERA5 tiene una precipitación promedio anual de 1400.6 mm, por lo que se tiene un coeficiente de variación (C.V.) del 31.75% en la precipitación.

Los datos anuales promedio de los valores de temperatura obtenidos en base a los datos de SENAMHI y ERA 5 son:

Figura 9

Datos anuales promedio de temperatura

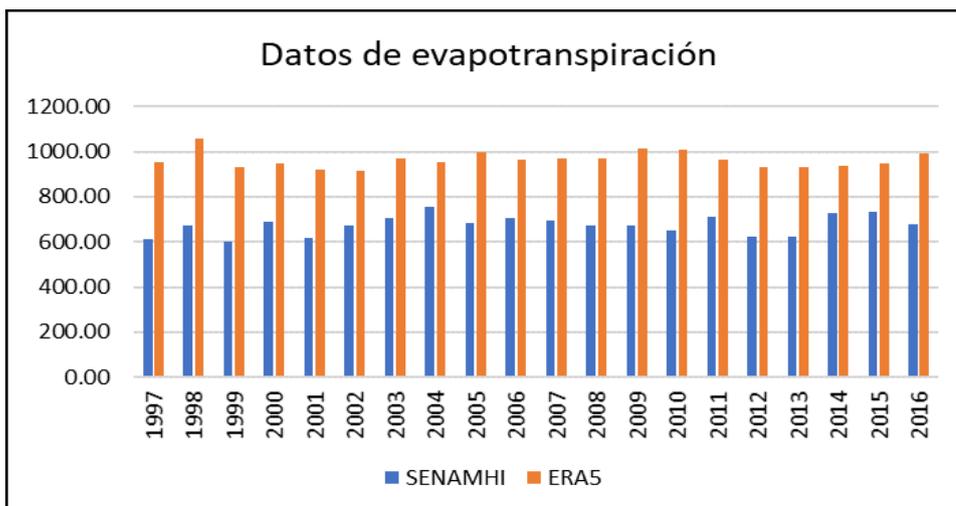


Nota. De acuerdo a los datos de SENAMHI se tiene una temperatura promedio de 7.82 °C, mientras que ERA5 tiene una temperatura promedio de 5.66 °C, por lo que se tiene un coeficiente de variación (C.V.) del 17.15% en la temperatura promedio.

Los datos anuales promedio de los valores de evapotranspiración obtenidos en base a los datos de SENAMHI y ERA 5 son:

Figura 10

Datos anuales promedio de evapotranspiración



Nota. De acuerdo a los datos de SENAMHI se tiene una evapotranspiración promedio anual de 675.0 mm, mientras que los datos de ERA5 tiene una evapotranspiración promedio anual de 964.1 mm, por lo que se tiene un coeficiente de variación (C.V.) del 18.49% en la cantidad de evapotranspiración.



4.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GR2M

Para el estudio del modelo hidrológico GR2M en la cuenca Ramis de la región de Puno se han considera 20 años, desde enero de 1997 hasta diciembre de 2016 con los datos obtenidos de la plataforma del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI disponibles hasta esta fecha de estudio, así como los datos de ERA5 de la plataforma Copernicus Climate Data Store – ECMWF.

Para la calibración del modelo hidrológico GR2M se consideran $2/3$ del periodo de estudio, en este caso de 13 años, mientras que para la calibración del modelo hidrológico GR2M se consideran $1/3$ del periodo de estudio, en este caso de 7 años.

El modelo GR2M con el que se trabaja es el desarrollado por Mouelhi et al. (2006), en base de datos de precipitación y evapotranspiración potencial.

4.2.1. Calibración del modelo GR2M - SENAMHI

Se tienen los siguientes datos introducidos en el modelo hidrológico GR2M para una etapa de calibración de 13 años con datos del SENAMHI.

Figura 11

Calibración del modelo GR2M - SENAMHI

Nombre de la cuenca	Cuenca del Rio Ramis		
Superficie de la cuenca (km²)	14704.3		
Parámetros del modelo	Transf.	Réels	
x1: Res. salida (mm)	6.22	502.75	
x2: Parámetro de intercambio (mm)	0.78	0.78	
Valores iniciales			
Nivel de llenado inicial S0 (máx.: x1 mm)			251.38
Nivel de llenado inicial R0 (máx.: 60 mm)			30
Periodo			
Duración del período de puesta en marcha (meses)			12
Duración del período de prueba (meses)			143
Fecha de salida			01/1998
Fecha final			12/2009
Precipitación media observada (mm/mes)			60.5
Promedio de FTE observados (mm/mes)			56.5
Caudales promedio observados (mm/mes)			13.0
Promedio de las raíces de los caudales observados			3.1
Promedio de los flujos logarítmicos observados			2.0
Criterios de eficacia (%)			
Nash(Q)			90.0
Nash(VQ)			90.6
Nash(ln(Q))			85.3
Bilan			100.3

Nota. De acuerdo a la figura de los resultados obtenidos del modelo GR2M, en el proceso de calibración con la optimización del programa Solver, se obtuvo el criterio de Nash de 90.0%, el cual representa un valor Excelente y con el criterio de balance (caudal observado/caudal simulado) se obtuvo 100.3% valor que indica que el modelo representa adecuadamente los caudales de la cuenca.

En el presente hidrograma se muestra la simulación de caudales (Caudal observado y caudal simulado) en la etapa de calibración del modelo hidrológico GR2M con datos del SENAMHI.

Figura 12

Hidrograma - Calibración del modelo GR2M - SENAMHI

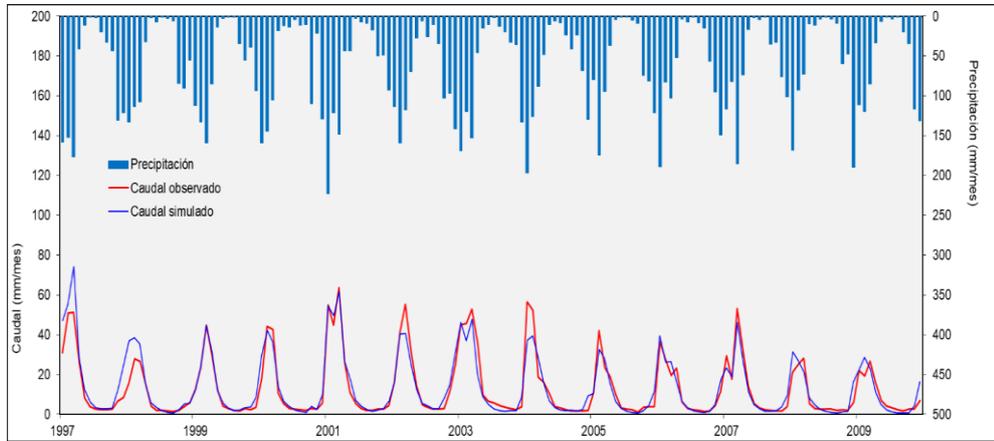
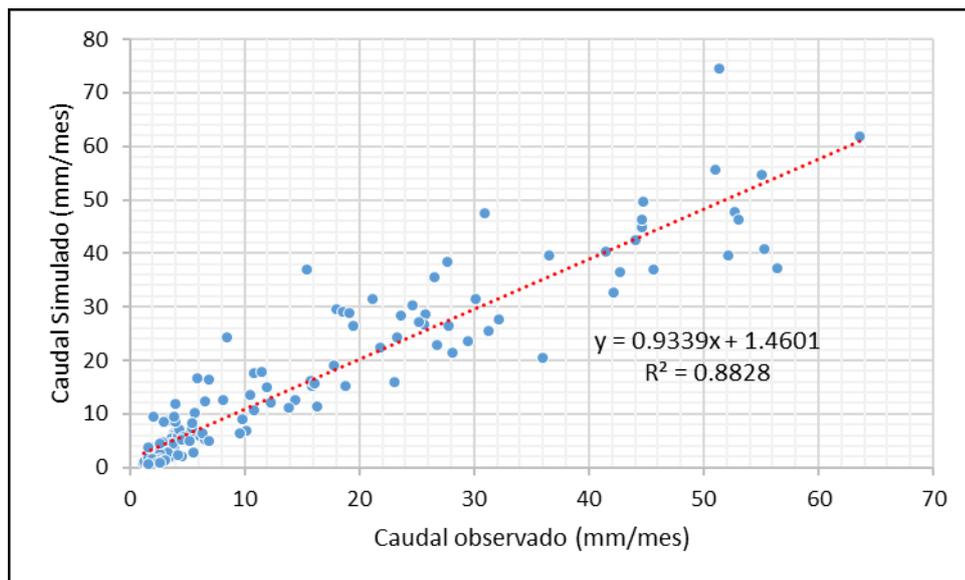


Figura 13

Correlación R2 – Calibración del modelo GR2M - SENAMHI



Nota. De acuerdo a la figura se observa que los caudales simulados, respecto a los caudales observados, tienen una buena correlación R^2 con un valor de 0.8828, el cual nos indica que el modelo se ajusta.

4.2.2. Validación del modelo GR2M - SENAMHI

Se tienen los siguientes datos introducidos en el modelo hidrológico GR2M para la etapa de validación de 7 años con datos del SENAMHI.

Figura 14

Validación del modelo GR2M - SENAMHI

Nombre de la cuenca	Cuenca del Rio Ramis		
Superficie de la cuenca (km²)	14704.3		
Parámetros del modelo	Transf.	Réels	
x1: Res. salida (mm)	6.22	502.75	
x2: Parámetro de intercambio (mm)	0.78	0.78	
Valores iniciales			
Nivel de llenado inicial S0 (máx.: x1 mm)			251.38
Nivel de llenado inicial R0 (máx.: 60 mm)			30
Periodo			
Duración del período de puesta en marcha (meses)			0
Duración del período de prueba (meses)			83
Fecha de salida			01/2010
Fecha final			12/2016
Precipitación media observada (mm/mes)			62.8
Promedio de FTE observados (mm/mes)			56.4
Caudales promedio observados (mm/mes)			13.5
Promedio de las raíces de los caudales observados			3.1
Promedio de los flujos logarítmicos observados			2.0
Criterios de eficacia (%)			
Nash(Q)			78.7
Nash(VQ)			87.1
Nash(ln(Q))			89.2
Bilan			109.8

Nota. De acuerdo a la figura de los resultados obtenidos del modelo GR2M, en el proceso de validación, se obtuvo el criterio de Nash de 78.7%, el cual representa un valor Muy bueno y con el criterio de balance (caudal observado/caudal simulado) se obtuvo 109.8% valor que indica que el modelo está sobreestimando ligeramente los caudales de la cuenca.

En el presente hidrograma se muestra la simulación de caudales (Caudal observado y caudal simulado) en la etapa de validación del modelo hidrológico GR2M con datos del SENAMHI.

Figura 15

Hidrograma - Validación del modelo GR2M - SENAMHI

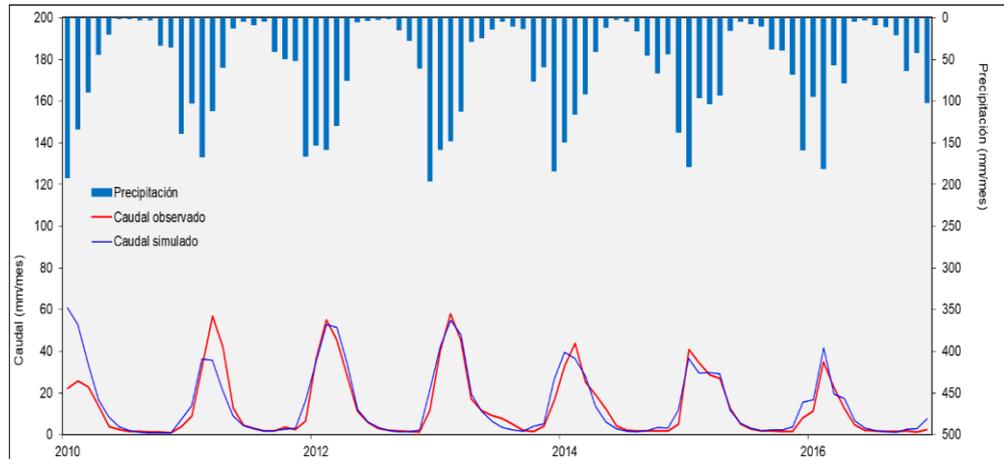
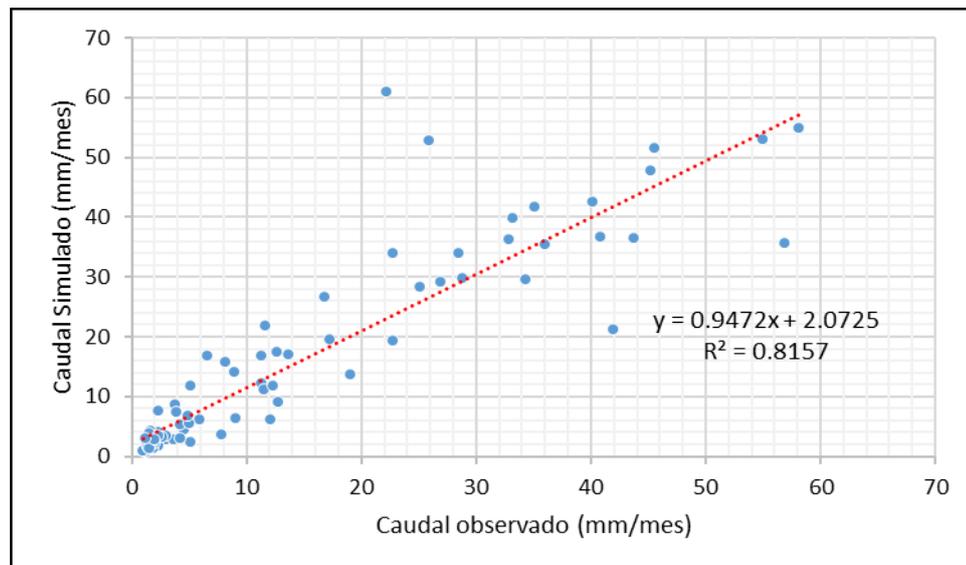


Figura 16

Correlación R2 – Validación del modelo GR2M - SENAMHI



Nota. De acuerdo a la figura se observa que los caudales simulados, respecto a los caudales observados, tienen una buena correlación R^2 con un valor de 0.8157, el cual nos indica que el modelo se ajusta.

4.2.3. Calibración del modelo GR2M – ERA5

Se tienen los siguientes datos introducidos en el modelo hidrológico GR2M para una etapa de calibración de 13 años con datos de ERA5.

Figura 17

Calibración del modelo GR2M – ERA5

Nombre de la cuenca	Cuenca del Rio Ramis		
Superficie de la cuenca (km²)	14704.3		
Parámetros del modelo	Transf.	Réels	
x1: Res. salida (mm)	6.90	988.62	
x2: Parámetro de intercambio (mm)	0.43	0.43	
Valores iniciales			
Nivel de llenado inicial S0 (máx.: x1 mm)			494.31
Nivel de llenado inicial R0 (máx.: 60 mm)			30
Periodo			
Duración del período de puesta en marcha (meses)			12
Duración del período de prueba (meses)			143
Fecha de salida			01/1998
Fecha final			12/2009
Precipitación media observada (mm/mes)			114.5
Promedio de FTE observados (mm/mes)			80.5
Caudales promedio observados (mm/mes)			13.0
Promedio de las raíces de los caudales observados			3.1
Promedio de los flujos logarítmicos observados			2.0
Criterios de eficacia (%)			
Nash(Q)			84.5
Nash(VQ)			86.0
Nash(ln(Q))			77.9
Bilan			100.8

Nota. De acuerdo a la figura de los resultados obtenidos del modelo GR2M, en el proceso de calibración con la optimización del programa Solver, se obtuvo el criterio de Nash de 84.5%, el cual representa un valor Excelente y con el criterio de balance (caudal observado/caudal simulado) se obtuvo 100.8% valor que indica que el modelo representa adecuadamente los caudales de la cuenca.

En el presente hidrograma se muestra la simulación de caudales (Caudal observado y caudal simulado) en la etapa de calibración del modelo hidrológico GR2M con datos de ERA5.

Figura 18

Hidrograma - Calibración del modelo GR2M – ERA5

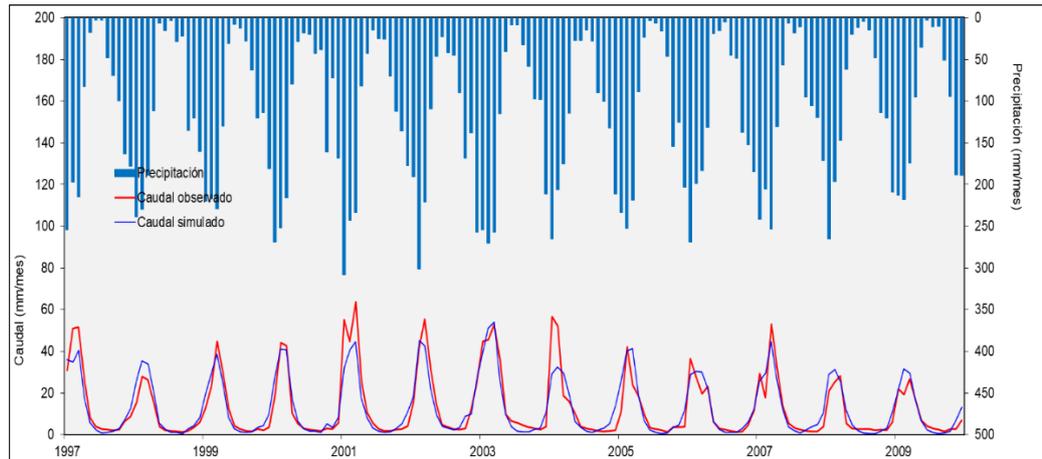
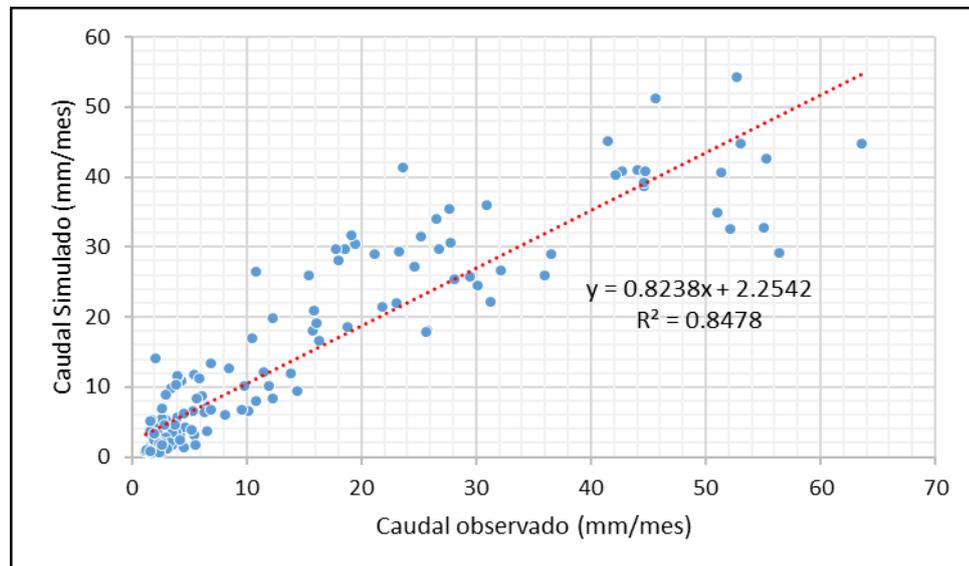


Figura 19

Correlación R2 – Calibración del modelo GR2M – ERA5



Nota. De acuerdo a la figura se observa que los caudales simulados, respecto a los caudales observados, tienen una buena correlación R^2 con un valor de 0.8828, el cual nos indica que el modelo se ajusta.

4.2.4. Validación del modelo GR2M – ERA5

Se tienen los siguientes datos introducidos en el modelo hidrológico GR2M para una etapa de validación de 7 años con datos de ERA5.

Figura 20

Validación del modelo GR2M – ERA5

Nombre de la cuenca	Cuenca del Rio Ramis		
Superficie de la cuenca (km²)	14704.3		
Parámetros del modelo	Transf.	Réels	
x1: Res. salida (mm)	6.90	988.62	
x2: Parámetro de intercambio (mm)	0.43	0.43	
Valores iniciales			
Nivel de llenado inicial S0 (máx.: x1 mm)			494.31
Nivel de llenado inicial R0 (máx.: 60 mm)			30
Periodo			
Duración del período de puesta en marcha (meses)			0
Duración del período de prueba (meses)			83
Fecha de salida			01/2010
Fecha final			12/2016
Precipitación media observada (mm/mes)			119.5
Promedio de FTE observados (mm/mes)			63.9
Caudales promedio observados (mm/mes)			13.5
Promedio de las raíces de los caudales observados			3.1
Promedio de los flujos logarítmicos observados			2.0
Criterios de eficacia (%)			
Nash(Q)			69.1
Nash(VQ)			69.0
Nash(ln(Q))			60.0
Bilan			131.4

Nota. De acuerdo a la figura de los resultados obtenidos del modelo GR2M, en el proceso de validación, se obtuvo el criterio de Nash de 69.1%, el cual representa un valor Muy bueno y con el criterio de balance (caudal observado/caudal simulado) se obtuvo 131.4% valor que indica que el modelo está sobreestimando los caudales de la cuenca.

En el presente hidrograma se muestra la simulación de caudales (Caudal observado y caudal simulado) en la etapa de validación del modelo hidrológico GR2M con datos de ERA5.

Figura 21

Hidrograma - Validación del modelo GR2M – ERA5

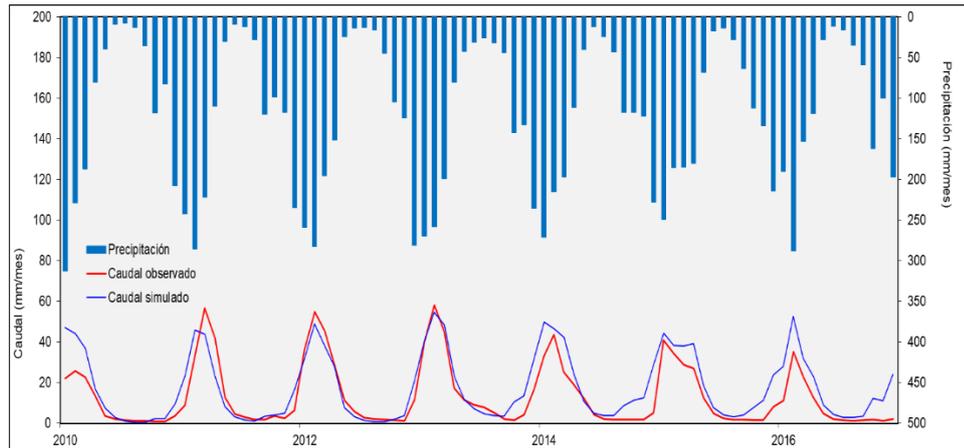
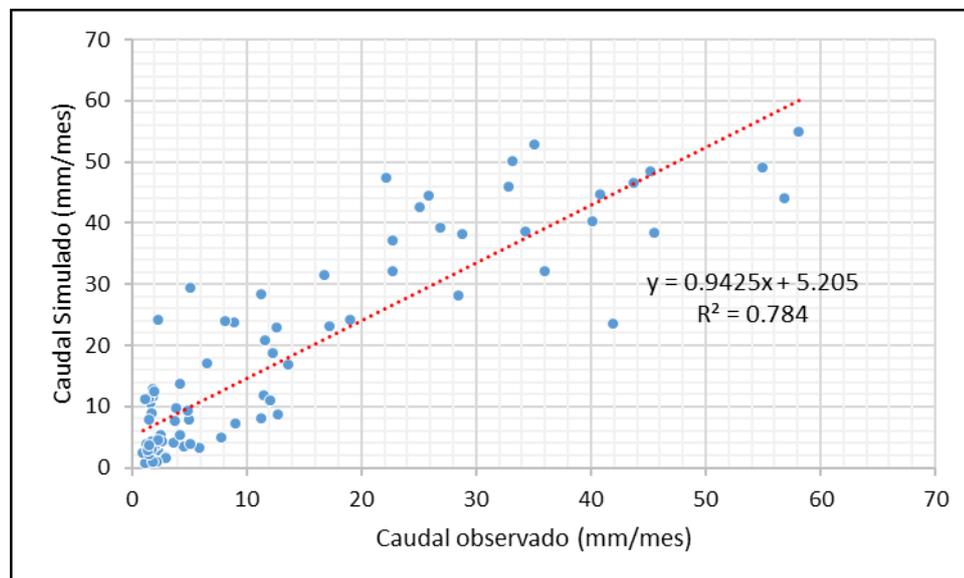


Figura 22

Correlación R2 – Validación del modelo GR2M – ERA5



Nota. De acuerdo a la figura se observa que los caudales simulados, respecto a los caudales observados, tienen una buena correlación R^2 con un valor de 0.7839, el cual nos indica que el modelo se ajusta.

4.2.5. Eficiencia del modelo GR2M

Para conocer qué modelo de simulación de caudales medios mensuales es eficiente para la cuenca del Río Ramis del departamento de Puno, se efectuó la prueba de eficiencia de ajuste del modelo hidrológico GR2M con los datos del SENAMHI y ERA5, para la etapa de calibración y validación, se tienen los siguientes datos introducidos en el modelo GR2M.

Las pruebas utilizadas para ver la eficiencia que presenta cada modelo son: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de calibración (r), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Tabla 8

Indicadores estadísticos de eficiencia

Proceso	Parámetros estadísticos	Modelo GR2M		
		SENAMHI	ERA5	
Calibración	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	NSE	0.90	0.79
	Coeficiente de calibración	r	0.94	0.92
	Raíz del error cuadrático medio	RMSE	5.41	6.07
	Porcentaje de sesgo	PBIAS	-4.43	0.57
Validación	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	NSE	0.85	0.69
	Coeficiente de calibración	r	0.90	0.89
	Raíz del error cuadrático medio	RMSE	7.06	8.79
	Porcentaje de sesgo	PBIAS	-10.26	-33.28

Nota. De acuerdo a la tabla el modelo GR2M con los datos de SENAMHI presenta una eficiencia de Nash de 0.90 para la etapa de calibración, y esta disminuye a 0.85 para la etapa de validación, el modelo GR2M con los datos de ERA5 presenta una eficiencia de Nash de 0.79 para la etapa de calibración, y esta disminuye a 0.69 para la etapa de validación, por lo que este modelo presenta un muy buen desempeño según los parámetros de Nash.



El indicador “r” del modelo GR2M con los datos de SENAMHI es de 0.94 para la etapa de calibración y esta se reduce a 0.92 para la etapa de validación, el modelo GR2M con los datos de ERA5 presenta un valor de “r” de 0.9 para la etapa de calibración, y esta se reduce a 0.89 para la etapa de validación, de acuerdo a los rangos de criterio de “r” de los valores cercanos a cero indica una fuerte correlación cuanto más cercano, por lo que los estos datos de SENAMHI y ERA5 presentan una fuerte correlación.

El indicador PBIAS del modelo GR2M con los datos de SENAMHI es de -4.43 para la etapa de calibración y esta incrementa a 0.57 para la etapa de validación, el modelo GR2M con los datos de ERA5 presenta un valor de PBIAS de -10.26 para la etapa de calibración, y esta incrementa a -33.28 para la etapa de validación, de acuerdo a los rangos de criterio de -15% hasta 15% indican que el modelo tiene una tendencia mínima a sobreestimar o subestimar, lo cual se considera favorable, a menudo se considera aceptable y sugiere que el modelo tiene un sesgo relativamente bajo, pero en el caso de la validaciones de los datos con ERA5 que es un valor que sobrepasa estos rangos pueden indicar un sesgo más pronunciado, por lo que se deben analizar y tratar los datos cuidadosamente.

El indicador RMSE del modelo GR2M con los datos de SENAMHI es de 5.41 para la etapa de calibración y esta incrementa a 6.07 para la etapa de validación, el modelo GR2M con los datos de ERA5 presenta un valor de RMSE de 7.06 para la etapa de calibración, y esta incrementa a 8.79 para la etapa de validación, de acuerdo a los rangos de criterio de valores RMSE se encuentra entre bajo a medio que indican que el modelo sugiere un buen ajuste a los datos observados, asimismo se considera un ajuste aceptable del modelo, aunque puede haber margen para mejoras.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los datos de precipitación y evapotranspiración se obtuvieron de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ERA 5), de la misma forma las siguientes investigaciones emplearon la base de datos ERA5: Dhawan et al. (2023), Pelosi et al. (2020), Vanella et al. (2022), Pelosi y Chirico (2021) en Italia, Almonacid et al. (2019) en Argentina, Nogueira (2020) en Portugal, Hormazábal et al. (2021) en Chile, Xu et al. (2022) en Estados Unidos,

Gomis et al. (2023) en España, Jiang et al. (2023) en China; asimismo a nivel nacional en las investigaciones de Lavado et al. (2022) en la Vertiente del Pacífico, Bonshoms et al. (2022) en cordilleras que pasan por el Perú, Arias et al. (2022) en Lambayeque, Subauste et al. (2022) en Ancash, Lima y Huánuco, Alfaro et al. (2022) en Apurímac, Sulca et al. (2022) en Cusco, Puno, Arequipa, Apurímac, Moquegua y Tacna, finalmente las investigación a nivel regional, Birkel et al. (2022) y Lujano et al. (2023) en el altiplano (Puno), Lujano et al. (2020) en la cuenca del Río Ramis.

Los resultados indican que el modelo GR2M con datos del SENAMHI en el indicador “NSE” es 0.90 para la calibración, y 0.85 para la validación, con datos de ERA5 el “NSE” es 0.79 para la calibración, y 0.69 para la validación, el indicador “r” es 0.94 para la calibración, y 0.92 para la validación, con datos de ERA5 el “r” es 0.90 para la calibración, y 0.89 para la validación, el indicador “PBIAS” es -4.43 para la calibración, y 0.57 para la validación, con datos de ERA5 el “PBIAS” es -10.26 para la calibración, y -33.28 para la validación, el



indicador “RMSE” es 5.41 para la calibración, y 6.07 para la validación, con datos de ERA5 el “RMSE” es 7.06 para la calibración, y 8.79 para la validación.

A nivel internacional en comparación con los estudios: Investigación de Almonacid et al. (2019) se tuvo un $r > 0.5$, RMSE de 0.31 y PBIAS de 16.47, por lo tanto las conclusiones indican un óptimo desempeño de la base de datos ERA5 pero subestimando los datos de validación en un 21%, en la investigación de Pelosi et al. (2020), donde el BIAS de temperatura varía en la región de $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un RMSE medio de $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un RMSE máximo de $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, concluyendo en la región de estudio el BIAS fue inferior al 5 % para todas las bases de datos y el RMSE para ETo calculado con datos de ERA5 fue del 17%, lo que el estudio confirma que los datos de reanálisis puede sustituir la falta de disponibilidad de datos meteorológicos observados para la evaluación regional de ETo, en la investigación de Nogueira (2020) se tuvo los valores de RMSE relativamente bajos, concluyendo que los datos de ERA-5 muestra un sesgo (PBIAS) más bajo y un error cuadrático medio imparcial, además de genera valores de precipitaciones excesivas, en la investigación de Vanella et al. (2022) se tuvo valores promedio de RMSE de $1.46\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.76\text{ }^{\circ}\text{C}$, los valores de PBIAS variaron entre el 0.38 %, 6.62 %, $-9.22\text{ }%$, concluyendo que estos parámetros indica una subestimación específica del sitio del 9% y una sobreestimación del 4%, en la investigación de Xu et al. (2022) los resultados promedios de los valores de “r” van desde 0.40 a 0.70, los resultados promedios de los valores de “RMSE” van desde 3.0 a 9.0, concluyendo con la sobreestimación de las precipitaciones por ERA5, en la investigación de Gomis et al. (2023) los resultados de la evaluación reveló que ERA5-Land/ERA5 tendía a sobrestimar las categorías de precipitación ligera (≥ 1 y < 5 mm/día), moderada



(≥ 5 y < 20 mm/día), intensa (≥ 20 y < 40 mm/día) y violentas (≥ 40 mm/día), mientras que el sesgo relativo (RBIAS) y los patrones espaciales RMSE se correlacionaron positivamente con la pendiente ($\rho = 0.41/0.35, 0.69/0.70$, respectivamente, concluyendo los datos ERA5 para la precipitación mostró una buena capacidad para reproducir los patrones espaciales y las tendencias temporales de las observaciones, en la investigación de Jiang et al. (2023) los datos de ERA5 mostró una buena correlación con un valor medio de 0.703 y sobreestimó significativamente las observaciones in situ, mientras que los valores RMSE para todos los productos de precipitación fueron mayores.

A nivel nacional en comparación con los estudios: Investigación de Lavado et al. (2022) según los parámetros NSE, RMSE, r, empleando un modelo hidrológico GR4J mostraron valores por encima de satisfactorios (>0.5) valores desde 0.5, 0.6, 0.7 y 0.75, de acuerdo a BIAS estuvo cerca del 0 en la etapa de calibración, pero en la etapa de validación el producto presento una mayor variación, en la investigación de Arias et al. (2022) los resultados del modelo GR4J presento un valor de NCE de 64.21% considerado como ajuste muy bueno, mientras que la correlación r^2 fue de 0.6599, concluyendo un buen desempeño en la estimación de caudales, en la investigación de Bonshoms et al. (2022) los resultados indican un mejor desempeño del reanálisis para Temperatura ($r > 0.80$), la validación ERA5L según RMSE entre $\pm 0.2^\circ\text{C}$, una correlación de r de 0.81; RMSE 13%, y PBIAS 8.3% entre correlación r de 0.96; RMSE 3%; PBIAS de -0.8%). Las conclusiones indican que, en base a los datos obtenidos, es apropiado utilizar ERA5 para caracterizar las condiciones de temperatura, en la investigación de Subauste et al. (2022) se tuvo el resultado según el indicador de Nash de 61% a un 100% y r^2 de 0.69, concluyendo que se muestra el potencial



del modelo a la hora de calibrar, los valores aceptables y la eficiencia que posee, en la investigación de Alfaro et al. (2022) los resultados indican que se obtuvo un valor de correlación de $r^2=0.8814$; mientras que NCE presenta un porcentaje de 80% a 100%, concluyendo que el modelo hidrológico presenta un buen desempeño y resultados satisfactorios por lo que puede ser integrado como una de las alternativas para los pronósticos hidrológicos de este sector de estudio.

A nivel regional en comparación con los estudios: Investigación de Lujano et al. (2020) se presenta un valor de NSE entre 0.58 y 0.93, sesgo porcentual (PBIAS) entre -0.58 y 1.34% , y error cuadrático medio (RMSE) entre 0.14 y 0.25 mm/d, por lo que se concluye que ante la falta de datos meteorológicos y/o disponibilidad de datos climáticos observados podría afectar su confiabilidad en áreas alejadas de las estaciones meteorológicas utilizadas para la calibración, en la investigación de Birkel et al. (2022) los resultados indican que los productos de reanálisis están validados con observaciones de estaciones meteorológicas automáticas, asimismo se concluye que los datos de ERA5 proporciona la descripción general más sólida de la temperatura y la precipitación en todo el dominio de estudio, y el conjunto de datos es particularmente útil para su extensión hasta 1950, en la investigación de Sulca et al. (2022) los resultados presenta un déficit superior al 46% del promedio de temperatura de $+3\text{ }^\circ\text{C}$, concluyendo que la base de datos de ERA5 permite obtener datos climatológicos diarios desde el año 1980 hasta la actualidad, superando a la información de las estaciones del Perú, en la investigación de Lujano et al. (2023) los resultados de NCE que van desde 0.86 a 0.86 para la etapa de calibración y 0.80 a 0.84 para la validación, mientras que RMSE va desde 0.45 a 0.48 en la etapa de calibración y 0.49 a 0.55 para la validación, las conclusiones del estudio muestran la mejora de



la estimación de evapotranspiración por medio de la calibración del coeficiente de radiación KRS, mejorándose la eficiencia de Nash NSE, el porcentaje de sesgo PBIAS y error cuadrático medio RMSE, por lo que los datos utilizados en las mediciones hidrometeorológicas de precipitación, temperatura y caudales del modelo hidrológico son aceptables.



V. CONCLUSIONES

PRIMERA. Se ha evaluado el desempeño de datos de reanálisis ERA5 en el modelado hidrológico mensual del Río Ramis mediante las métricas o parámetros estadísticos de eficiencia en el modelo hidrológico GR2M como lo son Nash Suftcliffe - NSE, el Coeficiente de correlación - r, el Sesgo relativo - BIAS y la Raíz de error medio cuadrático – RMSE, donde el resultado representa un valor muy bueno a excelente y con el criterio de balance (caudal observado/caudal simulado) indicando que el modelo representa adecuadamente los caudales de la cuenca, pero a veces el modelo tiende a sobreestimar valores, demostrando así un buen desempeño en el modelo hidrológico con los datos de reanálisis ERA5.

SEGUNDA. Se han determinado los datos de precipitación y evapotranspiración según la base de datos de las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y los datos de ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) de la cuenca del Río Ramis del departamento de Puno, los datos de SENAMHI presenta una precipitación promedio anual de 749.2 mm y evapotranspiración promedio anual de 675.0 mm mientras los datos de ERA5 presenta una precipitación promedio anual de 1400.6 mm y evapotranspiración promedio anual de 964.1 mm, los datos de precipitación tiene un coeficiente de variación (C.V.) del 31.75% mientras que los datos de evapotranspiración tiene un coeficiente de variación (C.V.) del 18.49%, lo que indica una clara diferencia entre los valores de la base de datos de ERA5.



TERCERA. Se ha evaluado el modelo hidrológico GR2M con los datos del SENAMHI y ERA5 para simular caudales mensuales de la cuenca del Rio Ramis mediante los parámetros estadísticos de eficiencia, Nash Sutcliffe (NSE), el Coeficiente de correlación (r), el Sesgo relativo (BIAS) y la Raíz de error medio cuadrático (RMSE), según el indicador “NSE” es 0.90 para la calibración, y 0.85 para la validación, con datos de ERA5 el “NSE” es 0.79 para la calibración, y 0.69 para la validación, por lo que el modelo hidrológico presenta un muy buen desempeño, según el indicador “ r ” es 0.94 para la calibración, y 0.92 para la validación, con datos de ERA5 el “ r ” es 0.90 para la calibración, y 0.89 para la validación, por lo que el modelo hidrológico presenta una fuerte correlación, según el indicador “PBIAS” es -4.43 para la calibración, y 0.57 para la validación, con datos de ERA5 el “PBIAS” es -10.26 para la calibración, y -33.28 para la validación, por lo que el modelo hidrológico se considera aceptable pero se tiene una tendencia mínima a sobreestimar o subestimar, según el indicador “RMSE” es 5.41 para la calibración, y 6.07 para la validación, con datos de ERA5 el “RMSE” es 7.06 para la calibración, y 8.79 para la validación, por lo que el modelo presenta un buen ajuste y se considera aceptable.



VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA.** Se recomienda tener en consideración tener un buen conocimiento del inglés debido que para la extracción de los datos de reanálisis ERA5 la plataforma del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio – ECMWF se encuentra en dicho idioma.
- SEGUNDA.** Para investigaciones futuras se recomienda trabajar con estaciones hidrológicas y estaciones meteorológicas que posean la suficiente información para su análisis debido a la insuficiencia de datos (datos de precipitación, temperatura no registrados o sin continuidad en el registro) que existen en las estaciones brindadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- TERCERA.** Se recomienda emplear los datos de reanálisis ERA5 de forma adecuada puesto que los resultados tienen una varianza con respecto al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, además que se recomienda revisar otros modelos hidrológicos con tal de comparar los resultados obtenidos.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro-Gurrieronero, C. D., Sovero-Gómez, S. V., Carmona-Arteaga, A., & Campos-Vasquez, N. (2022). Generation of daily and monthly flows using the GR4j Method and the ERA5 gridded climate information in the Pachachaca basin up to the Santa Rosa station. *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: "Education, Research and Leadership in Post-Pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions,"* 1–10. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.306>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., & Raes Smith, D. M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements.*
- Almonacid, L., Pessacg, N., Diaz, B., Bonfili, O., & Peri, P. L. (2019). Nueva base datos reticulada de precipitacion para la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Centro Argentino de Metereologos*, 1–23. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/165528>
- ANA, A. N. del A.-. (2019). *Estudio hidrológico de la unidad hidrográfica del río Ramis.* 1–404. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4716>
- Arias, R. G. A., Bazalar, D. A. J., Campos, V. N., & Carmona, A. A. (2022). Aplicación del modelo hidrológico GR4j para la estimación de caudales diarios utilizando conjunto de datos grillados ERA5 en la cuenca del río Zaña hasta la estación hidrométrica Batán. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2022-July*, 1–10. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85140020715&doi=10.18687%2FLACCEI2022.1.1.175&partnerID=40&md5=2910d7cc447c1364af242547d41668e4>



- Birkel, S. D., Mayewski, P. A., Perry, L. B., Seimon, A., & Andrade-Flores, M. (2022). Evaluation of Reanalysis Temperature and Precipitation for the Andean Altiplano and Adjacent Cordilleras. *Earth and Space Science*, 9(3). <https://doi.org/10.1029/2021EA001934>
- Bonshoms, M., Ubeda, J., Liguori, G., Körner, P., Navarro, Á., & Cruz, R. (2022). Validation of ERA5-Land temperature and relative humidity on four Peruvian glaciers using on-glacier observations. *Journal of Mountain Science*, 19(7), 1849–1873. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7388-4>
- Borja, S. M. (2012). *Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros*. <https://es.slideshare.net/manborja/metodologia-de-inv-cientifica-para-ing-civil>
- Cabrera, J. (2012). Modelos agregados : GR2M. *Instituto Para La Mitigación de Los Efectos Del Fenómeno El Niño - Universidad Nacional de Ingeniería*, 4. <http://www.imefen.uni.edu.pe/modhidro.htm>
- Cabrera, J. (2014). Modelos hidrológicos distribuidos. *Rhama*, 8. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Cloud Storage. (2022). *Datos de ERA5*. <https://cloud.google.com/storage/docs/public-datasets/era5?hl=es-419>
- Copernicus Climate Change Service [C3S]. (2022). *Climate Change Service*. <https://www.copernicus.eu/es/servicios/vigilancia-atmosferica>
- Dhawan, P., Torre, D. D., Righetti, M., Zanfei, A., Menapace, A., & Larcher, M. (2023). *Assessment of ERA5-Land Data in Medium-Term Drinking Water Demand Modelling with Deep Learning*. <https://doi.org/10.3390/w15081495>



- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2023). *Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio*. 1–14.
<https://www.ecmwf.int/en/learning>
- Gomis, C. J., Rattayova, V., Salazar, G. S., & Francés, F. (2023). Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020). *Atmospheric Research*, 284(January).
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106606>
- Gonzalez, L. (2018). Evaluando el error en los modelos de regresión. In *Aprende IA*.
- Gutierrez, L. (2020). *Precipitación*. https://www.docsity.com/es/articulo-sobre-la-precipitacion/5830217/?src=social_login
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*.
- Hernández, L. J. D., Espinosa, C. F., Rodríguez, J. E., Chacón, R. J. G., Toloza, S. C. A., Arenas, T. M. K., Carrillo, S. S. M., & Bermúdez, P. V. J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *AVFT Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*.
<http://www.revistaavft.com/>
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. P. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta Ed., Issue 2). Editorial McGraw Hill.
<https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta Ed.). Editorial McGraw Hill.



- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Horányi, A., Sabater, J. M., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., & Dee, D. (2019). Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *ECMWF Newsletter*, 159, 17–24. <https://doi.org/10.21957/vf291hehd7>
- Hormazábal, V., Vargas, R. V., Abarca, R., Little, C. C., Rivera, D., Carrasco, N., & Villalobos, V. E. (2021). Simulación hidrológica del caudal del estero Batuco en la microcuenca agroforestal Batuco (Ránquil, Región del Ñuble, Chile) bajo condiciones climáticas presentes y futuras. *Ciencia & Investigación Forestal*, 27(2), 3–22. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.546>
- Huaman, A. F. (2023). *Análisis comparativo de los modelos hidrológicos Lutz-Scholz, GR2M y abcd para estimar el caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, 1981-2016*. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19972>
- Jiang, S. hu, Wei, L. yong, Ren, L. liang, Zhang, L. qi, Wang, M. hao, & Cui, H. (2023). Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over mainland China: Spatiotemporal patterns and extremes. *Water Science and Engineering*, 16(1), 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.05.001>
- Kim, K. B., Kwon, H. H., & Han, D. (2015). Bias correction methods for regional climate model simulations considering the distributional parametric uncertainty underlying the observations. *Journal of Hydrology*, 530, 568–579. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.015>
- Lavado, C. W., Quenta, J., & Felipe, O. (2022). *Modelamiento Hidrológico con productos satelitales en la vertiente del Pacífico*. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1779>



- Lujano, A., Sanchez, D. M., & Lujano, E. (2023). Improvement of Hargreaves–Samani Reference Evapotranspiration Estimates in the Peruvian Altiplano. *Water (Switzerland)*, *15*(7). <https://doi.org/10.3390/w15071410>
- Lujano, E., Sosa, J. D., Lujano, R., & Lujano, A. (2020). Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú. *Revista de Ingeniería Universidad de Carabobo*, *27*(2), 2020–2189. <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>
- Martín, L. F. (2019). Los datos de ERA5 ayudarán a comprender el clima global. *Meteored*, 1–5. <https://www.tiempo.com/ram/497511/los-datos-de-era5-ayudaran-a-comprender-el-clima-global/>
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. (2001). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*, *1*(47), 36–58. <https://doi.org/10.14350/rig.59164>
- Ministerio de Agricultura - Autoridad Nacional del Agua. (2010). Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338. In *Ministerio de Agricultura*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *50*(3), 885–900.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, *318*(1–4), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>



- Nogueira, M. (2020). Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology*, 583(August 2019), 124632. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124632>
- Ocampo, L. O. L. (2012). *Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9268>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Oficina Regional De La FAO Para America Latina Y El Caribe. (2013). Captación Y Almacenamiento De Agua De Lluvia. In *Santiago de Chile*. <https://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>
- Ortega, C. (2017). *Investigación cuantitativa. Qué es y cómo realizarla*. <https://www.questionpro.com/blog/es/que-es-la-investigacion-cuantitativa/>
- Pelosi, A., & Chirico, G. B. (2021). Regional assessment of daily reference evapotranspiration: Can ground observations be replaced by blending ERA5-Land meteorological reanalysis and CM-SAF satellite-based radiation data? *Agricultural Water Management*, 258(December), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107169>
- Pelosi, A., Terribile, F., D'Urso, G., & Chirico, G. B. (2020). Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/W12061669>
- Plasencia, S. E., Matos, C. L., Posadas, A., & Cabrera, C. (2007). *Estimación horaria de*



la irradiancia solar total extraterrestre. 10, 72–77.

Sánchez, J. (2003). Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves. *Departamento de Geología. Universidad de Salamanca.*, 3–5.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi. (2023). *Descarga de datos Meteorológicos a nivel nacional*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Del Perú. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>

Siles Soria, G. (2022). REANÁLISIS CLIMATOLÓGICO ERA5: UNA REVISIÓN SOBRE SU USO EN EL CÁLCULO DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES SATELITALES (Monografía). *Revista Investigación & Desarrollo*, 22(1), 145–159. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-12i>

Subauste, G. F. N., Vílchez, V. J. M., Campos, V. N., & Carmona, A. A. (2022). Daily flow generation using the GR4j Method and ERA5 gridded climatic information in the Huaura basin up to the Alco - Sayán station. *20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 1–9. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.319> ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390 20th

Sulca, S., Calle, V., & Acuña, D. (2022). Ocean-atmospheric macro-scale pattern associated with extreme droughts in the Southern highlands of Peru. *Ecología Aplicada*, 21(1), 57–66. <https://doi.org/10.21704/rea.v21i1.1875>

Takahashi, G. K., Felipe, O. O. G., Acuña, A. J. Y., Metzger, T. L., & Casaverde, R. M.



(2019). *Modelamiento hidrológico para pronóstico estacional de caudales del Río Ramis.*

Vanella, D., Longo-Minnolo, G., Belfiore, O. R., Ramírez-Cuesta, J. M., Pappalardo, S., Consoli, S., D'Urso, G., Chirico, G. B., Coppola, A., Comegna, A., Toscano, A., Quarta, R., Provenzano, G., Ippolito, M., Castagna, A., & Gandolfi, C. (2022). Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42(July), 101182. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101182>

Xu, X., Frey, S. K., & Ma, D. (2022). Hydrological performance of ERA5 and MERRA-2 precipitation products over the Great Lakes Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 39(August 2021), 100982. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100982>



ANEXOS

ANEXO 1 Matriz de consistencia

Tabla 9

Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES:	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN
¿Cuál es la calidad de los datos de reanálisis ERA5 para el modelado hidrológico mensual del Río Ramis?	Evaluar el desempeño de los datos de reanálisis ERA5 en el modelado hidrológico mensual del Río Ramis utilizando datos de reanálisis	El modelado hidrológico mensual del Río Ramis con el modelo GR2M presenta un buen ajuste y es aceptable.	VARIABLE 1 Datos de reanálisis ERA5	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN: No experimental Cuantitativo Descriptivo
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	DIMENSIONES	POBLACIÓN
1) ¿Cuál es la precisión de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial de ERA5 en comparación con mediciones de estaciones	Determinar los datos de precipitación y evapotranspiración potencial de ERA5 y con mediciones de estaciones del meteorológicas	La precisión de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial de ERA5 es bueno así como las mediciones de estaciones meteorológicas del SENAMHI.	INDICADORES Resultados de comparación de datos ERA5 y SENAMHI	La población para la presente investigación será la cuenca del Río Ramis. De acuerdo al libro de Borja (2012) “Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros”, la población
			VARIABLE 2. Modelado hidrológico	

meteorológicas del SENAMHI para su uso en el modelado hidrológico.			se denomina al elemento, sujeto u objeto que se quiere estudiar.
2) ¿Cuál es la precisión del modelo hidrológico GR2M en la simulación de caudales mensuales del río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5?	2) El modelo hidrológico GR2M presenta una precisión adecuada en la simulación de caudales mensuales del Río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5.	DIMENSIONES Tipo de modelo	TÉCNICAS Análisis documental
2) Evaluar la capacidad del modelo hidrológico GR2M para simular caudales medios mensuales del Río Ramis utilizando datos de reanálisis ERA5.	2) Evaluar la hidrológico GR2M presenta una precisión adecuada en la simulación de caudales mensuales del Río eficiencia Nash Sutcliffe	INDICADORES Resultados del modelo	INSTRUMENTOS La observación relativa (BIAS) y la Raíz de error medio cuadrático (RMSE).

ANEXO 2 Datos de precipitación SENAMHI – ERA5 del sector de estudio**Precipitación del sector de estudio – SENAMHI****Tabla 10***Precipitación del sector de estudio – SENAMHI*

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1997	157.9	151.7	176.3	40.9	11.0	0.9	1.4	18.9	32.2	43.5	130.0	121.3	886.1
1998	132.4	113.4	107.2	31.2	1.3	6.8	0.6	2.5	5.3	84.3	90.1	55.0	630.0
1999	111.4	132.8	158.4	84.8	13.3	2.4	1.1	0.8	34.2	54.5	38.2	93.3	725.1
2000	159.0	143.8	105.0	18.0	11.2	12.8	3.6	11.1	10.1	109.4	20.8	128.9	733.8
2001	222.7	121.3	148.2	43.2	42.9	2.4	7.0	8.4	16.6	49.0	48.6	92.4	802.7
2002	113.2	158.7	117.4	69.5	27.0	5.4	25.7	10.2	34.3	102.5	96.2	141.2	901.3
2003	168.4	119.2	152.5	45.6	14.7	9.7	1.3	12.5	19.6	32.0	35.7	132.6	743.9
2004	196.2	125.7	88.1	47.4	10.3	5.1	7.8	22.8	40.7	23.1	68.2	129.2	764.5
2005	79.7	174.3	94.0	35.9	3.9	0.6	0.8	4.8	8.5	74.2	80.9	121.0	678.6
2006	188.7	82.2	102.7	51.5	3.2	6.6	0.7	7.4	14.6	56.0	94.4	148.4	756.3
2007	116.4	81.7	184.7	73.4	16.2	1.6	3.8	1.1	35.0	32.7	75.3	101.1	723.0
2008	167.9	92.7	72.7	9.4	10.8	3.5	0.8	2.7	8.6	59.1	47.2	189.7	665.2
2009	111.1	119.4	84.7	33.3	6.4	0.6	3.0	1.0	19.0	33.7	116.5	130.6	659.1
2010	191.7	133.5	89.1	44.1	19.6	1.4	1.0	2.3	2.5	33.2	35.4	138.8	692.6
2011	102.3	166.8	111.1	59.8	12.1	4.4	8.8	4.0	40.4	49.0	51.3	166.0	776.0
2012	153.0	157.6	129.1	74.8	4.8	3.8	1.6	1.3	14.8	26.7	60.2	195.5	823.3
2013	158.1	147.2	112.2	28.2	23.8	13.5	4.0	9.8	13.0	75.6	59.1	183.9	828.2
2014	149.3	115.9	91.5	40.1	11.5	1.6	4.0	15.8	44.8	66.2	43.0	137.3	720.9
2015	178.9	96.0	102.9	93.1	15.3	4.5	6.8	10.0	37.1	39.1	67.8	158.4	809.9
2016	94.6	181.1	56.5	78.3	3.9	2.5	8.6	11.0	20.6	63.1	41.7	102.1	664.1
TOTAL	2953.2	2615.0	2284.1	1002.4	263.2	90.2	92.2	158.6	451.6	1106.9	1300.7	2666.6	14984.7

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de SENAMHI 2023

Precipitación del sector de estudio – ERA5**Tabla 11***Precipitación del sector de estudio – ERA5*

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1997	253.7	197.2	214.9	82.5	17.4	2.9	2.8	47.8	68.8	99.6	162.8	178.1	1328.5
1998	238.6	229.5	188.8	111.3	6.0	15.1	3.6	28.4	21.7	134.7	120.4	160.0	1257.9
1999	219.9	217.3	228.7	129.9	30.6	7.6	12.1	27.5	62.6	120.2	113.6	180.7	1350.7
2000	268.9	251.7	215.7	79.3	28.6	18.2	20.0	42.4	38.1	160.7	71.8	168.4	1363.9
2001	308.2	243.3	233.0	81.9	42.8	14.2	24.9	25.3	69.7	112.0	135.5	176.9	1467.6
2002	190.7	301.1	220.9	109.3	46.2	22.4	41.6	44.6	89.9	167.9	138.0	257.1	1629.6
2003	254.1	270.0	256.9	114.8	40.0	8.7	8.6	31.9	58.2	97.1	98.0	210.7	1449.1
2004	264.9	205.8	174.5	114.2	27.3	27.2	14.8	27.6	90.0	100.0	131.7	211.1	1389.1
2005	233.3	252.6	218.8	88.6	23.6	3.2	6.2	15.8	46.1	154.2	125.2	203.2	1370.8
2006	268.9	198.4	183.2	131.6	18.8	15.1	4.9	45.0	48.5	137.1	151.9	184.5	1387.9
2007	241.2	205.0	253.5	130.3	56.8	6.2	17.9	10.5	95.0	105.4	119.6	171.3	1412.6
2008	265.1	196.5	146.6	61.7	19.3	11.8	4.5	14.2	47.8	113.6	119.9	208.8	1209.8
2009	212.8	217.8	174.1	94.8	34.9	2.7	10.5	10.2	51.0	94.5	187.9	189.0	1280.1
2010	312.3	228.8	186.5	79.7	39.0	8.7	7.4	12.3	35.1	118.2	82.6	207.3	1317.9
2011	241.8	285.5	221.6	109.7	29.8	8.6	11.6	27.5	119.2	98.5	117.1	234.6	1505.5
2012	258.7	282.3	195.2	150.9	23.7	13.6	12.5	15.4	44.7	104.0	123.8	280.6	1505.5
2013	269.5	258.0	199.0	79.9	42.0	30.9	25.3	31.4	43.5	141.8	132.2	234.9	1488.5
2014	270.4	214.4	196.9	110.8	40.0	11.7	24.3	43.1	117.4	116.8	121.4	227.6	1494.8
2015	248.5	185.2	184.3	180.2	68.2	17.5	13.1	27.7	63.1	111.4	133.5	213.9	1446.7
2016	190.1	287.8	153.0	118.3	27.9	10.8	15.6	34.8	58.7	161.5	99.8	196.9	1355.0
TOTAL	5011.5	4728.2	4046.2	2159.9	662.9	257.1	282.2	563.3	1269.2	2449.1	2486.7	4095.6	28011.7

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de ERA5 2023 - Copernicus Climate Data Store – ECMWF.



ANEXO 3 Datos de temperatura SENAMHI – ERA5 del sector de estudio

Temperatura mínima (°C) del sector de estudio – SENAMHI

Tabla 12

Temperatura mínima del sector de estudio – SENAMHI

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1997	3.95	3.62	2.48	-0.39	-3.55	-6.96	-6.50	-3.57	-0.25	0.90	2.59	3.66	-0.34
1998	5.00	4.84	3.80	1.17	-4.38	-3.92	-6.30	-4.06	-2.82	1.00	1.70	2.69	-0.11
1999	3.46	4.21	4.06	1.71	-1.90	-6.11	-6.02	-4.93	-2.10	1.08	-0.03	2.46	-0.34
2000	4.03	3.88	3.18	0.77	-2.54	-5.24	-6.48	-3.70	-2.38	0.95	0.10	2.32	-0.42
2001	3.80	4.04	3.51	0.99	-1.97	-4.58	-5.92	-5.24	-0.84	1.05	1.97	2.63	-0.05
2002	3.03	4.42	3.76	2.08	-1.13	-3.36	-4.61	-3.92	-0.78	1.80	2.36	3.49	0.60
2003	3.98	4.08	3.74	1.02	-1.77	-5.82	-6.16	-4.76	-2.51	-0.37	0.84	3.13	-0.38
2004	4.03	3.46	3.14	1.06	-4.06	-5.38	-5.42	-3.55	-0.94	0.63	1.59	3.00	-0.20
2005	3.49	4.04	3.11	0.94	-3.84	-6.91	-5.97	-6.07	-1.93	1.09	1.68	3.45	-0.58
2006	3.66	3.61	3.81	1.26	-4.69	-4.58	-7.33	-3.63	-2.36	0.84	2.70	3.08	-0.30
2007	3.93	3.69	3.63	1.68	-1.76	-4.63	-5.48	-4.54	-0.12	0.42	0.90	2.42	0.01
2008	4.16	2.77	1.90	-0.90	-5.10	-5.76	-7.25	-5.45	-3.33	0.91	1.57	3.10	-1.12
2009	3.28	3.75	2.64	0.57	-2.80	-7.05	-5.66	-6.28	-1.67	0.33	3.48	3.39	-0.50
2010	4.34	4.70	3.72	1.15	-2.08	-3.86	-6.76	-5.14	-2.05	0.41	0.47	3.17	-0.16
2011	3.42	4.16	3.38	1.02	-2.87	-5.33	-5.62	-4.40	-0.90	0.09	1.66	2.81	-0.22
2012	3.40	3.40	2.59	1.77	-3.46	-5.37	-6.82	-6.08	-2.18	0.89	2.30	4.22	-0.44
2013	3.67	4.15	3.20	-0.69	-1.68	-3.78	-4.97	-4.65	-2.85	1.25	1.83	3.79	-0.06
2014	3.51	3.09	2.58	1.21	-2.74	-4.64	-5.16	-3.81	0.61	1.47	1.63	3.25	0.08
2015	3.28	3.73	3.38	2.53	-1.60	-4.17	-6.30	-4.49	-0.89	0.45	2.19	2.61	0.06
2016	3.23	4.68	2.81	1.39	-3.59	-5.56	-5.71	-4.50	-2.48	0.70	0.43	3.01	-0.47
PROM	3.73	3.92	3.22	1.02	-2.87	-5.15	-6.02	-4.64	-1.64	0.79	1.60	3.08	-0.25

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de SENAMHI 2023



Temperatura máxima (°C) del sector de estudio – SENAMHI

Tabla 13

Temperatura máxima del sector de estudio – SENAMHI

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1997	13.45	13.28	13.73	14.13	14.57	14.57	15.39	14.32	16.49	17.68	16.96	17.88	15.20
1998	16.77	16.94	16.80	17.33	17.07	15.28	15.96	16.81	17.83	17.23	16.83	16.74	16.80
1999	15.26	13.41	13.40	14.24	15.02	14.77	14.28	15.83	16.07	15.64	17.22	16.25	15.12
2000	13.70	13.22	13.81	15.53	15.96	14.33	14.07	15.42	17.08	15.48	18.08	15.51	15.18
2001	12.86	13.30	13.58	14.73	14.83	14.65	14.32	15.11	16.81	17.23	17.80	16.63	15.15
2002	15.83	13.79	14.39	14.35	14.97	14.73	12.78	15.17	16.05	16.27	16.70	16.27	15.11
2003	15.35	15.31	14.32	15.19	15.29	15.18	14.87	15.08	15.98	17.62	18.08	16.98	15.77
2004	14.23	14.99	15.80	15.73	15.73	14.31	13.97	14.62	16.13	17.51	17.87	17.04	15.66
2005	15.77	14.90	15.90	16.20	16.56	15.66	15.63	16.45	16.31	16.72	17.22	16.18	16.13
2006	14.07	15.39	15.13	15.18	15.65	15.21	15.41	16.17	16.95	17.30	16.70	16.90	15.84
2007	16.25	15.50	14.38	15.27	15.50	16.03	14.48	16.70	16.09	17.42	17.28	16.38	15.94
2008	13.82	14.80	14.62	15.73	15.47	15.55	15.56	16.56	17.51	17.12	18.30	15.64	15.89
2009	15.31	14.61	14.96	15.47	15.80	15.55	14.93	16.55	17.64	18.56	17.43	16.73	16.13
2010	15.63	16.22	16.40	16.81	16.29	16.68	16.44	17.44	18.35	17.92	18.47	15.93	16.88
2011	15.45	13.35	14.32	15.33	15.97	15.65	14.92	16.62	16.65	17.32	18.45	15.85	15.82
2012	14.48	13.53	14.57	14.55	15.58	15.10	15.62	16.54	17.46	17.97	17.98	15.42	15.73
2013	15.06	14.71	15.63	16.57	16.04	14.62	14.96	15.83	17.54	17.13	18.03	15.86	16.00
2014	15.00	15.84	16.08	16.03	16.07	16.96	15.29	15.74	16.22	17.10	18.10	17.06	16.29
2015	14.66	15.09	15.15	14.48	15.40	16.41	15.70	16.46	17.55	17.65	18.51	17.35	16.20
2016	17.63	16.32	17.28	16.49	16.69	15.78	15.96	16.71	17.93	17.02	17.84	17.10	16.90
PROM	15.03	14.73	15.01	15.47	15.72	15.35	15.03	16.01	16.93	17.19	17.69	16.49	15.89

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de SENAMHI 2023

Temperatura mínima (°C) del sector de estudio – ERA5**Tabla 14***Temperatura mínima del sector de estudio – ERA5*

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
1997	1.2	-0.8	-0.8	-3.6	-4.6	-5.3	-4.9	-7.2	-3.9	-2.6	-1.8	1.4	-2.7
1998	2.1	1.2	1.8	-1.0	-3.9	-4.6	-4.3	-5.2	-3.0	-1.1	-4.8	-1.5	-2.0
1999	0.8	1.1	-0.6	-3.5	-3.8	-5.5	-5.4	-4.5	-4.4	-2.4	-2.1	0.0	-2.5
2000	-1.2	-1.1	-1.5	-1.8	-3.8	-4.9	-6.7	-4.7	-3.2	-2.9	-3.1	-0.1	-2.9
2001	0.3	-1.5	-0.2	-2.8	-5.3	-5.7	-6.2	-5.5	-3.0	-2.3	-0.7	-0.7	-2.8
2002	-0.2	0.5	0.0	-1.9	-3.3	-4.8	-7.9	-5.6	-3.3	-1.4	-1.1	0.6	-2.4
2003	0.5	1.5	0.2	-2.2	-3.4	-4.8	-5.1	-4.6	-4.3	-3.4	-1.6	0.9	-2.2
2004	0.9	-0.6	-0.9	-3.7	-4.4	-5.0	-6.0	-5.5	-3.8	-2.1	-1.8	0.8	-2.7
2005	-0.6	0.6	0.6	-2.5	-3.5	-5.3	-4.4	-5.1	-3.7	-1.4	-1.6	-0.1	-2.3
2006	-2.5	-0.6	0.2	-2.5	-5.7	-4.3	-6.5	-3.7	-5.2	-1.8	0.1	0.8	-2.6
2007	0.4	-1.7	-0.1	-1.5	-3.4	-3.8	-4.3	-4.3	-2.9	-2.7	-1.6	-1.1	-2.3
2008	1.2	0.0	-1.3	-3.4	-5.2	-5.0	-5.3	-4.1	-3.4	-1.7	-0.4	-1.0	-2.5
2009	0.0	-0.2	-2.0	-1.9	-3.9	-4.3	-4.4	-5.0	-5.1	-2.3	-0.4	1.1	-2.4
2010	0.7	1.4	0.7	-1.5	-3.2	-2.9	-5.5	-3.6	-3.4	-2.9	-1.4	0.7	-1.8
2011	-0.1	0.5	-0.6	-2.1	-4.2	-4.9	-4.9	-3.8	-3.5	-2.3	-0.8	0.3	-2.2
2012	-0.5	0.1	-0.1	-3.2	-3.8	-4.7	-4.8	-6.0	-2.6	-2.0	0.5	-0.3	-2.3
2013	0.0	0.4	-0.8	-2.9	-3.4	-4.9	-5.0	-4.7	-5.8	-0.1	-2.3	-1.4	-2.6
2014	-1.3	-1.7	-1.8	-2.6	-6.1	-4.7	-5.5	-5.0	-3.4	-2.1	-0.8	0.1	-2.9
2015	-0.2	-0.9	-0.1	-0.5	-3.4	-3.9	-6.4	-7.6	-3.0	-3.3	0.3	0.1	-2.4
2016	-0.3	1.9	0.2	-2.5	-4.5	-4.2	-7.0	-6.4	-3.6	-2.4	-1.5	0.9	-2.4
PROM	0.1	0.0	-0.4	-2.4	-4.1	-4.7	-5.5	-5.1	-3.7	-2.2	-1.3	0.1	-2.4

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de SENAMHI 2023

Temperatura máxima (°C) del sector de estudio – ERA5**Tabla 15***Temperatura máxima del sector de estudio – ERA5*

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
1997	12.4	12.8	12.1	13.0	11.6	12.9	13.7	13.0	16.5	15.8	15.6	16.6	13.8
1998	14.7	16.1	14.7	13.8	14.6	13.4	14.0	15.7	16.8	15.6	16.0	14.0	14.9
1999	13.2	12.4	12.2	11.4	11.8	11.5	12.1	12.9	14.2	12.8	14.1	13.4	12.7
2000	12.6	12.5	12.5	11.9	13.0	12.2	12.1	15.3	14.9	14.0	15.8	13.7	13.4
2001	12.2	12.7	12.4	12.3	12.0	11.8	13.2	13.0	13.9	15.3	15.1	13.9	13.2
2002	14.1	12.5	13.3	12.9	11.8	12.7	11.4	12.3	14.2	13.4	13.7	13.2	13.0
2003	13.7	13.6	12.5	12.3	12.0	13.1	12.9	13.3	13.4	15.6	15.4	14.8	13.5
2004	12.7	13.4	13.6	12.5	12.5	11.5	12.9	13.3	13.0	14.9	14.3	14.9	13.3
2005	12.9	12.7	13.1	12.6	13.9	12.9	14.3	15.5	15.7	14.6	14.7	13.3	13.8
2006	12.9	13.8	14.0	12.1	12.1	12.3	13.1	13.2	14.4	14.6	13.9	13.8	13.3
2007	14.2	14.6	12.8	12.5	11.5	13.3	12.4	15.5	12.5	13.8	16.2	13.9	13.6
2008	12.7	12.7	13.3	12.8	13.2	13.3	12.8	15.5	16.1	15.2	16.1	13.6	13.9
2009	12.7	13.3	12.7	12.4	11.8	12.6	13.5	14.4	15.8	17.1	16.4	14.5	13.9
2010	13.4	14.6	14.2	14.1	14.1	14.1	14.5	15.7	17.1	15.9	15.6	15.0	14.9
2011	13.9	11.5	12.6	12.4	13.3	14.2	12.9	14.3	14.5	14.4	15.5	14.2	13.6
2012	12.5	13.8	12.9	11.8	11.9	13.5	13.2	14.0	16.2	14.9	15.7	12.8	13.6
2013	12.0	13.8	13.6	12.8	12.9	11.3	12.9	14.4	15.7	15.4	14.7	14.0	13.6
2014	13.2	13.3	13.4	12.4	13.8	14.5	12.8	14.0	13.1	14.0	16.4	14.2	13.8
2015	12.0	13.9	13.3	12.5	11.8	12.2	13.5	14.5	15.7	16.9	15.8	14.7	13.9
2016	15.0	14.9	15.8	13.5	12.8	13.1	13.9	14.9	17.6	13.6	15.8	14.7	14.6
PROM	13.1	13.4	13.2	12.6	12.6	12.8	13.1	14.2	15.1	14.9	15.3	14.2	13.7

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de ERA5 2023 - Copernicus Climate Data Store – ECMWF.



ANEXO 4 Datos de evapotranspiración SENAMHI – ERA5

Evapotranspiración (ETP) del sector de estudio – SENAMHI

Tabla 16

Evapotranspiración del sector de estudio – SENAMHI

Año	Mes	Día	Ra	T media	Hr	Evapotranspiración
1997	Enero	31	16.63	8.70	0.82	70.0208434
1997	Febrero	28	16.21	8.45	0.82	61.5851491
1997	Marzo	31	15.29	8.10	0.89	49.6585598
1997	Abril	30	13.58	6.87	0.89	40.5496962
1997	Mayo	31	11.95	5.51	0.89	34.7573733
1997	Junio	30	11.05	3.81	0.89	28.7082617
1997	Julio	31	11.35	4.44	0.89	31.5312287
1997	Agosto	31	12.76	5.37	0.81	47.6684438
1997	Setiembre	30	14.49	8.12	0.80	60.9981668
1997	Octubre	31	15.80	9.29	0.81	70.1761363
1997	Noviembre	30	16.43	9.77	0.89	55.3357895
1997	Diciembre	31	16.63	10.77	0.89	60.0055669
1998	Enero	31	16.63	10.88	0.88	62.1622900
1998	Febrero	28	16.21	10.89	0.88	54.7686163
1998	Marzo	31	15.29	10.30	0.73	83.7724156
1998	Abril	30	13.58	9.25	0.88	46.2086321
1998	Mayo	31	11.95	6.34	0.83	44.5900894
1998	Junio	30	11.05	5.68	0.90	30.1119753
1998	Julio	31	11.35	4.83	0.83	39.4161975
1998	Agosto	31	12.76	6.37	0.83	47.4875942
1998	Setiembre	30	14.49	7.51	0.81	58.2258708
1998	Octubre	31	15.80	9.11	0.84	63.9189771
1998	Noviembre	30	16.43	9.26	0.82	68.4517051
1998	Diciembre	31	16.63	9.71	0.82	72.8395729
1999	Enero	31	16.63	9.36	0.78	79.2181471
1999	Febrero	28	16.21	8.81	0.82	61.9553873
1999	Marzo	31	15.29	8.73	0.83	62.2791371
1999	Abril	30	13.58	7.97	0.78	60.0016727
1999	Mayo	31	11.95	6.56	0.88	37.2736165
1999	Junio	30	11.05	4.33	0.87	31.3549092
1999	Julio	31	11.35	4.13	0.90	29.7482978
1999	Agosto	31	12.76	5.45	0.87	39.9789419
1999	Setiembre	30	14.49	6.98	0.90	41.4799294
1999	Octubre	31	15.80	8.36	0.90	49.4685817
1999	Noviembre	30	16.43	8.59	0.88	54.6998833
1999	Diciembre	31	16.63	9.35	0.90	54.1181837
2000	Enero	31	16.63	8.86	0.80	75.2360317
2000	Febrero	28	16.21	8.55	0.82	60.9641417
2000	Marzo	31	15.29	8.50	0.80	67.9484367
2000	Abril	30	13.58	8.15	0.88	44.6487113
2000	Mayo	31	11.95	6.71	0.81	47.6715946



2000	Junio	30	11.05	4.55	0.89	29.3685918
2000	Julio	31	11.35	3.79	0.71	49.2862807
2000	Agosto	31	12.76	5.86	0.71	61.0190961
2000	Setiembre	30	14.49	7.35	0.84	52.2552159
2000	Octubre	31	15.80	8.22	0.71	83.4393706
2000	Noviembre	30	16.43	9.09	0.85	62.7546463
2000	Diciembre	31	16.63	8.92	0.89	56.0670817
2001	Enero	31	16.63	8.33	0.88	57.1029518
2001	Febrero	28	16.21	8.67	0.88	50.1314254
2001	Marzo	31	15.29	8.55	0.89	50.7411791
2001	Abril	30	13.58	7.86	0.88	43.4077334
2001	Mayo	31	11.95	6.43	0.78	51.1205965
2001	Junio	30	11.05	5.03	0.78	42.9766580
2001	Julio	31	11.35	4.20	0.83	38.4308287
2001	Agosto	31	12.76	4.94	0.78	51.0637415
2001	Setiembre	30	14.49	7.98	0.78	63.1180912
2001	Octubre	31	15.80	9.14	0.89	53.7502613
2001	Noviembre	30	16.43	9.89	0.88	57.9892425
2001	Diciembre	31	16.63	9.63	0.88	59.0742887
2002	Enero	31	16.63	9.43	0.89	57.1163615
2002	Febrero	28	16.21	9.10	0.88	50.8411631
2002	Marzo	31	15.29	9.08	0.78	72.8838978
2002	Abril	30	13.58	8.22	0.78	60.5431410
2002	Mayo	31	11.95	6.92	0.83	45.7335935
2002	Junio	30	11.05	5.68	0.78	44.2658010
2002	Julio	31	11.35	4.09	0.78	43.0163826
2002	Agosto	31	12.76	5.63	0.90	35.7426997
2002	Setiembre	30	14.49	7.63	0.80	59.6820591
2002	Octubre	31	15.80	9.03	0.88	55.0287972
2002	Noviembre	30	16.43	9.53	0.87	58.3361839
2002	Diciembre	31	16.63	9.88	0.73	89.6464668
2003	Enero	31	16.63	9.66	0.70	94.1253137
2003	Febrero	28	16.21	9.70	0.70	83.0059786
2003	Marzo	31	15.29	9.03	0.82	66.1107547
2003	Abril	30	13.58	8.11	0.70	69.9762673
2003	Mayo	31	11.95	6.76	0.88	38.0276430
2003	Junio	30	11.05	4.68	0.89	30.0920442
2003	Julio	31	11.35	4.36	0.88	32.7832067
2003	Agosto	31	12.76	5.16	0.88	37.6382652
2003	Setiembre	30	14.49	6.73	0.89	43.1883441
2003	Octubre	31	15.80	8.63	0.88	53.8425380
2003	Noviembre	30	16.43	9.46	0.78	76.9107514
2003	Diciembre	31	16.63	10.05	0.78	82.2679340
2004	Enero	31	16.63	9.13	0.83	69.5935763
2004	Febrero	28	16.21	9.23	0.78	70.2188115
2004	Marzo	31	15.29	9.47	0.78	72.9699212
2004	Abril	30	13.58	8.39	0.70	70.6663519
2004	Mayo	31	11.95	5.84	0.88	37.0847767
2004	Junio	30	11.05	4.47	0.80	39.4697964
2004	Julio	31	11.35	4.27	0.81	40.8740312



2004	Agosto	31	12.76	5.53	0.80	49.2861488
2004	Setiembre	30	14.49	7.59	0.75	67.0636302
2004	Octubre	31	15.80	9.07	0.75	80.1690401
2004	Noviembre	30	16.43	9.73	0.82	69.2911543
2004	Diciembre	31	16.63	10.02	0.75	87.4731602
2005	Enero	31	16.63	9.63	0.81	74.3122511
2005	Febrero	28	16.21	9.47	0.74	76.2719334
2005	Marzo	31	15.29	9.50	0.89	52.2638867
2005	Abril	30	13.58	8.57	0.89	43.4804190
2005	Mayo	31	11.95	6.36	0.82	46.1366619
2005	Junio	30	11.05	4.37	0.83	36.6037269
2005	Julio	31	11.35	4.83	0.85	37.4991377
2005	Agosto	31	12.76	5.19	0.85	42.8693404
2005	Setiembre	30	14.49	7.19	0.84	52.3974888
2005	Octubre	31	15.80	8.91	0.85	62.0957509
2005	Noviembre	30	16.43	9.45	0.72	86.0401791
2005	Diciembre	31	16.63	9.82	0.82	72.6978310
2006	Enero	31	16.63	8.86	0.79	76.8975053
2006	Febrero	28	16.21	9.50	0.77	71.4992210
2006	Marzo	31	15.29	9.47	0.72	83.3435026
2006	Abril	30	13.58	8.22	0.88	44.0136945
2006	Mayo	31	11.95	5.48	0.84	41.6434659
2006	Junio	30	11.05	5.31	0.84	36.9851398
2006	Julio	31	11.35	4.04	0.89	30.8262565
2006	Agosto	31	12.76	6.27	0.84	46.0634435
2006	Setiembre	30	14.49	7.30	0.82	55.4631634
2006	Octubre	31	15.80	9.07	0.90	50.8861732
2006	Noviembre	30	16.43	9.70	0.73	85.3770229
2006	Diciembre	31	16.63	9.99	0.77	82.9004626
2007	Enero	31	16.63	10.09	0.78	81.7427632
2007	Febrero	28	16.21	9.59	0.72	79.9218592
2007	Marzo	31	15.29	9.00	0.80	68.9709564
2007	Abril	30	13.58	8.48	0.80	58.0523011
2007	Mayo	31	11.95	6.87	0.81	47.8144068
2007	Junio	30	11.05	5.70	0.80	42.0383127
2007	Julio	31	11.35	4.50	0.84	37.8295522
2007	Agosto	31	12.76	6.08	0.87	40.8321061
2007	Setiembre	30	14.49	7.98	0.89	44.6216752
2007	Octubre	31	15.80	8.92	0.81	69.5325683
2007	Noviembre	30	16.43	9.09	0.90	51.2646335
2007	Diciembre	31	16.63	9.40	0.83	70.4666262
2008	Enero	31	16.63	8.99	0.81	72.3633626
2008	Febrero	28	16.21	8.79	0.81	63.2388238
2008	Marzo	31	15.29	8.26	0.84	59.3493678
2008	Abril	30	13.58	7.41	0.81	53.6749847
2008	Mayo	31	11.95	5.18	0.89	34.2570272
2008	Junio	30	11.05	4.89	0.88	31.5525091
2008	Julio	31	11.35	4.15	0.88	31.6798760
2008	Agosto	31	12.76	5.55	0.84	44.8382882
2008	Setiembre	30	14.49	7.09	0.82	55.1346348



2008	Octubre	31	15.80	9.01	0.80	70.4867741
2008	Noviembre	30	16.43	9.94	0.79	76.6253634
2008	Diciembre	31	16.63	9.37	0.79	78.4419151
2009	Enero	31	16.63	9.30	0.79	77.7965039
2009	Febrero	28	16.21	9.18	0.79	68.5809275
2009	Marzo	31	15.29	8.80	0.71	82.1499266
2009	Abril	30	13.58	8.02	0.83	52.9408082
2009	Mayo	31	11.95	6.50	0.75	54.4812457
2009	Junio	30	11.05	4.25	0.80	39.1651959
2009	Julio	31	11.35	4.63	0.88	32.9217816
2009	Agosto	31	12.76	5.13	0.80	48.6169601
2009	Setiembre	30	14.49	7.98	0.88	46.2489022
2009	Octubre	31	15.80	9.44	0.88	55.2103253
2009	Noviembre	30	16.43	10.45	0.89	56.2661366
2009	Diciembre	31	16.63	10.06	0.88	59.4684014
2010	Enero	31	16.63	9.98	0.84	69.9329729
2010	Febrero	28	16.21	10.46	0.83	64.8415810
2010	Marzo	31	15.29	10.06	0.75	80.4025276
2010	Abril	30	13.58	8.98	0.80	58.9935828
2010	Mayo	31	11.95	7.10	0.88	38.6832747
2010	Junio	30	11.05	6.41	0.80	43.1236009
2010	Julio	31	11.35	4.84	0.88	32.6699631
2010	Agosto	31	12.76	6.15	0.88	38.9707234
2010	Setiembre	30	14.49	8.15	0.89	45.4137836
2010	Octubre	31	15.80	9.17	0.88	54.6243341
2010	Noviembre	30	16.43	9.47	0.84	65.5695103
2010	Diciembre	31	16.63	9.55	0.89	57.1017235
2011	Enero	31	16.63	9.44	0.72	90.1879268
2011	Febrero	28	16.21	8.75	0.88	50.3469545
2011	Marzo	31	15.29	8.85	0.74	78.1247198
2011	Abril	30	13.58	8.18	0.84	51.5522759
2011	Mayo	31	11.95	6.55	0.84	43.4960612
2011	Junio	30	11.05	5.16	0.84	36.5905528
2011	Julio	31	11.35	4.65	0.89	31.8243867
2011	Agosto	31	12.76	6.11	0.84	45.5644164
2011	Setiembre	30	14.49	7.87	0.82	57.2842833
2011	Octubre	31	15.80	8.71	0.83	65.4391564
2011	Noviembre	30	16.43	10.05	0.75	83.5798623
2011	Diciembre	31	16.63	9.33	0.80	75.6728258
2012	Enero	31	16.63	8.94	0.88	57.9726652
2012	Febrero	28	16.21	8.46	0.80	64.3033977
2012	Marzo	31	15.29	8.58	0.88	51.6547979
2012	Abril	30	13.58	8.16	0.88	43.6505318
2012	Mayo	31	11.95	6.06	0.89	35.4481578
2012	Junio	30	11.05	4.87	0.88	30.8160290
2012	Julio	31	11.35	4.40	0.84	37.7435581
2012	Agosto	31	12.76	5.23	0.90	34.9679748
2012	Setiembre	30	14.49	7.64	0.81	57.7484100
2012	Octubre	31	15.80	9.43	0.84	65.2777530
2012	Noviembre	30	16.43	10.14	0.81	72.5340903



2012	Diciembre	31	16.63	9.82	0.82	72.6234449
2013	Enero	31	16.63	9.36	0.89	56.9780004
2013	Febrero	28	16.21	9.43	0.89	50.3191335
2013	Marzo	31	15.29	9.41	0.89	51.5930765
2013	Abril	30	13.58	7.94	0.89	42.5642757
2013	Mayo	31	11.95	7.18	0.82	46.9910690
2013	Junio	30	11.05	5.42	0.83	37.9860735
2013	Julio	31	11.35	5.00	0.89	32.2440678
2013	Agosto	31	12.76	5.59	0.89	37.5504485
2013	Setiembre	30	14.49	7.34	0.88	45.1054728
2013	Octubre	31	15.80	9.19	0.84	64.6812824
2013	Noviembre	30	16.43	9.93	0.79	76.2498881
2013	Diciembre	31	16.63	9.83	0.79	79.4383692
2014	Enero	31	16.63	9.26	0.79	77.9994597
2014	Febrero	28	16.21	9.47	0.79	69.0214286
2014	Marzo	31	15.29	9.33	0.74	80.0493705
2014	Abril	30	13.58	8.62	0.70	71.1749921
2014	Mayo	31	11.95	6.66	0.89	36.5723261
2014	Junio	30	11.05	6.16	0.89	31.2086206
2014	Julio	31	11.35	5.07	0.83	40.3275376
2014	Agosto	31	12.76	5.97	0.89	37.7201499
2014	Setiembre	30	14.49	8.42	0.82	58.2060183
2014	Octubre	31	15.80	9.28	0.82	67.8617960
2014	Noviembre	30	16.43	9.86	0.73	86.5083600
2014	Diciembre	31	16.63	10.15	0.82	73.8035283
2015	Enero	31	16.63	8.97	0.80	74.8460280
2015	Febrero	28	16.21	9.41	0.80	67.3729220
2015	Marzo	31	15.29	9.27	0.83	64.6067273
2015	Abril	30	13.58	8.50	0.88	44.3608514
2015	Mayo	31	11.95	6.90	0.81	48.2485545
2015	Junio	30	11.05	6.12	0.84	38.3659029
2015	Julio	31	11.35	4.70	0.84	38.2988722
2015	Agosto	31	12.76	5.98	0.84	45.6463289
2015	Setiembre	30	14.49	8.33	0.81	59.6440333
2015	Octubre	31	15.80	9.05	0.84	64.1616548
2015	Noviembre	30	16.43	10.35	0.70	91.9360057
2015	Diciembre	31	16.63	9.98	0.71	93.3250275
2016	Enero	31	16.63	10.43	0.82	74.4521916
2016	Febrero	28	16.21	10.50	0.72	83.0811942
2016	Marzo	31	15.29	10.04	0.72	84.2627876
2016	Abril	30	13.58	8.94	0.81	57.6398329
2016	Mayo	31	11.95	6.55	0.88	37.6604063
2016	Junio	30	11.05	5.11	0.88	31.6071598
2016	Julio	31	11.35	5.13	0.85	37.7015741
2016	Agosto	31	12.76	6.11	0.88	39.4539073
2016	Setiembre	30	14.49	7.73	0.89	44.2571122
2016	Octubre	31	15.80	8.86	0.89	53.3406427
2016	Noviembre	30	16.43	9.14	0.79	74.1473351
2016	Diciembre	31	16.63	10.06	0.89	58.4115557

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de SENAMHI 2023



Evapotranspiración (ETP) del sector de estudio – ERA5

Tabla 17

Evapotranspiración del sector de estudio – ERA5

Año	Mes	Día	Ra	Tmedia	Hr	Evapotranspiración
1997	Enero	31	16.63	5.98	0.72	78.1052388
1997	Febrero	28	16.21	5.77	0.72	68.5720337
1997	Marzo	31	15.29	5.39	0.70	72.3667273
1997	Abril	30	13.58	4.61	0.64	66.2253016
1997	Mayo	31	11.95	4.24	0.56	65.4232820
1997	Junio	30	11.05	4.21	0.47	64.1309670
1997	Julio	31	11.35	4.66	0.46	70.3044290
1997	Agosto	31	12.76	3.59	0.51	70.8710236
1997	Setiembre	30	14.49	6.58	0.50	90.5724741
1997	Octubre	31	15.80	7.34	0.51	104.3678620
1997	Noviembre	30	16.43	7.05	0.57	97.4878525
1997	Diciembre	31	16.63	8.16	0.57	106.9635657
1998	Enero	31	16.63	8.21	0.64	97.2739545
1998	Febrero	28	16.21	7.90	0.64	84.5129853
1998	Marzo	31	15.29	7.83	0.63	89.2286562
1998	Abril	30	13.58	7.14	0.58	79.6517307
1998	Mayo	31	11.95	6.03	0.43	80.5689642
1998	Junio	30	11.05	4.81	0.50	64.0461273
1998	Julio	31	11.35	5.32	0.43	74.0282069
1998	Agosto	31	12.76	6.24	0.43	86.7114029
1998	Setiembre	30	14.49	7.41	0.41	102.0608038
1998	Octubre	31	15.80	7.09	0.54	100.0649813
1998	Noviembre	30	16.43	6.91	0.53	100.6026925
1998	Diciembre	31	16.63	6.85	0.57	100.3070529
1999	Enero	31	16.63	6.37	0.65	88.7009416
1999	Febrero	28	16.21	5.99	0.72	68.8534520
1999	Marzo	31	15.29	5.43	0.73	68.5623945
1999	Abril	30	13.58	4.85	0.68	63.3859446
1999	Mayo	31	11.95	4.32	0.56	65.1733863
1999	Junio	30	11.05	3.57	0.47	61.7363641
1999	Julio	31	11.35	3.30	0.50	63.2181977
1999	Agosto	31	12.76	4.56	0.47	77.5467607
1999	Setiembre	30	14.49	5.33	0.52	84.1297351
1999	Octubre	31	15.80	5.47	0.58	89.5827026
1999	Noviembre	30	16.43	6.29	0.48	103.5237912
1999	Diciembre	31	16.63	6.63	0.60	96.7536542
2000	Enero	31	16.63	5.49	0.70	79.7676744
2000	Febrero	28	16.21	5.20	0.72	66.2265451
2000	Marzo	31	15.29	5.71	0.70	74.2769589
2000	Abril	30	13.58	5.31	0.58	73.9176555
2000	Mayo	31	11.95	5.06	0.51	71.3907973



2000	Junio	30	11.05	3.61	0.49	60.8113544
2000	Julio	31	11.35	2.89	0.46	63.9943301
2000	Agosto	31	12.76	4.25	0.49	74.9103330
2000	Setiembre	30	14.49	6.36	0.44	94.6490491
2000	Octubre	31	15.80	5.23	0.61	85.3179697
2000	Noviembre	30	16.43	7.23	0.45	110.9948182
2000	Diciembre	31	16.63	6.23	0.61	93.0282492
2001	Enero	31	16.63	5.01	0.74	71.8691630
2001	Febrero	28	16.21	5.58	0.73	66.7091696
2001	Marzo	31	15.29	5.55	0.72	70.3423693
2001	Abril	30	13.58	5.18	0.62	69.9227137
2001	Mayo	31	11.95	4.17	0.58	63.5253915
2001	Junio	30	11.05	3.63	0.46	62.8185576
2001	Julio	31	11.35	3.55	0.51	63.0949143
2001	Agosto	31	12.76	3.92	0.48	74.6831486
2001	Setiembre	30	14.49	5.58	0.44	91.8369510
2001	Octubre	31	15.80	6.37	0.60	91.1177927
2001	Noviembre	30	16.43	7.23	0.59	95.7356086
2001	Diciembre	31	16.63	6.21	0.58	96.6582722
2002	Enero	31	16.63	6.47	0.64	91.1911380
2002	Febrero	28	16.21	6.00	0.73	67.3162285
2002	Marzo	31	15.29	6.20	0.70	74.8755480
2002	Abril	30	13.58	5.50	0.68	64.7892365
2002	Mayo	31	11.95	4.30	0.59	63.2025640
2002	Junio	30	11.05	3.85	0.52	59.8706462
2002	Julio	31	11.35	1.80	0.53	56.7955099
2002	Agosto	31	12.76	3.67	0.50	72.4913648
2002	Setiembre	30	14.49	5.03	0.50	84.4542894
2002	Octubre	31	15.80	5.85	0.58	90.5704729
2002	Noviembre	30	16.43	6.51	0.57	94.6961674
2002	Diciembre	31	16.63	6.77	0.63	92.8351823
2003	Enero	31	16.63	6.72	0.70	84.3523150
2003	Febrero	28	16.21	6.58	0.69	74.7164995
2003	Marzo	31	15.29	6.05	0.72	72.6645733
2003	Abril	30	13.58	5.19	0.60	71.3420272
2003	Mayo	31	11.95	4.48	0.55	66.6507244
2003	Junio	30	11.05	4.04	0.49	62.3503060
2003	Julio	31	11.35	3.95	0.48	66.7055071
2003	Agosto	31	12.76	4.42	0.48	76.2110581
2003	Setiembre	30	14.49	4.92	0.49	85.1969287
2003	Octubre	31	15.80	6.53	0.46	105.6704016
2003	Noviembre	30	16.43	7.04	0.48	107.0105548
2003	Diciembre	31	16.63	6.82	0.59	98.1229393
2004	Enero	31	16.63	6.25	0.73	77.9555764
2004	Febrero	28	16.21	6.31	0.68	75.0746573
2004	Marzo	31	15.29	6.49	0.66	80.6652198
2004	Abril	30	13.58	5.53	0.60	72.3450440
2004	Mayo	31	11.95	4.17	0.48	70.8447987
2004	Junio	30	11.05	2.93	0.50	58.1093634
2004	Julio	31	11.35	3.20	0.51	62.1925052



2004	Agosto	31	12.76	4.16	0.50	73.6043559
2004	Setiembre	30	14.49	4.99	0.52	82.4964683
2004	Octubre	31	15.80	6.26	0.49	101.6063884
2004	Noviembre	30	16.43	6.71	0.52	100.8887294
2004	Diciembre	31	16.63	6.64	0.60	96.5278627
2005	Enero	31	16.63	6.37	0.65	89.7032066
2005	Febrero	28	16.21	6.28	0.71	70.7826093
2005	Marzo	31	15.29	6.52	0.64	83.2866899
2005	Abril	30	13.58	5.93	0.59	74.8113367
2005	Mayo	31	11.95	5.16	0.47	74.9105104
2005	Junio	30	11.05	4.53	0.42	67.9961088
2005	Julio	31	11.35	4.97	0.43	73.1831087
2005	Agosto	31	12.76	5.34	0.41	84.8550692
2005	Setiembre	30	14.49	6.00	0.44	93.2142284
2005	Octubre	31	15.80	6.02	0.54	95.5010101
2005	Noviembre	30	16.43	6.56	0.55	97.7180768
2005	Diciembre	31	16.63	6.71	0.62	93.9563570
2006	Enero	31	16.63	5.79	0.72	77.1906143
2006	Febrero	28	16.21	6.59	0.67	77.1964326
2006	Marzo	31	15.29	6.41	0.67	79.1237123
2006	Abril	30	13.58	5.35	0.62	70.5282455
2006	Mayo	31	11.95	4.17	0.46	71.8106821
2006	Junio	30	11.05	4.24	0.49	62.5302409
2006	Julio	31	11.35	3.96	0.44	69.1202325
2006	Agosto	31	12.76	4.79	0.47	78.7666110
2006	Setiembre	30	14.49	5.90	0.44	93.1564213
2006	Octubre	31	15.80	6.37	0.52	98.8348209
2006	Noviembre	30	16.43	6.61	0.60	92.2165374
2006	Diciembre	31	16.63	7.03	0.63	94.0854158
2007	Enero	31	16.63	7.12	0.67	88.8593682
2007	Febrero	28	16.21	6.24	0.66	76.7445663
2007	Marzo	31	15.29	6.01	0.62	83.9914056
2007	Abril	30	13.58	5.83	0.67	66.8767601
2007	Mayo	31	11.95	4.49	0.58	64.2513152
2007	Junio	30	11.05	4.46	0.51	62.0144824
2007	Julio	31	11.35	3.86	0.50	64.7680486
2007	Agosto	31	12.76	5.45	0.44	83.1135840
2007	Setiembre	30	14.49	5.02	0.57	78.2280888
2007	Octubre	31	15.80	6.04	0.49	100.5626000
2007	Noviembre	30	16.43	6.82	0.51	102.9813208
2007	Diciembre	31	16.63	6.35	0.60	95.3790449
2008	Enero	31	16.63	6.09	0.73	77.4462441
2008	Febrero	28	16.21	6.03	0.66	76.1381623
2008	Marzo	31	15.29	5.61	0.65	79.1982725
2008	Abril	30	13.58	5.18	0.54	76.3109889
2008	Mayo	31	11.95	4.17	0.51	68.3013595
2008	Junio	30	11.05	3.96	0.49	62.0338975
2008	Julio	31	11.35	4.47	0.48	68.1337335
2008	Agosto	31	12.76	5.58	0.56	73.7687873
2008	Setiembre	30	14.49	6.14	0.44	94.2457573



2008	Octubre	31	15.80	6.69	0.52	100.2533102
2008	Noviembre	30	16.43	7.21	0.50	105.0298404
2008	Diciembre	31	16.63	6.16	0.63	90.7194030
2009	Enero	31	16.63	6.30	0.66	87.7431888
2009	Febrero	28	16.21	6.26	0.69	73.5360476
2009	Marzo	31	15.29	6.06	0.67	78.8032818
2009	Abril	30	13.58	5.74	0.61	72.0853649
2009	Mayo	31	11.95	4.51	0.64	59.5053534
2009	Junio	30	11.05	4.32	0.44	66.0506254
2009	Julio	31	11.35	4.39	0.55	62.8788259
2009	Agosto	31	12.76	5.30	0.42	84.0014994
2009	Setiembre	30	14.49	6.85	0.47	94.5862135
2009	Octubre	31	15.80	7.42	0.39	117.1926220
2009	Noviembre	30	16.43	7.75	0.48	110.6265538
2009	Diciembre	31	16.63	7.18	0.52	108.2323093
2010	Enero	31	16.63	6.54	0.72	80.6226020
2010	Febrero	28	16.21	7.35	0.69	76.7947160
2010	Marzo	31	15.29	7.16	0.68	80.4462408
2010	Abril	30	13.58	6.56	0.61	74.6408593
2010	Mayo	31	11.95	5.83	0.53	72.5848142
2010	Junio	30	11.05	5.31	0.48	66.7351340
2010	Julio	31	11.35	5.32	0.43	74.1243982
2010	Agosto	31	12.76	6.50	0.42	88.7278919
2010	Setiembre	30	14.49	7.09	0.43	98.5271925
2010	Octubre	31	15.80	6.62	0.50	102.6866645
2010	Noviembre	30	16.43	7.70	0.50	108.1933183
2010	Diciembre	31	16.63	6.70	0.68	86.2443169
2011	Enero	31	16.63	5.96	0.57	97.1369179
2011	Febrero	28	16.21	5.34	0.62	78.0519874
2011	Marzo	31	15.29	5.79	0.75	67.2836827
2011	Abril	30	13.58	5.43	0.64	68.4417746
2011	Mayo	31	11.95	4.78	0.54	68.4707947
2011	Junio	30	11.05	4.54	0.47	65.1005052
2011	Julio	31	11.35	4.05	0.48	66.7776755
2011	Agosto	31	12.76	5.36	0.46	81.6181877
2011	Setiembre	30	14.49	4.85	0.54	80.3783036
2011	Octubre	31	15.80	6.38	0.52	99.1768334
2011	Noviembre	30	16.43	7.01	0.53	101.7561315
2011	Diciembre	31	16.63	6.19	0.65	88.5105881
2012	Enero	31	16.63	5.63	0.70	79.6521919
2012	Febrero	28	16.21	5.25	0.75	63.1209098
2012	Marzo	31	15.29	5.64	0.70	73.1646842
2012	Abril	30	13.58	5.26	0.68	63.9908050
2012	Mayo	31	11.95	4.42	0.56	65.7734617
2012	Junio	30	11.05	3.88	0.49	61.7390359
2012	Julio	31	11.35	3.97	0.45	68.0837702
2012	Agosto	31	12.76	5.04	0.44	81.6215474
2012	Setiembre	30	14.49	6.49	0.50	90.7206484
2012	Octubre	31	15.80	6.70	0.51	101.1990158
2012	Noviembre	30	16.43	7.25	0.54	101.6437405



2012	Diciembre	31	16.63	6.43	0.71	80.9609501
2013	Enero	31	16.63	5.94	0.72	77.6469813
2013	Febrero	28	16.21	6.08	0.76	64.6160147
2013	Marzo	31	15.29	6.55	0.70	76.8847315
2013	Abril	30	13.58	5.52	0.59	73.2948509
2013	Mayo	31	11.95	5.14	0.57	67.3751263
2013	Junio	30	11.05	3.43	0.52	58.3055474
2013	Julio	31	11.35	3.54	0.53	61.6716228
2013	Agosto	31	12.76	4.88	0.49	77.5274443
2013	Setiembre	30	14.49	5.98	0.46	92.0193637
2013	Octubre	31	15.80	6.44	0.55	95.9299807
2013	Noviembre	30	16.43	6.67	0.54	99.4991560
2013	Diciembre	31	16.63	6.46	0.66	88.1525612
2014	Enero	31	16.63	6.14	0.71	80.8384397
2014	Febrero	28	16.21	6.05	0.67	75.3647156
2014	Marzo	31	15.29	6.24	0.69	76.7418198
2014	Abril	30	13.58	5.60	0.64	69.2761713
2014	Mayo	31	11.95	4.70	0.60	63.2490211
2014	Junio	30	11.05	4.97	0.47	66.5324539
2014	Julio	31	11.35	3.90	0.49	65.2943703
2014	Agosto	31	12.76	4.43	0.53	72.8092435
2014	Setiembre	30	14.49	5.19	0.59	77.2172815
2014	Octubre	31	15.80	5.95	0.57	92.5657058
2014	Noviembre	30	16.43	7.38	0.52	103.8555972
2014	Diciembre	31	16.63	6.75	0.63	93.7725099
2015	Enero	31	16.63	5.52	0.72	76.3768441
2015	Febrero	28	16.21	6.28	0.70	72.3034925
2015	Marzo	31	15.29	6.37	0.70	76.0290513
2015	Abril	30	13.58	5.29	0.73	59.1482255
2015	Mayo	31	11.95	4.35	0.58	63.7625795
2015	Junio	30	11.05	4.23	0.51	61.5231228
2015	Julio	31	11.35	3.83	0.44	68.5124904
2015	Agosto	31	12.76	4.57	0.47	77.3440974
2015	Setiembre	30	14.49	6.89	0.51	90.6017992
2015	Octubre	31	15.80	6.88	0.51	102.1717618
2015	Noviembre	30	16.43	7.38	0.54	102.3424585
2015	Diciembre	31	16.63	6.65	0.60	95.9893749
2016	Enero	31	16.63	7.64	0.61	98.8585117
2016	Febrero	28	16.21	7.42	0.72	72.9576381
2016	Marzo	31	15.29	7.57	0.62	90.3192963
2016	Abril	30	13.58	6.52	0.62	73.4383405
2016	Mayo	31	11.95	5.06	0.51	71.4680136
2016	Junio	30	11.05	4.65	0.45	66.5033482
2016	Julio	31	11.35	4.38	0.51	65.7947502
2016	Agosto	31	12.76	5.44	0.45	82.3522066
2016	Setiembre	30	14.49	6.25	0.46	92.8003311
2016	Octubre	31	15.80	5.95	0.59	89.8260959
2016	Noviembre	30	16.43	6.94	0.57	97.1482592
2016	Diciembre	31	16.63	6.93	0.66	90.4513754

Nota. Tabla elaborada en base a los datos de ERA5 2023 – ECMWF.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo CHRISTIAN EULER PAREDES CONDORI
identificado con DNI 71733596 en mi condición de egresado de:

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

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DATOS DE REANÁLISIS
ERAS EN EL MODELADO HIDROLÓGICO MENSUAL DEL
RÍO RAMIS "

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 14 de Mayo del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo CHRISTIAN EULER PAREDES CONDORI,
identificado con DNI 71733596 en mi condición de egresado de:

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

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

“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DATOS DE REANÁLISIS
ERAS EN EL MODELADO HIDROLÓGICO MENSUAL DEL
RÍO RAMIS”

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 14 de Mayo del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella