

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**“EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO
HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTANO”**

T E S I S

**Para optar el título profesional de:
INGENIERO FORESTAL**

**Presentado por el Bachiller:
ELMER DE LA CRUZ ROJAS BUSTAMANTE**

**Asesores:
Dr. WILFREDO POMA ROJAS
Ing. DENNIS ALVARINO CIEZA TARRILLO**

CAJAMARCA - PERÚ


2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
ELMER DE LA CRUZ ROJAS BUSTAMANTE
DNI:48581675
Escuela Profesional/Unidad UNC:
INGENIERÍA FORESTAL
2. Asesor:
DR. WILFREDO POMA ROJAS
Facultad/Unidad UNC:
DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTANO
Fecha de evaluación: 20/06/2023
6. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
7. Porcentaje de Informe de Similitud: 20%
8. Código Documento: D170968792
9. Resultado de la Evaluación de Similitud: 20%
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 28/06/2024

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*



Dr. Wilfredo Poma Rojas
DNI: 26719942

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veintiocho días del mes de junio del año dos mil veinticuatro, se reunieron en el ambiente **2C - 202** de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 349-2023-FCA-UNC, de fecha 14 de agosto del 2023**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHOTANO"**, realizada por el Bachiller **ELMER DE LA CRUZ ROJAS BUSTAMANTE** para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las ocho horas y quince minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de catorce (14); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las nueve horas y veinte minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.



Dr. Edin-Edgardo Alva Plasencia
PRESIDENTE



Ing. Nehemías Honorio Sangay Martos
SECRETARIO



Ing. M. Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
VOCAL



Dr. Wilfredo Poma Rojas
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios por brindarme la fortaleza y sabiduría al permitirme culminar esta meta a lo largo de mi vida.

A mi madre, María Bustamante Campos; pues una vida no bastará para agradecer su inmenso amor, confianza y motivación en todo momento.

A mis hermanos, Denys, Silvia y Eduar quienes han estado junto a mí a lo largo de este camino lleno de aprendizaje.

A mi mamita, María Betzabet Campos Riojas; que desde el cielo guía mis pasos.

AGRADECIMIENTO

Agradecido con Dios, por darme salud, por cada persona que permitió que llegara a mi vida para alentarme y permitirme cumplir una de mis metas.

A mi casa de estudios, la Universidad Nacional de Cajamarca.

A los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Forestal.

A mi asesor, el Dr. Wilfredo Poma Rojas, quien, con su experiencia, su vasto conocimiento y motivación me orientó en la investigación de esta tesis.

Quiero expresar mi agradecimiento de manera especial al Ing. Dennis Alvarino Cieza Tarrillo, mi amigo, por su apoyo constante en mi formación académica y por la incondicionalidad con la que atendió cada duda desde mis inicios en esta investigación.

Al Msc. Alex Joel Vergara Anticona, por el apoyo constante desde el inicio de mis prácticas pre profesionales, en su empresa GEOENGINEERS CONSULTING S.R.L y por sus aportes en la presente investigación.

Al Ing. Victor Hugo Gallo Ramos, por su apoyo y comprensión en todo momento, dar gracias a Dios por su amistad.

Al Ing. Elix Videlmo García Medina, mi gran amigo, por su apoyo incondicional en todo momento.

A la Ing. Cynthia Analy Herrera Delgado, por su amistad y amabilidad.

A la Ing Alejandra Katherine Cabrera Correa, gracias por ser mi compañía en los momentos de alegría y mi sostén en los de incertidumbre.

A mis amigos y familiares, que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Formulación del problema.....	3
1.2.1. Problema general	3
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Hipótesis.....	4
1.5.1. Hipótesis general	4

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Antecedentes de la investigación	5
2.1.1. Antecedentes internacionales	5
2.1.2. Nacionales	8
2.2. Bases teóricas	10
2.2.1. Cambio climático.....	10
2.2.2. Modelos climáticos.....	11
2.2.3. Modelo hidrológico	17
2.2.4. Tasa de cambio.....	28
2.2.5. Evapotranspiración potencial.....	30
2.3. Definición de términos básicos	30
2.3.1. Efectos del cambio climático	30
2.3.2. Disponibilidad hídrica.....	31
2.3.3. Modelo hidrológico GR2M.....	31
2.3.4. Variables climáticas.....	31
2.3.5. Variación del caudal	32
2.3.6. Caudal medio mensual.....	32
2.3.7. Precipitación.....	32
2.3.8. Temperatura	32
2.3.9. Evapotranspiración	32

2.3.10. Producto Pisco	33
III. MARCO METODOLÓGICO	33
3.1. Ubicación del área de estudio.....	34
3.2. Materiales	36
3.2.1. Base de datos	36
3.2.2. Información cartográfica.....	36
3.2.3. Software	37
3.3. Metodología.....	37
3.3.1. Tipo de investigación.....	37
3.3.2. Procedimientos	37
3.3.3. Análisis de datos.....	40
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1. Determinación la incidencia del Modelo hidrológico GR2M en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.....	48
4.1.1. Calibración del modelo.....	48
4.1.2. Validación del modelo	51
4.2. Determinación de la incidencia de las variables climáticas en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050	53
4.2.1. Tendencia futura de la precipitación media mensual.	56
4.2.2. Tendencia de la temperatura media mensual.	60

4.3. Determinación de la incidencia de la variación del caudal en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050	63
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
5.1. Conclusiones.....	68
5.2. Recomendaciones	69
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Modelos climáticos globales del CMIP5	11
Tabla 2 Trayectorias de CO ₂ en los RCP en (ppm)	14
Tabla 3 Métodos de corrección de sesgo para precipitación y temperatura.....	17
Tabla 4 Valores de referencia de NASH.....	22
Tabla 5 Clasificación de los criterios del coeficiente de determinación (R ²).....	23
Tabla 6 Descripción y condiciones de rango mínimo y máximo de los parámetros iniciales del modelo GR2M	25
Tabla 7 Límites del área de estudio a nivel de cuenca.....	34
Tabla 8 Estadísticos básicos de la precipitación para el periodo observado (1981-2011).....	40
Tabla 9 Estadísticos básicos de la temperatura promedio para el periodo observado (1981 – 2011)	41
Tabla 10 Estadísticos básicos del caudal (m ³ /s) para el periodo observado (1981 – 2011).....	41
Tabla 11 Prueba de normalidad para datos observados (1981-2011).....	43
Tabla 12 Prueba de Friedman para datos observados (1981-2011).....	46
Tabla 13 Parámetros de ajuste en la etapa de calibración del modelo.....	48
Tabla 14 Valores de tasa de cambio en porcentaje (%) de la precipitación futura (2030-2050) con respecto al observado (1981 – 2011)	59
Tabla 15 Valores de la variación de la temperatura promedio (°C) periodo (2030-2050) con respecto al observado (1981 – 2011)	62
Tabla 16 <i>Variación del caudal para la época seca y húmeda</i>	64
Tabla 17 Valores de la tasa de cambio en porcentaje del caudal futuro periodo (2030-2050) con respecto al observado (1981 – 2011)	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Trayectorias de emisiones de CO ₂ en los Trayectoria de concentración representativa (RCP).....	12
Figura 2 Procesos de downscaling entre GCM y resoluciones menores	16
Figura 3 Ciclo hidrológico.....	18
Figura 4 Clasificación de los modelos hidrológicos	20
Figura 5 Esquema del modelo GR2M.....	26
Figura 6 Ubicación de la cuenta del río Chota	35
Figura 7 Flujo del trabajo de investigación	39
Figura 8 Código utilizado en el software RStudio para el análisis inferencial.....	42
Figura 9 Datos de precipitación mensual observada (1981-2011)	43
Figura 10 Datos de temperatura promedio mensual observada (1981-2011).....	44
Figura 11 Datos de caudal mensual observado (1981-2011)	44
Figura 12 Prueba de normalidad para la precipitación observada	45
Figura 13 Prueba de normalidad para la temperatura promedio mensual observada	45
Figura 14 Prueba de normalidad para el caudal mensual observada	46
Figura 15 Resultados en la etapa de calibración periodo (1982-2000).....	49
Figura 16 Correlación lineal entre caudales observados y simulados para la cuenca del río Chotano	50
Figura 17 Resultados en la etapa de validación periodo (2001-2011).....	51
Figura 18 Correlación lineal entre caudales observados y simulados para la cuenca del río Chotano.	52

Figura 19 Aplicación del escalamiento lineal de la temperatura del GCM CanESM2, escenario RCP4.5	54
Figura 20 Aplicación de escalamiento lineal de la precipitación del GCM CNRM-CM5, escenario RCP4.5	55
Figura 21 Comportamiento de la precipitación promedio mensual.....	56
Figura 22 Tasa de cambio en porcentaje de la precipitación futura (2030-2050)	58
Figura 23 Comportamiento de la temperatura media futura (2030 – 2050).....	60
Figura 24 Variación de la temperatura futura para los modelos climáticos globales periodo (2030-2050)	61
Figura 25 Comportamiento del caudal medio mensual futuro (2030 – 2050)	63
Figura 26 Tasa de cambio en porcentaje del caudal futuro periodo (2030-2050).....	65

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

GR	Génie Rural (Ingeniería Rural, por sus siglas en francés)
GR2M	Ingeniería Rural a paso mensual
GR1A	Ingeniería Rural a paso anual
GR3J	Ingeniería Rural a paso diario
GR4J	Ingeniería Rural a paso diario
GR4H	Ingeniería Rural a paso horario
GR5H	Ingeniería Rural a paso horario
RCP	Trayectorias de Concentración Representativas
RegCM4	Modelo Climático Regional
CIFT	Centro Internacional Abdus Salam de Física Teórica
SSP	Trayectorias Socioeconómicas Compartidas
TÉMEZ	Método Racional Modificado
ABCD	Modelo de Thomas
AWBM	Modelo Australiano de Equilibrio Hídrico
GUO-5p	Modelo de Xiong y Guo
Thornthwaite-Mather	Modelo de balance hídrico mensual de Thornthwaite
SWAT	Herramienta de evaluación de suelos y aguas
REV	Error relativo entre los volúmenes de escorrentía observados y simulados
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
AR5	Quinto reporte de evaluación del cambio climático
AR6	Sexto reporte de evaluación del cambio climático
GCM	Modelos Climático Global
MCR	Modelos Climático Regional
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5
CHIRPS	Grupo de Riesgos Climáticos Precipitaciones por infrarrojos con datos de estaciones
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

HADGEM2-ES	Centro Hadley de la Oficina de Meteorología del Reino Unido (realizaciones adicionales de HadGEM2-ES contribuidas por el Instituto Nacional de Investigación Especial de Brasil)
CSIRO-Mk3-6-0	Centro de Excelencia para el Cambio Climático de Queensland y la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth
CanESM2	Centro Canadiense de Modelización y Análisis del Clima (CCCMA)
CNRM-CM5	Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas / Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Cálculo Científico (CNRM-CERFACS)
NASH-SUTCLIFFE (NSE)	Coefficiente de eficacia del modelo de Nash-Sutcliffe
R ²	Coefficiente de determinación
PBIAS	Porcentaje de sesgo
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
OMM	Organización Meteorológica Mundial
CEMAGREF	Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia
ET	Evapotranspiración
ETP	Evapotranspiración Potencial
UTM	Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator
ANA	Autoridad Nacional del Agua
L/S	Litros por segundo

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar el efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chotano, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050 utilizando el modelo hidrológico GR2M lluvia-escorrentía. El modelo consta de tres periodos de referencia, calentamiento, validación y calibración para un periodo de 31 años (1981-2011) empleando los datos de clima mensuales del producto PISCO (Datos peruanos de interpolación de las observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI), y caudales a paso mensual de la estación hidrométrica convencional Chotano Lajas. Para las proyecciones de las variables climáticas se emplearon los modelos climáticos globales (GCMs) del Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas / Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Cálculo Científico (CNRM-CM5) y el modelo del Centro Canadiense de Modelización y Análisis del Clima (CanESM2), del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5), en las Trayectorias de concentración representativas (RCP) 4.5 y 8.5. Los resultados sugieren una disminución del caudal entre 36.676% y 29.214% con respecto al promedio mensual en época seca (junio - agosto) usando el modelo CNRM-CM5 en sus RCP4.5 y 8.5, respectivamente. Asimismo, el modelo CanESM2 sugiere una disminución del caudal entre 20.660% y 23.283% en sus RCP4.5 y 8.5. En cuanto al promedio mensual en la época húmeda (diciembre – abril) los resultados del modelo CNRM-CM5 en sus RCP4.5 y 8.5 puede existir un aumento del caudal promedio hasta en un 12.832% y 19.385%, respectivamente; y para el modelo CanESM2 en su RCP4.5 y 8.5 puede existir un aumento del caudal promedio hasta en un 3.438% y 12.087%, respectivamente.

Palabras claves: GR2M, CMIP5, GCM, RCM, PISCO, calibración, validación.

ABSTRACT

The objective of the research is to determine the effect of climate change on the availability of water resources in the Chotano river basin for the periods 1981-2011 and 2030-2050 using the GR2M rainfall-runoff hydrological model. The model consists of three reference periods, warm-up, validation and calibration for a 31-year period (1981-2011) using monthly climate data from the PISCO product (Peruvian interpolation data from SENAMHI climatological and hydrological observations), and monthly flow rates from the conventional Chotano Lajas hydrometric station. Global climate models (GCMs) of the National Center for Meteorological Research / European Center for Research and Advanced Training in Scientific Computing (CNRM-CM5) and the model of the Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (CanESM2), from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), were used for the projections of climatic variables in the Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 and 8.5. The results suggest a decrease in flow between 36.676% and 29.214% with respect to the monthly average in the dry season (June - August) using the CNRM-CM5 model in its RCP4.5 and 8.5, respectively. Also, the CanESM2 model suggests a decrease in flow between 20.660% and 23.283% in its RCP4.5 and 8.5. Regarding the monthly average in the wet season (December - April), the results of the CNRM-CM5 model in its RCP4.5 and 8.5 may increase the average flow by up to 12.832% and 19.385%, respectively; and for the CanESM2 model in its RCP4.5 and 8.5 there may be an increase in the average flow by up to 3.438% and 12.087%, respectively.

Key words: GR2M, CMIP5, GCM, RCM, PISCO, calibration, validation.

I. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el cambio climático está generando perturbaciones significativas en las condiciones climáticas, que desfavorecen las condiciones hidrológicas, dado que las variaciones de temperatura y precipitación impactan directamente en la evapotranspiración, la humedad del suelo, la escorrentía y en el volumen del flujo del agua superficial, dando paso a diversos impactos en los sistemas globales de los recursos hídricos. (Yang & Chun, 2011)

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), señala que el incremento de temperatura y la variabilidad de precipitación se atribuirá significativamente a riesgos relacionados con el agua, como inundaciones y sequías (Lindner et al., 2010). Por lo tanto, el IPCC en su quinto informe menciona que el cambio climático es sin duda uno de los principales desafíos en el siglo XXI (Vo et al., 2016), tal es así que estos cambios están alterando las condiciones del ciclo hidrológico, mostrando diversos efectos en los sistemas globales de los recursos hídricos.

El presente estudio denominado “Efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chotano”, evaluará la información de caudales mensuales para la estación Chotano Lajas, así mismo las variables climáticas de precipitación y temperatura para el periodo 1981 – 2011, las mismas que se usó en el modelo GR2M para predecir caudales y con la ayuda de modelos climáticos globales permitió comparar con la data observada para simular los efectos climáticos futuros en el periodo 2030 - 2050.

El estudio consta de 7 capítulos que se detallan a continuación:

En el primer capítulo se describe y formula el problema de investigación, se propone los objetivos tanto generales y específicos, la justificación e importancia y la hipótesis.

En el segundo capítulo se desarrolló la revisión bibliográfica donde se mencionan los antecedentes de la investigación a nivel nacional e internacional, las bases teóricas y la definición de términos básicos referentes a la línea de investigación.

En el tercer capítulo se estableció el marco metodológico, donde se plantea el método y los materiales, el tipo de investigación es aplicada, el diseño es no experimental y el nivel de la investigación es correlacional analítico, por ende, el método de la investigación es inductivo. En este capítulo también se detallan los procedimientos realizados y se lleva a cabo todo el análisis que facilitan la obtención de los resultados.

En el cuarto capítulo se detallan los resultados de acuerdo a cada uno de los objetivos formulados, en este capítulo también se lleva a cabo la discusión de los resultados de manera paralela.

En el quinto capítulo se describe las conclusiones y se detallan también las recomendaciones, mientras que el sexto y séptimo capítulo se mencionan las referencias bibliográficas y los anexos considerados en la presente investigación.

1.1. Descripción del problema

En los últimos años, determinar cómo influye el cambio climático en los recursos hídricos locales es fundamental para tomar decisiones de gestión informadas y garantizar la estabilidad y sostenibilidad del agua. (Joo et al., 2017)

El cambio climático global y su impacto en los procesos hidrológicos han sido ampliamente discutidos (Reshmidevi et al., 2018). Se prevé que el cambio climático provocará cambios en los patrones de precipitación, variación en la frecuencia y distribución de inundaciones y sequías en diferentes regiones del mundo (Ficklin et al., 2013). En las proyecciones de cambio climático, se ha descubierto que los cambios en los caudales están relacionados en gran medida con las

variaciones en las precipitaciones. (McCabe & Wolock, 2011)

En América Latina y el Caribe, 17,8 millones de niños, niñas y adolescentes viven en zonas de alta o extremadamente alta vulnerabilidad al agua. Esto significa que no tienen suficiente agua para satisfacer sus necesidades diarias. (UNICEF, 2022)

El Perú es propenso a una variabilidad climática extrema, por esta razón, es necesario evaluar estos cambios en regiones con recursos hídricos limitados y alta sensibilidad del clima que enfrentan severos efectos del cambio climático en el sector agrícola especialmente. Viéndose reflejadas en pérdidas económicas, las cuales pueden ser más perjudiciales al involucrar otros mecanismos que afecten negativamente el crecimiento económico; como la pérdida de disponibilidad del recurso hídrico. (Ochoa et al., 2019)

En este contexto, los modelos hidrológicos son herramientas valiosas para evaluar el impacto del cambio climático en la hidrología de las cuencas al caracterizar escenarios climáticos basados en futuras emisiones de gases de efecto invernadero. (Mendez et al., 2022); en función a lo planteado, en el presente trabajo se utilizó el modelo agregado GR2M de lluvia-escorrentía para la modelización hidrológica en la cuenca del río Chotano.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo incide el efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chotano, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050?

1.3. Justificación

El presente estudio favorece en la generación de nuevos conocimientos en los pobladores de la cuenca del río Chotano y con ello puedan tomar decisiones a favor del cuidado de los recursos hídricos. Los dos escenarios donde se evalúa el efecto climático en la disponibilidad de recursos

hídricos, tanto en el pasado como futuro permiten visualizar los cambios y además de ello plantear mejores políticas de gestión por parte de los interesados del gobierno, además de ello servirá como una fuente de referencia para posteriores estudios en la zona.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar el efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chotano, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la incidencia del Modelo hidrológico GR2M en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.
- Determinar la incidencia de las variables climáticas en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.
- Determinar la incidencia de la variación del caudal en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

El efecto del cambio climático incide significativamente en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chotano, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Antecedentes internacionales*

Coulibaly et al. (2018) realizaron un estudio para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos hasta finales del siglo XXI en la cuenca transfronteriza del río Sassandra. Se proyectaron datos climáticos históricos y futuros de las vías de concentración representativas (RCP) 4.5 y 8.5 con el modelo climático regional (RegCM4) del Centro Internacional Abdus Salam de Física Teórica (CIPT). La modelización hidrológica de la cuenca se realizó con el modelo hidrológico conceptual de ingeniería rural a paso mensual (GR2M), el modelo permitió evaluar la descarga del río Sassandra para cuatro escenarios climáticos según los horizontes: horizonte 2030, horizonte 2050, horizonte 2070, horizonte 2090. Los resultados muestran una reducción de la descarga anual en comparación con la situación de referencia (1961-1980). Para el RCP4.5, los valores observados pasan del -1,2% en 2030 al -2,3% en 2070 y aumentan hasta el -2,1% en 2090. En cuanto al RCP8.5, observamos una variación de -4,2 a -7,9% en los horizontes 2030 y 2090, respectivamente.

Martínez et al. (2023) realizaron un estudio con el objetivo de evaluar los cambios futuros en la evapotranspiración y caudales de la cuenca del Río Sardinias en el Norte de Durango - México. Utilizaron el modelo hidrológico mensual agregado GR2M que se utiliza para reconstruir caudales a partir de la precipitación y la evapotranspiración aplicando dos funciones: una función de producción y una función de transferencia. Los resultados obtenidos mostraron que, bajo los escenarios de cambio climático, la evapotranspiración muestra un aumento en el tiempo. Bajo el escenario climático de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) 126, y la aplicación del test estadístico en las series de caudal muestran una tendencia creciente con una interrupción en

mayo de 2090, con una media de 1658 mm antes y 2238 mm después de la interrupción, con un exceso de 34,5 mm en mayo de 2090. con un exceso del 34,98%. El caudal en el escenario climático SSP 245 prevé un caudal medio de 1703,11 mm y un exceso del 34,98%. de 1703,11 mm y una ruptura en mayo del horizonte 2090, con una media antes y después de la ruptura de 1624 mm y 2168 mm, respectivamente, con un exceso del 33,49%. En el escenario SSP 370, la media será de 1710,81 mm, con una ruptura en mayo de 2090, con una media antes y después de 1633 mm y 2166 mm, respectivamente, con un exceso del 33,49%. 2166 mm, respectivamente, con un exceso del 32,63%. En el escenario de cambio climático SSP 585, la media esperada será de 1701,43 mm y la ruptura de la serie de caudales se producirá en mayo del horizonte 2090, con una media de 1628 mm antes de la ruptura y de 2132 mm después, con un exceso de caudal del 30,95%.

Pérez et al. (2019) realizaron un estudio comparativo de seis modelos de balance hidrológico: Método Racional Modificado (Témez), Modelo de Thomas (ABCD), GR2M, Modelo Australiano de Equilibrio Hídrico (AWBM), Modelo de Xiong y Guo (GUO-5p), y Modelo de balance hídrico mensual de Thornthwaite (Thornthwaite-Mather) en varias cuencas con diferentes condiciones climáticas dentro de España en el periodo 1977-2010. Para comparar los resultados del modelo aplicaron seis índices estadísticos: el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de información bayesiano (BIC), el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinación (R^2), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y el error relativo entre los volúmenes de escorrentía observados y simulados (REV). Los resultados obtenidos muestran que el modelo GR2M dio el mejor ajuste en España peninsular en un marco de índice de aridez del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) por encima de 1, y

valores de NSE por encima de 0,75 en un intervalo de confianza del 95% clasifican al GR2M como el mejor modelo.

Mena et al. (2020) realizaron una modelación hidrológica en la cuenca del río pamplonita - Colombia; en el cual determinaron los impactos potenciales del cambio climático sobre el régimen hidrológico de la zona, utilizando los modelos de circulación global (GCM) junto a las trayectorias de concentración representativas (RCP, por su siglas en inglés) para la proyección del clima. Además, se integraron las variables de precipitación, temperatura y caudal evaluadas para las condiciones actuales y para los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5. Las series climatológicas futuras, de 2015 a 2100, se generaron por medio de la metodología de reducción de escala basada en el método estadístico de la teoría del caos a partir de los datos obtenidos del modelo de circulación global CCMS4. Los resultados obtenidos del trabajo prevén que presentará una posible disminución en el caudal entre el 7.61% y 12% para el escenario RCP2.6, entre el 1.82% y el 10.28% para el escenario RCP4.5 y entre el 6.83% y el 13%; además concluye que para el final del siglo la temperatura aumente de 2 a 3 °C, lo que representa un consecuente aumento de fenómenos naturales.

Hincapie et al. (2019) evaluaron los posibles impactos que habría en la distribución espacial del recurso hídrico sobre el territorio colombiano, bajo dos escenarios de cambio climático, a mediados del siglo XXI. Empleando indicadores hídricos ambientales como: Índice de Aridez y Balance Hídrico, con los cuales, se estimó y cuantificó la oferta hídrica del territorio colombiano, donde emplearon datos climatológicos del período de referencia 1976 - 2005 y, posteriormente, utilizaron los datos de las variables climatológicas de los escenarios RCP4.5 y RCP6.0, de la tercera comunicación nacional de Colombia ante la convención marco de cambio climático. Los resultados obtenidos en la modelación arrojaron que habrá reducciones

significativas en el volumen promedio de la escorrentía hasta en 18% para los dos escenarios. La reducción más drástica, presenta el RCP6.0 hasta en un 18% y la reducción menor fue en el RCP4.5, en un 12% de la escorrentía.

2.1.2. Nacionales

Osorio et al. (2022) evaluaron el impacto del cambio climático para fines del siglo XXI en la cuenca del río Lurín, en Perú. El downscaling (reducción de escala) de las proyecciones de precipitación y temperatura de seis modelos climáticos globales (MCG) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5), bajo tres trayectorias de concentración representativas de crecientes intensidades de emisión de gases de efecto invernadero (RCP2.6; 4.5 y 8.5), fueron ingresadas a un modelo hidrológico. Los resultados obtenidos muestran que para fines del siglo XXI se espera que en la zona alta la precipitación disminuya, mientras que en las zonas media y baja aumente, llegando en la zona baja hasta valores de 95 a 221 mm en comparación con los 17 mm de precipitación de referencia. Además, se estima que la temperatura aumente y se produzcan diversas variaciones en la evapotranspiración en toda la cuenca. En el caudal anual proyectado en la zona alta se prevé una disminución del 36 al 50% y en la zona media un aumento del 14 al 44%, mientras que en la zona baja se esperan ambas tendencias, posiblemente influenciadas por la incertidumbre dependiente de la reducción de escala y resolución de los MCG.

Rodas (2022) evaluó los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca del río Caplina en la región Tacna, en Perú, para lo cual utilizó el modelo GR2M; seleccionó catorce modelos climáticos incluidos en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5). Asimismo, analizó dos escenarios de emisión, la Trayectoria de Concentración Representativa (RCP4.5 y RCP8.5), las cuales representan escenarios de emisiones intermedio y crítico de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos señalan que la

disponibilidad hídrica sufre alteraciones considerables: para los meses entre febrero - agosto existe una disminución hasta en un 38,8% (RCP4.5) y hasta un 41,3% (RCP8.5), mientras que para los meses comprendidos entre septiembre - enero existe un incremento en la oferta hídrica hasta en un 91,5% (RCP4.5) y hasta un 79,2% (RCP8.5). Sin embargo, existe una disminución en el caudal medio anual, tal es así que para el futuro cercano (2020-2040) disminuye en 5,3% (RCP4.5) y en 3,6% (RCP8.5), para el futuro medio (2041-2070) disminuye en 6,3% (RCP4.5) y en 8,8% (RCP8.5) y finalmente para el futuro lejano (2071-2100) disminuye en 6,7% (RCP4.5) y en un 2,0% (RCP8.5).

López (2022) evaluó los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica para fines de abastecimiento poblacional de la ciudad de Huánuco con el modelo hidrológico GR2M previo calibración y validación. Donde realizó una reducción de escala estadístico empleando el Bias Correction para los datos de precipitación y temperatura de 22 modelos climáticos globales (GCM) del Proyecto intercomparativo de modelos acoplados fase 5 (CIMP 5) en los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5, estos fueron utilizados como entrada para el modelo GR2M para obtener las descargas futuras. Los resultados obtenidos muestran que el efecto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica de la subcuenca del río Higuera, logrando que la oferta hídrica del río disminuya en los meses secos e incrementa en los meses húmedos, esto debido al comportamiento variable de la precipitación y el incremento consecuente de la temperatura.

Lavado et al. (2011) realizaron un estudio con el fin de evaluar de los impactos del cambio climático en la hidrología de la cuenca peruana de la Amazonía, para la estimación del caudal futuro empleó dos modelos hidrológicos mensuales, GR2M y MWB3, y las proyecciones climáticas provienen de BCM2, Modelos CSMK3 y MIHR para escenarios de emisión A1B y B1 (SCE A1B y SCE B1). Los resultados obtenidos en la investigación muestran que las proyecciones

se aproximan por dos escenarios simples (anomalías y horizonte) y se estimaron tasas anuales de precipitaciones, tasas de evapotranspiración y descarga para la década de 2020 (2008–2040), 2050s (2041–2070) y 2080s (2071–2099); concluyendo que se encuentra un incremento en la descarga mensual en la salida de las cuencas Tambo, Puerto Inca, para todas las estaciones; por el contrario las tendencias a la disminución se estiman en la descarga de otoño sobre la cuenca de Requena y la descarga de primavera sobre la cuenca de Pisac, así como en las descargas de verano y otoño sobre las cuencas de Chazuta y Maldonadillo.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cambio climático

En el transcurso del tiempo, el planeta ha podido mantener un equilibrio energético formado por un equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación saliente. Sin embargo, desde la década de 1950 se observa atrapamiento de radiación, provocando cambios en el balance energético, cuyas causas están directamente relacionadas con la actividad humana. Así, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como “el cambio climático causado, directa o indirectamente, por la actividad humana, altera la composición de la atmósfera global y excede la variabilidad climática natural”. (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2014a)

El cambio climático es generado por las diferentes actividades antropogénicas que alteran la composición de la atmósfera, el cual influye directa o indirectamente, y se suma a la variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables. (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [UNFCCC], 2006)

2.2.2. Modelos climáticos

Son herramientas que se utilizan para evaluar la respuesta del sistema climático ante el cambio climático. Estos modelos se basan en procesos físicos que simulan la transferencia de energía y materia a través del sistema climático. Además, utilizan fórmulas matemáticas para caracterizar cómo interactúan la energía y la materia en diferentes partes del océano, la atmósfera y la tierra. (IPCC, 2014a)

2.2.2.1. Modelos climáticos globales (GCMs). En los últimos años los modelos climáticos globales (GCMs), se han convertido en una de las herramientas más utilizadas para mejorar la comprensión del clima y proporcionar estimaciones del cambio climático futuro que puedan ser útiles para quienes estudian sus posibles consecuencias. (Pérez et al., 2012)

Tabla 1

Modelos climáticos globales del CMIP5

Código (MCG+RCP)	Nombre	Instituto	Resolución
CANES 4.5	CanESM2	Centro Canadiense de Modelización y Análisis del	2.8° × 2.8°
CANES 8.5		Clima (CCCMA)	(306x309) km
CNRM 4.5	CNRM-CM5	Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas	1.4° × 1.4°
CNMR 8.5		/ Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Cálculo Científico (CNRM- CERFACS)	(153x155) km

Nota. Tomado de SENAMHI (2014)

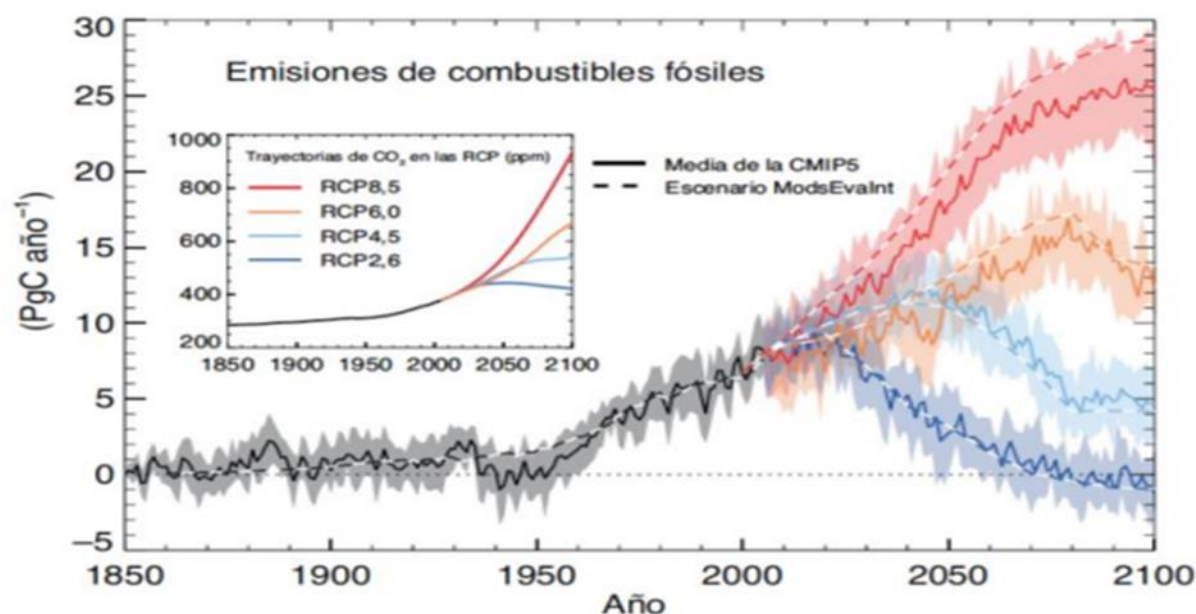
2.2.2.2. Modelos climáticos regionales (MCR). Algunas limitaciones de los modelos climáticos globales (GCMs) es la resolución bastante gruesa, el cual provoca que la incertidumbre en la predicción de las variables climáticas sea considerable, ante este problema se originan los modelos climáticos regionales, los cuales tienen una resolución bastante fina y hace que la

precisión de predicción de las variables climáticas sea bastante precisa, las resoluciones de las cuadrículas están en el orden de 50 a 25km y representan mejor a la información observada.

2.2.2.3. Escenarios de emisión. Los escenarios de emisión concentran series de emisión y concentración de los gases de efecto invernadero, gases químicamente activos, uso del suelo y la cubierta terrestre, dichos escenarios son denominados; trayectorias de concentración representativas (RCP), Cada trayectoria de concentración representa a muchos posibles escenarios que conducirán a la ocurrencia del forzamiento radiactivo. (IPCC, 2014a)

Figura 1

Trayectorias de emisiones de CO₂ en los Trayectoria de concentración representativa (RCP)



Nota. Tomado de IPCC (2014a)

2.2.2.3.1. Trayectoria de concentración representativa 2.6 (RCP2.6). Desarrollado por el equipo de modelación IMAGE de la PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Tiene una trayectoria de emisiones de muy bajos niveles de concentraciones de gases de efecto invernadero. Un escenario con una trayectoria de “pico y declive”, por lo que su nivel de

forzamiento radiativo alcanza un valor de 3.1 W/m^2 a mediados del siglo, y desciende a 2.6 W/m^2 para el año 2100. Para alcanzar tales niveles de forzamiento radiativo, las emisiones de gases de efecto invernadero (e indirectamente las emisiones de contaminantes atmosféricos) deben ser reducidas sustancialmente con el tiempo. (López et al., 2022)

2.2.2.3.2. Trayectoria de concentración representativa 4.5 (RCP4.5). Desarrollado por el equipo de modelación GCAM en el Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI) en los Estados Unidos. Es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza poco después del año 2100, sin sobrepasar el nivel objetivo de forzamiento radiativo a largo plazo. (López et al., 2022)

2.2.2.3.3. Trayectoria de concentración representativa 6.0 (RCP6.0). Desarrollado por el equipo de modelación AIM en el National Institute for Environmental Studies (NIES) en Japón. Es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza poco después del año 2100, mediante la aplicación de una variedad de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. (López et al., 2022)

2.2.2.3.4. Trayectoria de concentración representativa 8.5 (RCP8.5). Este escenario se desarrolló utilizando el modelo MESSAGE y el IIASA Integrated Assessment del International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) de Australia. Este escenario tiene un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo, que conducen a altos niveles de concentración. (López et al., 2022)

El término trayectoria, hace referencia a la concentración de CO_2 a largo plazo, pero también incluye el camino a seguir. (Moss et al., 2008), las trayectorias definidas y aceptadas por el IPCC reportadas en el quinto informe se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2*Trayectorias de CO₂ en los RCP en (ppm)*

Escenario	Forzamiento radiactivo (FR) al 2100	Tendencia del FR	[CO ₂] en el 2100
RCP2.6	2.6 w/m ²	Decreciente después del 2100	421 ppm
RCP4.5	4.5 w/m ²	Decreciente después del 2100	538 ppm
RCP6.0	6.0 w/m ²	Estable posterior entre el 2100 y 2150	670 ppm
RCP8.5	8.5 w/m ₂	Creciente hasta el 2100 y constantes después del 2250	939 ppm

Nota. Tomado de IPCC (2014a)

2.2.2.4. Proyecto de intercomparación de modelos acoplados – fase 5 (CMIP5).

Alrededor del mundo, se encuentran diversos centros de modelación climática, cada uno de los cuales elabora su propio modelo climático para realizar simulaciones con los RCPs. No obstante, por razones de eficiencia, estos centros no llevan a cabo la ejecución de todos los modelos disponibles con todos los RCPs, debido a la complejidad computacional involucrada. La utilización de supercomputadoras de alto rendimiento puede implicar varios meses para ejecutar un modelo global durante un periodo de simulación específico. (López et al., 2022)

En consecuencia, con el objetivo de obtener la mayor diversidad de simulaciones posible, los centros de modelación han llegado a un acuerdo para llevar a cabo la ejecución de sus modelos individuales con diversos RCPs. Posteriormente, ponen a disposición de toda la comunidad climática las simulaciones resultantes. Este enfoque colaborativo permite abordar la complejidad computacional y garantiza que las valiosas simulaciones sean accesibles para un mayor número de investigadores y profesionales en el campo del cambio climático. Esta colaboración forma parte del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP).

El CMIP ha recopilado la información de la salida de los Modelos de Circulación General acoplados globales del océano y la atmósfera de diversos grupos de modelación en 5 fases: CMIP1, CMIP2, CMIP3, CMIP5 y CMIP6. Entre otros usos, estos modelos se utilizan para detectar efectos antropogénicos en los registros climáticos del siglo pasado, así como para proyectar cambios climáticos futuros debido al aumento de gases de efecto invernadero y aerosoles de origen antropogénico. (López et al., 2022)

2.2.2.5. incertidumbre de los modelos climáticos. La confiabilidad de los MCG varía mucho entre las regiones del mundo y depende de las variables que se investigan. En efecto, las temperaturas simuladas por el GCM muestran una alta confiabilidad, pero sin embargo los resultados teóricos sugieren que el calentamiento global observado contrasta con el calentamiento regional observado actualmente. En cuanto a la variable de precipitación, la confianza es muy relativa: es probable que algunos modelos simulen muy bien ese comportamiento y otros estén bastante sesgados. (Rau, 2017)

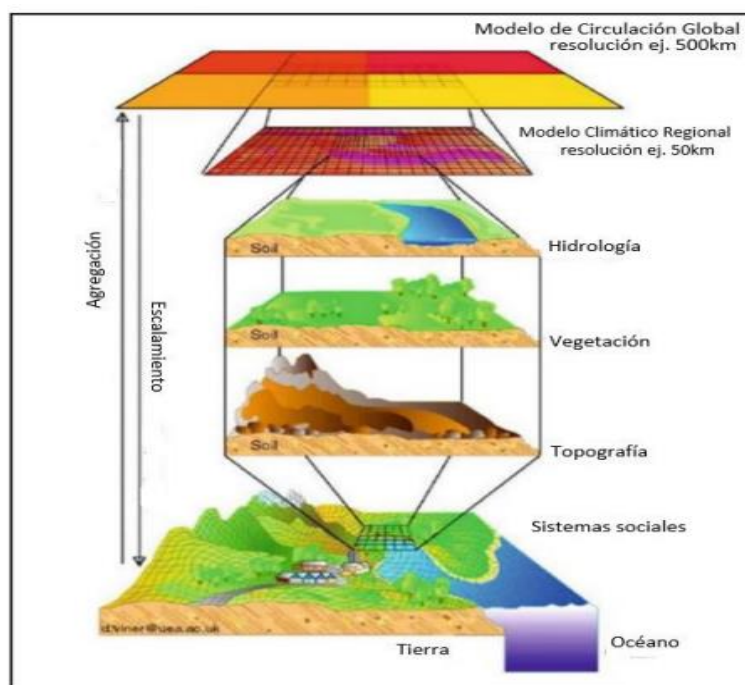
Para mejorar la predicción de los GCM, es necesario realizar correcciones de sesgo antes que se utilicen para investigaciones de recursos hídricos; esta técnica de mejorar la calidad de información es denominada: técnicas de escalamiento o Downscaling. (Fang et al., 2015)

2.2.2.6. Downscaling (escalamiento estadístico). Desde una perspectiva el escalamiento estadístico se argumenta en el supuesto que la relación estadística entre los datos observados y los GCMs, tal es así, que los datos observados establecido en el periodo de línea base se mantienen constantes en proyecciones climáticas futuras. (Wilby et al., 1998)

La reducción de escala estadística se puede utilizar para reducir eficientemente una gran cantidad de Modelos de circulación general GCM, como resultado sale a una escala temporal y espacial fina. (Ahmed et al., 2013)

Figura 2

Procesos de downscaling entre GCM y resoluciones menores



Nota. Tomado de Trzaska & Schnarr (2014)

Los métodos de downscaling estadístico se sustentan en modelos que vinculan de forma empírica las variables de circulación a gran escala (predictores), dadas por los modelos de circulación global (GCMs), con las variables locales observadas en superficie (predictandos; típicamente temperatura y precipitación). Dichos modelos se acoplan utilizando datos del clima presente y son posteriormente aplicados para proyectar localmente las simulaciones futuras de los GCMs, lo que supone su mayor limitación, puesto que se asume su estacionariedad. (Wilby et al., 2004)

Tabla 3*Métodos de corrección de sesgo para precipitación y temperatura*

Corrección de sesgo para precipitación	Corrección de sesgo para temperatura
Escalamiento Lineal (LS)	Escalamiento Lineal (LS)
Escalamiento de intensidad local (LOCI)	Escalamiento de la varianza (VARI)
Transformación de potencia (PT)	Mapeo de distribución para la temperatura usando la función de distribución gaussiana (DM)
Mapeo de distribución para precipitación usando la función de distribución gamma (DM)	
Mapeo de cuantiles (QM)	

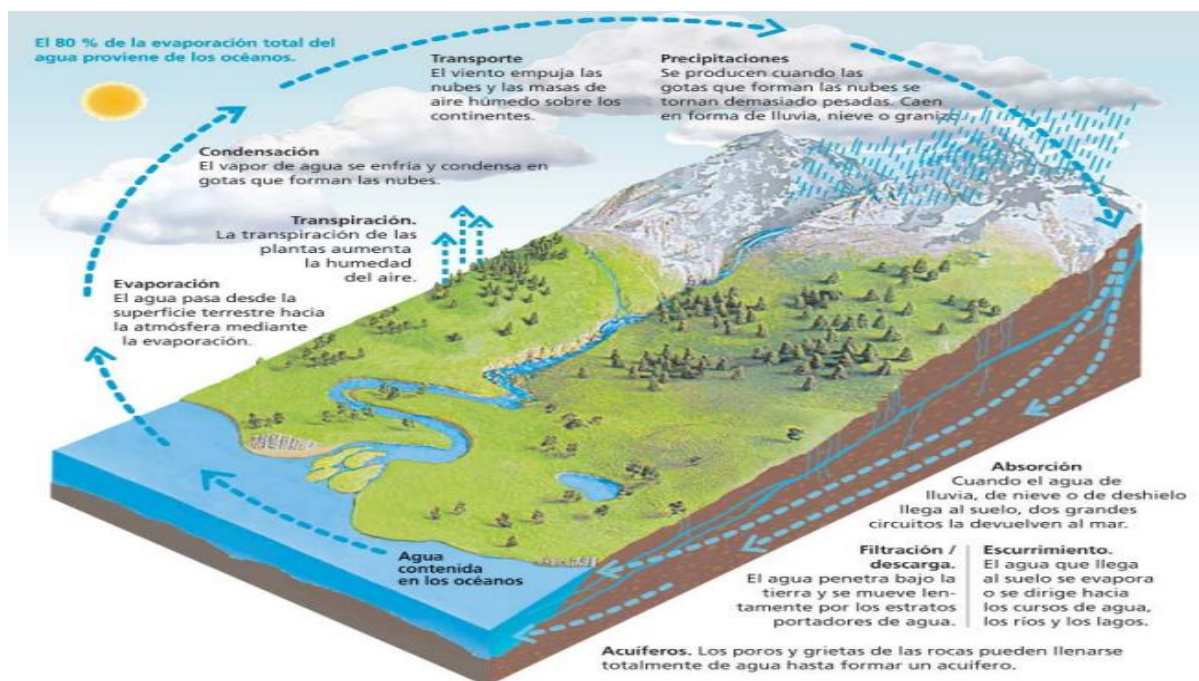
2.2.2.7. Proyección climática. Las proyecciones climáticas simulan las reacciones del sistema climático (interacciones entre la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la geosfera y la biosfera). Utiliza modelos climáticos para realizar simulaciones y se basa en diferentes escenarios de emisiones o concentraciones futuras de gases de efecto invernadero. (IPCC, 2014a)

2.2.3. Modelo hidrológico

2.2.3.1. Ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico también llamado ciclo del agua, describe el flujo de moléculas de agua desde la superficie a la atmósfera y viceversa, a veces desde el subsuelo. El sistema funciona con energía solar y hay un intercambio continuo de humedad entre la tierra, el océano y la atmósfera. (Vera & Camilloni, 2019)

Figura 3

Ciclo hidrológico



Nota. Tomado de Vera & Camilloni (2019)

2.2.3.2. Cuenca hidrográfica. La cuenca hidrográfica está formada por partes que se relacionan entre sí y presenta un límite definido (divisoria de aguas), además está conformado por un sistema hídrico que administra sus aguas a un río, lago o lagunas y finalmente hasta su desembocadura en el mar; además está constituye un ámbito tridimensional que comprende las interacciones entre la cobertura sobre el terreno, las profundidades del suelo. (Faustino, 2000)

2.2.3.3. Clasificación de los modelos hidrológicos. Chow et al. (1994) manifiestan que los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos.

2.2.3.3.1. Modelos físicos

Estos incluyen modelos a escala que representan el sistema en una escala reducida, tal como un modelo hidráulico del vertedero de una presa; y modelos análogos, que usan otros sistemas físicos con propiedades similares a las del prototipo. (Chow et al.,1994)

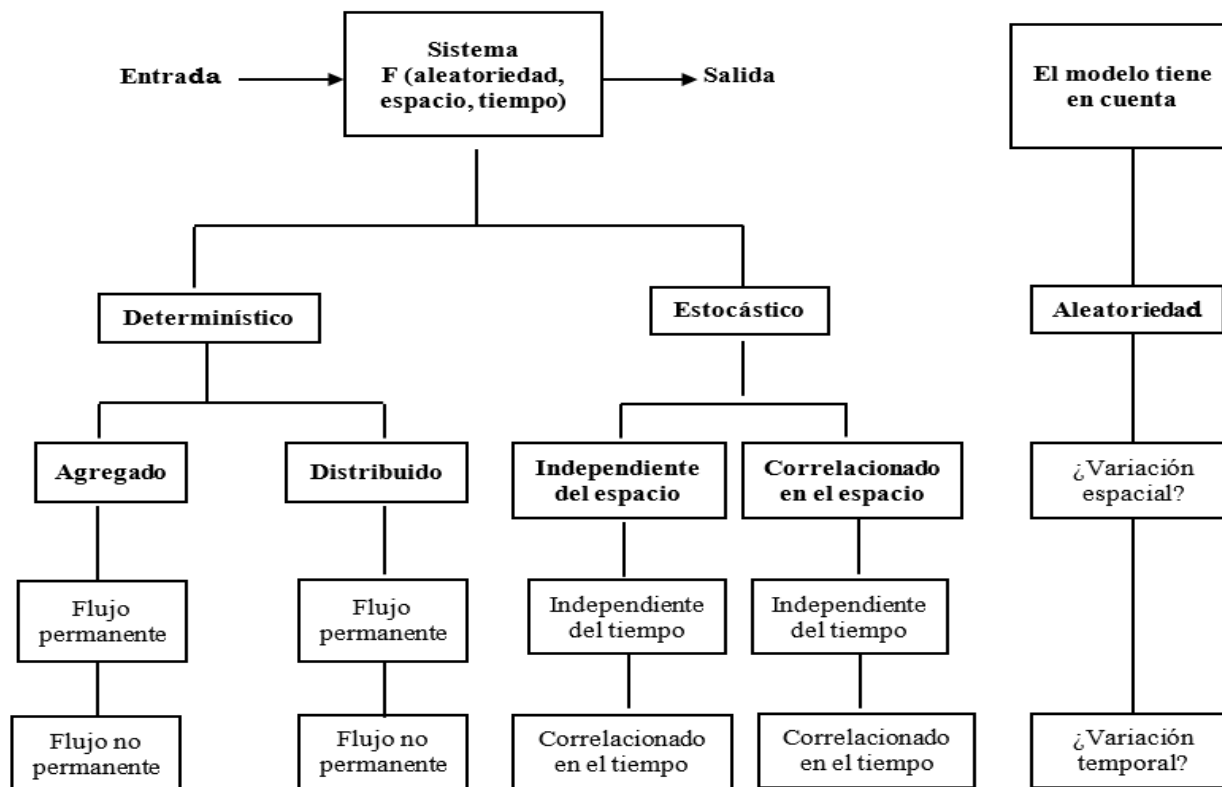
2.2.3.3.2. Modelos abstractos

Estos modelos representan el sistema en forma matemática. La operación del sistema se describe por medio de un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y salida. Estas variables pueden ser funciones de espacio y tiempo, pero también pueden ser variables aleatorias o aleatorias que no tienen valores fijos en ningún punto particular del espacio y tiempo, sino que están descritas por distribuciones de probabilidad. (Chow et al.,1994)

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar considerando la forma en que se realiza esta simplificación. El modelo debe tomar tres decisiones: Si las variables del modelo son aleatorias, espacialmente variables o uniformes, variables en el tiempo o constantes. Los modelos se pueden organizar en un "árbol" de acuerdo con estas opciones.

Figura 4

Clasificación de los modelos hidrológicos



Nota. Tomado de Chow et al. (1994)

2.2.3.4. Calibración y validación de los modelos hidrológicos. El proceso de calibración va acompañado de la validación del modelo hidrológico, el cual logra comprender el comportamiento del modelo en un periodo distinto al de calibración. Dicha validación comprueba si el modelo se está desempeñando de forma conveniente y simula la respuesta hídrica natural de la cuenca en el transcurso del tiempo. El proceso de validación es semejante al de calibración cambiando los periodos de análisis, siendo uno anterior la calibración y posterior el de validación siempre que se cuente con un registro suficientemente extenso. (Velásquez & León, 2022)

La validación es considerada como "el proceso de demostrar que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar particular y para períodos fuera del período de calibración". Por lo

tanto, se dice que un modelo está validado si su precisión y capacidad predictiva muestran errores o límites aceptables durante el período de validación. (Refsgaard & Knudsen, 1996)

La calibración está considerada como proceso de ajuste de valores de parámetros para optimizar el funcionamiento de parámetros de acuerdo a un grupo de criterios predefinidos. (Koray et al., 1995).

De acuerdo con Lujano (2013), Mendez et al. (2022) se sugiere utilizar 2/3 del periodo total de análisis para esta etapa, donde se simularán los caudales mensuales considerando los parámetros X_1 (reservorio suelo) y X_2 (coeficiente de intercambios subterráneos) del modelo GR2M.

2.2.3.5. Criterios de calibración. Como resultado a la agregación y parametrización de los procesos hidrológicos, los parámetros de los modelos hidrológicos conceptuales no pueden estimarse directamente in situ, sino que son ajustados mediante su calibración por medio de un algoritmo de optimización. (Rwasoka et al., 2013)

La optimización de los parámetros se ejecutó para maximizar los criterios de eficiencia de Nash y Sutclif (NSE), con el cual se encontró los parámetros más óptimos del modelo capaces de representar el comportamiento hidrológico. Para evaluar el rendimiento del modelo en términos se utilizó dos métricas adicionales: los criterios Porcentaje de Sesgo (PBIAS) y Coeficiente de Determinación (R^2)

Mirosław & Okruazko (2011) mencionan que el criterio Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), es uno de los estadísticos de los más usados en hidrología para la evaluación de modelos, ya que implica la estandarización de la varianza residual, y su valor esperado no cambia con la longitud del registro o la magnitud de la escorrentía. El criterio de Nash-Sutcliffe se utiliza para evaluar la capacidad de reproducir la evolución temporal de los caudales, su valor puede variar

desde un valor negativo a 1, donde 1 indica un ajuste perfecto entre la simulación y los valores observados, un valor negativo indica que el caudal promedio medido habría sido un buen predictor como un caudal modelo. Su valor se define mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

Q_{sim} = Caudales simulados

Q_i = Caudales observados

Q = Promedio de los caudales observados

A continuación, se muestra los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

Tabla 4

Valores de referencia de NASH

Coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Nota. Tomado de SENAMHI (2017)

Sin embargo, el coeficiente de determinación (R^2) describe la proporción de la Varianza en los datos observados que puede ser explicada por el modelo. El coeficiente de determinación fue clasificado bajo los criterios como se muestra en la (Tabla 5)

$$R^2 = \frac{(n - 1) \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{n \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}$$

Donde:

N = Número de observaciones

x_i = Valor observado

\hat{x}_i = Valor estimado por el modelo

\bar{x}_i = Promedio de los datos observados

Tabla 5

Clasificación de los criterios del coeficiente de determinación (R^2)

Coeficiente de determinación (R^2)	Ajuste
$0.6 \leq 0.70$	Satisfactorio
$0.70 \leq 0.80$	Bueno
>0.80	Muy bueno

Nota. Tomado de Moriasi et al. (2007)

El Porcentaje de sesgo (PBIAS) se describe como el balance entre la descarga simulada acumulada (Q_{sim}) y la descarga observada acumulada (Q_{obs}) a lo largo de un período de evaluación de n meses. De esta manera se utiliza comúnmente para cuantificar los errores en el balance hídrico, donde un valor negativo indica subestimación mientras que un valor positivo indica sobreestimación. En general, los valores de PBIAS tienden a variar más, entre los diferentes métodos de optimización, durante los años secos que durante los años húmedos. (Corrado et al., 2013)

Porcentaje de sesgo (PBIAS) es una medida de tendencia promedio de los valores simulados y observados. El valor óptimo de PBIAS es 0.0, los valores de magnitud baja representan mayor precisión entre los datos modelados y observados. Los valores positivos indican sobreestimación, mientras los valores negativos indican subestimación del sesgo. (Moriasi et al., 2007)

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

Donde:

$Q_{sim,i}$ = Valores simulados del caudal medio diario

$Q_{obs,i}$ = Valores observados del caudal medio diario

N = número de observaciones

2.2.3.6. Modelos GR (Genio Rural). Los modelos de genio rural (GR) son un grupo de modelos precipitación-escorrentía desarrollados en Francia por la unidad de investigación en hidrología del Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia (Cemagref). Estos modelos se caracterizan por utilizar como datos de ingreso la precipitación y la temperatura. (Rodas, 2022)

El modelo ingeniería rural a paso mensual (GR2M) es un modelo hidrológico de lluvia-escorrentía desarrollado por el Cemagref a finales de 1980. Este modelo pertenece al grupo GR por sus siglas en francés Génie Rural, lo cual, significa Ingeniería Rural. Posteriormente el modelo ha venido avanzando lo cual se cuenta con las versiones GR1a, GR3j, GR4j, GR4h y GR5h, donde el número indica el número de parámetros a modelar y la última letra indica el paso de tiempo. j (diario), m (mensual), a (anual), h (horario).

2.2.3.6.1. Modelo GR2M:

Mouelhi et al. (2006) mencionan que el modelo GR2M conceptualiza la cuenca como un par de estanques, el primero de producción y el segundo de rastreo. GR2M comprende dos parámetros, X_1 y X_2 los cuales 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 es forzado con datos mensuales de evapotranspiración potencial (PET) y precipitación (P) para generar caudales mensuales (Q) a la salida de la cuenca. Considera también

variables de estado en el estanque de producción (S) y rastro (R). Considerando que la incertidumbre en las forzantes, se agregan factores de corrección para la precipitación (f_{precip}) y evapotranspiración potencial (f_{pet}).

Tabla 6

Descripción y condiciones de rango mínimo y máximo de los parámetros iniciales del modelo

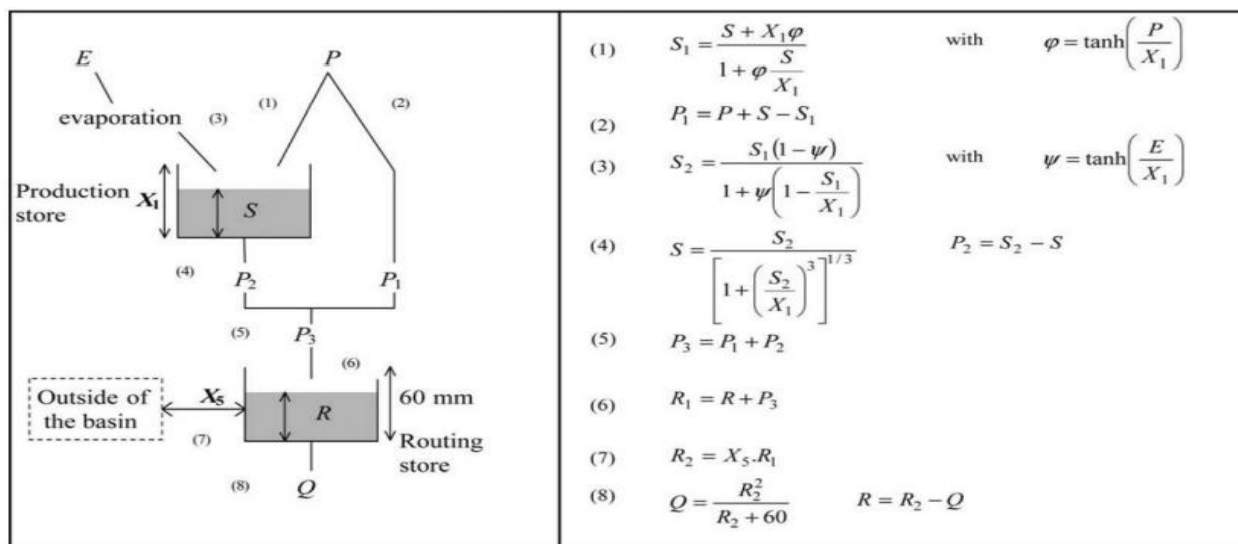
GR2M

Modelo	Unidades	Descripción	Rango	
			Mínimo	Máximo
GR2M		Capacidad máxima de almacenamiento del	1	2000
	X_1	mm reservorio suelo.		
	X_2	- Coeficiente de intercambios subterráneo	0.01	2
	f_{precip}	- Factor de corrección de la precipitación mensual.	0.8	1.2
Parámetros	f_{pet}	- Factor de corrección de la evapotranspiración potencial mensual.	0.8	1.2
		Almacenamiento inicial del reservorio de	0	X_1
	S_o	mm producción.		
		Almacenamiento inicial del reservorio de	0	60
Condiciones iniciales	R_o	mm agua gravitacional.		

Nota. Tomado de Pagano et al. (2009)

Figura 5

Esquema del modelo GR2M



Nota. tomado de Mouelhi et al. (2006)

Donde:

P: Precipitación (mm)

P1: Escorrentía superficial.

P2: percolación profunda.

P3: Precipitación efectiva, suma de P1 + P2.

E: evapotranspiración actual.

S: almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis.

R: Almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis, con una capacidad máxima de 60 mm.

Q: Caudal de salida de la cuenca.

Mouelhi et al. (2006) describió las funciones del modelo GR2M, como se detallan a continuación:

- **Función de producción**

La Figura 5, muestra que 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 teniendo en cuenta la formula siguiente:

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

Donde: X_1 es la capacidad del reservorio suelo; y φ se define como: $\varphi = \text{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)$

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

$$P_1 = P + S - S_1$$

En segundo lugar, el reservorio suelo será afectado por la evapotranspiración, reduciendo su volumen a S_2 . Por tanto, el nuevo volumen se calcula teniendo en cuenta la formula siguiente:

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

Donde: Ψ es igual a: $\Psi = \text{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right)$

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 P_2 se estimará con la diferencia entre S_2 y S :

$$P_2 = S_2 - S$$

- **Función de transferencia**

Conocido el volumen de agua que percola, la precipitación efectiva que ingresa al reservorio de agua gravitacional (P_3), 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:

$$R_1 = R + P_3$$

No obstante, debido a que existe un intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial, el volumen del reservorio se corrige por el factor X_2 :

$$R_2 = X_2 + R_1$$

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

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

Como se observa en la Figura 5, todos los volúmenes estimados dependen de dos variables a optimizar:

X_1 : capacidad del reservorio suelo en milímetros

X_2 : coeficiente de intercambios subterráneos (adimensional)

X_2 oscila entre 1 y 2. Si $X_2=1$ significa que toda la precipitación neta del mes es transferida a la salida de la cuenca sin ser retenida en el reservorio de transferencia. En el caso extremo si $X_2=2$ toda la precipitación es retenida en el reservorio de transferencia.

2.2.4. Tasa de cambio

Con respecto al cambio climático, la tasa de cambio cuantifica la variación del clima futuro en base a un periodo de referencia; la estimación de cambios se debe realizar en periodos específicos y en una escala específica. En cuanto a las unidades de medida, los cambios de precipitación se deben expresar en porcentaje (%), mientras que los cambios en temperatura se deben expresar en °C. Para las variables mencionadas se recomienda presentar los resultados en función a los valores medios, y acompañar de los mínimos y máximos para obtener un rango de incertidumbre asociado. (Correa et al., 2019)

Para la cuantificación de la tasa de cambio, se compara el promedio mensual en función a cada mes del año, tanto en el periodo observado como en el periodo futuro.

Tasa de cambio para la variable caudal

$$Tasa\ de\ cambio\ (\%) = \frac{Q_{fut} - Q_{his}}{Q_{his}} \dots\dots\dots Ecuación\ 1$$

Donde:

$$Q_{fut} = Caudal\ futuro$$

$$Q_{his} = Cuadal\ historico\ (observado)$$

Tasa de cambio para la variable precipitación

$$Tasa\ de\ cambio\ (\%) = \frac{P_{fut} - P_{his}}{P_{his}} \dots\dots\dots Ecuación\ 2$$

Donde:

$$P_{fut} = Precipitación\ futuro$$

$$P_{his} = Precipitación\ historico\ (observado)$$

Tasa de cambio para la variable temperatura

$$Tasa\ de\ cambio\ (°C) = (T_{fut} - T_{his}) \dots\dots\dots Ecuación\ 3$$

Donde:

$$T_{fut} = Temperatura\ futuro$$

This = Temperatura historico (observado)

2.2.5. Evapotranspiración potencial

De acuerdo con Hämmerly (2001) la noción de Evapotranspiración Potencial (ETP) es introducida por Thornthwaite en 1942 y se resume de la siguiente manera: “la evapotranspiración potencial corresponde a la pérdida de agua por evaporación directa del agua del suelo y por transpiración de una cubierta vegetal densa bien desarrollada, en pleno crecimiento y sin limitación en la disponibilidad de agua”.

Evapotranspiración potencial (ETP) mensual se calcula mediante la ecuación de Thornthwaite (Thornthwaite y Mather 1955). Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de la ETP:

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1.5}$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial mensual no corregida en mm/día

t = Temperatura media mensual en °C

I = Índice de calor anual

$a = 0.492 + 0.0179I - 0.0000771I^2 + 0.000000675I^3$

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Efectos del cambio climático

En las últimas décadas los impactos del cambio climático son más evidentes, y el sector con mayor sensibilidad son los sistemas naturales, las anomalías en precipitación o el derretimiento del nieve y hielo están alterando los sistemas hidrológicos, que afecta principalmente la distribución de los recursos hídricos. (IPCC, 2014b)

2.3.2. Disponibilidad hídrica

Se entiende como disponibilidad hídrica al volumen total de agua ya precipitada sobre una cuenca hidrográfica, para ser empleado, por ejemplo, para el riego, para generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua potable.

Conocer la disponibilidad hídrica de una cuenca nos permite optimizar el funcionamiento de las presas y así maximizar el uso de los recursos hídricos disponibles, además, sabiendo que el agua ya ha sido depositada, el operador del aprovechamiento múltiple podrá vaciar el embalse para evitar inundaciones formadas en la cuenca a causa de la reciente precipitación. (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2010)

2.3.3. Modelo hidrológico GR2M

Se emplea primordialmente para reconstruir los caudales a partir de la precipitación y la evapotranspiración. Dicho modelo se ejecuta a paso de tiempo mensual, el cual está basado en la transformación de la lluvia en escorrentía, con el apoyo de la utilización de un conjunto de ecuaciones. (Mouelhi et al., 2006)

2.3.4. Variables climáticas

Son aquellas que pueden expresar la variación del clima de un territorio. Algunas de ellas son: La precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, balance hídrico, etc. (Luebert & Pliscoff, 2012)

2.3.5. Variación del caudal

La variación de caudal se evalúa respecto al tiempo y en una sección determinada. Esta variación se puede representar mediante los hidrogramas o gráficas. (Tébar Juan, 2017)

2.3.6. Caudal medio mensual

Media aritmética de todos los caudales medios mensuales para un mes dado, en el período considerado. (UNESCO-WMO, 1992)

Conversión a mm/mes utilizando la siguiente expresión:

$$Q(mm) = \frac{Q \times 2592}{A}$$

Q = Caudal medio mensual en m³/s

A = Área de la cuenca en km²

2.3.7. Precipitación

La precipitación es el origen de todas las corrientes superficiales y profundas, por lo cual su cuantificación y el conocimiento de su distribución, en el tiempo y en el espacio, se constituyen en problemas básicos para la hidrología. (Villalodas, 2008)

2.3.8. Temperatura

Según la Real Academia Española, (2023), la temperatura es una magnitud física que expresa el grado de frío o calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K).

2.3.9. Evapotranspiración

La combinación de los dos procesos se denomina evapotranspiración (ET); evaporación del suelo y superficies cubiertas de plantas y la transpiración de las hojas de las plantas. (SiAR, 1999)

Se define a la evapotranspiración (ET) como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. (Villegas & Torres, 1977)

2.3.10. *Producto Pisco*

Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hidrological Observation, fue desarrollado por SENAMHI. El producto PISCO comprende una base de datos grillada para todo el PERÚ con una resolución espacial de 0.05° (~ 5.5 km), actualmente se tiene disponible las variables climáticas de evapotranspiración, temperatura y precipitación; tanto a escala diaria y mensual; los cuales abarcan un periodo desde el año 1981 hasta el año 2016. Para la construcción del producto PISCO se utilizó la base de datos del proyecto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) como una covariable, y fueron corregidas para cada punto de observación con la interpolación de los datos registrados en las distintas estaciones terrestres. (Aybar et al., 2017)

III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación del área de estudio

La cuenca se ubica en la vertiente del Atlántico, se origina en la parte sur de la cuenca Chamaya y sus aguas desembocan en el océano Atlántico; el área de estudio abarca una extensión de 360.506 km² y un perímetro de 90367.4 m.

Políticamente se ubica en el departamento de Cajamarca, provincia de Chota, en los distritos de Chota y Lajas, el cual posee los siguientes límites:

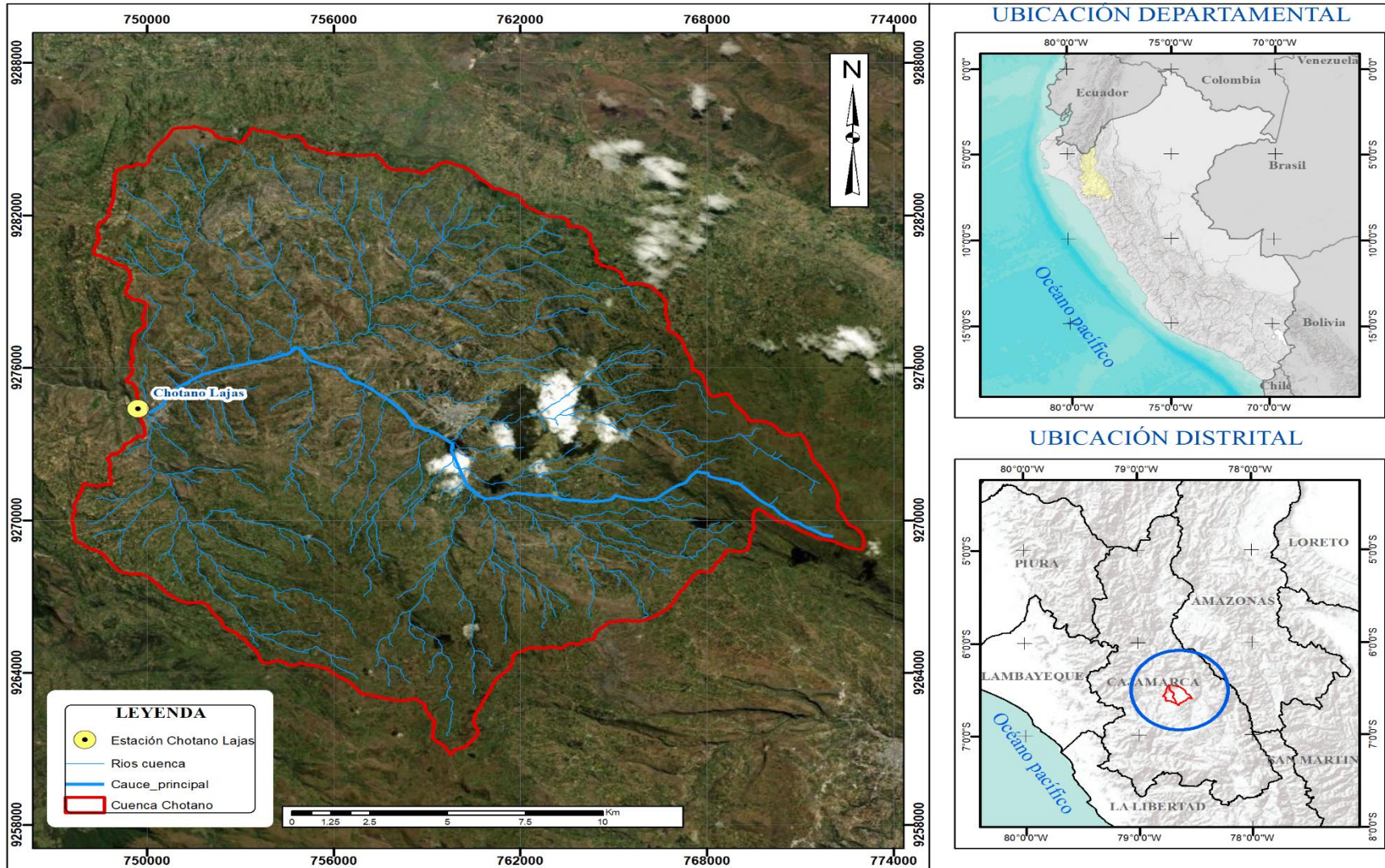
Tabla 7

Límites del área de estudio a nivel de cuenca.

Límites	Unidades hidrográficas
Norte	Intercuenca alto Marañón IV
Sur	Cuenca Chamaya-Lambayeque,
Este	Intercuenca alto Marañón IV
Oeste	Cuenca Chamaya

Figura 6

Ubicación de la cuenta del río Chotano



3.2. Materiales

3.2.1. Base de datos

- Precipitación (SENAMHI PISCOp v.2.1, 1981 - 2011)
- Temperatura máxima y mínima (SENAMHI PISCOtemp v1.1, 1981 - 2011)
<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/>.
- Caudal (ANA, 1981 - 2011) obtenido de la estación Hidrométrica convencional Chotano Lajas. <https://snirh.ana.gob.pe/onrh/Index2.aspx?IdVar=263>
- DEM (Satélite Alos Palsar, con una resolución espacial de 12.5 m)
- Precipitación y temperatura (mínima y máxima) para el periodo 1981-2050 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) el cual contiene los modelos climáticos globales (GCMs). Seleccionando dos escenarios (medio y alto) de intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP4.5 y RCP8.5 W/m²), puesto que el primer escenario es la trayectoria más probable de emisión futura y el segundo escenario es el más crítico para explorar el rango de posibles impactos del cambio climático. La descarga se efectuó de la plataforma web KNMI Climate Explorer, disponibles en https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere

3.2.2. Información cartográfica

- Límite de cuencas hidrográficas a nivel nacional de referencia (ANA, 2009),
- Puntos de estaciones meteorológicas (SENAMI, 2024)

3.2.3. Software

- Microsoft office
- Qgis
- RStudio

3.3. Metodología

3.3.1. Tipo de investigación

Según Hernández & Mendoza (2018), En el presente estudio el tipo de investigación es aplicada de corte longitudinal pues se estudia el evento para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.

El nivel de la investigación es correlacional con un diseño de investigación no experimental.

3.3.2. Procedimientos

Se inicia con la descarga de la información de las variables climáticas del caudal, precipitación, temperatura mínima y máxima de las cuales mediante el método de Thornthwaite se obtiene la evapotranspiración potencial (ETP). Estas variables de entrada fueron usadas posteriormente para correr el modelo GR2M.

Por otro lado, se trabajó con las variables de la proyección climática que son la precipitación, temperatura mínima y máxima obtenidos de los modelos GCM y posteriormente se realizó el escalamiento estadístico (downscaling) mediante el método de escalamiento lineal Según Lenderink et al. (2007), Rodas (2022), López (2022) para las variables de precipitación y temperatura (mínima y máxima) en el periodo de análisis (1981-2050). De igual manera se obtuvo la evapotranspiración potencial mediante el método de Thornthwaite. Este proceso permitió obtener valores que representen el área de estudio. El proceso se realizó en hojas de Excel, donde se trabajó en primera instancia el escalamiento de la temperatura, con el primer modelo climático

global CanESM2 y de igual manera se realiza el escalamiento lineal para la precipitación, para el modelo climático global CNRM-CM5. En ambos casos el escalamiento estadístico permitió simular la precipitación y temperaturas promedio, primero para el periodo 1981-2011 que si se tiene información real (observada del producto pisco) y completar la información para el periodo 2012-2050 siguiendo el mismo patrón de referencia de acuerdo a la simulación de datos del primer periodo de tal manera que se genere una serie de datos para un periodo uniforme desde el año 1981-2050.

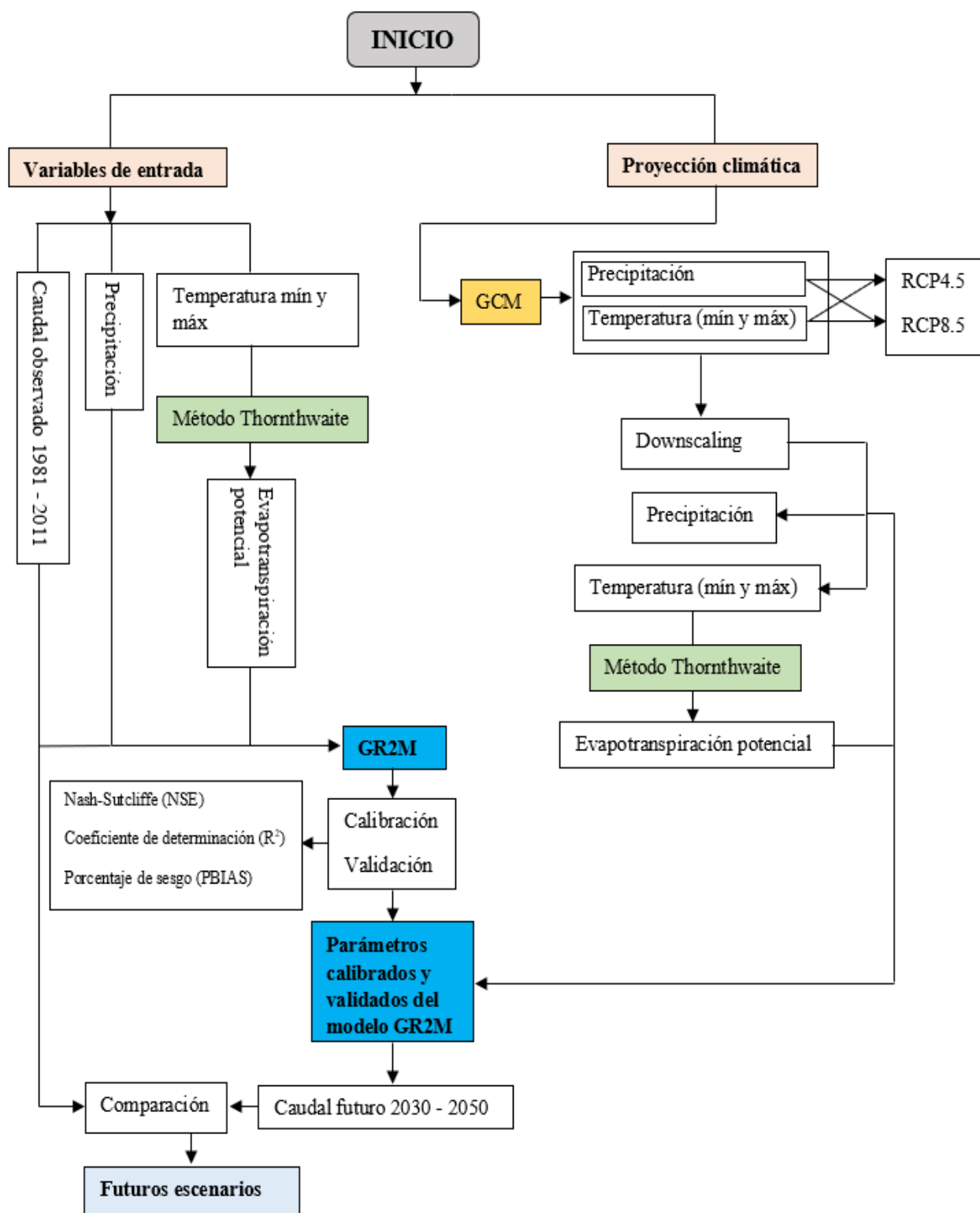
Con las nuevas variables climáticas procesadas con la técnica downscaling más las variables climáticas observadas inicialmente se procede a utilizar el modelo GR2M, donde se realiza la calibración y validación del modelo y se obtiene los datos del caudal simulado, el cual es comparado con la información de caudal observado de la estación Chotano Lajas para analizar los futuros escenarios.

Se evaluaron proyecciones futuras de precipitación, temperatura mínima y máxima del CMIP5 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de los modelos climáticos globales (CanESM2, CNRM-CM5). Posteriormente se realizó una comparación con los valores obtenidos del caudal al 2050 con el histórico, considerando un periodo de estudio de 20 años.

Por otro lado, se determina la tasa de cambio de las variables de precipitación y temperatura, en relación a la observada, la tasa de cambio de la precipitación y caudal se expresan en porcentaje (%); en cuanto a la tasa de cambio de la temperatura será expresada en grados Celsius (°C).

Figura 7

Flujo del trabajo de investigación



3.3.3. *Análisis de datos*

Consta de dos etapas: un análisis descriptivo básico donde se señalan los promedios, máximos y mínimos de las variables y un análisis inferencial que permite establecer la relación entre las variables. Los datos a analizar corresponden a información de precipitación y temperatura para los años 1981-2011 tomados en la estación hidrométrica Chotano Lajas de la cuenca del río Chotano.

Para el análisis de datos se utilizó el software RStudio, donde se procesaron los estadísticos básicos, se realizó la prueba de normalidad y finalmente con la prueba de Friedman para validar la hipótesis nula.

3.3.3.1. Análisis descriptivo. Se describen los estadísticos básicos para las variables climáticas observadas (periodo 1981-2011) utilizadas en la modelación hidrológica, las cuales son precipitación, temperatura media y caudal.

Tabla 8

Estadísticos básicos de la precipitación para el periodo observado (1981-2011)

Estadísticos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Promedio	90.54	134.22	137.79	90.31	55.91	16.94	11.63	14.48	46.97	103.93	93.29	98.31	894.30
Min	23.77	30.42	50.76	49.85	7.71	0.63	0.42	1.25	8.70	9.22	53.28	12.47	615.16
Max	177.97	297.52	232.88	151.93	105.79	74.94	42.93	37.40	114.14	180.43	149.03	175.50	1163.20
DE	41.09	67.39	57.14	23.61	24.07	16.33	9.13	10.06	24.32	44.47	29.08	42.62	146.04
CV	0.45	0.50	0.41	0.26	0.43	0.96	0.79	0.69	0.52	0.43	0.31	0.43	0.16

Según los datos de precipitación para la cuenca del río Chotano se observa que los meses de junio a agosto se tienen escasas precipitaciones (meses secos), mientras que en los meses de diciembre a abril son más húmedos con mayor presencia de precipitaciones; se registra también

que el mes de febrero presenta el valor máximo de precipitaciones con 297.5 mm/mes y el mes de julio con la precipitación mínima de 0.42 mm/mes.

Tabla 9

Estadísticos básicos de la temperatura promedio para el periodo observado (1981 – 2011)

Estadísticos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Promedio	15.01	14.95	14.97	14.79	14.52	13.68	13.62	14.04	14.87	15.15	15.00	15.00	14.63
Min	14.15	13.91	13.94	14.13	13.73	13.10	12.74	13.51	14.02	14.47	14.12	14.25	14.02
Max	16.43	16.29	16.22	16.16	15.39	14.23	14.46	14.57	15.65	16.11	15.58	15.88	15.26
DE	0.57	0.62	0.56	0.46	0.40	0.30	0.44	0.30	0.34	0.36	0.37	0.41	0.31
CV	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02

Según los datos de temperatura promedio para la cuenca del río Chotano se observa que en todos los meses la temperatura varía entre los 13.1 °C y 16.43 °C. En el mes de junio se registran las temperaturas más bajas, mientras que en los meses de enero a mayo y noviembre a diciembre presentan temperaturas más elevadas entre 14.5 °C y 15 °C con una variación mínima que coincide con los meses más húmedos con mayor presencia de precipitaciones.

Tabla 10

Estadísticos básicos del caudal (m³/s) para el periodo observado (1981 – 2011)

Estadísticos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Promedio	7.21	12.27	12.97	11.13	5.69	2.52	1.28	0.86	1.06	3.60	5.10	6.49	5.85
Min	1.46	2.56	1.60	2.15	1.12	0.48	0.42	0.31	0.26	0.47	0.59	0.77	1.45
Max	35.58	33.08	40.22	28.14	12.56	6.51	2.37	1.62	2.72	11.68	15.77	14.92	12.46
DV	7.09	8.59	9.46	7.11	3.01	1.25	0.44	0.31	0.59	3.11	3.51	3.19	2.76
CV	0.98	0.70	0.73	0.64	0.53	0.50	0.34	0.36	0.56	0.86	0.69	0.49	0.47

Según los datos de caudal tomados en la estación hidrométrica Chotano Lajas se observa que los meses de junio, julio, agosto y septiembre se tienen los caudales más bajos puesto que hay menor presencia de precipitaciones se entiende que es la causa por el cual el caudal también disminuye. En los meses de febrero, marzo y abril se tienen los caudales más elevados.

3.3.3.2. Análisis inferencial. En este análisis se ha considerado realizar las pruebas de normalidad y posteriormente las pruebas de correlación.

3.3.3.2.1. Prueba de normalidad - kolmorov smirnov

Esta prueba se ejecutó para determinar si es que los valores de precipitación, temperatura promedio y caudal para el periodo observado 1981-2011 cuentan con una distribución normal. La prueba a usar corresponde a kolmorov smirnov, pues la cantidad de muestras con la que se cuenta es mayor a 50 datos.

Figura 8

Código utilizado en el software RStudio para el análisis inferencial

```
setwd("C:/TESIS_cambioclimatico")
rm(list = ls())
### Leer archivo de caudal
datos<-read_excel('ANALISIS.xlsx',sheet = 'Hoja1')
plot (datos$PR)
plot (datos$TMED)
plot (datos$CAUDAL)

## PR
#PRUEBA DE NORMALIDAD - kolmorov smirnov
lillie.test(datos$PR)
qqnorm(datos$PR)
qqline(datos$PR)

## TMED
#PRUEBA DE NORMALIDAD - kolmorov smirnov
lillie.test(datos$TMED)
qqnorm(datos$TMED)
qqline(datos$TMED)

## CAUDAL
#PRUEBA DE NORMALIDAD - kolmorov smirnov
lillie.test(datos$CAUDAL)
qqnorm(datos$CAUDAL)
qqline(datos$CAUDAL)

## TMIN
#PRUEBA DE NORMALIDAD - kolmorov smirnov
lillie.test(datos$TMIN)
qqnorm(datos$TMIN)
qqline(datos$TMIN)

## PRUEBA DE FRIEDMAN
friedman.test(datos$PR, datos$Mes, datos$Año)
friedman.test(datos$TMIN, datos$Mes, datos$Año)
friedman.test(datos$CAUDAL, datos$Mes, datos$Año)
```

Tomando en cuenta una significancia de 0.05 se obtuvo los siguientes valores de p – value que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11

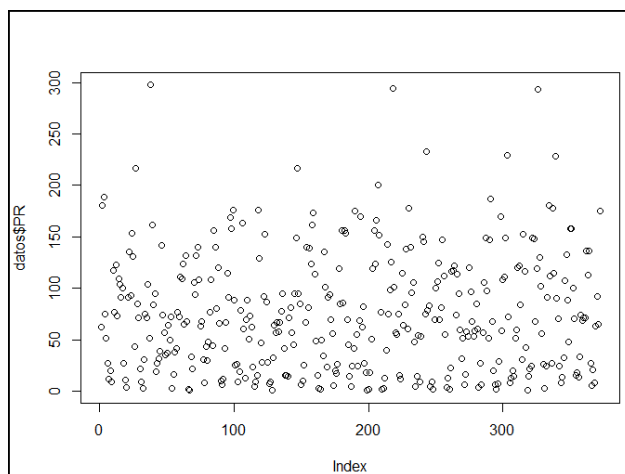
Prueba de normalidad para datos observados (1981-2011)

Variable	D	p-value
Precipitación	0.094676	1.611e-08
Temperatura promedio	0.051379	0.01961
Caudal	0.19731	2.2e-16

Para todas las variables el valor del p-value es menor a 0.05 por lo tanto los datos no siguen una distribución normal.

Figura 9

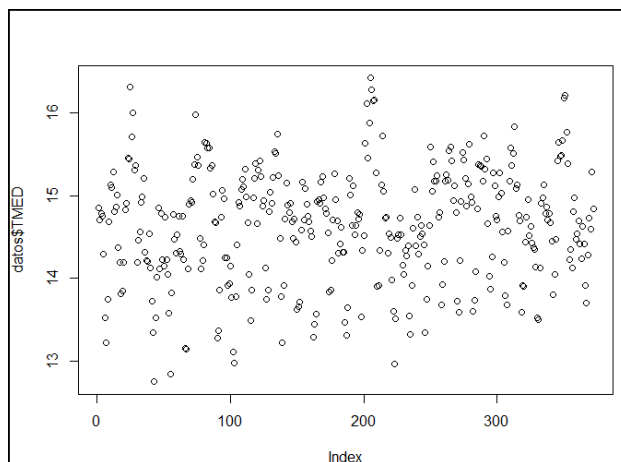
Datos de precipitación mensual observada (1981-2011)



Se observa que para la precipitación la mayor cantidad de datos oscilan entre los 0 y 150 mm/mes; también se puede distinguir que existen valores atípicos con valores cercanos a los 300mm/mes.

Figura 10

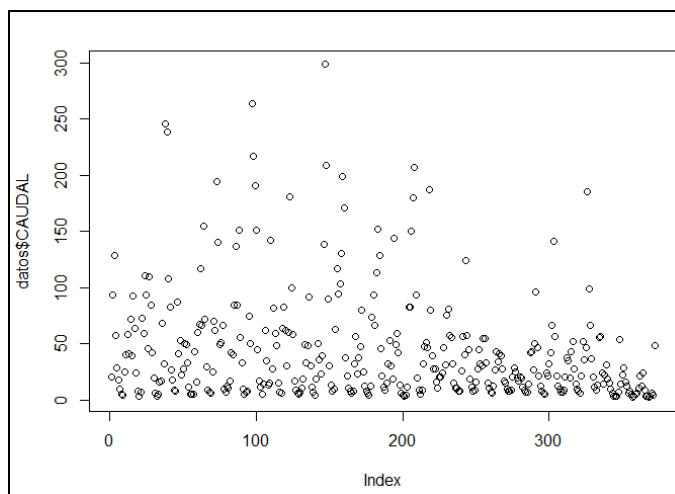
Datos de temperatura promedio mensual observada (1981-2011)



Se observa que los datos de temperatura no sufren variaciones significativas y estas oscilan entre los 12.5 - 16.5 °C.

Figura 11

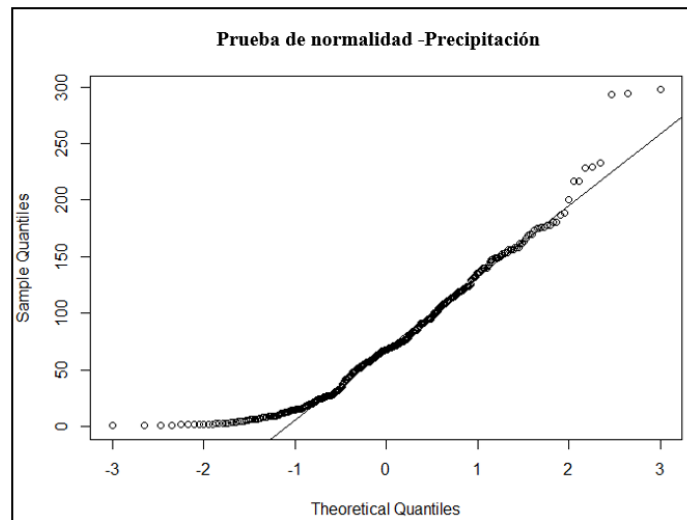
Datos de caudal mensual observado (1981-2011)



Los datos de caudal en su mayoría se distribuyen entre los 0 a 50 mm, también hay presencia de valores atípicos entre los 250 a 300 mm.

Figura 12

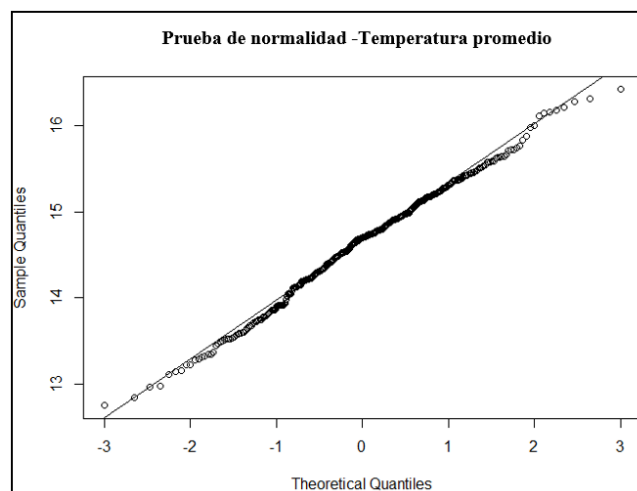
Prueba de normalidad para la precipitación observada



La línea de tendencia no se ajusta de acuerdo a la distribución de los datos por lo tanto la variable no tiene una distribución normal.

Figura 13

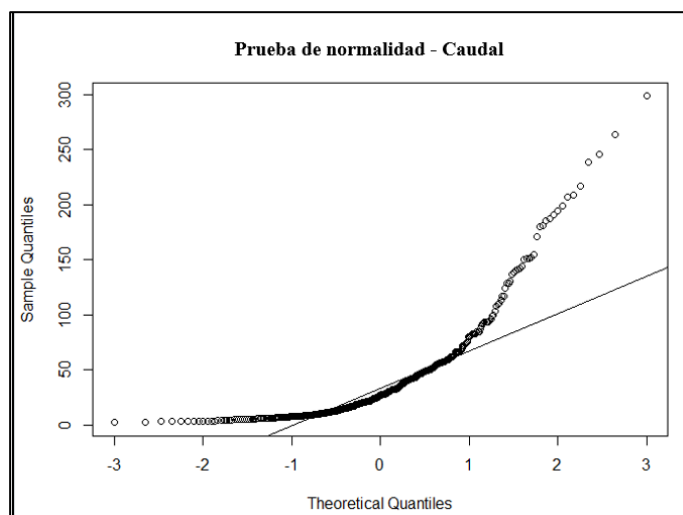
Prueba de normalidad para la temperatura promedio mensual observada



La línea de tendencia no se ajusta de acuerdo a la distribución de los datos por lo tanto la variable no tiene una distribución normal.

Figura 14

Prueba de normalidad para el caudal mensual observada



La línea de tendencia no se ajusta de acuerdo a la distribución de los datos por lo tanto la variable no tiene una distribución normal.

3.3.3.2.2. *Prueba de Friedman*

La prueba de Friedman Test es una ampliación de Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo y el análogo no paramétrico de medidas repetidas de un factor. Friedman contrasta la hipótesis nula de que las variables precipitación, temperatura promedio y caudal que están relacionadas procedan de los mismos meses de estudio.

Tabla 12

Prueba de Friedman para datos observados (1981-2011)

Variable	chi-squared	Grado de libertad	p-value
Precipitación	229.78	11	< 2.2e-16
Temperatura promedio	227.94	11	< 2.2e-16
Caudal	253.61	11	< 2.2e-16

Para todas las variables el valor del p-value es menor a 0.05 por lo tanto las diferencias entre algunas de las medianas son estadísticamente significativas.

Con los resultados obtenidos de la prueba de Friedman se puede decir que las medianas para las tres variables precipitación, temperatura promedio y caudal son diferentes para cada mes de estudio (enero-diciembre) esto debido a que en la cuenca del río Chotano existe temporadas húmedas con abundante lluvia y otras secas con escasa precipitación esto condiciona de igual manera a tener valores de temperatura promedio y caudal con medianas significativas diferentes por temporadas. El hecho de que estas variables estén relacionadas permite que sean usadas en el modelo GR2M para simular condiciones climáticas futuras.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación la incidencia del Modelo hidrológico GR2M en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050.

4.1.1. Calibración del modelo.

El ajuste del modelo en la etapa de calibración dio como resultado los siguientes valores para cada uno de los parámetros del modelo: X_1 (Reservorio suelo) = 5.38 mm, y X_2 (coeficiente de intercambio subterráneo) = 1.65. Se evaluó la métrica de Nash (Miroslaw & Okruazko, 2011) el cual nos da un valor de 0.743. De acuerdo con SENAMHI (2017), este valor se encuentra en la categoría de “Muy bueno” puesto que se ubica en el rango de 0.6 – 0.8.

Tabla 13

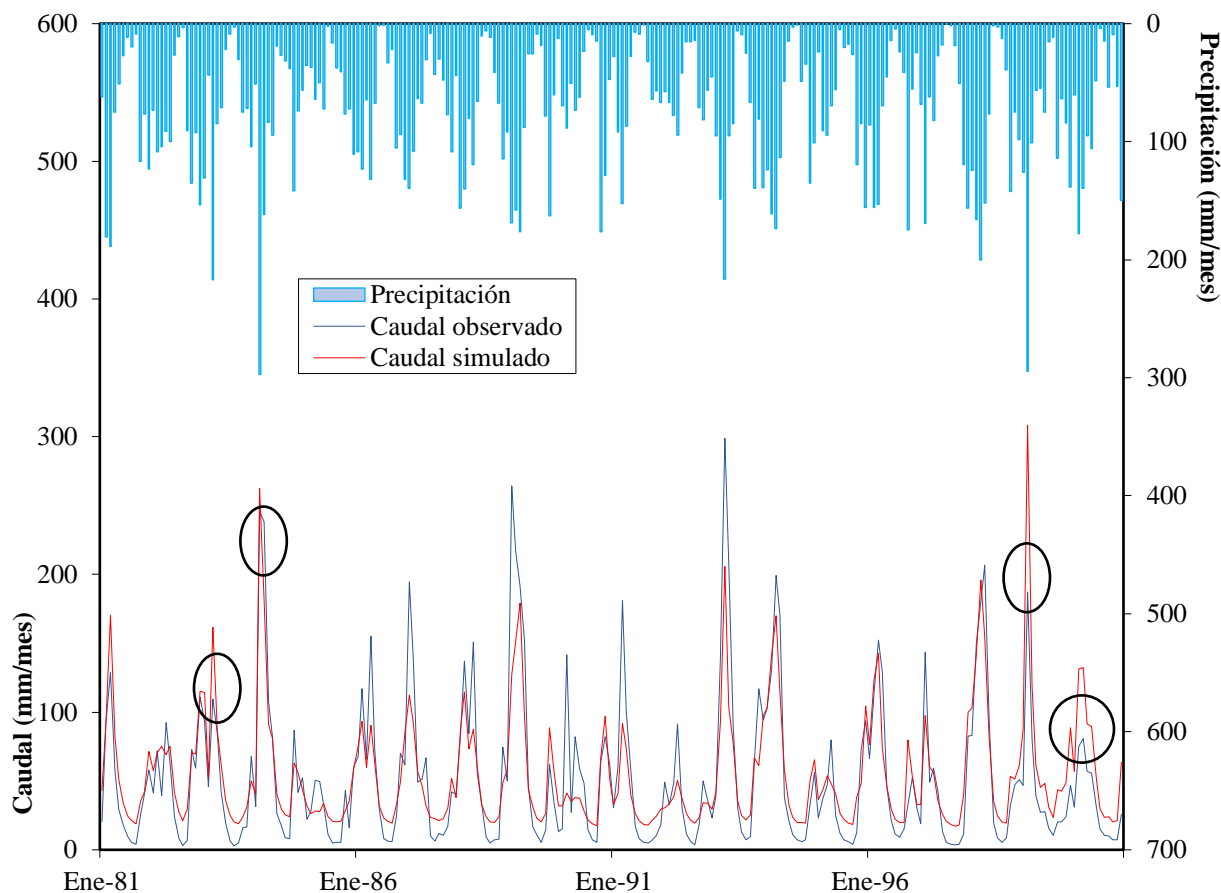
Parámetros de ajuste en la etapa de calibración del modelo

Parámetros del modelo	Transferencia
X_1 : Capacidad del reservorio de producción (mm)	5.38
X_2 : Parámetro de intercambio	1.65

Se muestra los valores de X_1 y X_2 obtenidos en la calibración del modelo hidrológico GR2M.

Figura 15

Resultados en la etapa de calibración periodo (1982-2000)

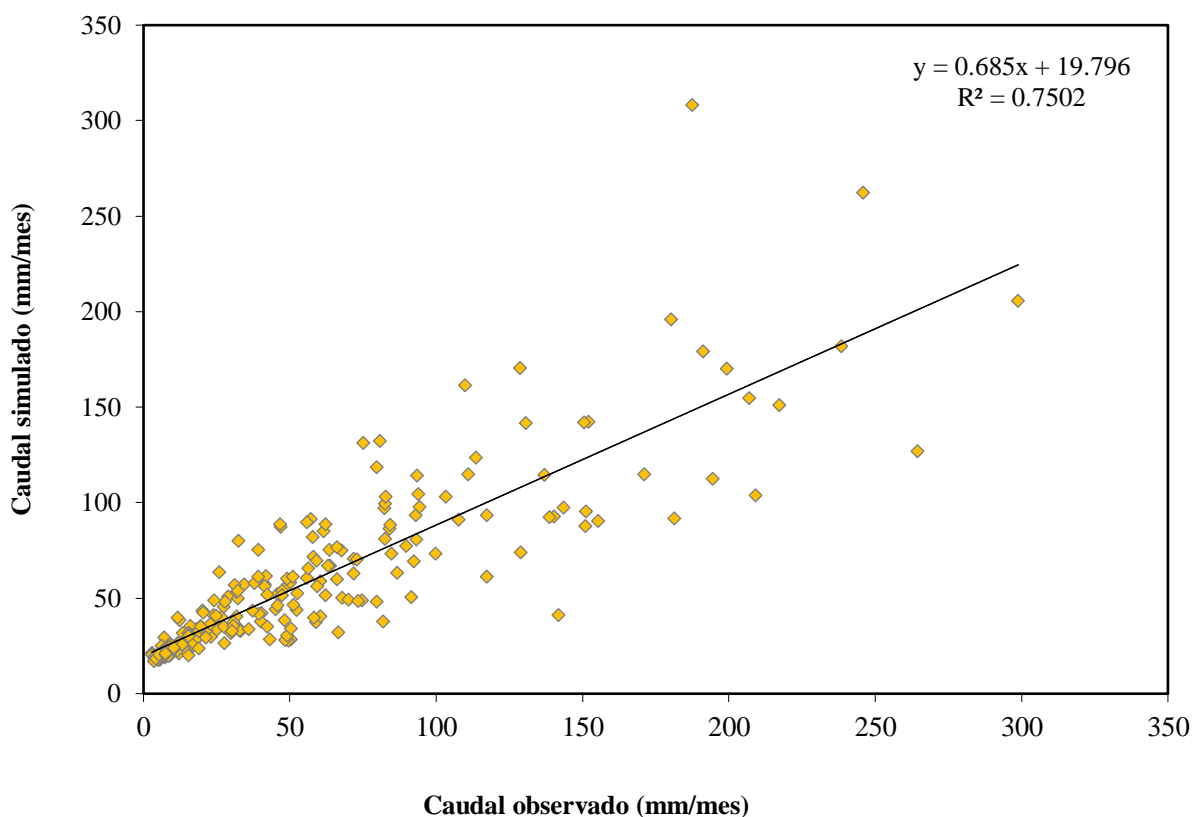


Según la figura 15 se muestra los resultados de la simulación hidrológica en la etapa de calibración (1982-2000) el cual representan el 61.4% del total de datos comprendidos en 19 años para la cuenca del río Chotano, se evidencia que de forma general los caudales simulados se ajustan a los caudales observados, sin embargo, se observa que el modelo, sobrestima en algunos picos que se muestran en los círculos negros en la figura. Esto puede deberse a que, en los periodos húmedos, la cuenca ya tiene cierta retención de agua por lo que el parámetro X_2 (coeficiente de intercambios subterráneos) podría ser más susceptible en la evaluación del modelo GR2M en la

cuenca del río Chotano. De la misma forma, se observa que los caudales mínimos son sobre estimados en el periodo de simulación.

Figura 16

Correlación lineal entre caudales observados y simulados para la cuenca del río Chotano



En la figura 16, se observa una correlación lineal entre el caudal simulado y caudal observado en la etapa de calibración, obteniendo una correlación de 0.7502, respectivamente. Moriasi et al. (2007) sugirió que el modelo tiene un ajuste “Bueno” en la predicción ya que el R^2 se encuentra en el rango de 0.70 - 0.80; por otra parte, se evaluó el modelo con el porcentaje de sesgo (PBIAS) arrojando un valor en la etapa de calibración de -0.1 Corrado et al. (2013) considera como un valor “optimo” debido a que el resultado obtenido se acerca a cero, además los autores

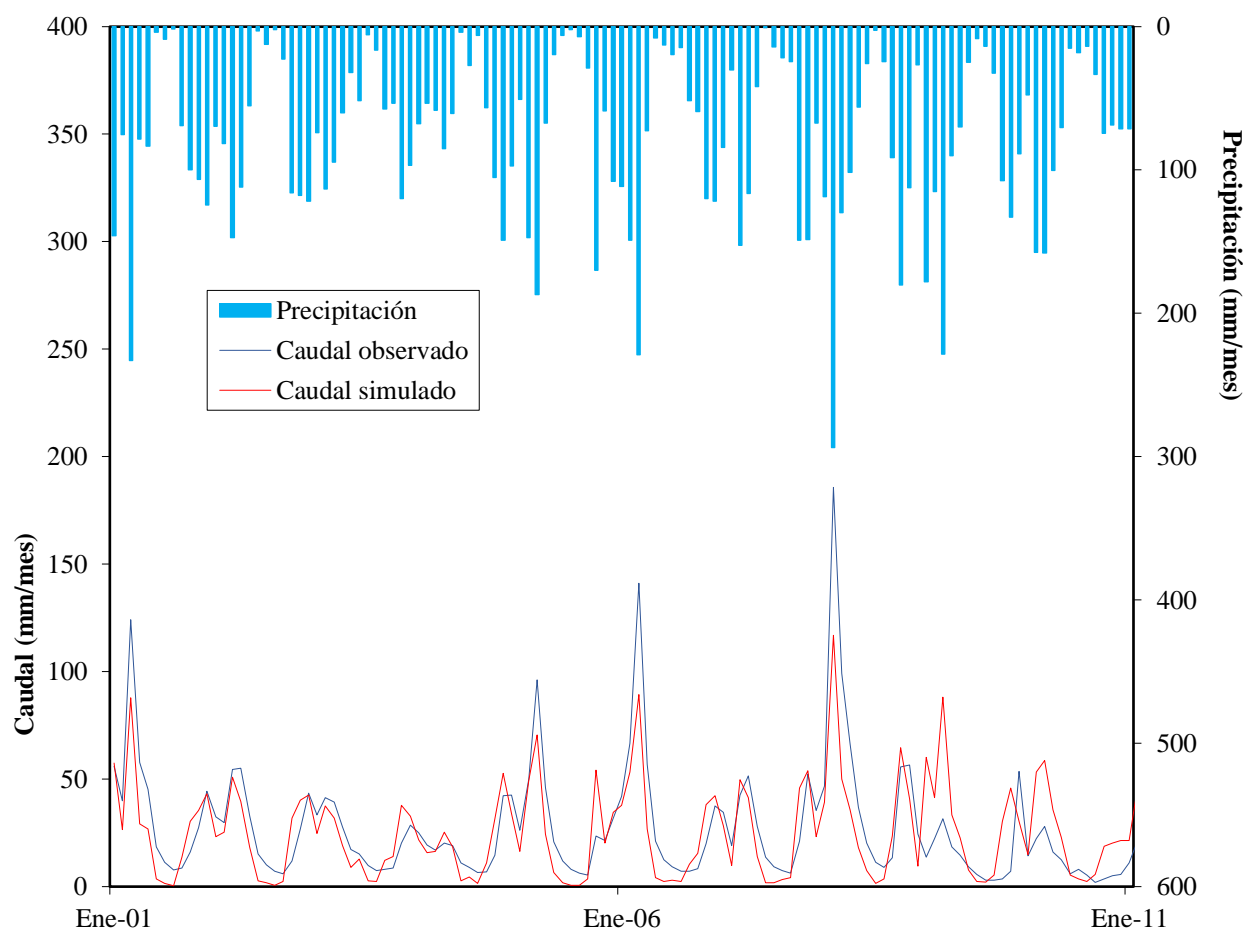
señalan que los valores de magnitud baja representan mayor precisión entre los caudales simulados y observados.

4.1.2. Validación del modelo

Con los parámetros calibrados en el periodo (1982-2000) se procedió a realizar la validación del modelo para el periodo (2001-2011).

Figura 17

Resultados en la etapa de validación periodo (2001-2011)

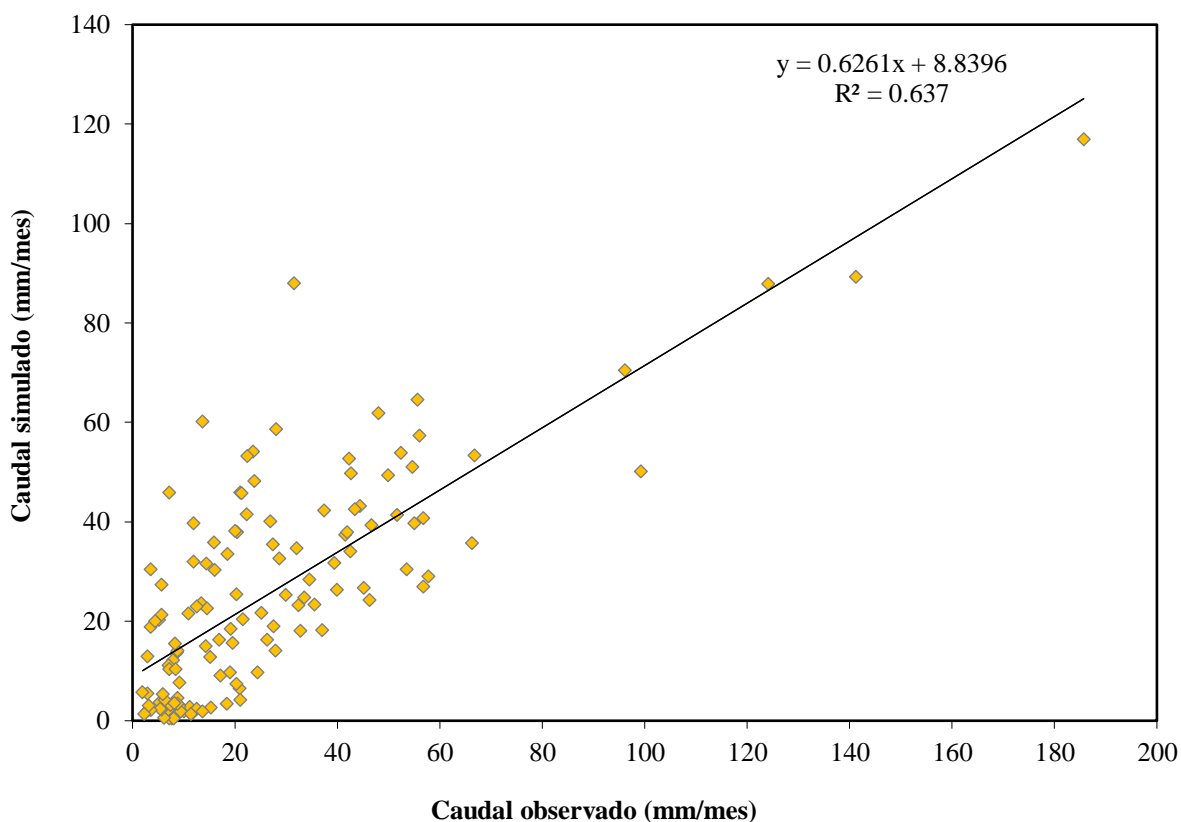


En la Figura 17 se observa los resultados de la simulación hidrológica en la etapa de validación (2001-2011) los cuales son bastante aceptables, puesto que los caudales simulados se ajustan a los caudales observados en la mayor parte del periodo de validación y los picos se atenúan

dando evidencia que hay una buena respuesta de los caudales simulados en esta etapa. El valor obtenido para el coeficiente de Nash fue de 0.591, lo cual es considerado como un ajuste “Bueno” según SENAMHI (2017) debido a que se encuentra en el rango 0.4 - 0.6. Finalmente, de acuerdo a los resultados mostrados y las métricas de eficiencia obtenidas, se aceptan los parámetros X_1 y X_2 para la cuenca del río Chotano.

Figura 18

Correlación lineal entre caudales observados y simulados para la cuenca del río Chotano



En la figura 18, se observa una correlación lineal entre el caudal simulado y caudal observado en la etapa de validación, obteniendo una correlación de 0,637. Moriasi et al. (2007) considera a este un valor de ajuste “Satisfactorio” puesto que el modelo tiene una precisión de pronóstico del caudal relativamente bueno debido que se encuentra entre el rango de 0.6 – 0.70;

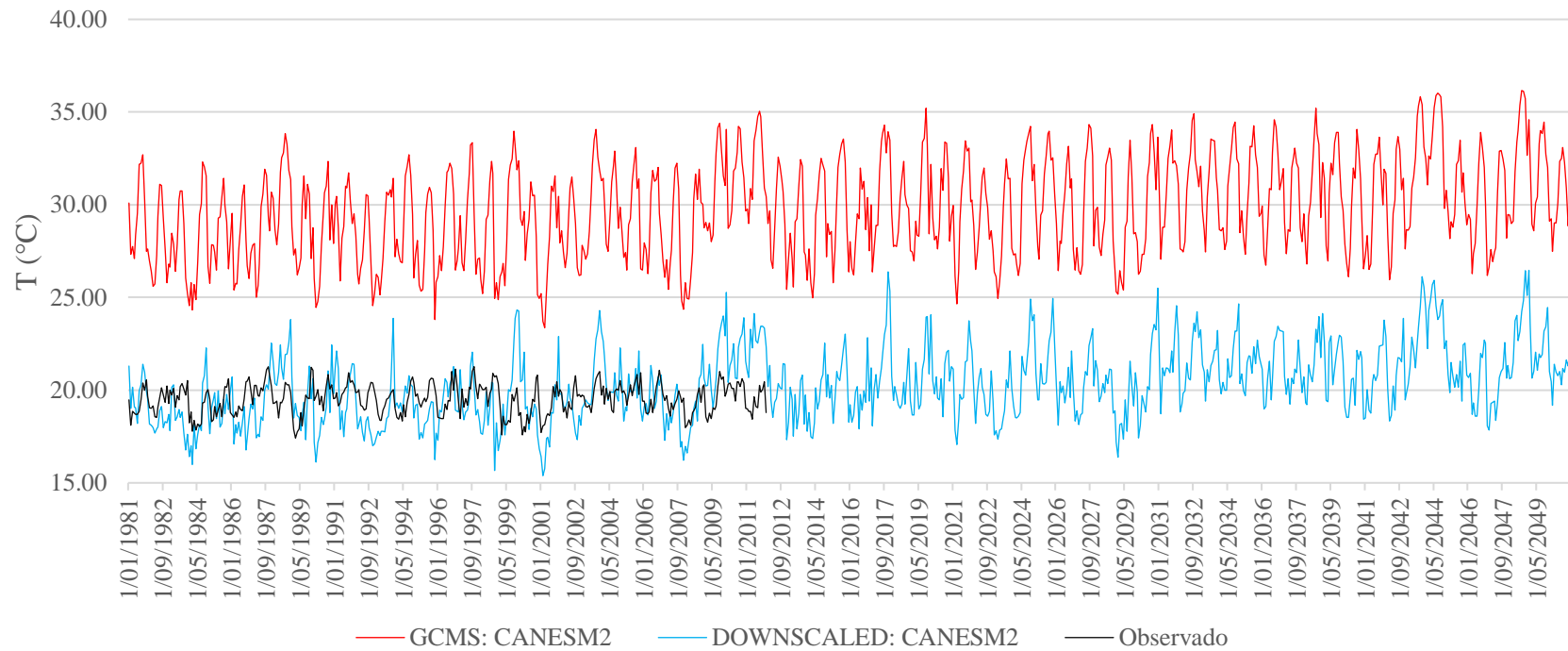
por otra parte, se evaluó al modelo con otro estadístico PBIAS arrojando un valor en la etapa de validación de -0.03 el cual está considerado como un valor “óptimo” (Corrado et al., 2013) debido que el resultado obtenido se acerca a cero.

4.2. Determinación de la incidencia de las variables climáticas en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050

En la determinación la incidencia de las variables climáticas en la disponibilidad del recurso hídrico se realizó inicialmente el escalamiento estadístico (downscaling) para las variables de temperatura (con el modelo climático global CanESM2) y precipitación (con el modelo climático global CNRM-CM5)

Figura 19

Aplicación del escalamiento lineal de la temperatura del GCM CanESM2, escenario RCP4.5

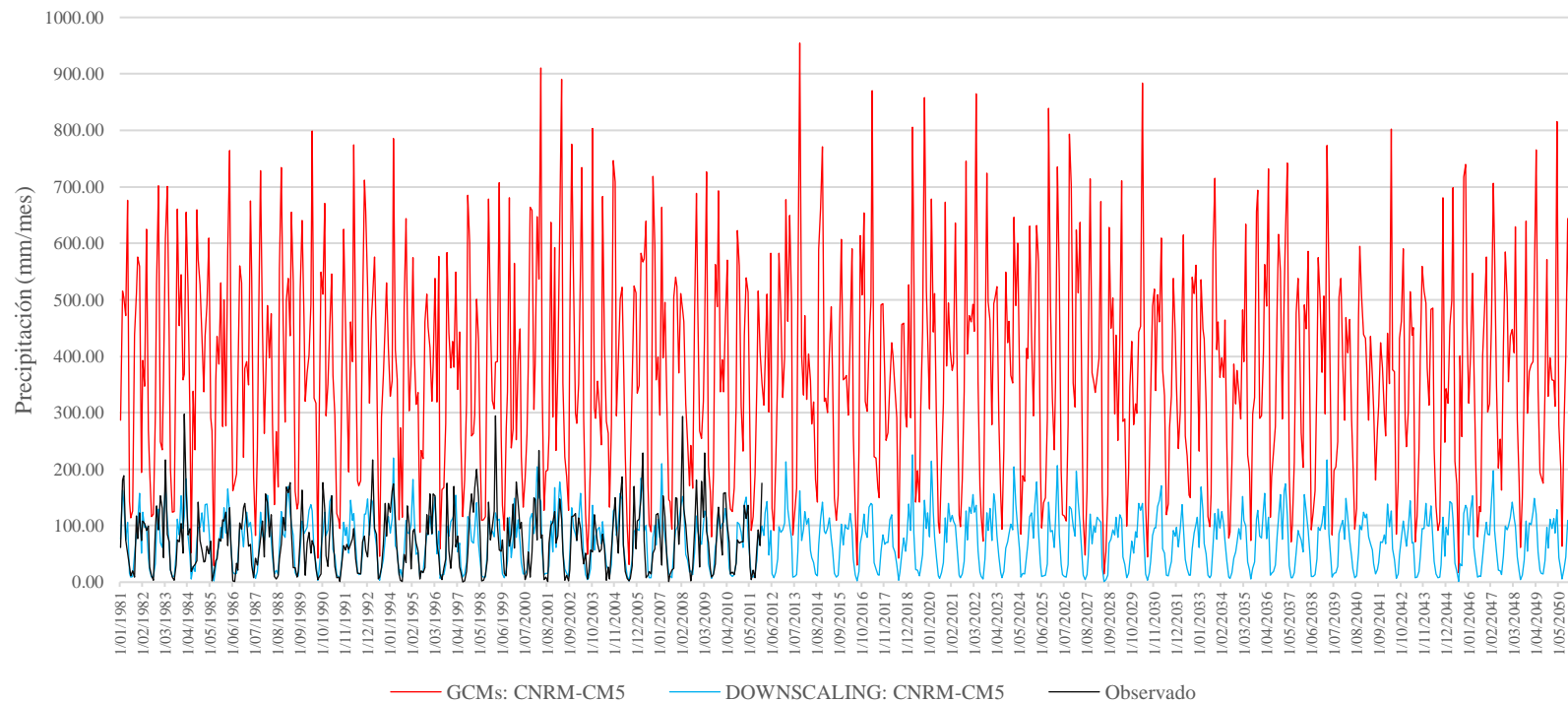


Se observa el histograma de color negro que representa la data observada para el periodo 1981-2011 extraída del producto Pisco. Asimismo, el histograma en color rojo es la data cruda del GCM y el histograma de color celeste es el resultado de la aplicación del escalamiento estadístico que comprende el periodo de análisis 1981-2050. Asimismo, antes de realizar el escalamiento estadístico el rango mínimo y máximo de la temperatura del GCM es de 23.37 a 36.16 °C, sin embargo, realizando el escalamiento estadístico la

temperatura presenta un rango mínimo y máximo 15.39 a 26.46 °C, en comparación con la temperatura observada que se encuentra en los rangos mínimos y máximos de 17.42 a 19.47 °C.

Figura 20

Aplicación de escalamiento lineal de la precipitación del GCM CNRM-CM5, escenario RCP4.5



El histograma de color negro es la data observada para el periodo 1981-2011, el histograma de color rojo es la data cruda del GCM y el histograma de color celeste es el resultado de la aplicación el escalamiento estadístico que comprende el periodo 1981-2050.

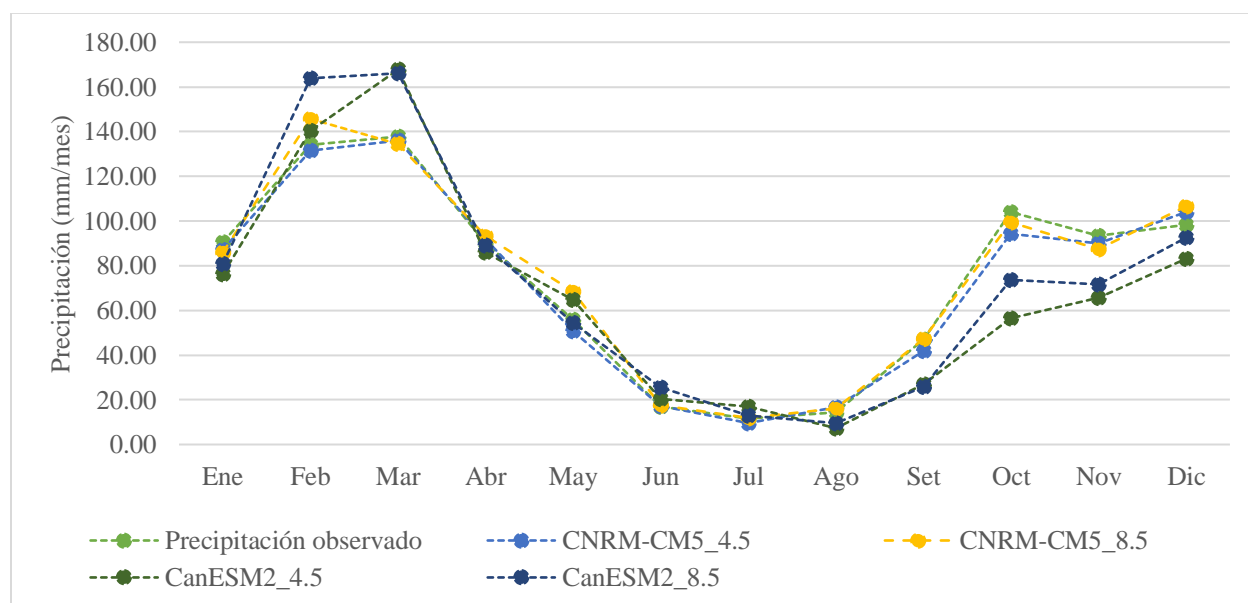
Asimismo, antes de realizar el escalamiento estadístico el rango mínimo y máximo de precipitación del GCM es de 14.47 a 954.48 mm, sin embargo, realizado escalamiento estadístico la precipitación presenta un rango mínimo y máximo de 1.35 a 225.46 mm, en comparación con la precipitación observada que se encuentra entre los rangos mínimo y máximo de 0.42 a 297.52 mm.

4.2.1. *Tendencia futura de la precipitación media mensual.*

En la figura 21 se muestra la tendencia futura de la precipitación media mensual para el periodo (2030-2050) provenientes de modelos climáticos globales (GCMs) Con respecto a la precipitación media mensual observada en los años (1981-2011). Los modelos climáticos globales usados son; CNRM-CM5 (Centro nacional de investigaciones meteorológicas – centro europeo de investigación y formación avanzada en cálculo científico) y CanESM2 (Centro canadiense de modelación y análisis del clima) en sus trayectorias de concentración representativas (RCPs) 4.5 y 8.5.

Figura 21

Comportamiento de la precipitación promedio mensual



En la figura 21 se muestra la curva multianual de los cambios a futuro de la precipitación con referencia a la precipitación promedio histórico.

Para el modelo global GCM-CNRM-CM5 en su escenario RCP4.5 y 8.5, en la época seca (junio, julio y agosto) para la precipitación se espera un incremento multianual en un 0.91% y 6.23% respectivamente. En cuanto a la época húmeda (diciembre – abril), se espera para la precipitación una reducción multianual en 0.10% para el escenario RCP8.5, por el contrario, para el escenario RCP8.5 la precipitación presentara un incremento multianual en 2.75%.

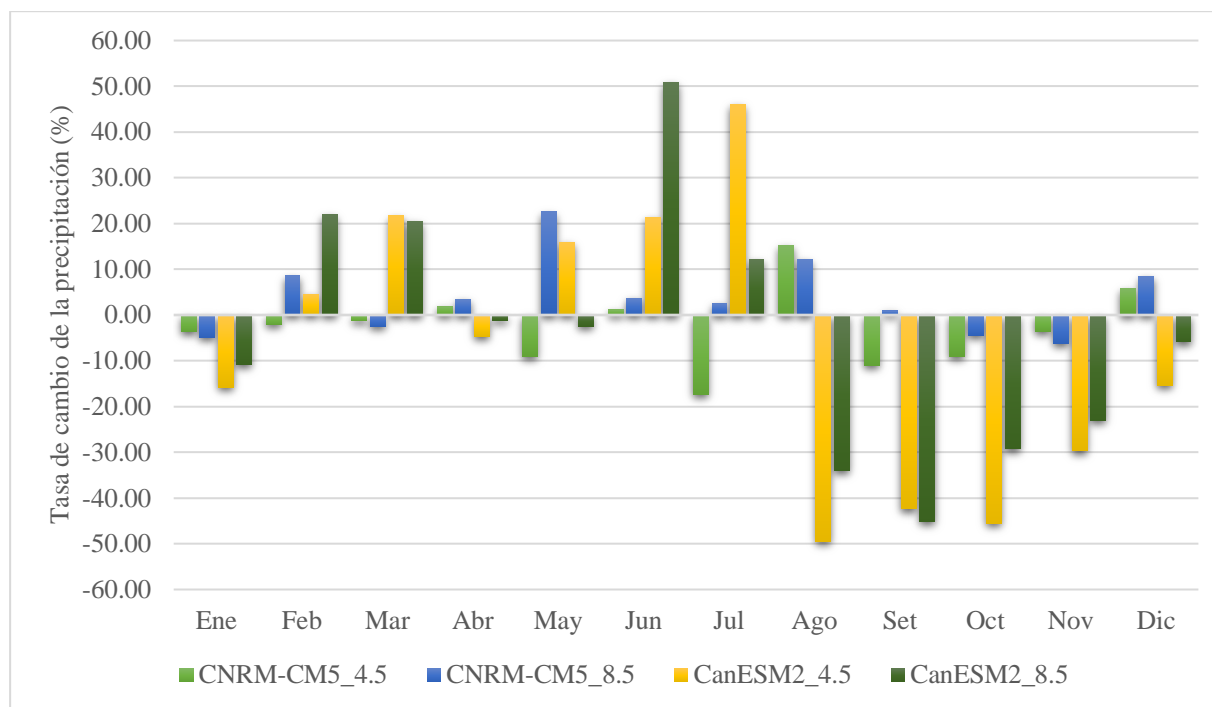
Para el GCM-CanESM2 en sus escenarios RCP4.5, en la época seca se espera para la precipitación un incremento multianual en 4.14% y para el escenario RCP 8.5 un incremento de multianual en un 11.81%. Asimismo, para la época húmeda se espera la precipitación presenta un incremento multianual en 0.44% en el escenario RCP 4.5 y en el escenario RCP 8.5 un incremento multianual de 7.49%.

Rodas, F. (2022). Obtuvo como resultados en la precipitación media mensual para el futuro cercano (2020-2040) y futuro mediano (2041-2060), periodos comparables para la presente investigación, presenta tendencia al incremento de la precipitación media mensual en los meses de época seca de hasta un 150% y en los meses épocas húmedas una reducción de hasta 36.7%, periodos húmedos y secos marcados por las tendencias actuales calculados desde los datos observados bajo el escenario RCP4.5 y 8.5.

López, J. (2022). Obtuvo como resultado de la precipitación total mensual futura presenta un comportamiento variable con tendencia a incremento, tanto para la época húmeda y seca para los escenarios de los 22 modelos climáticos globales evaluados.

Figura 22

Tasa de cambio en porcentaje de la precipitación futura (2030-2050)



En la figura 22 y en la tabla 14, se muestra la variación de la tasa de cambio en porcentaje de la precipitación futura para el periodo (2030-2050) con respecto a la precipitación observada (1981-2011).

En la época seca, el modelo GCM-CNRM-CM5 en su escenario RCP4.5 se espera una variación de incremento en la precipitación hasta en un 15.22% en el mes de agosto, por el contrario, en el mes de julio se esperaría una disminución hasta en un 17.33%; Asimismo en el escenario RCP8.5 podría existir una tendencia de incremento en la precipitación hasta en un 12.15% respectivamente. Del mismo modo para el modelo GCM-CanESM2 en su escenario RCP4.5 podría existir un incremento en la precipitación hasta en un 46% en el mes de Julio, por el contrario, en el mes de agosto podría existir una disminución hasta en un 49.49%. Asimismo, para el escenario RCP8.5 podría existir un incremento en la precipitación hasta en un 50.78%, por

el contrario, en el mes de agosto podría existir una disminución en la precipitación hasta en un 34.05%.

En cuanto en la época húmeda, el GCM-CNRM-CM5 en su escenario RCP4.5 se esperaría un incremento hasta en un 5.84%, en el mes de diciembre, por el contrario, en el mes de enero podría existir una reducción de la precipitación hasta en un 3.70%; Asimismo para el RCP8.5 podría existir un incremento en la precipitación en el mes de febrero hasta en un 8.59%, mientras que para el mes de enero se esperaría una reducción hasta 4.90%. Del mismo modo para el modelo GCM-CanESM2 en su escenario RCP4.5 podría existir una disminución en la precipitación de 15.77% en el mes de enero, por el contrario, en el mes de marzo podría existir un incremento en la precipitación hasta en un 21.74%; Asimismo para el RCP8.5 podría existir una disminución de la precipitación en el mes de enero hasta en un 10.81%, por el contrario, en el mes de febrero se esperaría un incremento en la precipitación hasta en un 22.06%.

Tabla 14

Valores de tasa de cambio en porcentaje (%) de la precipitación futura (2030-2050) con respecto al observado (1981 – 2011)

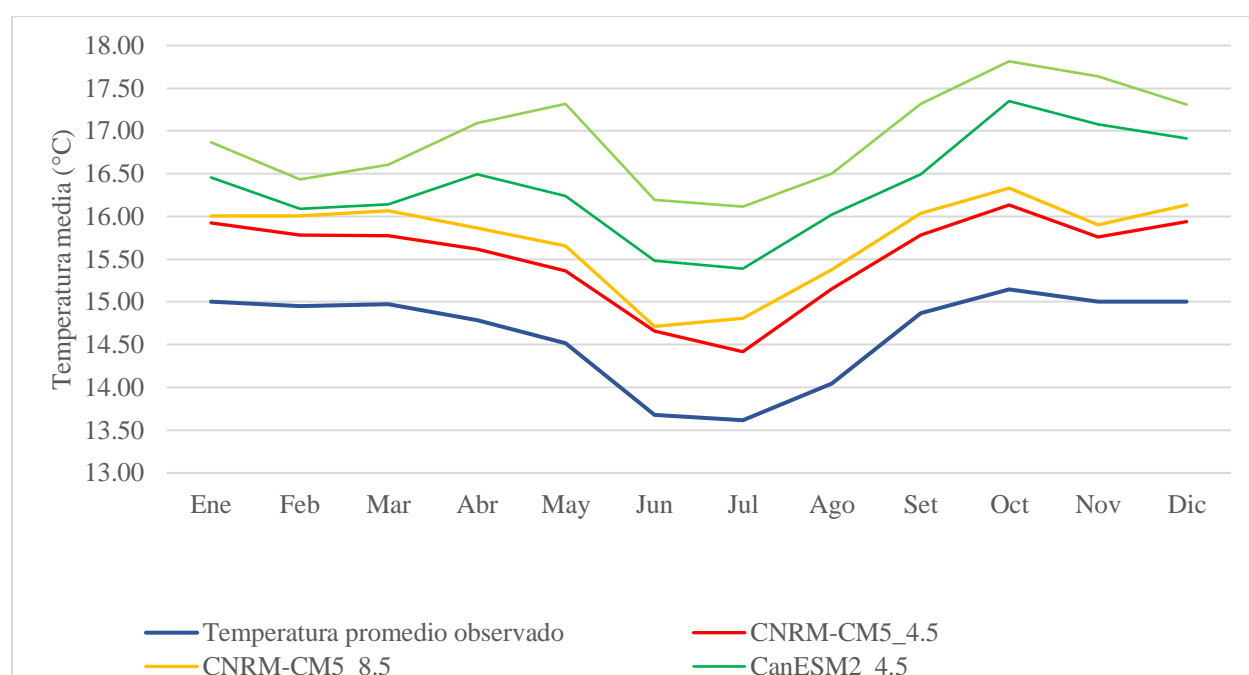
Mes	CNRM-CM5		CanESM2	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Enero	-3.70	-4.90	-15.77	-10.81
Febrero	-2.11	8.59	4.52	22.06
Marzo	-1.30	-2.42	21.74	20.55
Abril	1.83	3.40	-4.66	-1.23
Mayo	-9.16	22.53	15.86	-2.49
Junio	1.20	3.70	21.24	50.78
Julio	-17.33	2.52	46.00	12.13
Agosto	15.22	12.15	-49.49	-34.05
Septiembre	-11.05	0.98	-42.35	-45.10
Octubre	-9.16	-4.37	-45.54	-29.24
Noviembre	-3.63	-6.19	-29.62	-23.07
Diciembre	5.84	8.49	-15.38	-5.86

4.2.2. Tendencia de la temperatura media mensual.

Los cambios de la temperatura media futura para el periodo (2030-2050) en relación al observado (1981-2011), se muestra en la figura 23, en la cual se observa la variación estacional de esta variable para los modelos climáticos globales (GCMs), CNRM-CM5 y CanESM2 en sus RCP4.5 y 8.5.

Figura 23

Comportamiento de la temperatura media futura (2030 – 2050)



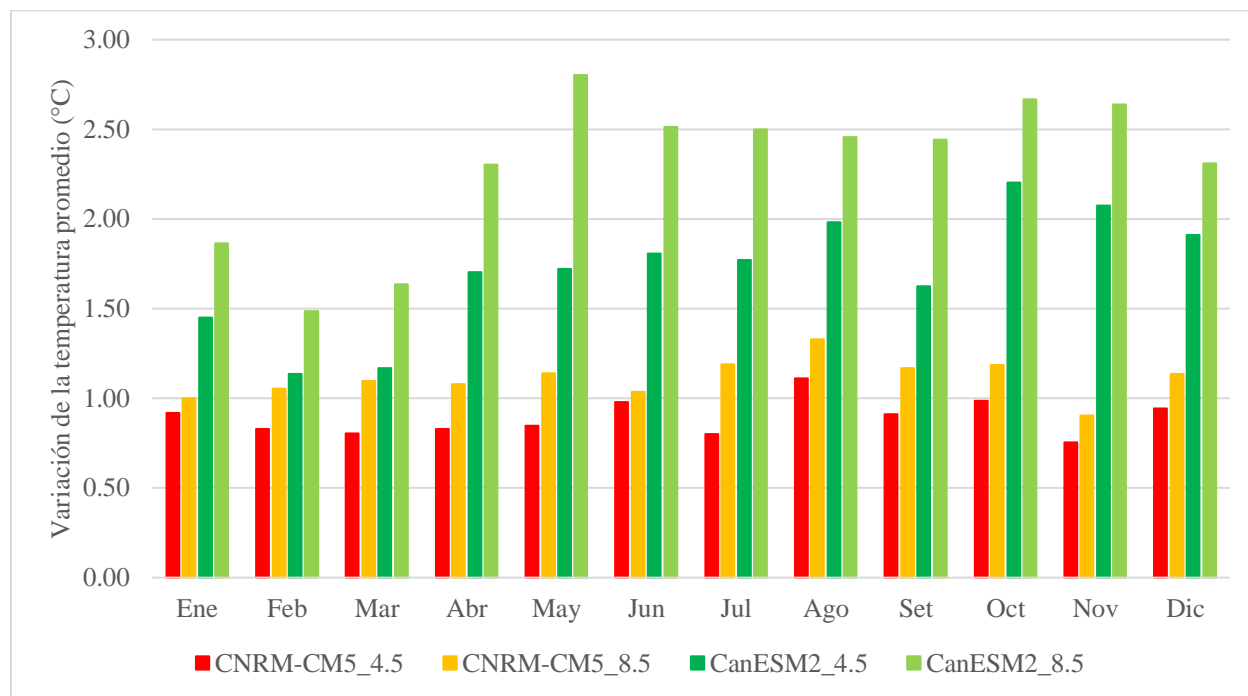
En la época seca el modelo GCM-CNRM-CM5 en su escenario RCP4.5 y 8.5, la temperatura media se incrementa hasta en 0.96°C y 1.18°C; del mismo modo para el GCM-CanESM2 en su escenario RCP4.5 y 8.5, la temperatura media se incrementa hasta en 1.85°C y 2.49°C.

En cuanto en la época húmeda el GCM-CNRM-CM5 en su escenario RCP4.5 y 8.5 la temperatura media se incrementa hasta en 0.86°C y 1.07°C; asimismo, para el GCM-CanESM2 en

su escenario RCP4.5 y 8.5 la temperatura media se incrementa hasta en 1.47°C y 1.92°C respectivamente.

Figura 24

Variación de la temperatura futura para los modelos climáticos globales periodo (2030-2050)



En la figura 24, se observa la tasa de cambio en grados Celsius (°C) de la temperatura media futura (2030-2050) con respecto a la observada (1981-2011); en la época seca en el GCM-CNRM-CM5 en su RCP4.5 en el mes de junio, julio y agosto podría existir un aumento de la temperatura media hasta en 1.11°C; asimismo en el RCP8.5 podría existir un incremento de 1.19°C en los respectivos meses de la época.

En cuanto a la época húmeda, en el GCM-CNRM-CM5 en su RCP4.5 en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril podría existir un aumento de la temperatura media hasta en un 0.94°C respectivamente; asimismo para el RCP8.5 podría existir un incremento en la temperatura media hasta en un 1.14°C. Del mismo modo para el modelo GCM-CanESM2 en su escenario RCP4.5 en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril podría existir un

aumento de la temperatura media hasta en un 1.91°C respectivamente; asimismo para el RCP8.5 podría existir un incremento en la temperatura media hasta en un 2.31°C, los valores se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Valores de la variación de la temperatura promedio (°C) periodo (2030-2050) con respecto al observado (1981 – 2011)

Mes	CNRM-CM5		CANESM2	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Enero	0.92	1.00	1.45	1.86
Febrero	0.83	1.05	1.14	1.48
Marzo	0.81	1.10	1.17	1,64
Abril	0.83	1.08	1.71	2.30.
Mayo	0.85	1.14	1.72	2.80
Junio	0.98	1.04	1.81	2.51
Julio	0.80	1.19	1.77	2.50
Agosto	1.11	1.33	1.98	2.46
Septiembre	0.91	1.17	1.62	2.44
Octubre	0.99	1.18	2.20	2.67
Noviembre	0.76	0.90	2.07	2.64
Diciembre	0.94	1.14	1.91	2.31

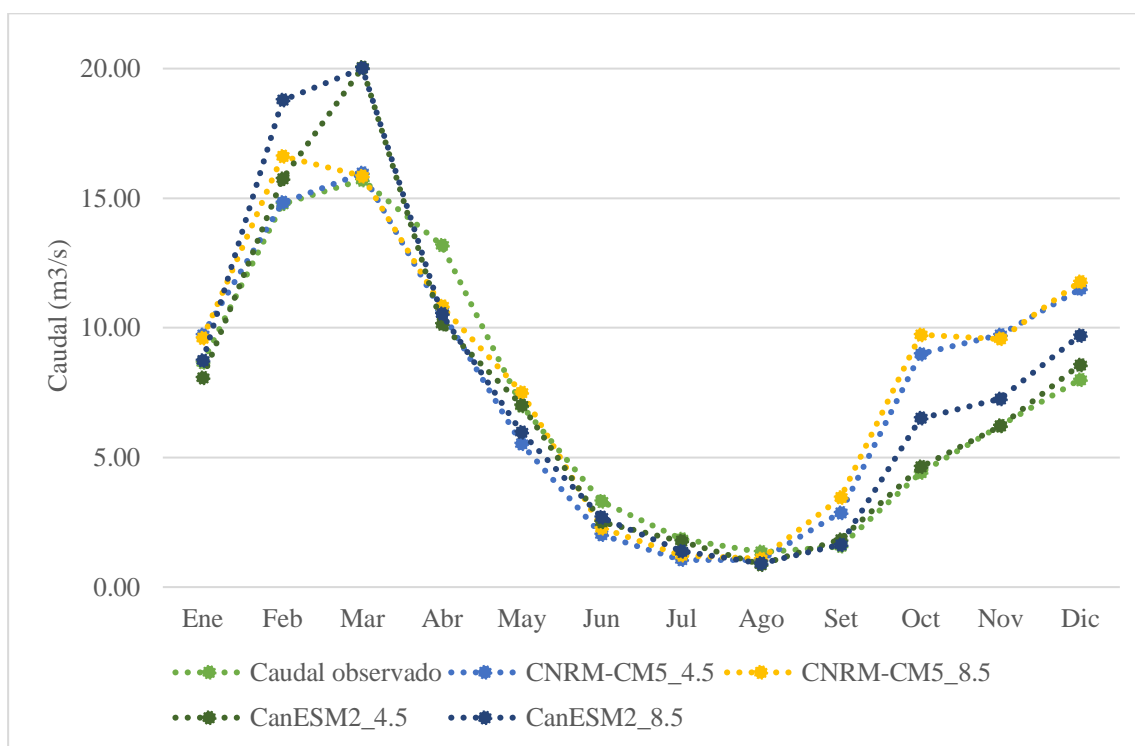
Según Osorio et al. (2022) la temperatura tiende a aumentar como efecto del cambio climático; esto concuerda con los resultados obtenidos para la cuenca en estudio donde para todos los modelos analizados la temperatura tiene una tasa de cambio positiva que va desde un 0.76 °C como valor mínimo obtenido (modelo CNRM-CM5 en su escenario RCP4.5) a un 2.8 °C como valor máximo (modelo CANESM2 en su escenario RCP8.5), esto indica que se provee un calentamiento a futuro en toda la cuenca.

4.3. Determinación de la incidencia de la variación del caudal en la disponibilidad del recurso hídrico, para los periodos 1981-2011 y 2030-2050

Debido a que la disponibilidad hídrica está relacionada directamente con las variables hidrometeorológicas medido a través del caudal y la temperatura. En esta sección se muestra los cambios del caudal medio mensual futuro para el periodo (2030-2050) en relación al caudal medio observado en el periodo (1981-2011) para todos los meses del año, estos cambios se muestran en la figura 25.

Figura 25

Comportamiento del caudal medio mensual futuro (2030 – 2050)



Se evidencia que los caudales medios multimensuales para el modelo CNRM-CM5 en su RCP4.5 y 8.5 se ajusta mejor con respecto a los caudales observados, con una ligera disminución en los meses secos y un incremento en los meses húmedos. Asimismo, para el modelo CanESM2

en su RCP4.5 y 8.5 tienen diferencias marcadas pues se evidencia un pico de incremento en los meses de época húmeda y una ligera disminución en los meses de época seca.

Tabla 16

Variación del caudal para la época seca y húmeda

Mes	Caudal observado	CNRM-CM5_4.5	CNRM-CM5_8.5	CanESM2_4.5	CanESM2_8.5
Ene	8.665	9.727	9.603	8.075	8.736
Feb	14.774	14.822	16.621	15.747	18.781
Mar	15.709	15.958	15.850	20.038	20.007
Abr	13.184	10.626	10.824	10.140	10.535
May	6.986	5.521	7.509	7.016	5.964
Jun	3.294	2.016	2.280	2.514	2.684
Jul	1.854	1.050	1.220	1.764	1.385
Ago	1.343	1.045	1.095	0.873	0.911
Set	1.570	2.863	3.447	1.825	1.630
Oct	4.411	8.984	9.736	4.631	6.509
Nov	6.227	9.735	9.575	6.214	7.262
Dic	7.997	11.490	11.773	8.572	9.710
época seca (Qobs/GCM)	$\Delta \text{ m}^3/\text{s}$ $\Delta \%$	1.370 -36.676	1.532 -29.214	1.717 -20.660	1.660 -23.283
época húmeda (Qobs/GCM)	$\Delta \text{ m}^3/\text{s}$ $\Delta \%$	9.970 12.832	10.549 19.385	9.140 3.438	9.904 12.087

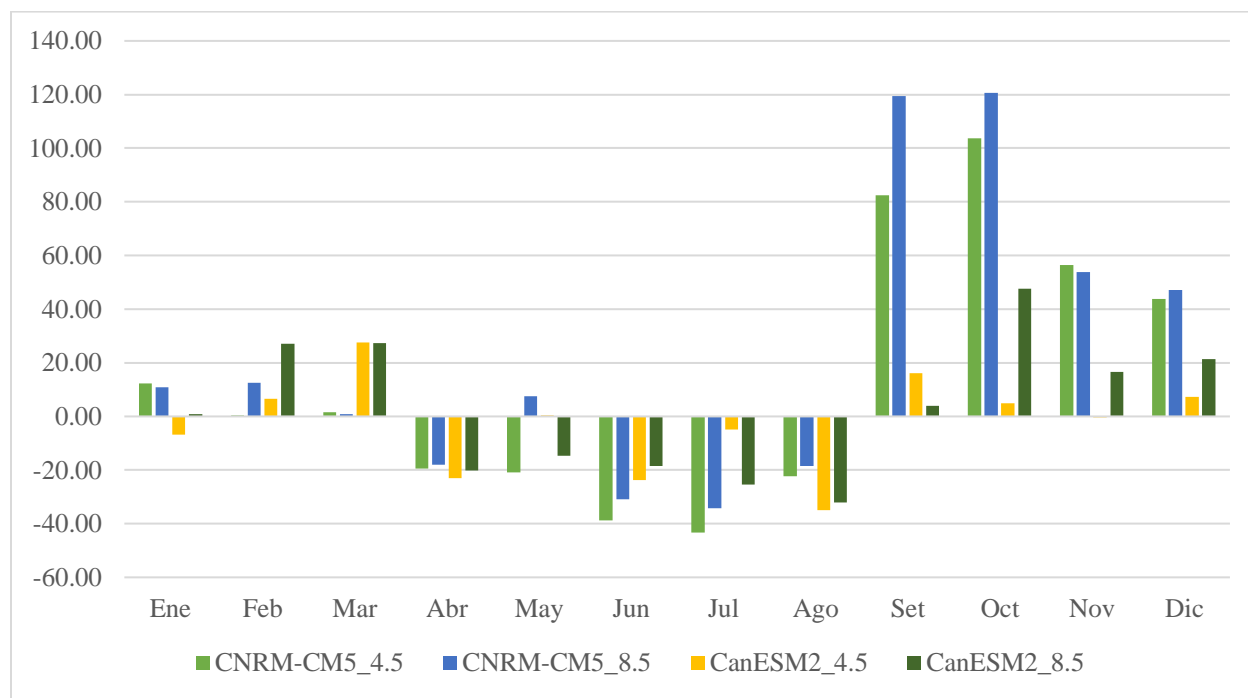
En la tabla 16, se detalla la variación estacional del caudal promedio mensual comparando los datos observados en la estación de aforos y los modelos climáticos globales (GCMs), CNRM-CM5 y CanESM2 en los escenarios RCP4.5 y 8.5.

En la época seca, el modelo GM-CNRM-CM5 en sus escenarios RCP4.5 y 8.5, se esperan que el caudal promedio multianual disminuya hasta en un 36.676% y 29.214% respectivamente a los escenarios; del mismo modo para el modelo GCM-CanESM2 en su escenario RCP4.5, se esperan que el caudal disminuya en hasta en 20.660% y para el escenario RCP8.5 disminuya en un 23.283%.

En cuanto en la época húmeda, el GCM-CNRM-CM5 en los escenarios RCP4.5 y 8.5 se espera que el caudal en el promedio multianual tiende a aumentar en hasta en un 12.832% y 19.385%; asimismo, para el GCM-CanESM2 en sus escenarios RCP4.5 y 8.5, se esperan que el caudal tiende a aumentar hasta en un 3.438% y 12.087% respectivamente.

Figura 26

Tasa de cambio en porcentaje del caudal futuro periodo (2030-2050)



La figura 26, evalúa la tasa de cambio en porcentaje del caudal multimensual futuro (2030-2050) con respecto al caudal observado (1981-2011).

En la época seca (junio, julio y agosto) en el GCM-CNRM-CM5 en su RCP4.5, se espera una disminución en el caudal medio mensual hasta en un 43.4% (Julio). Asimismo, en la misma época para el RCP8.5 se espera una disminución del caudal hasta en un 32.18% (junio) y para el modelo GCM-CanESM2 en su escenario RCP4.5 podría existir un incremento en el caudal hasta en un 35.01% (agosto). Para el RCP8.5 se espera un incremento en el caudal hasta en un 32.18% (agosto).

En la época húmeda, en el GCM-CNRM-CM5 en su RCP4.5 según las proyecciones se espera un aumento en el caudal medio mensual hasta en un 43.7% (diciembre). Asimismo, para el RCP8.5 podría existir un aumento del caudal medio mensual 47.2% (diciembre). Del mismo modo para el modelo GCM-CanESM2 en su escenario RCP4.5 podría existir un aumento del caudal medio mensual de hasta en un 27.6% (marzo). Para el RCP8.5 según proyecciones se espera que el caudal medio mensual aumente en un 27.4% (marzo).

Tabla 17

Valores de la tasa de cambio en porcentaje del caudal futuro periodo (2030-2050) con respecto al observado (1981 – 2011)

Mes	CNRM-CM5		CANESM2	
	RCP4.5 %	RCP8.5 %	RCP4.5 %	RCP8.5 %
Ene	12.3	10.8	-6.8	0.8
Feb	0.3	12.5	6.6	27.1
Mar	1.6	0.9	27.6	27.4
Abr	-19.4	-17.9	-23.1	-20.1
May	-21.0	7.5	0.4	-14.6
Jun	-38.8	-30.8	-23.7	-18.5
Jul	-43.4	-34.2	-4.9	-25.3
Ago	-22.2	-18.5	-35.0	-32.2
Set	82.4	119.5	16.2	3.8
Oct	103.7	120.7	5.0	47.6
Nov	56.3	53.8	-0.2	16.6
Dic	43.7	47.2	7.2	21.4

Según tabla 17 se interpreta que para los dos escenarios y los dos modelos globales se espera para el periodo (2030-2050) en época seca, se espera una disminución de hasta un 43.4% (0.804 m³/s – 804 l/s) y en época húmeda se espera un aumento de hasta 47.2% (3.77 m³/s- 3770 l/s)

Según Coulibaly et al. (2018), Mena et al. (2020) y Rodas (2022) en sus cuencas de estudio concluyen que en un futuro los caudales medios multianuales disminuyan en hasta un 8.8%, mientras que, en la comparación de resultados multianuales del caudal medio, los resultados difieren porque siguen tendencias distintas, debido a que en la cuenca del río Chotano se espera un aumento de hasta 6.07% en el caudal medio anual proyectado con los dos modelos globales y dos escenarios de proyección. Esto se debería al incremento de las temperaturas futuras, lo que provocaría el incremento de la evapotranspiración, precipitación y por ende se vería reflejado también en el incremento del caudal. Esto es un claro ejemplo de que la cuenca del río Chotano se va enfrentando a un periodo de calentamiento climático lo que representa un consecuente aumento de fenómenos naturales. Cuando en el presente estudio se analizó los resultados por estacionalidad en relación con los resultados de los estudios realizados por los autores anteriormente mencionados, los resultados siguen la misma tendencia, aumento de caudales medios mensuales en época húmeda y disminución en época seca.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Respecto de la evaluación del modelo GR2M, los parámetros obtenidos fueron $X1 = 5.38$ mm y $X2 = 1.65$, mismos que se evaluaron con la métrica NSE, obteniendo un valor de 0.74 siendo este un valor “Muy bueno” para la etapa de calibración. En la validación se obtuvo un NSE de 0.59 siendo un valor “Bueno”, según Moriasi et al. (2007). Concluyéndose que el modelo es apto para predecir los caudales medios mensuales en la cuenca del río Chotano.
- Los modelos CNRM-CM5 y CanESM2 para los escenarios RCPs 4.5 y 8.5. Se espera en la precipitación un aumento multianual hasta de hasta 7.49% para el periodo 2030-2050 en relación a los datos de precipitación provenientes del producto PISCO en la cuenca del río Chotano. Así mismo, se concluye en cuanto a la temperatura para los modelos CNRM-CM5 y CanESM2 para los escenarios RCPs 4.5 y 8.5 para el periodo 2030-2050, se espera un incremento promedio de 1.5°C , representado claramente alteraciones en el balance hídrico y consecuentemente en la disponibilidad hídrica.
- Respecto a las variaciones del caudal para el periodo futuro (2030-2050), se evaluó usando los modelos climáticos globales CNRM-CM5 y CanESM2 en los escenarios RCP 4.5 y 8.5. En cuanto a la estacionalidad de los caudales mensuales se mantendrían, mientras que en las variaciones multianuales se espera en época seca una disminución de hasta un 43.4% ($0.804 \text{ m}^3/\text{s} - 804 \text{ l/s}$) y en época húmeda se espera un aumento de hasta 120.74% ($5.325 \text{ m}^3/\text{s} - 5325 \text{ l/s}$).

5.2. Recomendaciones

Concluido la investigación, se recomienda considerar:

- Para obtener mejores resultados en investigaciones futuras se sugiere evaluar el estado actual del funcionamiento de la estación hidrométrica Chotano Lajas, realizar los mantenimientos periódicos correspondiente a su sección de control hidrométrico. Con la finalidad de que se pueda generar información hidrométrica de calidad que posteriormente sea empleada en el modelamiento hidrológico.
- Para la evaluación de variables climáticas es necesario realizar una recopilación de trabajos de investigación previos, donde se hayan usado los modelos climáticos globales con la finalidad de poder identificar los modelos más convenientes que puedan adecuarse a la zona de estudio. Además, se sugiere evaluar otros métodos de corrección de sesgo para corregir los valores de los GCMs, reduciendo la incertidumbre con respecto a los datos reales.
- Se recomienda continuar investigando el cambio climático en el ámbito de la ingeniería y la ciencia, con la finalidad de comprender su impacto en las variaciones a mediano y largo plazo de las variables hidrometeorológicas que describen la disponibilidad hídrica en las cuencas hidrográficas.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, K. F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A. M., Allen, J. M., Horton, R., & Anyah, R. (2013). Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast. *Global and Planetary Change*, 100, 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.003>
- Allani, M., Mezzi, R., Béji, R., Joumade, F., Hamza, M., & Sahli, A. (2020). Impact of future climate change on water supply and irrigation demand in a small mediterranean catchment. Case study: Nebhana dam system, Tunisia. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.131>
- Aybar Camacho, C., Waldo Lavado, C., Huerta Julca, A., Fernández Palomino, C., Vega Jácome, F., & Felipe Obando, O. G. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Senamhi, 1–22. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/260/Uso-producto-grillado-Pisco-precipitación-estudios-investigaciones-sistemas-operacionales-monitoreo-pronóstico-Hidrometeorológico_2017.
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Larry W, M. (1994). *Hidrología aplicada*.
- Chylek, P., Li, J., Dubey, M. K., Wang, M., & Lesins, G. (2011). Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11(8), 22893–22907. <https://doi.org/10.5194/acpd-11-22893-2011>
- Corrado, C., Bruggeman, A., Hadjinicolaou, P., Pashiardis, S., & Lange, M. (2013). Evaluation of interpolation techniques for the creation of gridded daily precipitation (1 × 1 km²); Cyprus, 1980–2010. 693–712. <https://doi.org/10.1002/2013JD020611>. Received

- Correa, K., Avalos, G., Cubas, F., De la Cruz, G., & Díaz, A. (2019). Orientaciones para el análisis del clima y determinación de los peligros asociados al cambio climático. 0–29.
- Coulibaly, N., Coulibaly, T. J. H., Mpakama, Z., & Savané, I. (2018). The impact of climate change on water resource availability in a trans-boundary Basin in West Africa: The case of Sassandra. *Hydrology*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology5010012>
- Del Aguila, S. (2018). Modelación higrológica con GR2M y pronóstico climático al 2100 en la cuenca del río Santa - Perú. 1–2. http://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2018/11/T0042_DELAGUILA.pdf
- Fang, G., Yang, J., Chen, Y., & Zammit, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2547–2559. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>
- Faustino, J. (2000). Manual de manejo de cuencas. San Salvador, SV, 107.
- Ficklin, D. L., Stewart, I. T., & Maurer, E. P. (2013). Effects of projected climate change on the hydrology in the Mono Lake Basin, California. *Climatic Change*, 116(1), 111–131. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0566-6>
- Hämmerly, R. del C. (2001). Modelación de la Evapotranspiración con Métodos De Balance De Agua.
- Hincapie, J., Mejia, C., & Prieto, L. (2019). Climate change and water resources in Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, 22(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368>
- Huerta, A., Aybar, C., & Lavado-Casimiro, W. (2018). PISCO temperatura v. 1.1 (PISCO t v 1.1). *Senamhi - Dhi-2018*, 1.1, 1–15.

http://iridl.ldeo.columbia.edu/documentation/.pisco/.PISCOt_report.pdf

IPCC. (2014a). Anexo II: Glosario. Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II y III Al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático, 127–141.

IPCC. (2014b). Informe Del Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre El Cambio Climático. In Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

Joo, J., Zhang, A., Li, X., & Zheng, C. (2017). Hydrological responses to climate shifts for a minimally disturbed mountainous watershed in northwestern China. 6667. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1316851>

Koray K, Y., Jasper A, V., Hoshin V, G., & Soroosh, S. (1995). Chapter NO 3 Model Calibration in Watershed Hydrology. *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*, 53–105.

Lavado, W., Labat, D., Guyot, J., & Ardoin-Bardin, S. (2011). Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon-Andes basin. *Hydrological Processes*, 25(24), 3721–3734. <https://doi.org/10.1002/hyp.8097>

Lenderink, G., Buishand, A., & Van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145–1159. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Lexer, M. J., & Marchetti, M. (2010). Forest Ecology and Management Climate change impacts , adaptive capacity , and vulnerability of European forest ecosystems. 259, 698–709.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>

López, F., Nava, Y., Rojas, M., & Gonzáles, D. (2022). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC): Guía sobre escenarios de cambio climático. *Inecc*, 1, 3–59.

López, J. (2022). Efectos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica para fines de abastecimiento poblacional de la ciudad de Huánuco [Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/24559?mode=full>

Luebert, F., & Pliscoff, P. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones geográficas*, (44), ág-41.

Lujano, E. (2013). Caracterización hidroclimática, modelización hidrológica y eventos extremos en las cuencas de los ríos Coata e Ilave.

McCabe, G. J., & Wolock, D. M. (2011). Independent effects of temperature and precipitation on modeled runoff in the conterminous United States. *Water Resources Research*, 47(11). <https://doi.org/10.1029/2011WR010630>

Martínez, A., Trucíos, R., Rodríguez, V., Villanueva, J., & Estrada, J. (2023). The Impact of Climate Change on Evapotranspiration and Flow in a Major Basin in Northern Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/su15010847>

Mena, D., Cañón, M., & Suárez, A. (2020). Modelación de los impactos de los escenarios de cambio climático en la cuenca del río Pamplonita en Norte de Santander. *Revista EIA*, 17(33), 182–193. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372020000100182&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/eia/v17n33/2463-0950-eia-17-33-182.pdf

Mendez, M., Calvo, L., Imbach, P., Maathuis, B., Hein, D., Hidalgo, J., & Alvarado, L. (2022). Hydrological Response of Tropical Catchments to Climate Change as Modeled by the GR2M

- Model: A Case Study in Costa Rica. *Sustainability* (Switzerland), 14(24).
<https://doi.org/10.3390/su142416938>
- Mirosław, D., & Okruazko, T. (2011). Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment. *Environmental Science and Policy*, 61, 194–203.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>
- 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.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., ... Zurek, M. (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies : IPCC Expert Meeting Report : 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, the Netherlands. In Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- 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>
- Ochoa, R. F. L., Maurtua, D. M. P., & Velarde, & E. A. C. (2019). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático. 21(3), 182–193.
- Okkan, U., & Fistikoglu, O. (2014). Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1), 343–361. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1005-y>

- Osorio, K., Ramos, L., & Velásquez, T. (2022). Proyección de los impactos del cambio climático en el caudal de la cuenca del río Lurín-Perú, bajo escenarios del CMIP5-RCP. *Idesia (Arica)*, 40(1), 101–114. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292022000100101>
- Ouhamdouch, S., Bahir, M., Ouazar, D., Goumih, A., & Zouari, K. (2020). Assessment the climate change impact on the future evapotranspiration and flows from a semi-arid environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(2). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5065-x>
- Pagano, T., Hapuarachchi, P., & Wang, Q. J. (2009). Development and Testing of a Multi- Model Rainfall-Runoff Streamflow Forecasting Application. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship, December. https://www.google.com.au/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FThomas_Pagano%2Fpublication%2F255738174_Development_and_testing_of_a_multi-model_rainfall-runoff_streamflow_f
- Pérez, J, Menéndez, M., & Méndez, F. (2012). Habilidad de los modelos climáticos globales para el desarrollo de proyecciones regionales. VIII Congreso de La Asociación Española de Climatología Celebrado En Salamanca, 187–196. <http://cera-www.dkrz.de/CERA/>
- Pérez, Julio, Senent, J., Segura, F., Pulido, D., & Srinivasan, R. (2019). Evaluating hydrological models for deriving water resources in peninsular Spain. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10), 1–36. <https://doi.org/10.3390/su11102872>
- Rau, P. (2017). Alcances sobre el cambio climático y lectura de datos CMIP5. <http://pedrorau.blogspot.com/2017/01/cambioclimaticocmip5.html>
- Real Academia Española. (2023). Temperatura, Definición, Diccionario de la lengua española - RAE - ASALE. <https://dle.rae.es/temperatura>

- Reshmidevi, T. V., Nagesh Kumar, D., Mehrotra, R., & Sharma, A. (2018). Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCMs. *Journal of Hydrology*, 556, 1192–1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.016>
- Refsgaard, J. C., & Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 32(7), 2189–2202. <https://doi.org/10.1029/96WR00896>
- Rodas, F. (2022). Evaluación del cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina - Tacna. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rwasoka, D. T., Madamombe, C. E., Gumindoga, W., & Kabobah, A. T. (2013). Calibration , validation , parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2 – parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe. *JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EAR*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.015>
- Santos, D. (2016). Oferta hídrica superficial del río Coata - Puno bajo escenarios de cambio climático. 86. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-36.pdf>
- SENAMHI. (2010). Disponibilidad hídrica. https://idesepe.senamhi.gob.pe/portalidesepe/idesepe_tema_cambio_climatico_disponibilidad_hidrica_analisis_comparativo.jsp
- SENAMHI. (2014). Generación de una base de datos de caudales grillado y de alta resolución a nivel nacional (1981 – 2014).
- SENAMHI. (2017). Modelamiento hidrológico para pronóstico estacional de caudales del río Ramis. *Syria Studies*, 7(1), 37–72. https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civil

- wars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625
- SiAR. (1999). Evapotranspiración. 22–24. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/Evapotranspiración_tcm30-82951.pdf
- Tébar Juan, E. (2017). Evaluación de la seguridad de una presa de materiales sueltos en el río San Juan, en la provincia de San Juan (República Dominicana).
- Thorntwaite, C., Wilm, H., & Otros. (1944). Reports, hydrology. 683–693.
- Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). A review of downscaling methods for climate change projections
- United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD, September, 1–42.
- UNESCO/WMO Glosario Internacional de Hidrología (2nd revised ed., 1992)
- UNFCCC. (2006). Manual Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 72(3), 247. <http://www.un.org/es/>
- Velásquez L, M., & León K, V. (2022). Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir. 7.
- Vera Arévalo, H., & Obando, O. F. (2011). Modelización de los caudales medios mensuales en la cuenca del río Ramis Monthly means flow modeling into Ramis basin. 124(3), 116–124.
- Vera, C., & Camilloni, I. (2019). Ciclo del agua. Revista de Obras Publicas, 166(3606), 60–67.
- Villalodas, R. (2008). Hidrología. https://www.academia.edu/36851515/Hidrologia_I_y_II_Ruben_Villo
- Villegas, J. A., & Torres, B. E. (1977). Evapotranspiracion del cultivo. Serie Didactica, Facultad de Agronomia y Zootecnica, Universidad Nacional de Tucuman, 45.
- Vo, N., Gourbesville, P., Vu, M., Raghavan, S., & Liong, S. (2016). A deterministic hydrological

- approach to estimate climate change impact on river flow: Vu Gia-Thu Bon catchment, Vietnam. *Journal of Hydro-Environment Research*, 11(November), 59–74.
<https://doi.org/10.1016/j.jher.2015.11.001>
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M. P., Planton, S., Saint-Martin, D., ... Chauvin, F. (2013). The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40(9–10), 2091–2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>
- Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. O. (2004). *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. Analysis*, 27(August), 1–27.
http://www.ctn.etsmtl.ca/cours/mgc921/dgm_no2_v1_09_2004.pdf
- Wilby, R. L., Wigley, T. M. L., Conway, D., Jones, P. D., Hewitson, B. C., Main, J., & Wilks, D. S. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research*, 34(11), 2995–3008.
<https://doi.org/10.1029/98WR02577>
- Yang, M., & Chun-kun, L. (2011). *Procedia Engineering* Impact analysis of climate change on water resources. 24, 643–648. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2710>