



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua

Carrera de Hidrología

Evaluación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático en la microcuenca del río Colonso, Ecuador

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:
INGENIERO EN CIENCIAS DEL AGUA

AUTOR

VICTOR GERMAN SEGARRA LINDAO

Napo – Ecuador

2022

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 25 de enero de 2022


Yo, Víctor German Segarra Lindao con documento de identidad N° 0928647510, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero/a en Ciencias del Agua son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,

Firma:



Victor German Segarra Lindao

Certificado de dirección de trabajo de integración curricular

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Evaluación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático en la microcuenca del río Colonso, Ecuador”, en la modalidad de: proyecto de investigación en formato tesis, fue realizado por: Victor German Segarra Lindao, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 25 de enero de 2022

Firma:



Firmado electrónicamente por:

**EDGAR FABIAN
ESPITIA
SARMIENTO**

.....
Edgar Fabian Espitia

SarmientoC.I: 1758828709

AGRADECIMIENTOS

Agradecerles a mis docentes y en especial a mi tutor por su ayuda, paciencia y dedicación. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para redactar lo que hoy he logrado.

A mi hija, papá, mamá y hermano por darme ánimo y apoyo durante este proceso. Ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida.

A mis amigos que me acompañaron desde siempre, sobre todo a mi gran amiga Gisella por siempre alentarme, apoyarme y aconsejarme.

Al GAD Municipal de Tena y los operadores de la planta de tratamiento de agua potable Colonso, por permitirme realizar mediciones del caudal del río Colonso cada semana.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi hija Victoria Segarra, a mi madre Gioconda Lindao y a mi padre Aquiles Segarra, quienes fueron un gran apoyo emocional durante el tiempo en que escribía esta tesis.

A mis amigos, quienes me inspiraban y alentaban para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme y depositaron su confianza en mí.

A mi tutor Edgar Espitia, quien me asesoró para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Cambio climático	1
1.1.2. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos	1
1.1.3. Proyecciones climáticas para el Ecuador continental	2
1.1.4. Modelación Hidrológica.....	2
1.2. Planteamiento del problema a investigar	3
1.3. Justificación de la investigación.....	4
1.4. Objetivos de la investigación	5
1.4.1. General	5
1.4.2. Específicos	6
CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO.....	6
2.1. Descripción del área de estudio.	6
2.1.1. Ubicación Geográfica.....	6
2.1.2. Hidrogeología	7
2.1.3. Variables hidrometeorológicas.....	8
2.2. Monitoreo meteorológico	10
2.3. Monitoreo hidrológico.....	11
2.4. Extracción de datos históricos y escenarios de cambio climático.....	14
2.5. Descripción del modelo GR4J	14

2.6. Calibración del modelo GR4J	15
2.7. Validación del modelo GR4J	16
2.8. Modelación de caudales históricos y futuros.....	17
2.9. Evaluación de la oferta hídrica	17
CAPITULO III: PRESENTACION DE DATOS Y RESULTADOS	17
3.1. Cambio de la precipitación y temperatura histórica respecto a los RCP 4.5 y 8.5.....	17
3.2. Nivel del agua del río y su relación con la precipitación	21
3.3. Serie de caudales calculados y observados	22
3.4. Selección de parámetros para la calibración del modelo	24
3.5. Validación del modelo hidrológico	24
3.6. Análisis de caudales simulados.....	26
3.7. Curva de duración para caudales simulados	27
CAPITULO IV: INTERPRETACION Y DISCUSION	30
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Microcuenca del río Colonso a escala 1:50000.	7
Figura 2. Carta geológica (escala 1:250000) de unidades geológicas antiguas a reciente. Fuente: SENAGUA (2014) [33].....	8
Figura 3. Promedio mensual multianual de las variables meteorológicas registradas por la estación M070 en el período 1965-2000.	9
Figura 4. Ubicación de las estaciones meteorológicas de mayor proximidad a la zona de estudio... ..	10
Figura 5. Sección transversal de un tramo del río Colonso a diferentes niveles de agua asumidos.	13
Figura 6. Descripción del modelo lluvia-escorrentía [19].	15
Figura 7. Análisis de la precipitación histórica en el período 1987-2005.	18
Figura 8. Análisis de la precipitación para RPC 4.5 en el período 2011-2070.	19
Figura 9. Análisis de la precipitación para RPC 8.5 en el período 2011-2070.....	20
Figura 10. Temperatura promedio mensual multianual para los registros históricos y escenarios 4.5 y 8.5.....	21
Figura 11. Relación precipitación (mm) y nivel del agua (m) a escala de minutos en el río Colonso.	22
Figura 12. Caudales observados (Q Obs.) y calculados (Q Cal.), respecto al nivel de la lámina de agua (h) en el río Colonso.	23
Figura 13. Calibración del modelo bajo un período de análisis comprendido entre el 2021-07-14 y el 2021-08-02.	25
Figura 14. Validación del modelo para un período de análisis comprendido entre el 2021-08-02 y el 2021-09-02.	26
Figura 15. (a) Precipitación, (b) Temperatura y (c) Caudales simulados para el período histórico (1981-2005) y para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (2021-2070).	27
Figura 16. Curvas de duración de caudales histórica y para los RPC 4.5 y 8.5.....	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedios anuales de variables meteorológicas registrados por la estación M070.....	9
Tabla 2. Listado de estaciones meteorológicas seleccionadas.	10
Tabla 3. Caudales del río Colonso medidos in situ con molinete electromagnético.	12
Tabla 4. Cambio de la temperatura y precipitación histórica respecto a los RCP 4.5 y 8.5	20
Tabla 5. Nivel (N), área (A), perímetro (P), radio hidráulico (R), número de Manning promedio (n), pendiente (S), máxima altura de las batimetrías (H), caudales calculados (Q_cal) y observados (Q_obs) para la sección transversal del río Colonso.	23
Tabla 6. Parámetros y criterios de eficiencia obtenidos para cada uno de los periodos de calentamiento.....	24
Tabla 7. Periodos de calentamiento que mejor KGE obtuvieron.....	25
Tabla 8. Cambio del caudal histórico simulado respecto a los caudales proyectados para los escenarios 4.5 y 8.5.....	29
Tabla 9. Prueba t-student para diferencia de medias entre caudales históricos simulados respecto a los escenarios 4.5 y 8.5.....	29

RESUMEN

Debido al cambio climático se esperan importantes cambios en los patrones de precipitación y régimen térmico a nivel global, regional y local. Específicamente en el caso de Ecuador, el estudio “Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura, bajo distintos escenarios de cambio climático”, indica que para la Amazonía ecuatoriana, el régimen pluviométrico tiene una tendencia creciente entre 10-20% en el período 2010-2100. En cuanto a temperaturas medias, mencionan aumentos entre 1.80 y 2.76 °C para los escenarios 4.5 y 8.5, respectivamente. Lo anterior, crea un cuadro de incertidumbre respecto a los impactos futuros de estas variables sobre la disponibilidad hídrica a nivel de cuencas locales. Por ello, este estudio propone un marco para determinar la oferta hídrica en el período 2010-2070 de la cuenca del río Colonso para escenarios de cambio climático, mediante la implementación del modelo lluvia escorrentía GR4J. En general, la modelación hidrológica para los escenarios 4.5 y 8.5, muestra un aumento en los caudales del 22.15% y 26.50%, respectivamente, en referencia a las condiciones climáticas históricas simuladas. Asimismo, a pesar de contar con un período de observación corto para la calibración y validación del modelo, las simulaciones presentaron un desempeño satisfactorio ($KGE > 0.1$). El adecuado entendimiento de los procesos de lluvia escorrentía, tanto a mediano como largo plazo, así como su impacto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca, es fundamental para la gestión de los recursos hídricos, de tal manera que se trate de asegurar un suficiente suministro de agua.

Palabras claves: cambio climático, precipitación, temperatura, caudales, modelo GR4J, cuenca del río Colonso, disponibilidad hídrica.

ABSTRACT

Due to climate change, significant changes in precipitation patterns and thermal regimes are expected at the global, regional and local levels. In Ecuador, the study "Climate projections of precipitation and temperature, under different climate change scenarios", indicates that for the Ecuadorian Amazon Region, the rainfall regime has a growing trend between 10-20% in the period 2010-2100. As for average temperatures, there are increases between 1.80 and 2.76 °C for scenarios 4.5 and 8.5, respectively. The foregoing creates an outlook of uncertainty regarding the future impacts of these variables on water availability at the level of local basins. Therefore, this study proposes a framework to determine the water supply in the 2010-2070 period of the Colonso river basin for climate change scenarios, through the implementation of the GR4J rain-runoff model. As a result, the hydrological modeling for scenarios 4.5 and 8.5 shows an increase in flows of 22.15% and 26.50% respectively, in reference to simulated historical climatic conditions. Likewise, the simulations presented a satisfactory performance ($KGE > 0.1$) despite having a short observation period for the calibration and validation of the model. The adequate understanding of the processes of rainfall runoff, both in the medium and long term, as well as its impact on the future water availability of the basin, is essential for the management of water resources, in such a way that it tries to ensure a sufficient water supply.

Keywords: climate change, precipitation, temperature, flows, GR4J model, Colonso River Basin, water availability.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Cambio climático

El clima está cambiando significativamente y es muy probable que esté relacionado a actividades humanas que se incrementaron desde la revolución industrial [1, 2]; siendo muy factible que dicha tendencia se mantenga, a menos que se implemente con éxito acciones de mitigación contra dichas actividades [3]. Por su parte, el aumento de las actividades antropogénicas ha traído consigo implicaciones significativas dentro circulación atmosférica; influyendo tanto en el clima local, regional y global; así como en la concentración y el tiempo de residencia de diversos gases contaminantes [4]. En este sentido, el cambio climático puede definirse como la alteración en la composición de la atmósfera mundial provocada por actividades humanas que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables [5].

1.1.2. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos

El cambio climático podría incidir de forma directa sobre los patrones de precipitación y evapotranspiración [6], así como acelerar el derretimiento de los glaciares debido al aumento de la temperatura promedio global de la superficie terrestre; alterando los suministros de agua e intensificando temporadas de inundaciones y sequías en diferentes partes del mundo [7]. Además, se tiene previsto que para el año 2050, diversos sistemas de agua del mundo enfrentan amenazas formidables como la escasez hídrica [8].

La escasez hídrica, hace referencia a la insuficiencia relativa o restricción del uso del agua en un sistema de suministro; generalmente ocasionada por períodos prolongados de sequías o por acciones humanas [9]. La cual, puede intensificarse significativamente debido al crecimiento económico y demográfico; así como cambios en el estilo de vida y la expansión de los sistemas de suministro de agua [8].

1.1.3. Proyecciones climáticas para el Ecuador continental

Para Ecuador hasta el año 2010, se habían elaborado 3 modelos dinámicos de alta resolución espacial para estudios de Escenarios de Cambio Climático (precipitación y temperatura) como el PRECIS (25 km), el ETA (56 km) y el TL959 (20 km). Sin embargo, los mismos presentaban inconsistencias, como subestimación y sobreestimación de algunas variables para ciertas regiones del país [10]. En este sentido, para solventar las limitaciones presentadas en estudios precedentes, se analizaron varios escenarios climáticos basados en “Modelos de Circulación General” [GCM, por sus siglas en inglés] actualizados y coordinados; que se correlacionen con mayor eficiencia las diferentes variaciones que podrían presentarse en el clima de Ecuador [11]. Para lo cual, aplicaron métodos de reducción de escala para implementarlos regional y localmente [11, 12]. Respecto a los modelos climáticos implementados, seleccionaron cuatro provenientes del proyecto CMIP5 (CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM), bajo escenarios “Representative Concentration Pathways” [RCP] de Cambio Climático de acuerdo al Quinto Reporte del IPCC (AR5) [11].

De los cuales, tomaron como período de referencia los datos de temperatura y precipitación desde 1981-2005, que correspondían a un RCP específico en Ecuador para los periodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Los resultados en general detallan aumentos en la temperatura media con incrementos de 0.74, 1.35 y 1.80 °C para el RCP 4.5, mientras que para el RCP 8.5 se registraron aumentos de 0.75, 1.71 y 2.76 °C [11, 12]. Siendo la Costa y Amazonía las regiones con escenarios de mayor incremento de temperatura. Respecto a la precipitación, las proyecciones muestran una reducción entre el 2-10% en la Amazonía Oriental. Mientras que para al sur, centro, norte y occidente del área continental del país; reportan incrementos entre 5-10% y 10-20%, respectivamente [11].

1.1.4. Modelación Hidrológica

Los modelos hidrológicos son utilizados para describir la transformación dinámica y no lineal de la precipitación en caudal (lluvia-escorrentía) para una región específica [13, 14].

En este sentido, son aplicados ampliamente para evaluar el impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de una determinada cuenca [14]. La elección de un modelo depende de muchos factores y entre ellos se encuentran: el propósito del estudio y la disponibilidad de información y las características propias del modelo [13].

A pesar de ser muchas las razones por las que se necesita modelar procesos de transformación de precipitación en caudal, gran parte de los mismos presentan limitaciones debido a su alta necesidad de parámetros de mediciones o registros hidrológicos en el espacio y el tiempo [15]. No obstante, dicha deficiencia ha incentivado a muchos investigadores a desarrollar modelos precipitación – escorrentía con bajo requerimiento de datos. Estos modelos generalmente realizan simplificaciones en el modelamiento de cuencas, asumiendo cierta homogeneidad en procesos, lo cual; es propio de modelos agregados [16].

Entre los modelos agregados de mayor relevancia tenemos a los de tipo GR, los cuales, son un grupo de modelos precipitación - escorrentía; caracterizados por utilizar como datos de entrada la precipitación y la temperatura [17, 18]. Los modelos GR desde su implementación en el año 1980, han evolucionado y presentado diferentes versiones tales como: GR1A (caudales anuales), GR2M (caudales mensuales); GR3J y GR4J (caudales diarios) [18]. Para el presente caso, se hará énfasis en el modelo GR4J, el cual, es un modelo agregado y parsimonioso que utiliza la precipitación y la evapotranspiración como datos de entrada para el modelado de caudales diarios sobre una determinada cuenca [19]. Lo cual, ha hecho que sea uno de los modelos más probados dentro de múltiples cuencas francesas, obteniendo óptimos resultados (ver, por ejemplo, Van Esse et al., 2013) [20].

1.2. Planteamiento del problema a investigar

Para implementar un sistema de modelación hidrológica es necesario contar con una buena serie de datos climáticos [21]. No obstante, el acceso a información hidrometeorológica en países en desarrollo o en vías de desarrollo es limitado [22]. Ecuador no es la excepción, especialmente en la región amazónica, donde solo están instaladas 36 (6.9%) de las 379 estaciones meteorológicas en operación [23]; ocasionando que existan zonas donde no se

cuenta con suficiente cobertura de datos que representen significativamente las variables meteorológicas [24]. En este sentido, del déficit estaciones meteorológicas en esta región del país se traduce en insuficiente información meteorológica, lo que limita el análisis de investigaciones climatológicas relacionadas a modelaciones hidrológicas que permitan cuantificar el estado de los recursos hídricos presentes en la zona [23].

Por su parte, incorporar escenarios de cambio climático dentro de modelos hidrológicos para sus respectivos análisis, ha permitido proyectar e identificar cambios en los patrones de flujos hídricos en algunas regiones del mundo [25]. Siendo la cuenca del río Amazonas, una de las zonas que mayor variabilidad presenta respecto al nivel de agua y regímenes de inundación; así como disminución y aumento en los patrones de precipitación anuales al este y oeste de la región, respectivamente [26]. Lo cual, puede generar efectos positivos (aumento) o negativos (descensos) [27] en los caudales medios de la cuencas afluentes del río del Amazonas [26]. Que sumado al crecimiento económico y demográfico de las ciudades [28], intensificaría escenarios con un aumento de problemas ambientales y distribución de agua; con posibles implicaciones negativas sobre la sostenibilidad hídrica actual y futura [29].

Este último panorama, también se refleja en ciudades como Tena, la cual, en su actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial realizado en el 2019; menciona que debido al crecimiento demográfico de la ciudad, el sistema de abastecimiento de agua potable ha tenido que irse mejorando de acuerdo a las necesidades y demandas de la población [30].

1.3. Justificación de la investigación

A escala local, se conoce que en la Amazonía ecuatoriana no hay estudios específicos donde se prevean escenarios de variabilidad climática y sus efectos sobre los recursos hídricos [10]. Ya que, dichos estudios necesitan de una buena cobertura de serie de datos meteorológicos, además de la aplicación de técnicas de análisis de datos, modelación, métodos numéricos y rutinas de automatización [13]. Por lo cual, modelar y evaluar el

comportamiento hidrológico relacionado a escenarios de cambio climático en cuencas hidrográficas presenta un gran reto [25].

Es aquí donde la utilización de modelos hidrológicos como el GR4J son de suma importancia, ya que a través de pocos datos de ingreso (Precipitación y Temperatura); se pueden realizar simplificaciones en el modelamiento de cuencas, asumiendo cierta homogeneidad en procesos [31]. Además, que se adapta bien a cuencas donde la producción del flujo de escorrentía está condicionada por la precipitación y nivel de humedad de la zona [19], que es lo que generalmente sucede en nuestra área de estudio.

Esto sumado a la utilización de series históricas extraídas a resolución temporal diaria con resolución espacial de 10 km y de dos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 provenientes de la combinación individual (ensamble REA) de cuatro modelos globales de circulación que estadísticamente mejor se ajustaron y representaron el clima del país [11]; permitirá realizar una evaluación del comportamiento hidrológico del río Colonso bajo los escenarios de cambio climático previamente mencionados.

Lo cual, a su vez contribuiría directamente al plan maestro integral proyectado a 20 años sobre la planta de tratamiento de agua potable Colonso que el GAD de Tena menciona que se debe realizar, para el desarrollo de un modelo de gestión eficiente que permita cubrir las proyecciones para mantenimientos, mejoramiento y ampliación de la cobertura de este sistema a sus habitantes [30].

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. General

Determinar la oferta hídrica de la cuenca del río Colonso para escenarios de cambio climático en la Amazonía ecuatoriana, mediante la implementación del modelo lluvia escorrentía GR4J.

1.4.2. Específicos

- Estudiar la variabilidad estacional e interanual de la precipitación, temperatura y caudal en la cuenca del río Colonso.
- Implementar un modelo hidrológico para la cuenca del río Colonso, considerando los cambios futuros de los parámetros climáticos de acuerdo a los escenarios de cambio climático del IPCC.
- Evaluar los efectos de la temperatura y precipitación en la oferta hídrica en la cuenca del río Colonso, mediante modelación hidrológica para diferentes escenarios climáticos.

CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO

2.1. Descripción del área de estudio.

2.1.1. Ubicación Geográfica

La microcuenca del río Colonso que abastece la Planta de Tratamiento de Agua Potable (Planta T. Colonso) del mismo nombre, se encuentra ubicada en la parroquia Muyuna, Napo, Ecuador a dos kilómetros aproximadamente de la Comunidad de Alto Tena; en la parte baja del bosque protector Colonso (ver **Figura 1**) [32]. La misma, posee un área de 7.76 km² y un perímetro de 19553.94 m².

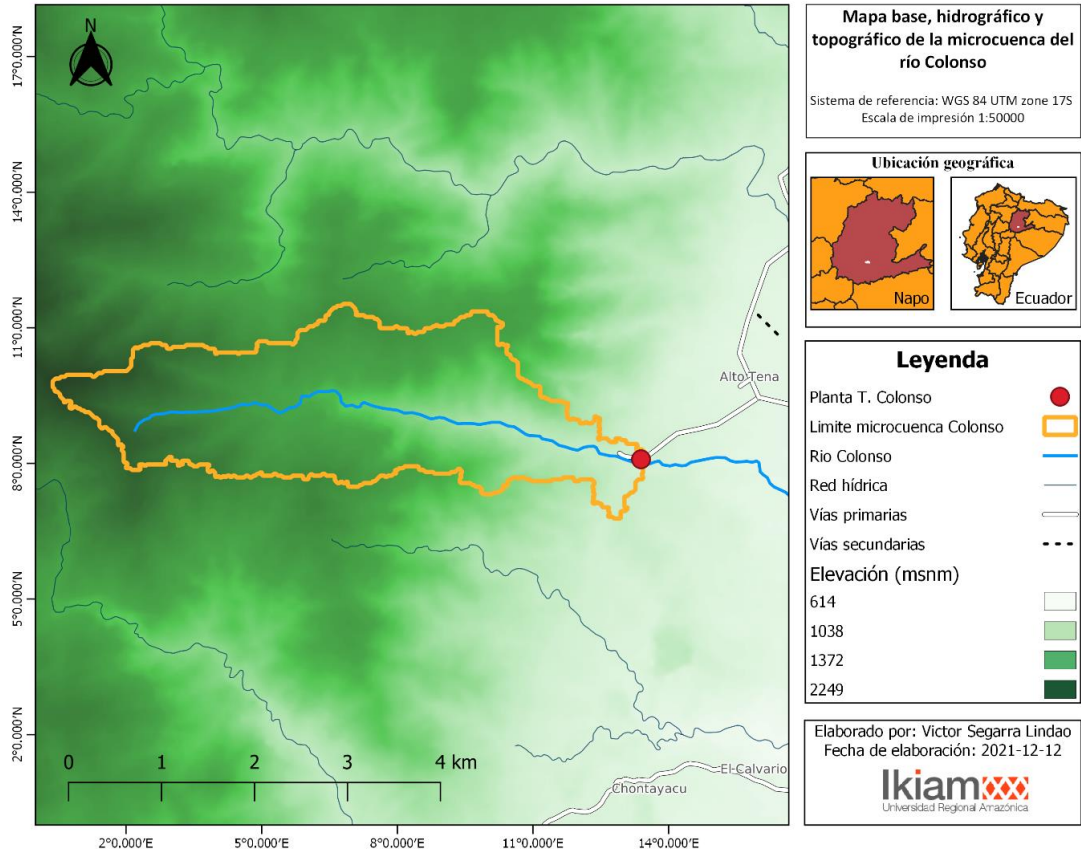


Figura 1. Microcuenca del río Colonso a escala 1:50000.

2.1.2. Hidrogeología

En la Microcuenca del río Colonso se observa la presencia de dos formaciones (depósitos superficiales y la formación Tena) presentes desde la edad Cretaceo Paleoceno (Figura 2), caracterizadas por una alta porosidad intergranular y fisuración de rocas sin importancia Hidrogeológica, así como nula permeabilidad y presencia de rocas arcillolita, limonita y arenisca [33].

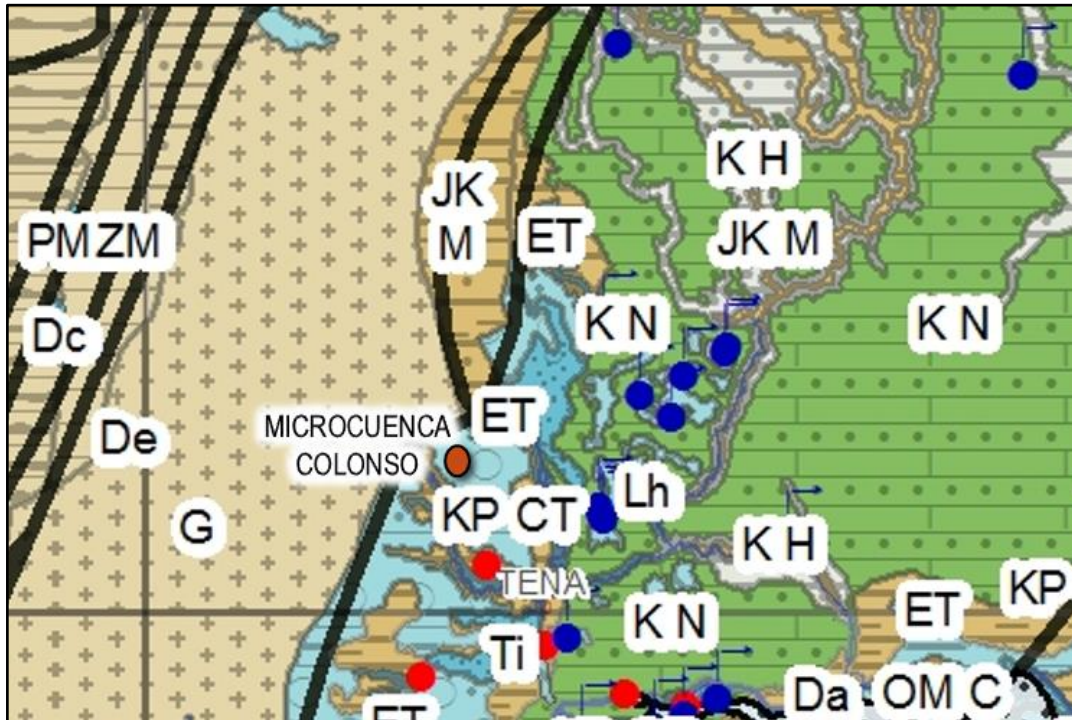


Figura 2. Carta geológica (escala 1:250000) de unidades geológicas antiguas a reciente. Fuente: SENAGUA (2014) [33].

2.1.3. Variables hidrometeorológicas

Dada la poca variabilidad espacial entre la estación meteorológica M070 (estación Tena) y la zona de estudio (ver Figura 4), se puede considerar que ambas localidades poseen el mismo tipo de clima (aunque esto no implica que las condiciones meteorológicas siempre sean las mismas en ambas zonas) [34]. Por este motivo, se procedió a analizar una serie de datos meteorológicos (precipitación, temperatura y evaporación) durante una serie temporal comprendida entre el 01-01-1965 y 01-01-2000 a escala mensual y anual [35]; lo cual, permitió tener una noción sobre el comportamiento de estas variables. En este sentido, el análisis temporal permitió observar que la zona de estudio posee una temperatura promedio anual de 24.2 °C (Tabla 2). Sin embargo, a nivel mensual se observa que existe una variación que va desde los 23 °C hasta los 25.3 °C con un valor promedio de 24.1 °C (ver Figura 3.b).

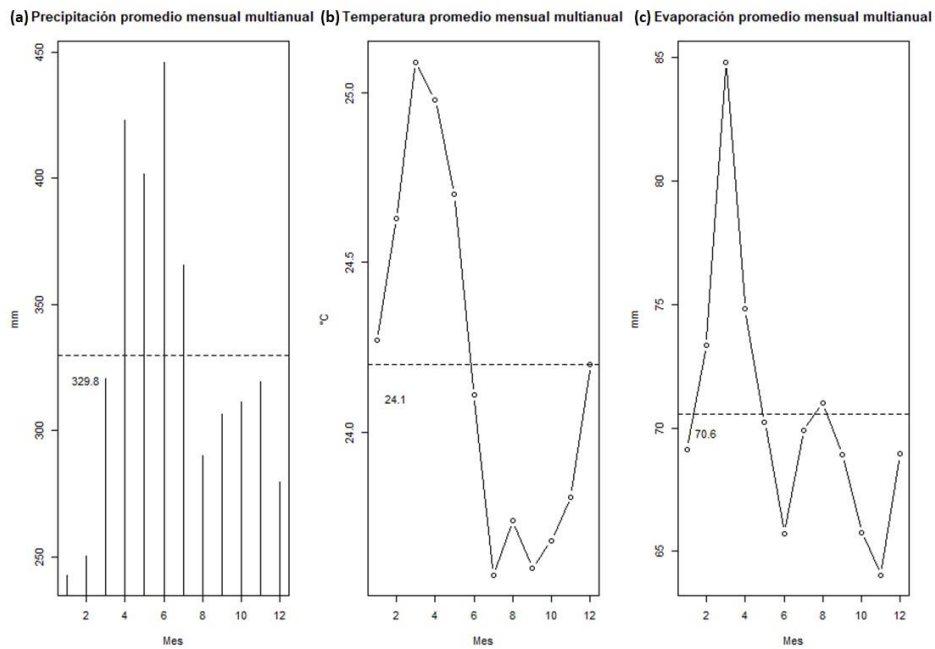


Figura 3. Promedio mensual multianual de las variables meteorológicas registradas por la estación M070 en el período 1965-2000.

En la Amazonía ecuatoriana, la precipitación es relativamente constante durante todo el año, sin embargo, existen períodos de baja precipitación. Por lo cual, se logró identificar aquellos periodos de meses que presentaban ascensos y descensos en sus registros. Resultando que los periodos de abundancia de lluvia están comprendidos entre abril y julio (estación húmeda). Mientras que, entre diciembre y marzo ocurre el descenso previamente mencionado (época seca), ver **Figura 3.a**. Respecto, al promedio mensual y anual, se observa que los mismos comprenden los 329.8 y 4099.6 mm, respectivamente (ver **Tabla 1**). Esta última característica sirve para catalogarla como una zona de selva tropical del piedemonte, dominada por un clima tropical húmedo [36]. En variables como la evaporación, se observa que la misma posee un promedio mensual y anual de 70.6 y 841.1 mm, respectivamente (ver **Figura 3.c** y **Tabla 1**).

Tabla 1. Promedios anuales de variables meteorológicas registrados por la estación M070.

	Prec. Acum.	Evaporación	Temperatura
	mm	mm	° C
Promedio Anual	4099.1	841.1	24.2

2.2. Monitoreo meteorológico

Para una cuenca específica, el conjunto de estaciones meteorológicas consiste en estaciones cuyo perímetro de influencia coincida con el de la cuenca [37]. Por ello, se recolectaron y analizaron datos de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio y cuyos registros se encuentren a escala diaria, siendo 3 las seleccionadas: M5147, M1219 y MI001 (ver **Tabla 2**). Las cuales, poseían 3958 registros diarios de lluvia y temperatura promedio del aire. Adicionalmente, se analizó una serie horaria de 1224 datos de precipitación ajustados a la zona de estudio, desde el 2021-07-14 hasta el 2021-09-02, provenientes del modelo Bias correction random forest (BC-RFP) [36].

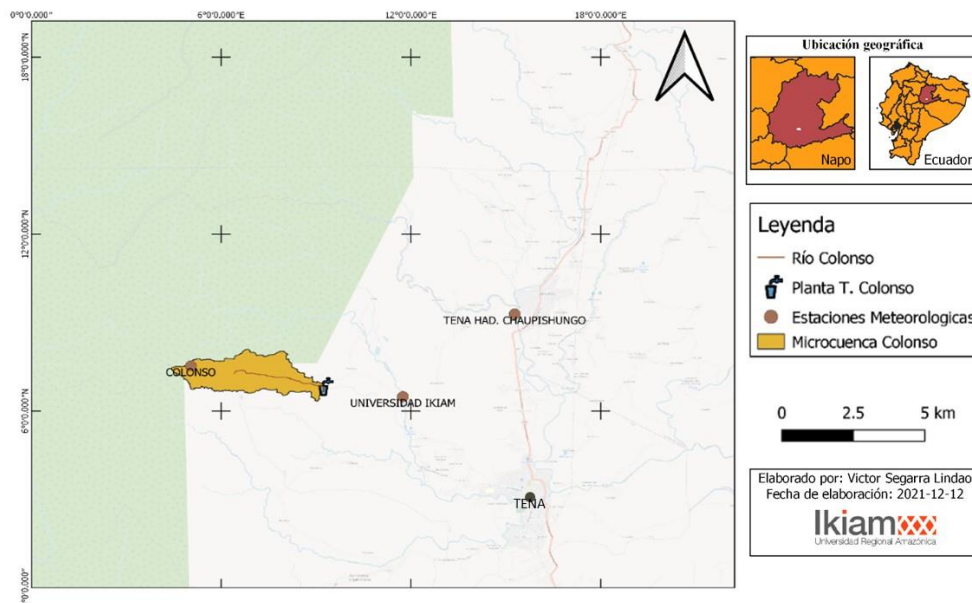


Figura 4. Ubicación de las estaciones meteorológicas de mayor proximidad a la zona de estudio.

Tabla 2. Listado de estaciones meteorológicas seleccionadas.

Código	Nombre	Coordenadas		Período Registro		Registro s
		X	y	Inicio	Fin	
M1219	Tena Hacienda	77.86106	0.9501	2016-01-	2020-10-	1918
	Chaupishungo		7			
M5147	Universidad	77.81916	0.9169	2016-05-	2019-12-	1718
	Ikiam		4			
MI001	Colonso	77.94055	0.9378	2019-12-	2020-10-	322
			2			

2.3. Monitoreo hidrológico.

Para realizar un análisis robusto de sensibilidad de un modelo hidrológico, es preferible contar con varios años de mediciones [21]. No obstante, debido a la falta de estaciones hidrológicas que permitan obtener un conjunto de datos históricos de caudales del río Colonso, el análisis de sensibilidad del modelo tuvo un período corto; ya que sólo se utilizaron registros de caudales de 50 días (desde el 14-07-2021 hasta el 02-09-2021). Para la recolección de estos datos, se ubicó un sensor de presión y temperatura debajo de la superficie del río, el cual registraba cada minuto la presión hidrostática que el agua ejercía sobre el diafragma del sensor. Por otra parte, se ubicó otro sensor en las laderas del río para registrar la presión y temperatura atmosférica de la zona.

Simultáneamente, durante ese período de tiempo, se realizaron mediciones *in situ* del caudal del río de estudio una vez cada semana (ver **Tabla 3**); el mismo, se obtuvo sumergiendo desde la izquierda del río, un molinete electromagnético HACH F950 cada 0.5 m en 27 puntos a lo ancho del mismo (12.7 metros). Resulta necesario mencionar, que si el nivel de profundidad desde la superficie del agua en cada punto era menor a 0.6 m, se realizaba una sola medición de velocidad del agua. No obstante, si el nivel del agua en algún punto superaba dicha medida, las mediciones de velocidad se realizaban a 0.6 y 0.8 m, respectivamente. Adicionalmente, se realizaron mediciones de la distancia del sensor sumergido respecto a la superficie del agua y el punto 1 del ancho del río (0 m) (ver **Tabla 3**).

Tabla 3. Caudales del río Colonso medidos in situ con molinete electromagnético.

Fecha	Q (m ³ /s)
2021-07-14	1.418
2021-07-21	1.820
2021-07-27	0.841
2021-08-06	0.823
2021-08-11	0.820
2021-08-18	0.712
2021-08-26	0.562
2021-09-02	0.853

Una vez culminado el período de medición, se procedió a convertir la presión de la columna de agua en nivel (m), mediante la siguiente fórmula:

$$h = \left(\frac{\Delta P}{\rho g} \right) * 1000 \quad (1)$$

Donde, ΔP = diferencia entre presión hidrostática y presión atmosférica [kPa], ρ = densidad del fluido [kg/m³], g = aceleración gravitacional [m/s²], h = altura de la columna de líquido [m]. No obstante, a cada uno de los niveles de agua calculados (h), se le sumó la profundidad que había desde la base del sensor hasta el fondo del río (0.21 m).

Con las batimetrías realizadas en campo, se obtuvieron secciones transversales del río Colonso para un mismo lugar de referencia, las cuales fueron divididas en trapecios para facilitar el cálculo de sus áreas (A) y perímetros (P). El cálculo de estos últimos valores permitió obtener el radio hidráulico (R), dividiendo A para P , para posteriormente incorporarlo en la ecuación de caudal de Manning:

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Donde, A = área de la sección transversal (m²), n = número de Manning, R = radio hidráulico (m) y S = pendiente de la sección (m/m). Por otra parte, se obtuvo el número de Manning mediante calibración, utilizando el programa complemento Solver de Microsoft Excel, el

cual permitió ajustar y variar los datos de las celdas correspondientes a un valor inicial aleatorio de Manning para que cumplan con un valor de restricción igual a 0 y se obtenga dicho resultado en cada una de las celdas objetivo ($\|Q_{obs} - Q_{cal}\| = 0$). Respecto a la pendiente, la misma se la calculó a través de mediciones *in situ* de la altura de la lámina de agua en el centro, aguas arriba y aguas abajo del río mediante un nivel de precisión. Posteriormente, se incorporó cada altura (h) y longitud (L) registrada en la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\Delta h}{L} \quad (3)$$

Donde, $\Delta h = h_{max} - h_{min}$ (m), L = longitud del tramo (m) y S = pendiente (m/m).

Una vez obtenido el caudal para cada celda, se procedió a calcular nuevamente el área y perímetro para cada una de las secciones transversales, pero esta vez asumiendo distintos niveles de agua (ver **Figura 5**). Esto con el objetivo de obtener caudales dependientes del nivel de agua y ver gráficamente si se interceptaban con los caudales medidos en campo, así como obtener una ecuación, curva de descarga de la sección de análisis (proveniente de un ajuste potencial) dependiente de h.

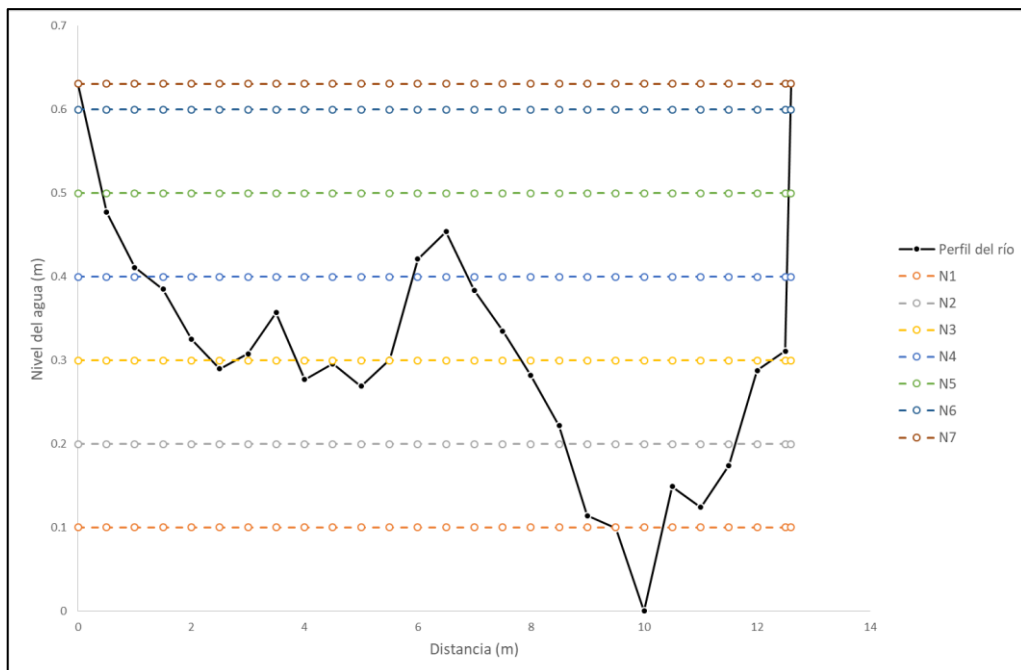


Figura 5. Sección transversal de un tramo del río Colonso a diferentes niveles de agua asumidos.

La ecuación de descarga para la sección de análisis es:

$$Q = y = 0.699 h^{0.344} \quad (4)$$

A partir de la ecuación de descarga (4) los valores de nivel del agua, h (m), calculados con la ecuación 1, se transformaron en una serie de caudales con resolución temporal de minuto. Los cuales, se pasaron a escala diaria para utilizarlos como datos de calibración y validación del modelo hidrológico.

2.4. Extracción de datos históricos y escenarios de cambio climático.

Se utilizó los raster de temperatura y precipitación del proyecto desarrollado por Armenta et al. (2016) en formato .nc [11]. Simultáneamente, se desarrolló un script en el software R para extraer los valores de cada uno de los raster para cada uno de los puntos donde se encontraban las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio. Posteriormente, se obtuvieron series de datos de las variables climáticas (precipitación y temperatura) a nivel diario en el período 1981-2005 para el histórico y 2011-2070 para los escenarios RCP 4.5 Y 8.5.

2.5. Descripción del modelo GR4J

Este estudio hace uso del modelo GR4J, cuya estructura y descripción matemática se presentan a detalle en Perrin et. al, 2003 [19] (ver **Figura 6**). En este modelo, la P representa la precipitación, mientras que la E la evapotranspiración potencial, la cual, fue calculada implementando la ecuación de Oudin [38]. A su vez, todas las entradas, salidas y variables internas están expresadas en mm, por ello, los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cada que sea necesario. Por su parte, el modelo GR4J necesita de cuatro parámetros [19]:

- x_1 : Máxima capacidad del reservorio de producción (mm).
- x_2 : Coeficiente de intercambio de agua subterránea (mm).
- x_3 : Capacidad máxima para el tránsito de canales (mm).
- x_4 : Tiempo base del hidrograma unitario (días).

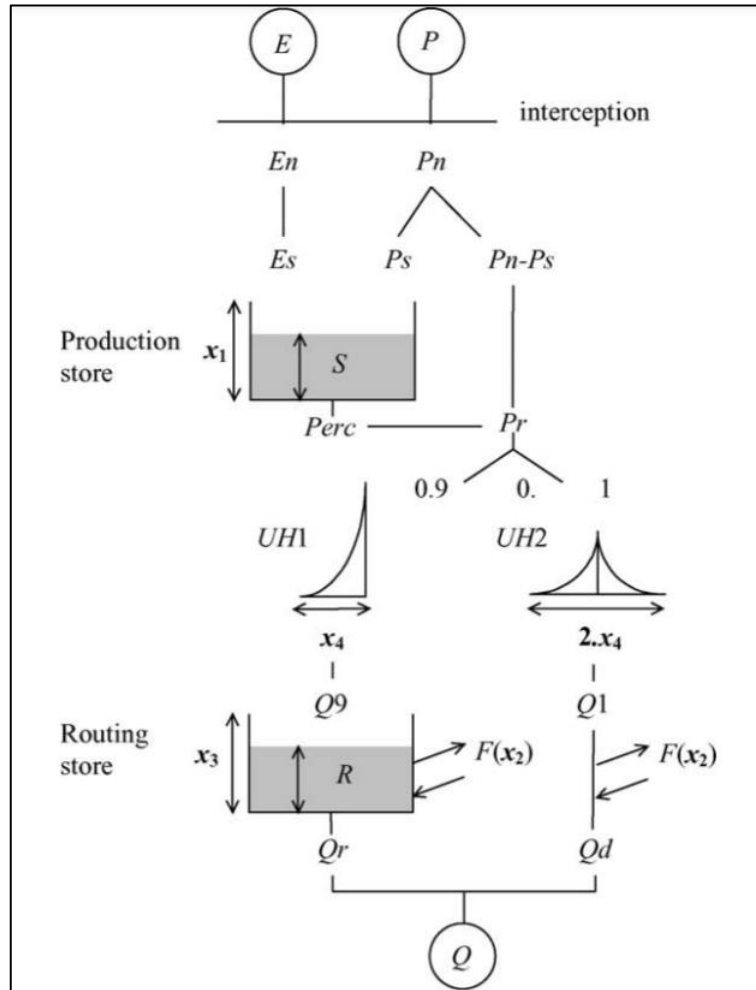


Figura 6. Descripción del modelo lluvia-escorrentía [19].

2.6. Calibración del modelo GR4J

La calibración es el proceso de identificar los mejores conjuntos de parámetros (x_1 , x_2 , x_3 y x_4) del modelo ajustando los valores numéricos para imitar mejor la respuesta observada en la salida [18][39]. Para simular la escorrentía presente en la zona, primero se tuvo que encontrar 4 parámetros (x_1 , x_2 , x_3 y x_4) mediante combinaciones de distintos períodos de calentamiento bajo un mismo período de análisis (2021-07-14 hasta 2021-08-02). Posteriormente, se evaluó a cada combinación de parámetros mediante los criterios de eficiencia: Nash-Sutcliffe (NSE) [31] y Kling-Gupta (KGE) [40].

Nash-Sutcliffe (NSE), es un valor adimensional que evalúa el rendimiento de un modelo en un rango entre $-\infty$ y 1, donde, $NSE = 1$ indica excelente ajuste entre simulaciones y

observaciones; $NSE = 0$ refiere que las simulaciones del modelo se asemejan a la media de las observaciones; y $NSE < 0$ indica que el modelo es peor predictor que la media de las observaciones [31, 38]. La fórmula para el cálculo del coeficiente se muestra a continuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

Donde, N es el número total de pasos de tiempo, S_i la descarga simulada en el tiempo N , O_i la descarga observada en el tiempo N , y \bar{O} la descarga media observada. Por su parte, Kling-Gupta (KGE), es un valor adimensional que aborda varias deficiencias de NSE y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

Donde, r es la correlación lineal entre observaciones y simulaciones, σ_{obs} es la desviación estándar en las observaciones, σ_{sim} la desviación estándar en las simulaciones, μ_{sim} la media de la simulación y μ_{obs} la media de la observación. Respecto a su interpretación, autores utilizan valores $KGE > 0$ como indicativos de buenas simulaciones, mientras que valores $KGE < 0$ se consideran malos [40].

2.7. Validación del modelo GR4J

Validar un modelo consiste en comprobar la reproducibilidad de los resultados mediante los parámetros calibrados [39]. Para ello, se siguió el procedimiento planteado en Perrin et. al, 2003 [19]; el cual, utiliza los mismos criterios de eficiencia previamente mencionados (NSE y KGE), pero para un nuevo período de análisis (desde 2021-08-02 hasta el 2021-09-02). A través de esta prueba, verificamos si los resultados los parámetros identificados permiten representar el proceso lluvia – escorrentía de la cuenca de análisis. Por otra parte, resulta necesario mencionar que el período de calentamiento a utilizar en el modelo fue de 1 año y medio.

2.8. Modelación de caudales históricos y futuros.

Una vez seleccionados los parámetros con los mejores desempeños en calibración como validación del modelo, se procedió a simular caudales a escala diaria para la serie histórica (1981 – 2005) y para las proyecciones bajo condiciones de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (2021 – 2070).

2.9. Evaluación de la oferta hídrica

La evaluación del cambio climático en la hidrología de la microcuenca del río Colonso, se realizó comparando los resultados simulados de los escenarios proyectados con el escenario histórico, a través de las diferencias que presentan sus curvas de duración de caudales (CDC); las cuales, representan gráficamente la distribución de frecuencias del caudal de un período de tiempo específico [41]. A su vez, se realizó un análisis estadístico mediante la prueba t-student para cada una de las simulaciones (escenarios proyectados respecto al histórico).

CAPITULO III: PRESENTACION DE DATOS Y RESULTADOS

3.1. Cambio de la precipitación y temperatura histórica respecto a los RCP 4.5 y 8.5

Podemos observar que en la serie a escala diaria (**Figura 7.a**), la precipitación se mantiene en un rango de 0 a 20 mm (**Figura 7.c**), con diversos picos de eventos de extremos, ya que se tienen intensidades que oscilan desde los 50 hasta los 100 mm/día. Esto último puede verse reflejado en la **Figura 7.b**, donde los valores atípicos sobrepasan el umbral de los valores mínimos y máximos para esos mismos períodos. Por otra parte, se visualiza que el valor medio de precipitación diaria es de aproximadamente 10 mm. Respecto al comportamiento de la precipitación mensual, se observa que posee un régimen bimodal (**Figura 7.e**), siendo los meses de marzo a junio donde mayores valores medios de precipitación se registran (>250 mm). Simultáneamente, se visualiza que la mayoría de las precipitaciones presentan un rango entre los 200 y 300 mm (**Figura 7.f**).

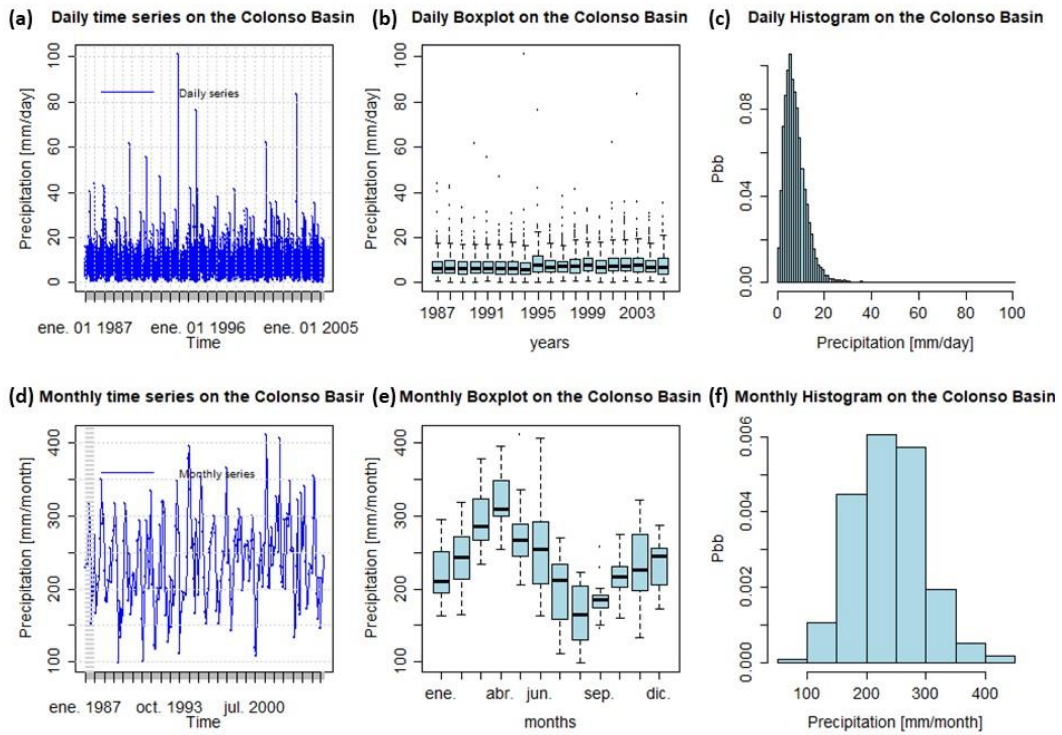


Figura 7. Análisis de la precipitación histórica en el período 1987-2005.

Para el escenario 4.5 se observa que el rango de precipitación diaria seguirá oscilando entre los 0 y 20 mm, con un valor medio de 10 mm (**Figura 8.a**). No obstante, eventos de intensidades extremas se harán más periódicos, así como un aumento en el rango de registros entre los 20 y 40 mm respecto al histórico (**Figura 8.c**). Esto último también ocurre a escala mensual, ya que las frecuencias entre los 300 y 400 mm aumentan y se extienden (en menor proporción) hasta los 600 mm (**Figura 8.f**). Por otro lado, el régimen seguirá siendo bimodal, pero con un incremento en el valor medio mensual de aproximadamente 50 mm para la época húmeda y de 10 mm para los meses restantes (**Figura 8.e**).

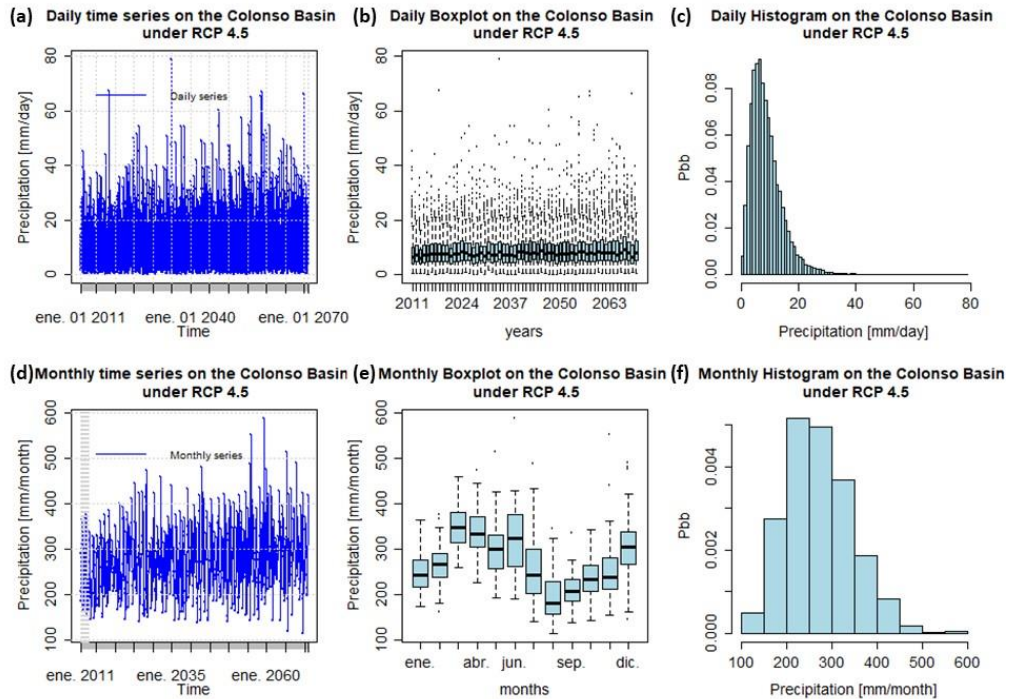


Figura 8. Análisis de la precipitación para RPC 4.5 en el período 2011-2070.

Para el escenario 8.5 también observamos que el valor medio de precipitación diaria es de aproximadamente 10 mm (**Figura 9.a y 9.b**), con aumento de eventos de intensidades respecto al histórico, pero en menor proporción que en el escenario 4.5. Por otra parte, la precipitación mensual mantiene su régimen bimodal, pero respecto al escenario previamente descrito, meses húmedos como mayo y junio, reducen valores medios en 10 mm (**Figura 9.e**). Respecto a su frecuencia, se observa un descenso en los registros entre los 200 y 250 mm, así como la ausencia de intensidades que oscilan entre los 500 y 600 mm en comparación al escenario 4.5 (**Figura 9.f**).

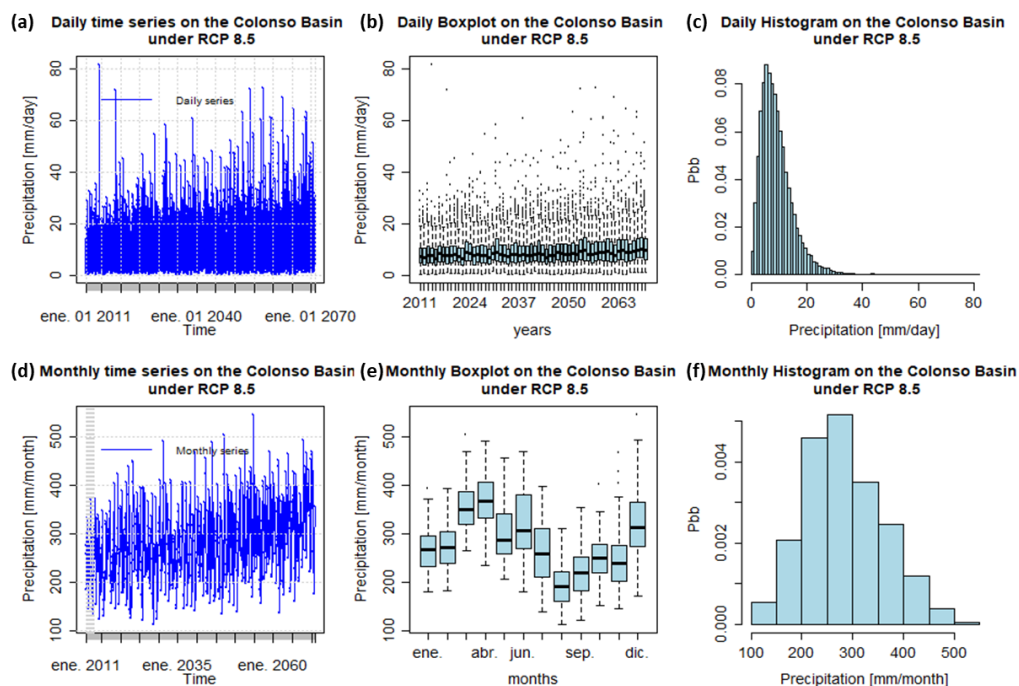


Figura 9. Análisis de la precipitación para RPC 8.5 en el período 2011-2070.

En la **Tabla 4**, se reflejan los cambios de la temperatura histórica promedio respecto a los RCP 4.5 y 8.5. En la misma, vale la pena destacar que existirá un aumento de 1.4 °C (5.35%) para el RCP 4.5 y de 2 °C (6.96%) para el RCP 8.5. Lo mismo ocurre para la precipitación promedio mensual, donde los aumentos van desde un 16.4% para el escenario 4.5 y un 20.9% para el escenario 8.5.

Tabla 4. Cambio de la temperatura y precipitación histórica respecto a los RCP 4.5 y 8.5

	Hist.	RCP 4.5	RCP 8.5	Δ (%)	
				RCP 4.5	RCP 8.5
Temperatura (°C)	23.3	24.7	25.3	6.1	8.7
Precipitación (mm)	234.3	272.7	283.3	16.4	20.9

Respecto al régimen térmico, se observa que el mismo es bimodal, siendo septiembre y octubre los meses que mayor temperatura promedio registran, (**Figura 9.a**). Por otra parte, resulta necesario mencionar que, aunque se proyecta un aumento en la temperatura promedio para ambos escenarios (**Figura 10.b y 10.c**), esto no influirá en la estacionalidad de la misma. En cuanto al comportamiento de la temperatura promedio anual, se aprecia un aumento promedio de 0.04 °C/año desde 1981 hasta el 2005 (**Figura 10.d**), lo cual,

también ocurre para los escenarios 4.5 y 8.5 con $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ y $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, respectivamente (**Figura 10.e y 10.f**).

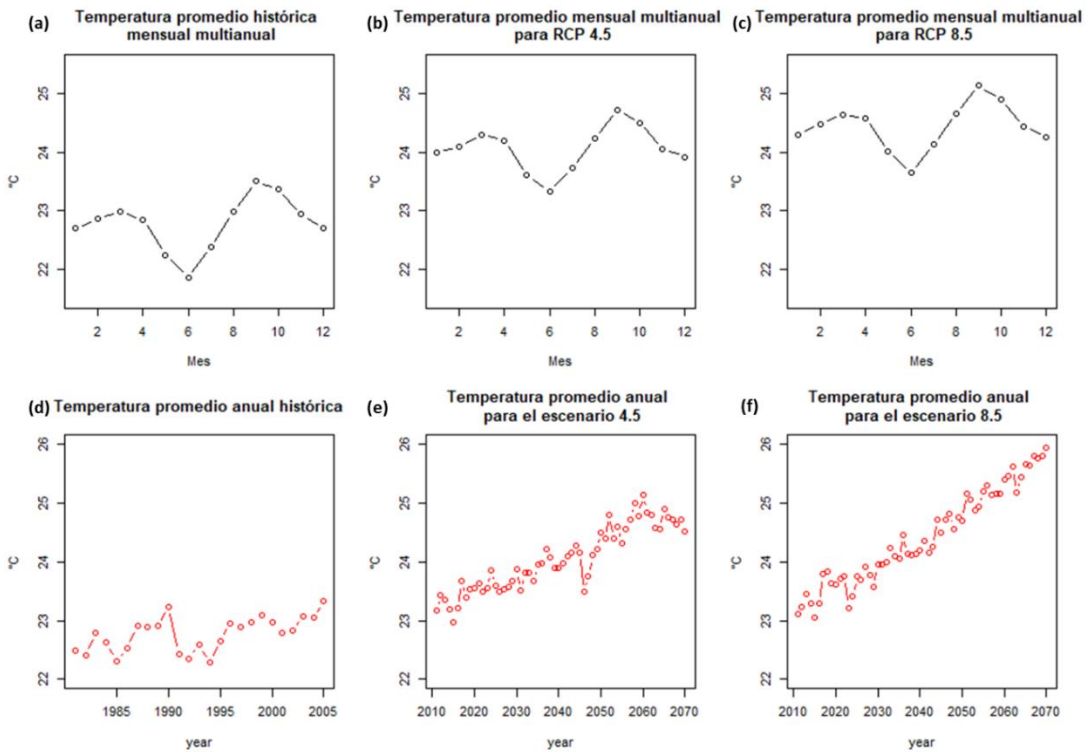


Figura 10. Temperatura promedio mensual multianual para los registros históricos y escenarios 4.5 y 8.5.

3.2. Nivel del agua del río y su relación con la precipitación

Obtenida toda la serie a escala de minutos de la precipitación registrada en la estación M5147 se procedió a compararla con los niveles de agua del río calculados durante el período comprendido entre el 2021-07-14 y el 2021-09-02. En dicha relación, se puede observar que en períodos donde la precipitación alcanza los picos más altos, existe un aumento proporcional en el nivel del agua del río (ver **Figura 11**). Lo cual, infiere que gran parte del agua proveniente de la precipitación, se transforma directamente en escorrentía. Por otra parte, se observa que el nivel promedio de la lámina de agua se mantiene sobre los 0.30 m aproximadamente.

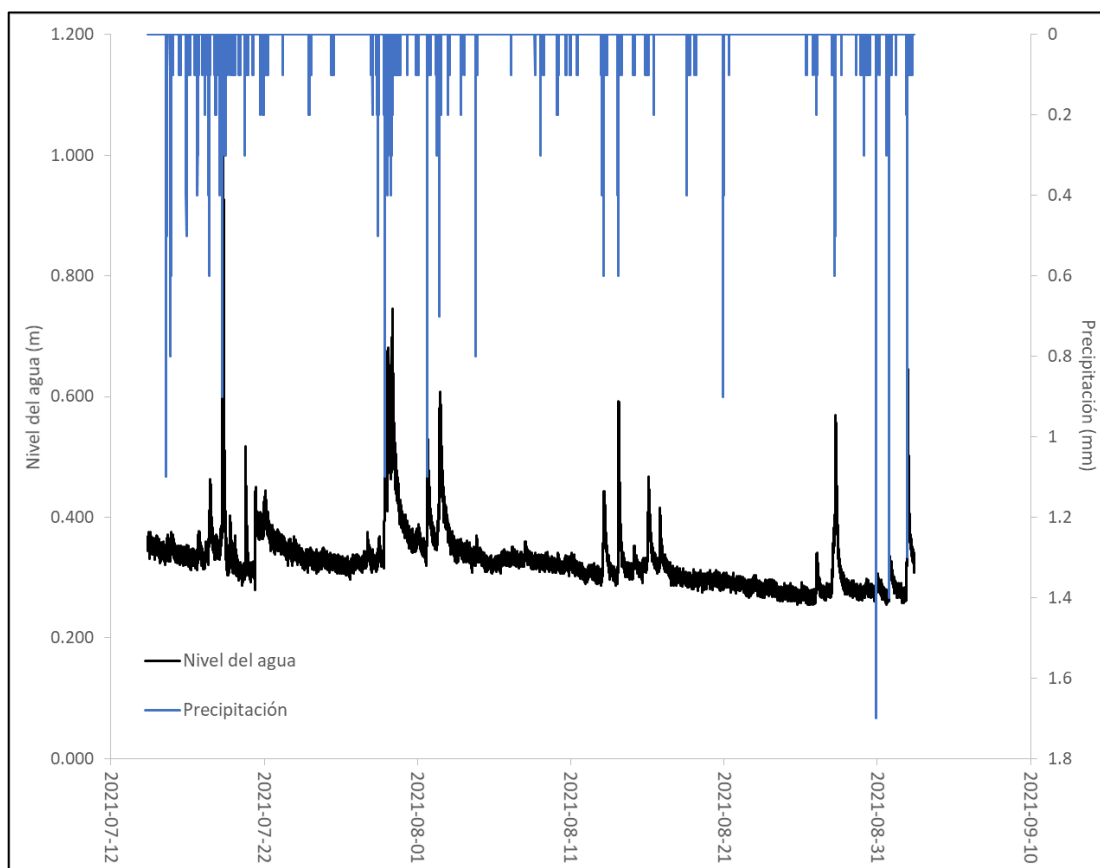


Figura 11. Relación precipitación (mm) y nivel del agua (m) a escala de minutos en el río Colonso.

3.3. Serie de caudales calculados y observados

Aplicados los procedimientos descritos en la **sección 2.3**, se calcularon los resultados presentes en la **Tabla 5**. Los cuales, fueron utilizados para construir la gráfica de caudales dependientes del nivel de agua (ver **Figura 12**).

Tabla 5. Nivel (N), área (A), perímetro (P), radio hidráulico (R), número de Manning promedio (n), pendiente (S), máxima altura de las batimetrías (H), caudales calculados (Q_cal) y observados (Q_obs) para la sección transversal del río Colonso.

N	A	Pm	RH	Manning calibrado	Pendiente	Q_Cal	H	Q_Obs
m	m ²	M	M	-	-	m ³ /s	m	m ³ /s
0.1	0.074	1.524	0.048	0.352	0.021	0.004	0.72	1.418
0.2	0.340	3.209	0.106	0.352	0.021	0.031	0.671	1.820
0.3	0.942	7.576	0.124	0.352	0.021	0.096	0.644	0.841
0.4	1.736	11.102	0.156	0.352	0.021	0.206	0.631	0.823
0.5	2.823	12.633	0.223	0.352	0.021	0.425	0.665	0.820
0.6	3.998	12.633	0.316	0.352	0.021	0.758	0.654	0.712
0.7	5.258	13.226	0.398	0.352	0.021	1.161	0.604	0.562
0.8	6.558	13.226	0.496	0.352	0.021	1.678	0.702	0.853

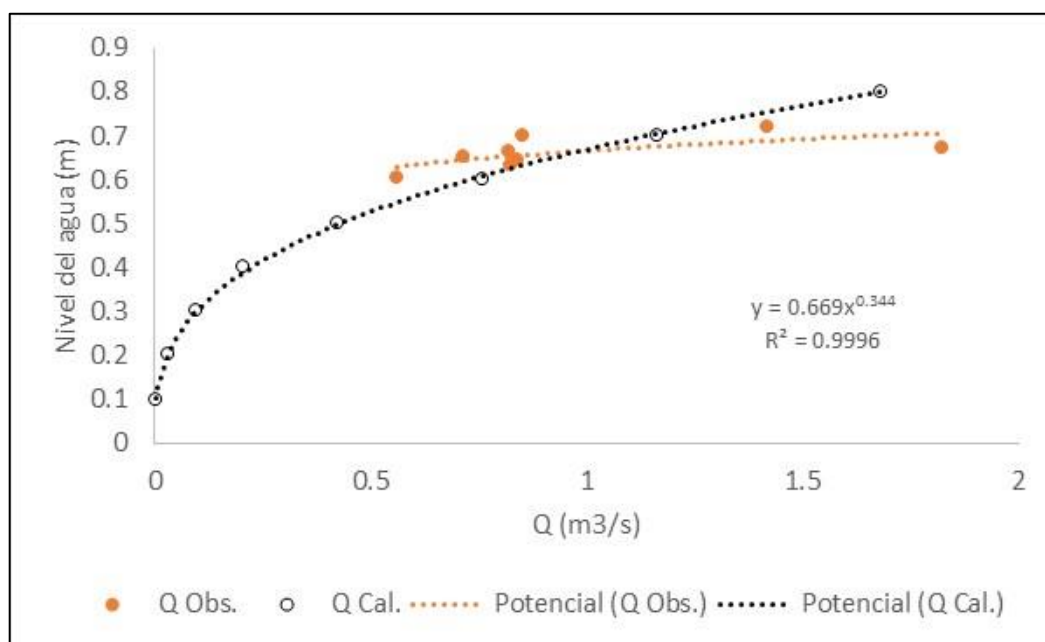


Figura 12. Caudales observados (Q Obs.) y calculados (Q Cal.), respecto al nivel de la lámina de agua (h) en el río Colonso.

3.4. Selección de parámetros para la calibración del modelo

Obtenidos los criterios de eficiencia para cada uno de períodos de calentamiento, se procedió a seleccionar los que mejor ajuste tuvieron, para ello, se estableció el siguiente criterio: $KGE \geq 0.32$ y $NSE \geq -0.68$ (ver **Tabla 6**).

Tabla 6. Parámetros y criterios de eficiencia obtenidos para cada uno de los periodos de calentamiento.

Periodo calentamiento		Parámetros				NSE [Q]	KGE [Q]
Inicio	Fin	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (día)		
2021-01-13	2021-07-13	21807	9.62	143.79	1.20	-0.54	0.33
2020-07-13	2021-07-13	11551	4.62	153.86	1.36	-1.11	0.20
2020-01-13	2021-07-13	16960	3.96	173.83	1.35	-0.69	0.32
2019-07-13	2021-07-13	18984.07	1.28	201.42	1.36	-0.68	0.32
2019-01-13	2021-07-13	21807.30	-0.29	216.93	1.36	-0.60	0.35
2018-07-13	2021-07-13	21807.30	-1.53	227.58	1.36	-0.65	0.33
2018-01-13	2021-07-13	21807.30	-2.53	246.62	1.35	-0.70	0.32
2017-07-13	2021-07-13	21807.30	-3.25	223.50	1.37	-0.76	0.30
2017-01-13	2021-07-13	21807.30	-4.06	258.71	1.28	-0.64	0.35
2016-07-13	2021-07-13	21807.30	-4.18	254.71	1.26	-0.59	0.36
2016-05-01	2021-07-13	21807.30	-4.03	239.75	1.27	-0.57	0.37

3.5. Validación del modelo hidrológico

Cada una de las combinaciones previamente seleccionadas, fueron utilizadas en el proceso de validación y de esta manera observar cuál de todas poseía mejor criterio de eficiencia para la reproductibilidad de los datos. Resultando 2 los seleccionados, ya que sólo se escogieron aquellas cuyo $KGE \geq 0$ (ver **Tabla 7**).

Tabla 7. Periodos de calentamiento que mejor KGE obtuvieron.

Periodo calentamiento		Parámetros				NSE [Q]	KGE [Q]
Inicio	Fin	X_1	X_2	X_3	X_4		
2020-01-13	2021-07-13	16960.90	3.96	173.83	1.35	-2.468	0.109
2016-05-01	2021-07-13	21807.30	-4.03	239.75	1.27	-2.127	0.007

En este sentido, fue el período con un calentamiento de 1 año y 6 meses el seleccionado, debido a que presentó un mejor criterio de eficiencia (KGE = 0.109). Los resultados gráficos de calibración y validación con los parámetros pertenecientes a dicha combinación pueden observarse en la **Figura 13** y **14**. Resulta necesario mencionar, que visualmente el modelo responde de forma significativa a eventos donde la intensidad de lluvia aumenta, ya que genera picos de crecida de flujo cada que uno de estos eventos ocurre.

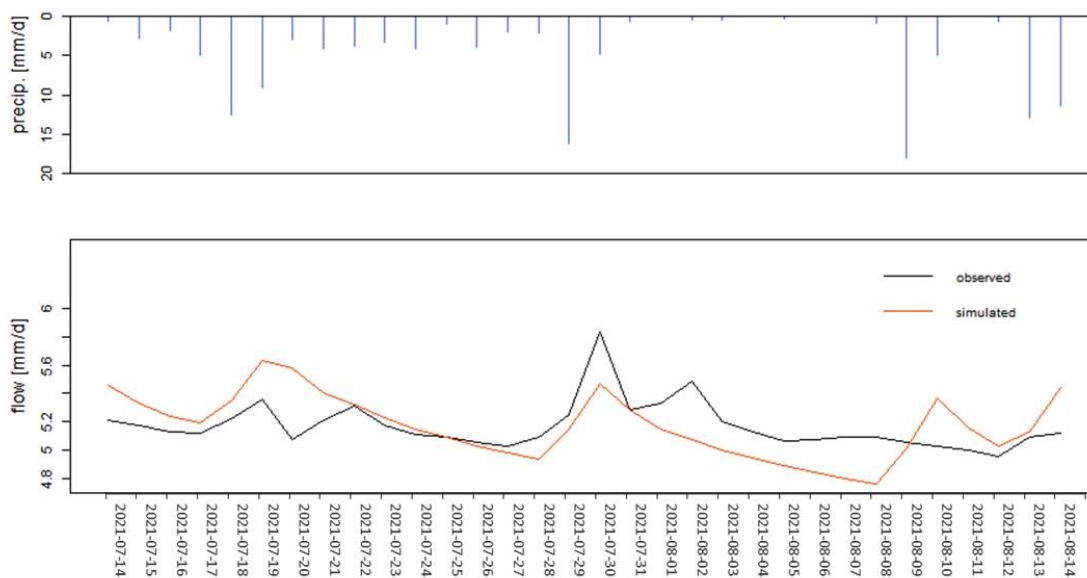


Figura 13. Calibración del modelo bajo un período de análisis comprendido entre el 2021-07-14 y el 2021-08-02.

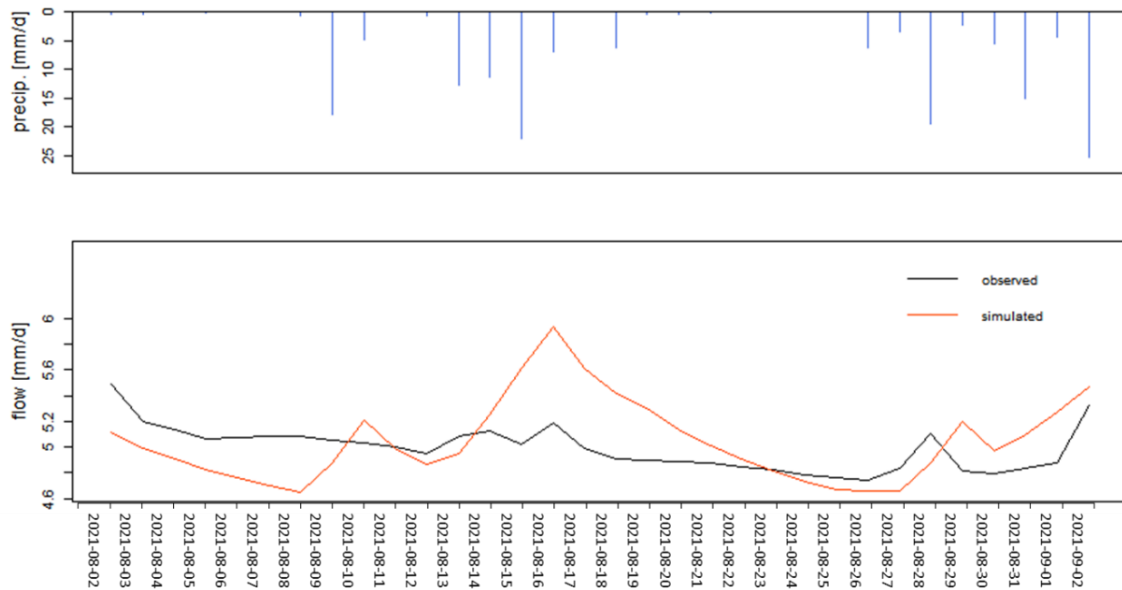


Figura 14. Validación del modelo para un período de análisis comprendido entre el 2021-08-02 y el 2021-09-02.

3.6. Análisis de caudales simulados

La **Figura 15.c** denota que los caudales presentan un aumento en su flujo respecto a la serie histórica (de 0.4 a 0.5 m³/s) tanto para el escenario 4.5 como para el 8.5. Esto último, puede estar ligado al incremento en la frecuencia de períodos de intensidad de lluvias proyectadas para ambos escenarios (**Figura 15.a**). Lo cual, también se ve reflejado en el ascenso de los picos de caudales para ambas series (RCP 4.5 Y 8.5), siendo el año 2020 el que menor valor de simulación registra (0.3 m³/s). Por otra parte, resulta necesario mencionar que, aunque se observa una tendencia de aumento en la temperatura promedio del aire para ambos escenarios (**Figura 15.b**), la misma no tendrá un impacto significativo en la disponibilidad hídrica de la microcuenca.

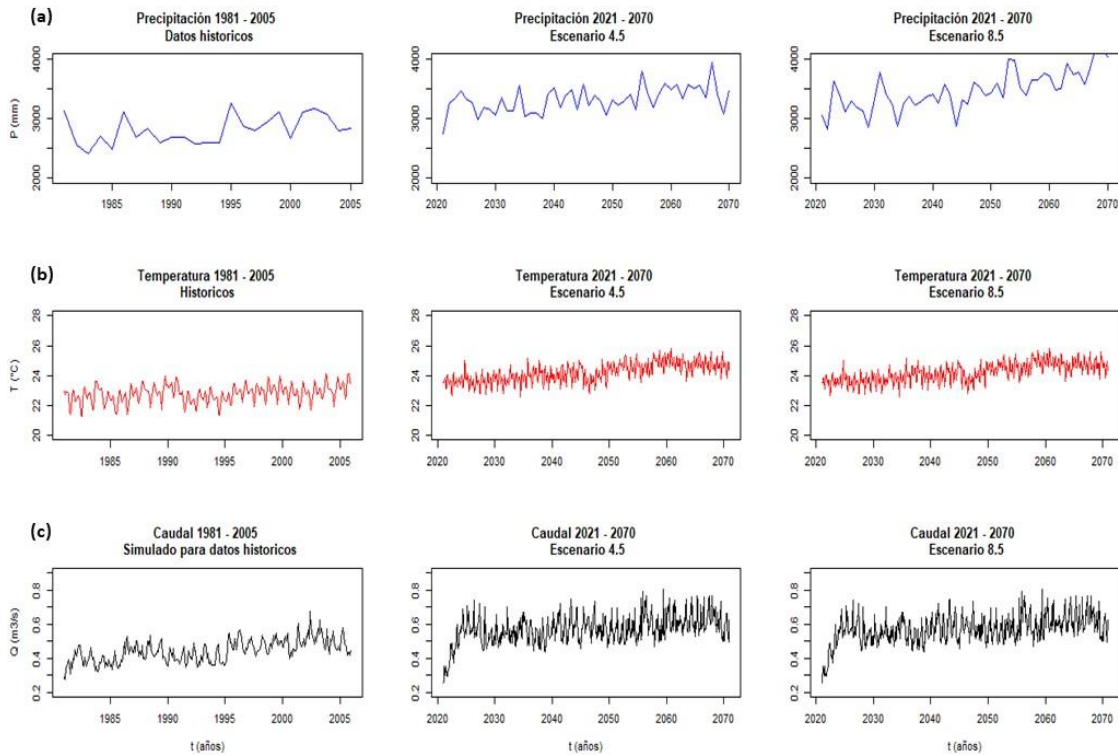


Figura 15. (a) Precipitación, (b) Temperatura y (c) Caudales simulados para el período histórico (1981-2005) y para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (2021-2070).

3.7. Curva de duración para caudales simulados

Como se observa en la **Figura 16**, sobre el eje de las abscisas de cada CDC se ubican los caudales medios diarios, mientras que, sobre el eje de las ordenadas, las probabilidades de que dichos caudales puedan ser igualados o excedidos. En este sentido, la pendiente pronunciada en los tramos iniciales y finales de cada una de las curvas indica que tanto los caudales altos como bajos se presentan durante períodos cortos. Por su parte, la pendiente alta en cada una de las CDC infiere caudales muy variables, característicos de caudales diarios. Respecto a la curva de duración de caudales del escenario 4.5 (**Figura 16.b**) se observa que la misma presenta un desplazamiento vertical ascendente respecto a la curva histórica (**Figura 16.a**), lo cual, denota un aumento en el caudal base. Esto mismo ocurre para el escenario 8.5, siendo el que mayor desplazamiento vertical presenta y por ende, donde mayor oferta hídrica habrá (**Figura 16.c**).

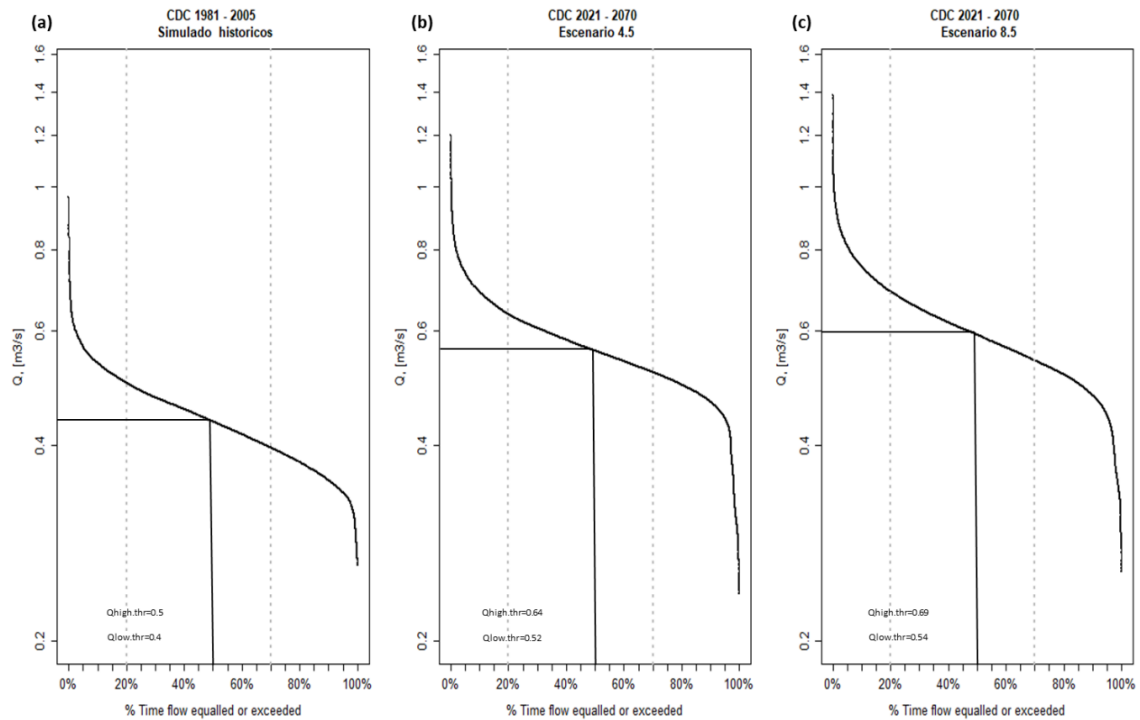


Figura 16. Curvas de duración de caudales histórica y para los RPC 4.5 y 8.5

El aumento de la oferta hídrica puede verse reflejado en la **Tabla 8**, la cual, presenta numéricamente las comparaciones entre los caudales proyectados para el año 2070 según cada escenario. En este sentido, tanto el RCP 4.5 como el 8.5 muestran panoramas de aumento en los caudales para todos los períodos de retorno, a excepción del $Pr = 0.99$ para el escenario 4.5; donde ocurre un descenso del 1.42% respecto al histórico. No obstante, para los demás resultados se infiere que los cambios proyectados en el régimen pluvial, tendrá implicaciones significativas en el aumento de la disponibilidad hídrica de la microcuenca.

Tabla 8. Cambio del caudal histórico simulado respecto a los caudales proyectados para los escenarios 4.5 y 8.5.

Pr (%)	Tr (años)	Q (m ³ /s)			ΔQ (%)	
		Hist.	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	100	0.642	0.850	0.940	24.483	31.737
10	10	0.536	0.689	0.754	22.251	28.941
20	5	0.499	0.637	0.691	21.600	27.682
50	2	0.435	0.559	0.592	22.154	26.503
70	1	0.397	0.519	0.541	23.488	26.601
99	1	0.310	0.305	0.347	- 1.423	10.601

Por su parte, la **Tabla 9** resume los resultados de la prueba t-student aplicada al comparar el promedio de caudales históricos respecto a ambos escenarios (4.5 y 8.5); donde se observa que tanto para el escenario 4.5 y 8.5 se tienen $p < 0.05$ (0.0076 y 0.0044, respectivamente). Lo cual, denota que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los caudales promedio de cada grupo de muestras comparado.

Tabla 9. Prueba t-student para diferencia de medias entre caudales históricos simulados respecto a los escenarios 4.5 y 8.5.

	Hist.	RCP 4.5	RCP 8.5
Media	0.470	0.593	0.644
Varianza	0.013	0.033	0.041
Observaciones	6	6	6
Coefficiente de correlación de Pearson	-	0.989	0.997
Grados de libertad	-	5	5
Estadístico t	-	-4.31	-4.91
p (dos colas)	-	0.0076	0.0044
Valor crítico de t (dos colas)	-	2.57	2.57

CAPITULO IV: INTERPRETACION Y DISCUSION

En todas las combinaciones de períodos de calentamiento implementadas, el valor para el parámetro x_1 fue alto y se estabilizó en 21807.30 mm, superando el rango recomendado (100 a 1200 mm) [19]. Lo que indica que el depósito de producción (x_1) para esta cuenca resultó mayor a lo esperado respecto a la parametrización del modelo original [42]. Por ello, puede estar compensando procesos particulares de esta cuenca, tales como, aportes de flujo subterráneo y fuerte intensidad de lluvia [43]. Esto último explica de cierta manera los resultados encontrados, ya que se considera que la precipitación promedio en la cuenca de estudio es relativamente alta (10 mm/día).

Por su parte, el parámetro x_2 , presenta valores positivos hasta la combinación de 2 años de calibración, de ahí en adelante todos se vuelven negativos hasta estabilizarse en -4.0 mm; lo cual, a diferencia del anterior parámetro, si entra dentro del rango establecido (-5 a 3 mm) [19]. Resulta necesario mencionar, que la combinación seleccionada al encontrarse dentro de los primeros 2 años de calibración posee un x_2 de 3.96, indicando que existe un aporte de flujo subterráneo al cauce [44].

El parámetro x_3 , presenta dos tendencias. La primera es que hasta al año y medio de período de calentamiento los valores están entre 143 y 173 mm, mientras que, para las combinaciones restantes, los valores oscilan entre 200 y 239 mm. No obstante, todos entran del rango recomendado (20 a 300 mm) [19]. Respecto al parámetro x_4 , este presenta resultados entre 1.20 a 1.37 días (cumple dentro del rango establecido: 1.1 a 2.9 días) [19]; lo cual, se interpreta como el tiempo que la microcuenca tarda en convertir la lluvia en escorrentía [42].

El criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) implementado en la calibración, arroja resultados negativos para cada una de las combinaciones, lo cual, indicaría que los caudales simulados no se ajustan a los observados [45]. Lo contrario ocurre con el criterio de eficiencia Kling-Gupta (KGE), ya que este arroja valores por encima de 0.2; infiriendo una

buena simulación del modelo [46]. La clara diferencia entre los valores que cada criterio arrojó produjo una disyuntiva de qué interpretación acorde a cada criterio elegir. No obstante, resulta necesario mencionar que los valores de NSE y KGE no deberían compararse directamente, ni tratarse como criterios aproximadamente equivalentes; ya que cada uno se comporta de manera diferente [45, 46]. Además, que existe evidencia donde altos valores de NSE no se traducen necesariamente en altos valores de KGE y viceversa [48].

Otro motivo por el cual no se pudo obtener mejores valores para cada uno de los criterios, fue porque el período de análisis contó con solo 50 días de registro, de los cuales 25 se utilizaron para calibración, mientras los días restantes para validación del modelo. Esto último, resulta importante destacar ya que para realizar un análisis robusto de sensibilidad para cualquier modelo hidrológico, es preferible contar con varios años de mediciones [21]. A su vez, es necesario mencionar que el ajuste de los resultados para la microcuenca solo representa el componente atmosférico, más no los aportes hídricos adicionales que esta misma recibe [49].

El caudal es una variable hidrológica relevante que puede ser usada como indicador de las respuestas hidrológicas respecto al cambio y variabilidad climática [50]. Por otro lado, a pesar de que no se tiene información hidrológica de la zona de estudio, se conoce que aumentos de temperatura y cambios en el régimen de precipitación; alteran algunos componentes en los sistemas hidrológicos, tales como: precipitaciones extremas, aumento de la evaporación y cambios en la escorrentía de los ríos [27, 48, 49]. Lo cual, es lo que se observa que ocurrirá en la microcuenca para ambos escenarios (**Figura 15**).

Los valores de caudales simulados (**Tabla 8**), nos dan una idea de la variación del comportamiento histórico frente al proyectado para ambos escenarios. En la cual, se observa diferencias estadísticamente significativas del caudal medio, tanto para el escenario 4.5 ($p = 0.0076$) como para el 8.5 ($p = 0.0044$). Por su parte, como en otros casos de estudio, se infiere que la temperatura cumple un papel mínimo en los procesos de descarga del río [50], atribuyendo que el incremento proyectado de la disponibilidad

hídrica se verá mayormente influenciado por los cambios en la frecuencia, intensidad y tiempo de la precipitación [27, 48].

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados permiten realizar una primera evaluación e interpretación cualitativa de los potenciales impactos de la temperatura y precipitación sobre la disponibilidad de los recursos hídricos de la microcuenca. En este sentido, las proyecciones indican un cambio en la temperatura promedio respecto al histórico entre 1.4 y 2 °C para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, respectivamente. Esto también ocurre para la precipitación, ya que se proyectan aumentos del 16.4% para el escenario 4.5 y 20.9% para el escenario 8.5; lo cual, aumentará el caudal promedio de la microcuenca hasta en el escenario más pesimista (RCP 8.5). Respecto a su estacionalidad, a pesar de que se proyectan aumentos para ambas variables meteorológicas, las mismas seguirán manteniendo un régimen bimodal.

A pesar de obtener valores $KGE > 0$ y parámetros ajustados a las zonas de estudio, los mismos pueden mejorarse si se utilizan series de caudales con períodos de registro más extensos tanto para la calibración y validación del modelo, lo que implica establecer un programa de monitoreo continuo de caudal en la planta de tratamiento de agua potable Colonso. Las simulaciones para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, indican un aumento en los caudales respecto al histórico de un 22.15% y 26.50%, respectivamente. Lo cual, va ligado con una variación en el régimen pluviométrico, con un aumento en la frecuencia de lluvias intensas; así como un aumento gradual de la temperatura.

El aumento en la disponibilidad hídrica de una cuenca no siempre es una condición favorable, ya que el aumento de la precipitación implica un aumento en la erosión y por lo tanto la producción sedimentos. El aumento de caudales puede significar un cambio en funcionamiento hidráulico de la infraestructura y posibilidad de superar la capacidad de las hidráulicas de diseño. En general se recomienda a las autoridades competentes realizar control y monitoreo hidrológico, mediante la instalación de una estación hidrológica

permanente en la cuenca del río Colonso para así tener la suficiente información base y generar planes de prevención y cuidado de las fuentes hídricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Mastrandrea MD, Field CB, Stocker TF, Edenhofer O, Ebi KL, Frame DJ, et al. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. 2010. Available: <http://www.ipcc.ch>
2. Collier CG. The impact of urban areas on weather. *Q J R Meteorol Soc.* 2006; 132: 1–25. doi:10.1256/qj.05.199
3. Kour R, Patel N, Krishna AP. Climate and hydrological models to assess the impact of climate change on hydrological regime: a review. *Arab J Geosci.* 2016; 9:544. doi:10.1007/s12517-016-2561-0
4. Staten PW, Rutz JJ, Reichler T, Lu J. Breaking down the tropospheric circulation response by forcing. *Clim Dyn.* 2012; 39: 2361–2375. doi:10.1007/s00382-011-1267-y
5. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, et al. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis.* Intergovernmental Panel on Climate Change, editor. IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. 2014. doi:10.1017/CBO9781107415324
6. Buytaert W, Célleri R, Timbe L. Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: Effects of GCM uncertainty. *Geophys Res Lett.* 2009; 36. doi:10.1029/2008GL037048
7. Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, Bindi M, Abdul Halim S, Achlatis Australia M, et al. Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems. In Press. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts J, Skea PR, Shukla A, et al., editors. *Global Warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global*

- warming of 15°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change,. In Press. 2018. p. 138. Available: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>
8. Franks SW. Water Resources Systems-Water Availability and Global Change: Proceedings of an International Symposium (Symposium HS02a) Held During IUGG 2003, the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics : at Sapporo, Japan, from 30. Kyoto, Japan: IÂHS Publ; 2003. Available: <http://books.google.com/books?hl=ja&lr=&id=vHt9ypsLhrMC&pgis=1>
 9. Mejía A. Water scarcity in Latin America and the Caribbean: Myths and reality. Water for the Americas: Challenges and Opportunities. 2014. pp. 40–60.
 10. Muñoz Á. Validación y Análisis de Consenso de Modelos de Escenarios de Cambio Climático para Ecuador, Informe Final. Proy MAE-INAMHI Quito. Maracaibo. 2010.
 11. Armenta G, Villa J, Jácome P. Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático. INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). 2016; 104.
 12. Scher S. Toward Data-Driven Weather and Climate Forecasting: Approximating a Simple General Circulation Model With Deep Learning. *Geophys Res Lett*. 2018; 45: 12, pp. 616-622. doi:10.1029/2018GL080704
 13. Xu C. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Prog Phys Geogr Earth Environ*. 1999; 23: 229–249. doi:10.1177/030913339902300204
 14. Montecelos Y. Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático. *Ciencias en Ciencias la Tierra con orientación en Geociencias Ambient Model*. 2018; 114.

Available: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2531>

15. Jimeno P. Simulación de procesos hidrológicos utilizando técnicas de machine learning y modelos hidrológicos. Universidad de Murcia. 2018. Available: <http://repositorio.ucam.edu/handle/10952/3381>
16. Todini E. History and perspectives of hydrological catchment modelling. *Hydrology Research*. 2011. pp. 73–85. doi:10.2166/nh.2011.096
17. Mobilia M, Longobardi A. Impact of rainfall properties on the performance of hydrological models for green roofs simulation. *Water Sci Technol*. 2020; 81: 1375–1387. doi:10.2166/wst.2020.210
18. Coron L, Thirel G, Delaigue O, Perrin C, Andréassian V. The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environ Model Softw*. 2017; 94: 166–171. doi:10.1016/j.envsoft.2017.05.002
19. Perrin C, Michel C, Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J Hydrol*. 2003; 279: 275–289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7
20. Van Esse WR, Perrin C, Booij MJ, Augustijn DCM, Fenicia F, Kavetski D, et al. The influence of conceptual model structure on model performance: A comparative study for 237 French catchments. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2013; 17: 4227–4239. doi:10.5194/hess-17-4227-2013
21. Humphrey GB, Gibbs MS, Dandy GC, Maier HR. A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: Integrating hydrological model outputs into a Bayesian artificial neural network. *J Hydrol*. 2016; 540: 623–640. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.06.026
22. Frausto Martínez O, Vázquez Sosa A, Colin Olivares O, Hernández Aguilar ML, Arroyo Arcos L, David Velázquez Torres D. Monitoreo de indicadores de resiliencia urbana

- ante huracanes para las ciudades costeras: Playa del Carmen, caribe mexicano. Esteves Juan Man Rodríguez y Rodríguez, C M W, Aguilar, M L R Riesgo Desastr en México eventos Hidrometeorol y climáticos. 2018; pp. 29–55. Available: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/desastres-mexico/Libro-Riesgo-desastres-en-Mexico.pdf
23. Córdova Tafur EE. Evaluación del producto de precipitación diaria TMPA 3B42 V7 para su aplicabilidad en la modelización hidrológica en el Ecuador utilizando diferentes metodologías de corrección de datos. 2017; 202. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18066>
 24. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Boletín Climático Mensual. Quito; 2021. Available: <https://www.inamhi.gob.ec/boletines-climaticos-y-agricolas/#>
 25. Jones RN, Chiew FHS, Boughton WC, Zhang L. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. *Adv Water Resour.* 2006; 29: 1419–1429. doi:10.1016/j.advwatres.2005.11.001
 26. Sorribas MV, Paiva RCD, Melack JM, Bravo JM, Jones C, Carvalho L, et al. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Clim Change.* 2016; 136: 555–570. doi:10.1007/s10584-016-1640-2
 27. Milly PCD, Dunne KA, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature.* 2005;438: 347–350. doi:10.1038/nature04312
 28. Bangash F. Analysis of climate change impact on hydrological ecosystem services and water allocation in water scarce mediterranean river basins. TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). Universitat Rovira i Virgili. 2014. Available: <http://www.tdx.cat/handle/10803/145256>
 29. Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M. Challenges to manage the risk of water

- scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resour Manag.* 2007; 21: 775–788. doi:10.1007/s11269-006-9111-6
30. Gobierno Autónomo Descentralizado de Tena. Actualización Del Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Tena. *Inf del Gob del Cantón Tena.* 2019; 2: 517. Available: <https://tena.gob.ec/images/convocatoria/ACTUALIZACION-PDOT-2020-2023.pdf>
 31. Sezen C, Partal T. The utilization of a GR4J model and wavelet-based artificial neural network for rainfall–runoff modelling. *Water Sci Technol Water Supply.* 2019;19: 1295–1304. doi:10.2166/ws.2018.189
 32. Freire CM. Optimización del proceso de potabilización de agua en la planta de tratamiento Colonso: Tena. Facultad de Ciencias. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2016. Available: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/6469>
 33. SENAGUA. Mapa Hidrogeológico, a escala 1:250.000, año 2014. In: Metadatos del Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador [Internet]. 2014 [cited 12 Dec 2021]. Available: shorturl.at/ijmpH
 34. Pastén M, González V, Espínola C. Clasificación Climática del Paraguay Utilizado los Métodos de Köppen y Thornthwaite. *Univ Nac Asunción sdi cnc una py.* 2011; pp. 1–17.
 35. Moreno S. Estudio y diseño geométrico de la AV. 15 de noviembre (etapa III de 1.71 Km de longitud) Canton tena, Provincia de Napo. 2013; pp. 1–484. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1736>
 36. Chancay J, Espitia-Sarmiento E. Improving Hourly Precipitation Estimates for Flash Flood Modeling in Data-Scarce Andean-Amazon Basins: An Integrative Framework Based on Machine Learning and Multiple Remotely Sensed Data. *Remote Sens.* 2021;

13: 4446. doi:10.3390/rs13214446

37. Campozano L, Tenelanda D, Sanchez E, Samaniego E, Feyen J. Comparison of Statistical Downscaling Methods for Monthly Total Precipitation: Case Study for the Paute River Basin in Southern Ecuador. *Adv Meteorol.* 2016. doi:10.1155/2016/6526341
38. Oudin L, Hervieu F, Michel C, Perrin C, Andréassian V, Anctil F, et al. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *J Hydrol.* 2005; 303: 290–306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
39. Domínguez Calle E. Protocolo Para La Modelacion Matematica De Procesos Hidrologicos. *Meteorol Colomb.* 2000; 2: 33–38. Available: https://www.researchgate.net/publication/235983737_PROTOCOLO_PARA_LA_MODELACION_MATEMATICA_DE_PROCESOS_HIDROLOGICOS
40. Knoben WJM, Freer JE, Woods RA. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2019; 23: 4323–4331. doi:10.5194/hess-23-4323-2019
41. Yokoo Y, Sivapalan M. Towards reconstruction of the flow duration curve: Development of a conceptual framework with a physical basis. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2011; 15: 2805–2819. doi:10.5194/hess-15-2805-2011
42. Nepal S, Chen J, Penton DJ, Neumann LE, Zheng H, Wahid S. Spatial GR4J conceptualization of the Tamor glaciated alpine catchment in Eastern Nepal: evaluation of GR4JSG against streamflow and MODIS snow extent. *Hydrol Process.* 2017; 31: 51–68. doi:https://doi.org/10.1002/hyp.10962
43. Carvajal L, Roldán E. Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J. Aplicación: Cuenca del río Aburrá. Año. 2007; 74: 73–87.

44. Harlan D, Muljana W, Munajat C. Rainfall-Runoff Modeling of Citarum Hulu River Basin by Using GR4J. *Lect Notes Eng Comput Sci*. 2010; 2.
45. Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE*. 2007; 50: 885–900.
46. Valles LJR. Aplicación de Redes Neuronales Artificiales en Pronóstico hidrológico. Caso de estudio: Cuenca Rio Grande de San Miguel. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2017: 7.
47. Liu D. A rational performance criterion for hydrological model. *J Hydrol*. 2020; 590: 125-488. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125488>
48. Knoben WJM, Freer JE, Woods RA. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2019; 23: 4323–4331. doi:10.5194/hess-23-4323-2019
49. Duque P. Modelo de gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Tarqui, analizando escenarios de cambio climático mediante la herramienta de simulación Hydro-BID. *Politécnica Salesiana*. 2020. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19553>
50. Dahal N, Shrestha UB, Tuitui A, Ojha HR. Temporal changes in precipitation and temperature and their implications on the streamflow of Rosi river, Central Nepal. *Climate*. 2019; 7: 3. doi:10.3390/cli7010003
51. Guardiola M, Troch PA, Breshears DD, Huxman TE, Switanek MB, Durcik M, et al. Decreased streamflow in semi-arid basins following drought-induced tree die-off: A counter-intuitive and indirect climate impact on hydrology. *J Hydrol*. 2011; 406: 225–233. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.06.017