



POSGRADOS

MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES CON MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

RPC-SO-17-NO.363-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:
INFORMES DE INVESTIGACIÓN

TEMA:
EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN
DEL ESCENARIO HIDROLÓGICO
FUTURO 2050 DE LA CUENCA ALTA
DEL RÍO MIRA

AUTOR
JACQUELINE ALEXANDRA GUEVARA AVILÉS

DIRECTOR:
CHRISTIAN GONZALO
DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ

QUITO – ECUADOR
2023



Autor:



Jacqueline Alexandra Guevara Avilés

Ingeniera Ambiental

Candidata a Magíster en Recursos Naturales Renovables con Mención en Remediación y Restauración por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.

jackyguevaraa@gmail.com

Dirigido por:



Christian Gonzalo Domínguez González

Ingeniero Civil

Docteur Specialite Geosciences Ressources Naturelles Et Environnement por la Universidad Paris 6

cdominguez@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Jacqueline Alexandra Guevara Avilés

EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL ESCENARIO HIDROLÓGICO FUTURO 2050 DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MIRA

DEDICATORIA

A quienes siempre han sido mi fuente de inspiración y fortaleza en cada paso que doy en la vida, este trabajo está dedicado a ustedes con gratitud y amor, mi reconocimiento por su constancia y apoyo en mi búsqueda del conocimiento y desarrollo personal.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento a mi tutor, por su orientación experta y apoyo constante, sus valiosas contribuciones y conocimientos desempeñaron un papel fundamental a lo largo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	14
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	14
3.1.1. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS Y TOPOGRAFÍA.....	14
3.1.2. USOS Y TIPOS DE SUELO.....	15
3.1.3. INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA.....	17
3.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	18
3.2.1. TIPO Y CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	18
3.2.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	19
3.3. CAMBIO CLIMÁTICO Y ESCENARIOS HÍDRICOS.....	23
3.4. GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS.....	26
3.4.1. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS.....	26
3.4.2. CUENCAS TRANSFRONTERIZAS.....	28
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	30
4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	30
4.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	38
4.3. MODELO DE CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA.....	38
4.4. USO Y TIPO DE SUELO DE LA CUENCA.....	42
4.4.1. PROCESAMIENTO DE LA COBERTURA Y USO DE LA TIERRA	43
4.4.2. PROCESAMIENTO DE LAS CLASES TEXTURALES DE SUELO...	44
4.4.3. PROCESAMIENTO DE COEFICIENTE DE CULTIVO (KC)	
ESCENARIO ACTUAL Y FUTURO.....	44
4.5. ESCENARIOS HÍDRICOS FUTUROS AL 2050.....	47
4.5.1. HOMOGENIZACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA	
DIARIA.....	48
4.5.2. REGIONALIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA	
DIARIA.....	49
4.5.3. TRATAMIENTO DE DATOS DE CAUDAL DIARIO.....	49

4.5.4.	ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA	50
4.5.5.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE CAUDALES	50
4.5.6.	EXTRACCIÓN DE DATOS FUTUROS Y CALIBRACIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS	51
4.5.7.	MODELACIÓN DEL ESCENARIO HÍDRICO FUTURO 2050 POR CAMBIOS DE USO DE SUELO	52
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
5.1.	CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS, USO Y TIPO DE SUELO DE LA CUENCA.....	55
5.1.1.	CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS.....	55
5.1.2.	ANÁLISIS DEL USO DE SUELO DE LA CUENCA	59
5.1.3.	ANÁLISIS DEL TIPO DE SUELO DE LA CUENCA.....	65
5.2.	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS	66
5.2.1.	RESULTADOS DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA	67
5.2.2.	RESULTADO TRATAMIENTO DE CAUDALES.....	69
5.2.3.	COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	71
5.2.4.	RESULTADOS CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	75
5.2.5.	OBTENCIÓN DE DATOS FUTUROS Y CALIBRACIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS	80
5.2.6.	RESULTADOS MODELACIÓN DEL ESCENARIO HÍDRICO FUTURO 2050	88
5.2.7.	EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CAUDAL	94
5.2.8.	EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS POR CAMBIO DE USO DE SUELO.....	96
5.2.9.	RECOMENDACIONES EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS.....	98
5.2.10.	RECOMENDACIONES EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA 100	
6.	CONCLUSIONES.....	103
	REFERENCIAS	106
	ANEXOS	116

EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL ESCENARIO HIDROLÓGICO FUTURO 2050 DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MIRA

AUTOR:

JACQUELINE ALEXANDRA GUEVARA AVILÉS

RESUMEN

La cuenca alta del río Mira presenta actualmente un incremento en las actividades agropecuarias (17,7%), la misma que al 2020 representa el 51% de la superficie total. Dado estas condiciones y al impacto que podría tener el cambio climático en esta zona, en este trabajo se ha estimado el escenario hidrológico futuro al 2050 de la cuenca alta del río Mira. Para ello, se aplicó el modelo hidrológico agregado GR2M incorporando características de un enfoque de modelo semi-distribuido, a nivel de subcuencas hidrográficas, con datos hidrometeorológicos locales limitados, información de uso y tipo de suelo y escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Como resultado se obtuvo que el caudal de la cuenca podría incrementarse entre el 7,3% y 12,4% considerando que se pronostica un incremento de la precipitación y la temperatura para el año 2050. En relación a cambios en el uso del suelo hacia el futuro, el modelo no es sensible al cambio y pronostica la disminución de la disponibilidad de agua entre el 1% y 8%. En consecuencia, la implementación de una adecuada gestión integral del recurso hídrico en el presente puede influir de forma positiva en el futuro, facilitando una perspectiva de manejo sostenible del agua.

Palabras clave:

escenario hídrico, modelación hidrológica, cambio climático.

ABSTRACT

The upper Mira River basin currently exhibits an increase in agricultural activities (17.7%), which, as of 2020, accounts for 51% of the total land area. Given these conditions and the potential impact of climate change in this region, this study has estimated the future hydrological scenario for the upper Mira River basin in 2050. To do so, the aggregated hydrological model GR2M was applied, incorporating characteristics of a semi-distributed model approach at the level of hydrographic sub-basins, with limited local hydrometeorological data, land use and land type information, and climate change scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. The results indicate that the basin's flow could increase by 7.3% to 12.4%, considering projected increases in precipitation and temperature by the year 2050. Regarding future land use changes, the model is not sensitive to change and predicts a decrease in water availability by 1% to 8%. Consequently, implementing effective integrated water resource management in the present can have a positive impact on the future, facilitating a perspective for sustainable water management.

Palabras clave:

hydrological scenario, hydrological modeling, climate change

1. INTRODUCCIÓN

El manejo de los recursos hídricos en el Ecuador, se ha convertido en un desafío especialmente en las zonas de limítrofes con países como Colombia y Perú, debido a que, el agua no distingue fronteras y al ser un recurso cada vez más limitado en calidad y cantidad, requiere de una serie de estrategias políticas y diplomáticas para fortalecer la gestión integral entre países. Según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica – MAATE, (2023^a) el Ecuador y Colombia comparten 4 cuencas transfronterizas, que representan 1.258.905,48 ha de la superficie continental, estas son la Cuenca Mataje, Cuenca Mira, Cuenca Putumayo, Cuenca Carchi – Guaytara.

En este contexto, la cuenca transfronteriza del Mira con una extensión de 12.145,73 km² tiene su nacimiento en el Ecuador, para este estudio se le ha denominado “cuenca alta del río Mira”, esta unidad hidrográfica tiene una superficie de 1.916 km² y sus aguas abarcan el 33,45% de la provincia del Carchi y 13,63% de Imbabura, que se caracteriza por ser una zona agroproductiva que se desarrolla en medio del páramo de la región andina albergando una gran diversidad de fauna y flora, lo que ha generado que esta zona contemple 6 mecanismos de conservación declarados por el Estado con el objetivo de conservar y proteger los recursos naturales e hídricos, y que presenta una gran demanda de agua para riego, generación hidroeléctricidad y energía hidrotérmica y para consumo humano con un total de 27.763 L/s requeridos únicamente para estos tipos de usos y aprovechamientos. Sin embargo, para atender esta gran demanda de agua es necesario conocer la cantidad de agua disponible en la cuenca, lo cual es gran reto debido a la escasa cantidad de estaciones meteorológicas recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial – OMM para llevar a cabo un monitoreo adecuado, considerando los problemas sociales relacionados a la violencia delincuencia, grupos armados ilegales, minería ilegal y cultivos ilegales en la cuenca (MAATE, 2023^a; PNUD, 2021) .

Con estos antecedentes, se puede mencionar que, para conocer el estado actual y futuro de una cuenca, se llevó a cabo la “Evaluación y determinación del Escenario Hidrológico Futuro 2050 de la Cuenca Alta del Río Mira” mediante la aplicación de modelos hidrológicos como una herramienta que facilita la gestión del recurso hídrico especialmente en zonas de difícil acceso o que no cuentan con suficiente información. Cabe señalar que, todo modelo es perfectible, y dependerá de los datos observados que se disponga, sin embargo, nos muestra un posible escenario del recurso y de las acciones que se deberán considerar para disponer del recurso hídrico en calidad y cantidad para las futuras generaciones.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En Ecuador existe una inherente falta de información hidrometeorológica a nivel nacional, y la cuenca alta del río Mira no es la excepción, por ello, la Organización Meteorológica Mundial – OMM, ha definido que esta zona presenta una baja densidad de estaciones de medición con base a sus criterios y recomendaciones. La información hidrometeorológica es clave para la planificación hídrica y una toma de decisiones basada en criterios técnicos, por lo tanto, es importante conocer la disponibilidad del recurso hídrico, especialmente en las zonas altas y que albergan ecosistemas frágiles, como es el caso del páramo y que pueden verse afectados por un aumento en la demanda de agua que muchas veces se autoriza sin conocer previamente su disponibilidad. (PNUD, 2021).

En este sentido, la recopilación de datos sobre la disponibilidad de agua es crucial, por ello, la modelación hidrológica brinda una alternativa para potenciar los sistemas de monitoreo, permite generar datos más relevantes a través de simulaciones basadas en datos observados, lo cual facilita la comprensión de los procesos hidrológicos y la generación de predicciones basadas en escenarios específicos; fortaleciendo la generación de datos que permitan aclarar incertidumbres, especialmente cuando las observaciones en el terreno tienen limitaciones en términos de espacio, tiempo, recursos financieros y tecnología (UNESCO, 2019; USAID, 2022).

La principal actividad de la cuenca alta del río Mira es la agricultura, sin embargo, su población enfrenta altos niveles de pobreza y riesgos como la violencia, la delincuencia y la minería ilegal. Estos problemas se derivan de una gestión inadecuada de desechos y prácticas agrícolas perjudiciales, sumado a la expansión de la agricultura que causa fragmentación de hábitats, y la falta de gobernanza del agua que genera una presión sobre los recursos hídricos constituyendo un gran desafío, considerando que en la zona

existe la presencia de cultivos ilícitos y grupos armados que agravan la situación (PNUD, 2021).

Para el año 2050, a nivel global, la agricultura enfrentará un aumento del 60% en la producción de alimentos, llegando al 100% en países en desarrollo. Esta demanda se encuentra en un contexto de creciente presión sobre los recursos de agua dulce. La industria manufacturera anticipa un aumento del 400% en la demanda de agua entre 2000 y 2050, y el suministro de agua para fines sanitarios se vuelve costoso debido al rápido crecimiento de la población en zonas marginadas. La distribución desigual del agua en el planeta genera desafíos para el desarrollo socioeconómico y humano, con una creciente competencia por recursos hídricos, especialmente en el sector agrícola, que ya utiliza el 70% del agua extraída a nivel mundial y depende de riego para la seguridad alimentaria (Banco Mundial, 2017; UNESCO, 2015^a; UNESCO, 2015b)UNESCO, 2015bUNESCO, 2015b.

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

3.1.1. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS Y TOPOGRAFÍA

Cuenca hidrográfica

Desde el punto de vista hidrológico, una cuenca es un área que se encuentra delimitada topográficamente, con una red de drenaje hacia una salida en común, de esta manera se puede considerar que, las cuencas hidrográficas tienen las siguientes características topológicas: i) dividen áreas continentales en subunidades y ii) presentan niveles de anidación, es decir, que una cuenca está conformada por cuencas de menor extensión. Sin embargo, es importante señalar que, además de las características físicas estas superficies desde un punto de vista biológico, incluyen organismos vivos, un ambiente físico para desarrollarse y un componente social; convirtiéndolas en sistemas complejos de interacciones (Salehpour Jam & Mosaffaie, 2023).

En el caso de Ecuador la cuenca hidrográfica es la unidad territorial, para la adecuada gestión de los recursos naturales y especialmente de los recursos hídricos, en este sentido, con el objetivo de establecer el marco para una gestión integral tanto a nivel nacional como transfronterizo, la ex Secretaría del Agua (SENAGUA), generó la cartografía de unidades hidrográficas bajo un sistema estandarizado de delimitación y codificación. En este contexto, la Secretaría de la Comunidad Andina y la oficina sudamericana de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, oficializaron el Mapa de Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas de la Comunidad Andina a escala 1:25.000, con un nivel 5 de desagregación de las unidades hidrográficas según la metodología (Secretaría del Agua, 2017).

Características morfométricas

Los parámetros morfométricos son medidas empleadas para caracterizar la topografía de una cuenca hidrográfica, estas son la descripción de sus propiedades físicas, como su forma, tamaño y topografía; las cuales son cuantificables y medibles, y permiten generar una comprensión detallada de la estructura de la unidad hidrográfica, desempeñando un papel esencial en la planificación y gestión de los recursos hídricos. Para ello, las características se pueden clasificar en tres grupos principales: i) características de forma, que abordan la configuración de la cuenca en criterios generales como su área, perímetro, ancho, alargamiento, Coeficiente de Gravelius; ii) características de relieve, las cuales se centran en la topografía de la cuenca y consideran parámetros como altitud, pendiente, curva hipsométrica y finalmente iii) características de drenaje, que permiten analizar la red hídrica que recorre la cuenca, como la longitud del cauce principal, número de corrientes y orden y densidad de drenaje. En este contexto, es posible conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca, identificar zonas en riesgo de inundación, erosión, sedimentación, y de esta manera gestionar el uso y el aprovechamiento del recurso de una forma sostenible (Posada-Arrubla & García-Hernández, 2018).

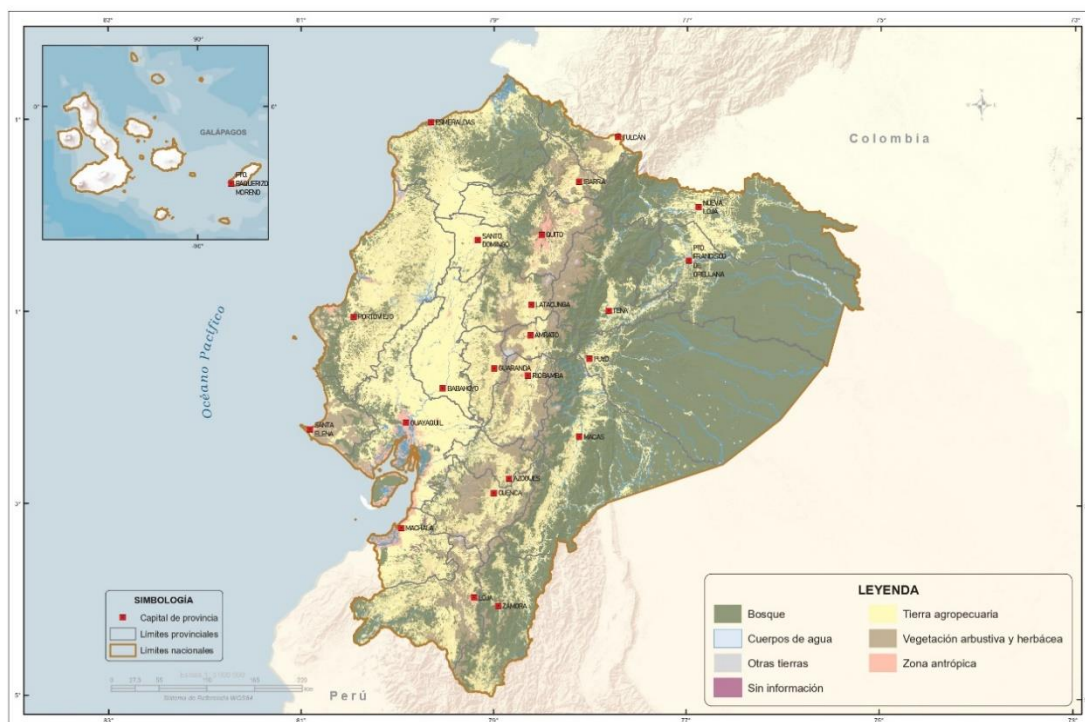
3.1.2. USOS Y TIPOS DE SUELO

Los usos y tipos de suelo del Ecuador se encuentran identificados a través de las Coberturas y Uso de la Tierra – CUT, donde la cobertura de la tierra se constituye como la cubierta biofísica que se observa sobre la superficie terrestre, incluyendo elementos naturales y antrópicos, mientras que el uso de la tierra representa la ocupación que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura, resultado de la interrelación entre los factores biofísicos y culturales de un espacio geográfico determinado, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica – MAATE a través de CUT 2020 publicado en el año 2023 (Figura 1), identificó 7 coberturas a nivel 1 a nivel nacional: bosque, tierra agropecuaria, vegetación arbustiva y herbácea, zona antrópica, cuerpo de agua y otras tierras y áreas sin información MAATE, 2023); mientras que la información correspondiente a tipo de suelo se encuentra disponible a través de la información cartográfica del Ministerio de Agricultura – MAG en

conformidad con lo establecido en su Catálogo de Objetos Geográficos y Productos Cartográficos Agropecuarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería, Volumen V (MAG, 2021).

Figura 1

Mapa de Coberturas y Uso de la Tierra – CUT



Fuente: MAATE (2023a)

Los cambios de uso de suelo mantienen una influencia directa en las alteraciones de escurrimiento de la cuenca y por ende, afecta al ciclo hidrológico, estos cambios tienen impactos significativos en los procesos de retención de vegetación superficial, evapotranspiración, escorrentía precipitación y la infiltración del agua superficial, en consecencial la deforestación, el crecimiento de las zonas urbanas, la expansión de la frontera agrícola puede presentar eventos como inundaciones y otros aspectos vinculados al flujo del agua a corto o largo plazo (Guo et al., 2023).

3.1.3. INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

Las series temporales continuas de datos de precipitación, temperatura, caudal y niveles de agua, pueden variar en su disponibilidad en muchas zonas del mundo, en especial en países en vías de desarrollo, donde estos datos son irregulares o en algunos casos inexistentes. Por esta razón, no cabe duda de la importancia de mantener mediciones de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. En algunos casos el uso de redes de monitoreo satelital han sido la solución, sin embargo, para lograr una mayor precisión estos deben contar con datos de observación terrestre y mejorar la calibración (Walker et al., 2016).

Los ciclos climáticos e hidrológicos ya no son estacionarios, esto debido a los cambios climáticos actuales, es decir, las condiciones hidrológicas y climáticas se encuentran cambiando de una manera direccional, esto puede desafiar la suposición anterior de una estabilidad en el largo plazo. En este contexto de no estacionalidad, es esencial contar con información y datos precisos para la gestión de los recursos hídricos y así comprender y adaptarse a los cambios en la disponibilidad y calidad del agua (Botero-Acosta et al., 2022).

Con estos antecedentes, y con respecto a la cuenca alta del Río Mira como parte del cuenca binacional Mira-Mataje, se puede encontrar que existe insuficiencia de datos, la cual se origina por la escasa cantidad de estaciones meteorológicas recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial – OMM para llevar a cabo un monitoreo hidrológico adecuado, entre las razones vinculadas a esta problemática se destacan los complejos riesgos relacionados con la seguridad como violencia, delincuencia, grupos armados ilegales, minería ilegal y cultivos ilegales en la cuenca (PNUD, 2021).

3.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

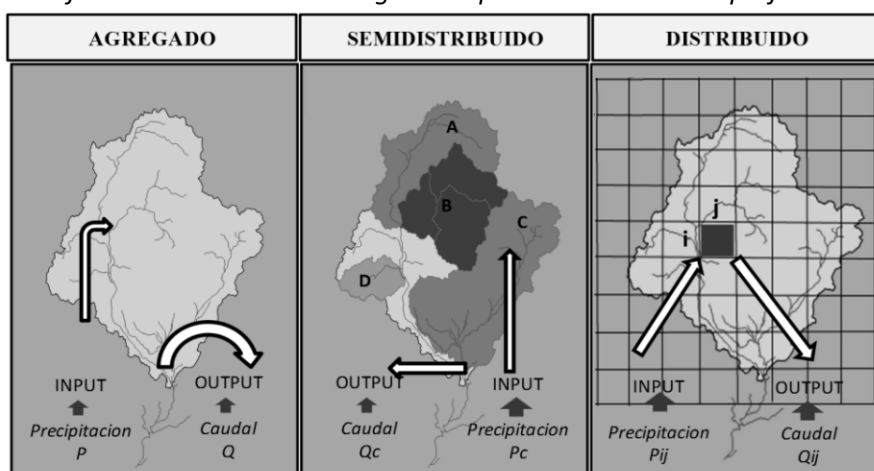
3.2.1. TIPO Y CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Según Aguilar & Díaz, (2016) los modelos pueden ser categorizados bajo diferentes criterios, considerando factores como el enfoque matemático, el nivel de detalle en la representación espacial de sus componentes, entre otros. En la mayoría de casos, los modelos hidrológicos se definen según cómo representan la superficie de la cuenca, como: i) agregados, ii) semi-distribuidos o iii) distribuidos (Figura 2); según su enfoque matemático como i) deterministas o ii) estocásticos; y la manera que abordan los procesos hidrológicos como i) basados en principios físicos o ii) observaciones empíricas. En este contexto, la investigación se centrará en los modelos según la representación de la superficie de la cuenca:

- Modelo agregado. Evalúa a la cuenca con valores uniformes, sin tener en cuenta las variaciones espaciales.
- Modelo distribuido. Representa en gran detalle los procesos y parámetros.
- Modelo semi-distribuido. Consiste en un punto intermedio, que ofrece una representación parcial de la variabilidad espacial agrupando zonas con comportamientos teóricamente similares.

Figura 2

Clasificación de los modelos según la representación de la superficie de la cuenca

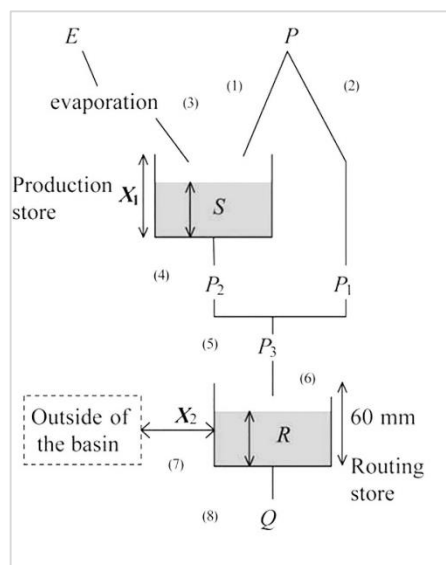


Fuente: Ministerio del Ambiente de Perú (2016)

3.2.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Los modelos hidrológicos pueden ser utilizados para comprender y predecir los fenómenos hidrológicos, fortaleciendo la gestión del recurso hídrico de una cuenca (Ergün & Demirel, 2023). El modelo agregado GR2M de balance hídrico, que opera con poca información, realiza simplificaciones en el modelamiento, como la homogeneidad del proceso característica de un modelo agregado, y es utilizable en cualquier extensión de la cuenca (Cabrera, 2009; Cruz & Romero, 2018). Además de su aplicación en la determinación de escenarios de climáticos para el análisis de parámetros hidrológicos al cambio climático futuro (Hadour et al., 2020). Este modelo emplea dos depósitos diferentes para representar la transformación de precipitación mensual en escorrentía en cada unidad hidrográfica (Figura 3). El primer depósito representa una reserva de humedad del suelo con una capacidad máxima de X_1 , un valor calibrado expresado en milímetros. Por otro lado, el segundo depósito es un depósito de recorrido cuadrático con una capacidad máxima de 60 mm. La relación entre este segundo depósito y el flujo de agua subterránea o el entorno exterior de la cuenca se regula mediante un segundo parámetro calibrado, X_2 , que es un valor adimensional positivo (Fathi et al., 2023a; Hrou et al., 2023). Este modelo requiere de datos mensuales de precipitación (P), evapotranspiración potencial (E), con lo cual se generan los caudales mensuales (Q) en el punto de descarga de la cuenca, además se puede considerar la variable de estado del estanque de producción (S) y rastreo (R) (SENAMHI, 2019).

El modelo agregado GR2M ha demostrado ser eficaz en comparación con modelos más complejos, este modelo puede requerir 2 parámetros, es decir, se destaca por su simplicidad y rendimiento en la captura de escorrentía mensual, en diversas aplicaciones y regiones climáticas (Fathi et al., 2023), incluyendo cuencas hidrográficas de Sudamérica (Zhou et al., 2020). Para evaluar el desempeño del modelo agregado GR2M, se debe evaluar la concordancia entre los caudales observados y simulados utilizando el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) Nash (Hrou et al., 2023; Nash & Sutcliffe, 1970).

Figura 3*Representación esquemática del modelo agregado GR2M*

Fuente: Adaptado de Fathi et al., (2023)

Por otra parte, el modelo agregado GR4J es utilizado para simular lluvia-escorrentía en una unidad hidrográfica, ha demostrado ser un modelo eficiente para reproducir la descarga de ríos. Una de las ventajas de este modelo es su simplicidad y la capacidad de funcionar con un menor requisito de datos, facilitando la aplicación en diversas condiciones hidrológicas. GR4J se caracteriza por una estructura parsimoniosa, es decir, utiliza un número limitado de parámetros para describir los procesos de escorrentía de la cuenca (Kapoor et al., 2023). En este modelo se puede utilizar funciones de enrutamiento para convertirse en un modelo semi-distribuido.

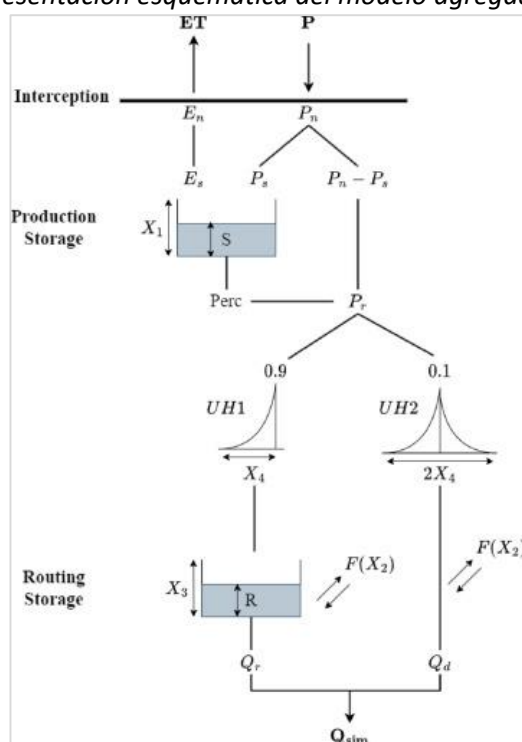
La conceptualización del modelo GR4J se basa en dos embalses secuenciales (Figura 4) que permiten simular los procesos de escorrentía de la cuenca, el primer depósito representa el balance de humedad del suelo utilizando datos de evaporación (E) y datos de precipitación (P); con respecto a la humedad contenida en el suelo esta se encuentra controlada en el parámetro X_1 , representando la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (S). Por otra parte, del primer embalse sale el agua y es dividida en dos flujos, y representa la respuesta de corto plazo de la cuenca, y por el contrario un flujo lento, que representa la respuesta lenta del sistema y entra al segundo depósito; en este se recibe parte del flujo y a través del parámetro X_3 se

controla la capacidad de almacenamiento máximo (R). El tiempo de recorrido de los flujos rápido y lento se establece mediante un hidrograma unitario con un tiempo determinado por el parámetro X_4 (Mbaye et al., 2020; Kapoor et al., 2023).

El modelo GR4J ha demostrado ser capaz de simular caudales de manera razonable, tanto en periodos de calibración como de validación, para representar caudales mínimos, medios y máximos (Wijayarathne & Coulibaly, 2020).

Figura 4

Representación esquemática del modelo agregado GR4J



Fuente: (Kapoor et al., 2023)

En la modelación hidrológica el índice de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) es una métrica normalizada que evalúa la proporción relativa de la variabilidad residual en relación con la variabilidad de los datos medidos, se utiliza para evaluar la capacidad de pronóstico de los modelos hidrológicos (Nash & Sutcliffe, 1970; Ritter & Muñoz-Carpena, 2013). Se define como se muestra en la ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - \bar{Q}_o^t)^2}$$

De esta manera, \bar{Q} se refiere al promedio de las descargas observadas, mientras que Q_m representa la descarga modelada, y la descarga observada en el tiempo t se indica como Q_o^t (Mandeville et al., 1970). La eficiencia de Nash-Sutcliffe se calcula restando la relación entre la varianza del error de la serie temporal modelada y la varianza de la serie temporal observada de 1. En el escenario de un modelo perfecto con una varianza de error igual a cero, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) alcanza el valor de uno ($NSE = 1$), señalando una concordancia perfecta entre el modelo y los datos observados (Finck et al., 2024). Por el contrario, si un modelo presenta una varianza de error de estimación igual a la varianza de la serie temporal observada, la eficiencia de Nash-Sutcliffe es de 0 ($NSE = 0$). Específicamente, un NSE de 0 indica que el modelo predice con la misma precisión que la media de la serie temporal en términos de la suma de errores al cuadrado, por lo tanto, el NSE se vuelve negativo cuando la varianza del error de estimación en una serie temporal modelada es significativamente mayor que la varianza de los datos observados (Elkurdy et al., 2022; Gupta & Kling, 2011; Moriasi et al., 2015). En la Tabla 1, se presenta la interpretación del índice de NSE para facilitar su comprensión:

Tabla 1

Interpretación del índice de Nash –Sutcliffe Efficiency

Nash –Sutcliffe Efficiency (NSE)	Descripción
$NSE > 0,8$	Excelente
$0,6 < NSE \leq 0,8$	Muy bueno
$0,4 < NSE \leq 0,6$	Bueno
$0,2 < NSE \leq 0,4$	Satisfactorio
$NSE \leq 0,20$	Insuficiente

*Fuente: Khorram, (2020)
Adaptado de Mahdaoui et al., (2024)*

3.3. CAMBIO CLIMÁTICO Y ESCENARIOS HÍDRICOS

Los cambios en la temperatura y precipitaciones pueden afectar a los recursos hídricos y las condiciones geomorfológicas de las cuencas, los cambios en la escurrentía y en el caudal se han incrementado durante el último siglo, por consiguiente se espera que continúen aumentando en el futuro y desencadenen una movilización de sedimentos y contaminación de los cuerpos hídricos, por ejemplo el exceso de escurrentía de sedimentos provenientes de tierras agrícolas de la cuenca combinado con una carga de nutrientes que podría tener incluso repercusiones económicas, por los altos costos de dragado de los ríos. Por otra parte, los cambios en la cobertura del suelo, combinado con el incremento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones pueden influir en la calidad del agua, elevando los niveles de concentración de nutrientes y bajas condiciones de oxígeno, alterando los ecosistemas acuáticos, que pueden ocasionar graves problemas de eutrofización. Los efectos del cambio climático y los cambios en el uso de suelo en las cuencas hidrográficas, tienen impactos acumulativos, por lo tanto, la planificación de la gestión de los recursos hídricos debe considerar a estos factores cambiantes y sus interacciones (Cousino et al., 2015; Ross & Randhir, 2022).

En el caso de América del Sur el cambio climático representa una amenaza muy importante con riesgos altos particularmente en las áreas urbanas, debido a la alta concentración de población y activos, y a la relación y conexión entre los diferentes sistemas de infraestructura como carreteras, servicios de red eléctrica, agua potable, alcantarillado, sistemas de comunicaciones, transporte, entre otros (Núñez Mejía et al., 2023). Este argumento es confirmado en el Systhesis Report Climate Change del 2023 donde para América Central y América del Sur, se prevé riesgos con respecto a la seguridad hídrica, aumento de epidemias transmitidas por vectores, degradación de ecosistemas de arrecifes de coral, riesgos en la seguridad alimentaria debido a sequías frecuentes y/o extremas, sumado los daños de infraestructura (Calvin et al., 2023).

En este contexto, de cambio climático para el Ecuador en el año 2023 se presentaron anomalías cálidas de temperatura superficial en el Pacífico Oriental, ocasionadas por El Niño – Oscilación Sur (ENOS), favoreciendo las condiciones para el desarrollo de una época muy lluviosa que tendrá impactos en los asentamientos poblacionales con inundaciones y movimientos en masas en las zonas susceptibles y que presentan un alto grado de vulnerabilidad. Por esta razón para finales del 2023 las condiciones se mantendrán en moderadas a fuerte, con un aumento significativo en cantidad y frecuencia de las precipitaciones especialmente en áreas costeras y las estribaciones occidentales de los Andes (Secretaría de Gestión de Riegos, 2023).

Con estos antecedentes, se destaca la importancia de comprender las interacciones entre el sistema climático, los ecosistemas y las actividades humanas, para ello, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático – IPCC, que inició en 1988, tiene el objetivo de proporcionar evaluaciones de carácter integral del estado de los conocimientos científicos, tecnológicos y socioeconómicos relacionados con el cambio climático, incluyendo sus orígenes, posibles consecuencias y las estrategias de respuesta. De esta manera, el IPCC ha desarrollado seis informes de evaluación que contienen varios volúmenes, el Sexto Informe de Evaluación (IE6), resalta el desarrollo prometedor en tecnologías bajas en carbono, el esfuerzo de los países por asumir compromisos para reducción de emisiones y apoyo a las comunidades para adaptarse a los efectos de cambio climático, de la mano de un mayor financiamiento, sin embargo, aún no son suficientes para mantener el calentamiento global a 1,5°C; un umbral que los expertos creen necesario para evitar cambios irreversibles en los ecosistemas del mundo, lo que sería catastrófico para la vida silvestre y los seres humanos (IPCC, 2023; The Nature Conservancy, 2023; UNEP, 2022).

En este sentido, en el marco del Quinto Informe de Evaluación del IPCC se han desarrollado el uso de escenarios que son descripciones de posibles estados futuros, las cuales no deben considerarse como predicciones, sino como imágenes alternativas del futuro en condiciones específicas para un periodo determinado. Por

lo cual, los Escenarios RCP (Representative Concentration Pathways) son herramientas, que proporcionan información sobre emisiones, cambio de uso de suelo y cobertura vegetal a lo largo del tiempo. Cabe señalar que, cada RCP contiene suposiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas diferente; por ejemplo, el RCP 4.5 presenta una probabilidad de que la temperatura de la superficie terrestre será superior a 2°C, mientras que el RCP 8.5 presenta un incremento de la temperatura superior a 3°C (Armenta et al., 2016), escenarios que serán considerados en este estudio.

Finalmente, es importante contar con información relacionada a los posibles impactos futuros que provocará el cambio climático en los caudales de los ríos, esto con el objetivo de realizar una adecuada planificación y tomar medidas de adaptación y mitigación adecuadas (Kay et al., 2021).

3.4. GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

3.4.1. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS

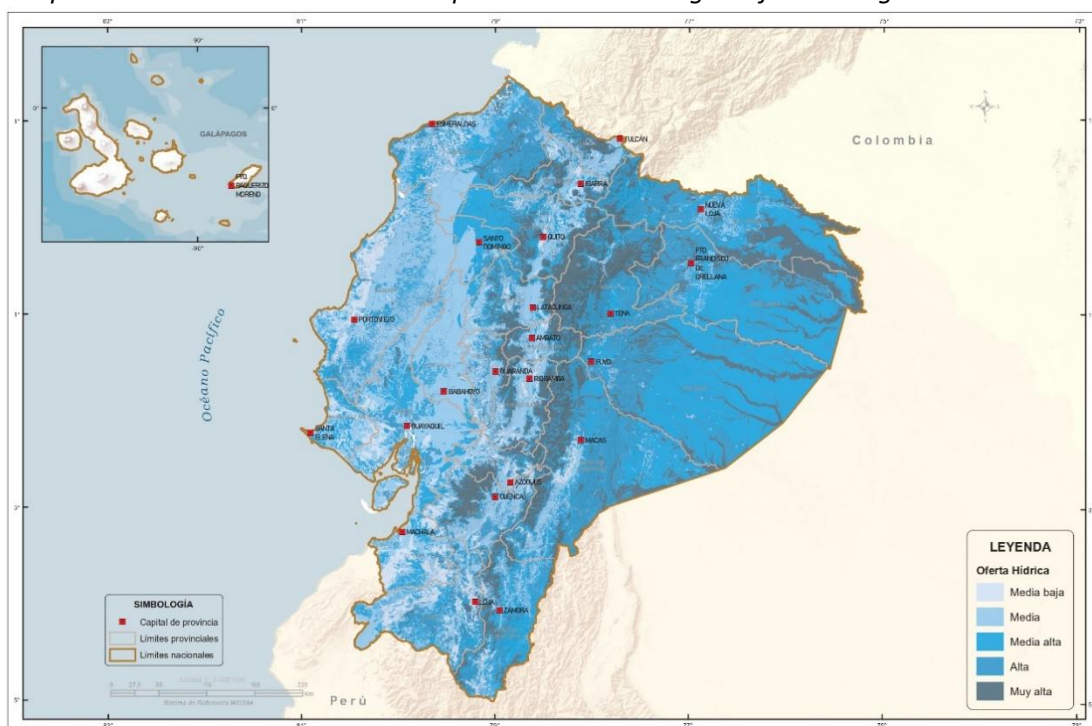
Los Andes presentan grandes desafíos y riesgos con los recursos hídricos debido al cambio climático, cambios en el uso de suelo y actividades antrópicas, entre los riesgos se destaca la inseguridad hídrica ocasionada por cambios estacionales y anuales en la disponibilidad del agua, afectaciones en la agricultura y cadenas de suministro de alimentos ocasionados por sequías más frecuentes y prolongadas, riesgos para la población debido a inundaciones y deslizamientos de tierra. Por otra parte, la demanda de agua en la región es creciente, esto se debe a constante crecimiento demográfico y desarrollo hidroeléctrico, lo cual genera una fuerte presión sobre los recursos hídricos; si bien, acorde a los criterios de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*FAO por sus siglas en inglés*), la mayor parte de países andinos no se encuentra en un estado de estrés hídrico, esta categorización no tiene en cuenta las diferencias regionales dentro de los países y que la extracción de agua dulce ha incrementado en las últimas décadas, esto sumado a disminución de la calidad del agua en algunas zonas debido al deshielo de glaciares y la exposición a sedimentos. Por consiguiente, existe una inherente necesidad de investigar más sobre la integración de los componentes del ciclo del agua con los procesos socioeconómicos y la resiliencia socioecológica de manera más sistemática a través de leyes y políticas que promuevan la gestión integrada de los recursos hídricos y la adaptación al cambio climático (Drenkhan et al., 2023).

El MAATE define a las Zonas de Importancia Hídrica según Oferta de Agua como a la disponibilidad del agua en términos de cantidad y calidad del recurso hídrico en un área determinada, esta se define mediante un análisis de componentes ambientales, como el índice ombrotérmico (relacionada con la precipitación), cobertura vegetal, profundidad del suelo y pendiente del terreno; que influyen en el ciclo hidrológico, usos consuntivos y no consuntivos del agua y vulnerabilidad de los recursos hídricos (Figura 5). El MAATE establece que se cuenta con 24.8 millones de hectáreas de superficie total continental terrestre que proporcionan oferta hídrica, donde el

68,13% dispone una oferta entre media alta o muy alta, es decir, con menos de 4 meses secos año y que abarca desde áreas con oferta permanente de agua, debido a componentes biofísicos, como cuerpos de agua y bosques siempreverdes (Zona 1), hasta áreas con retención y regulación hídrica en ecosistemas remanentes (Zona 2) y áreas con un nivel medio de ingreso de agua y vegetación variada (Zona 3) (MAATE, 2023).

Figura 5

Mapa del Ecuador de las Zonas de Importancia Hídrica según Oferta de Agua



Fuente: MAATE (2023a)

Finalmente, el 70% de la población ecuatoriana cuenta con agua segura, sin embargo, un 30% aún no tiene acceso con una grave exposición al consumo de agua contaminada con materia fecal, además que 6 de cada 10 niñas y niños en zonas rurales no tienen acceso a agua segura y saneamiento (Naciones Unidas Ecuador, 2023).

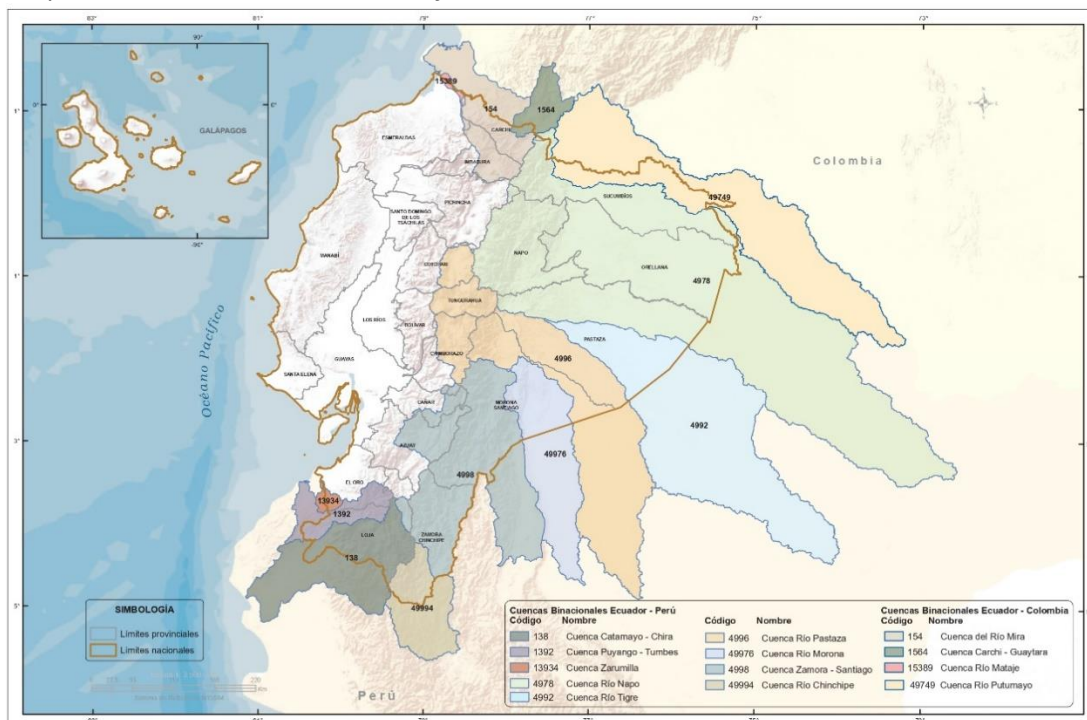
3.4.2. CUENCAS TRANSFRONTERIZAS

Las aguas transfronterizas engloban todas las aguas superficiales o subterráneas que marcan, atraviesan o están situadas en las fronteras entre dos o más Estados, por lo tanto, las aguas transfronterizas que fluyen directamente hacia el mar, su límite se define como una línea imaginaria recta que se traza a través de la desembocadura durante la bajamar. En todo el mundo, existen un total de 261 ríos que cubren aproximadamente el 45.3% de la superficie terrestre (excluyendo la Antártida), y que son compartidos por dos o más países, lo que convierte la gestión de los recursos hídricos transfronterizos en una cuestión de gran importancia en el ámbito del agua. En América Latina, se cuentan más de 70 cuencas hidrográficas compartidas por al menos dos países, es decir, un 60% del territorio sudamericano corresponde a cuencas transfronterizas; siendo el ejemplo más destacado la cuenca del Amazonas, que abarca ocho países sudamericanos y cuenta con más de 8,000 kilómetros de fronteras (MAATE, 2023).

El Ecuador y Colombia comparten 4 cuencas transfronterizas, que representan 1.258.905,48 ha de la superficie continental, estas son la Cuenca Mataje, Cuenca Mira, Cuenca Putumayo, Cuenca Carchi – Guaytara (Figura 6). La Cuenca Transfronteriza del Mira, enfrenta múltiples amenazas tanto a su biodiversidad, recursos hídricos y habitantes, sumado o la variabilidad climática como el ENOS con fenómenos meteorológicos extremos que se han vuelto más intensos y frecuentes (MAATE, 2023a; PNUD, 2021).

Figura 6

Mapa del Ecuador de Cuencas Transfronterizas



Fuente: MAATE (2023a)

En el contexto de cuenca transfronteriza, se temía que la escasez de agua pudiera llevar a conflictos internacionales, que lo se describía como “guerras por el agua”, convirtiéndose en una perspectiva realista en política exterior que relacionaba la seguridad del Estado con el control sobre los recursos hídricos; sin embargo, ha surgido un enfoque más amplio de seguridad hídrica que abarca un marco de desarrollo económico y seguridad humana y global, esto ha llevado a concebir el contexto de agua transfronteriza dentro de una variedad de dimensiones del agua con enfoques más multidisciplinarios. Es importante considerar que, esto ha impactado en el desarrollo de mecanismos de cooperación para tratados internacionales sobre el agua, teniendo presente que la gobernanza del agua a través de la cuenca hidrográfica, rara vez coincide con los límites políticos-administrativos, pudiendo generarse conflictos y desafíos adicionales (Albrecht & Gerlak, 2022).

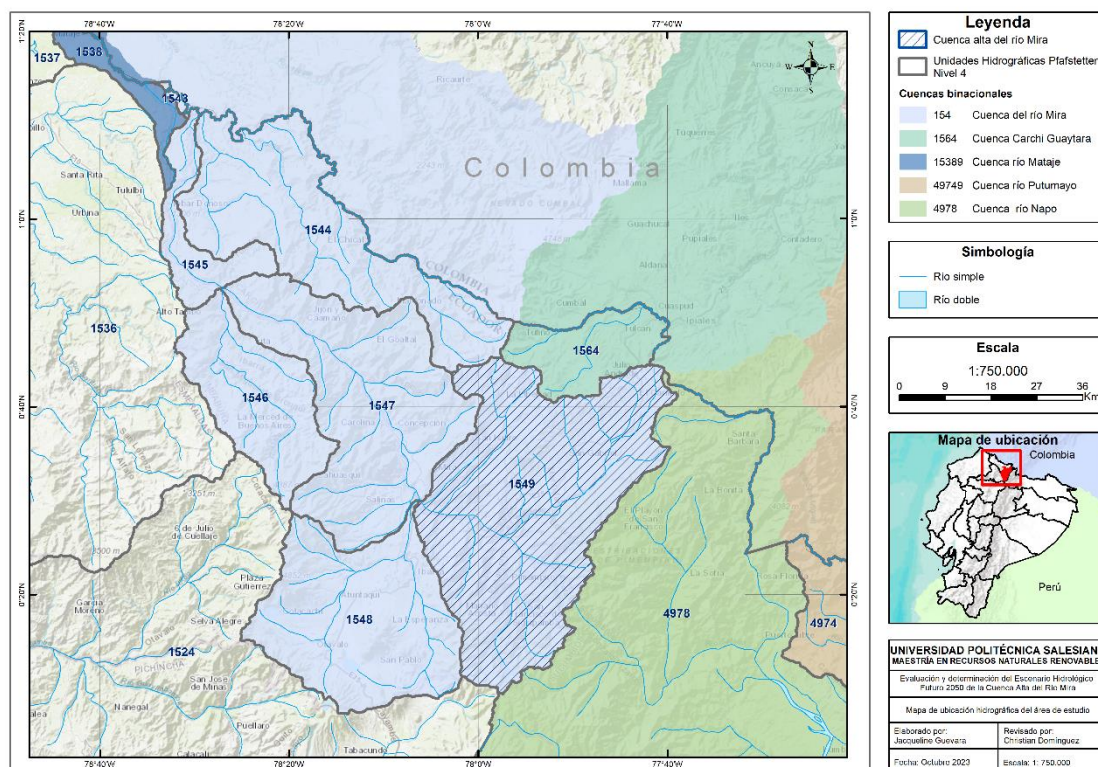
4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Con base a la Delimitación Hidrográfica del Ecuador, establecida por el MAATE, mediante la metodología Pfafstetter, que mantiene en un enfoque geoespacial que se utiliza para asignar identificadores únicos a las unidades hidrográficas con el propósito de relacionarlas entre sí y comprender la jerarquía y las interconexiones de sistemas de drenaje en la superficie terrestre. Esta metodología establece un sistema jerárquico de identificación, donde se asigna un código Pfafstetter específico a cada unidad hidrográfica (Figura 7), según su ubicación en el sistema de drenaje, lo que garantiza unicidad dentro de un continente, siendo los códigos de longitud variable para representar el nivel de la unidad en la jerarquía (Secretaría del Agua, 2017).

Figura 7

Mapa de ubicación de la cuenca alta del río Mira dentro de la cuenca binacional del río Mira



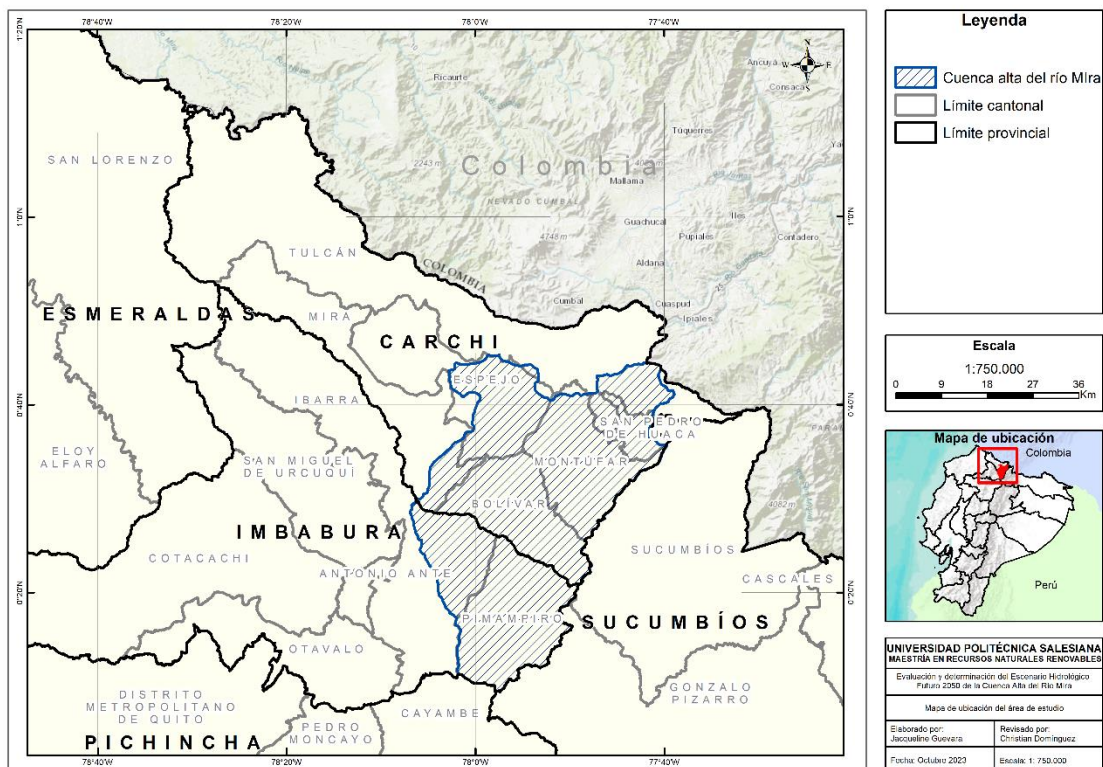
Fuente: Autor (2023)

De esta manera el área de estudio, se centra en unidad hidrográfica de código Pfafstetter 1549, correspondiente a la cuenca alta del río Mira, que tiene una extensión de 1.916 km², debido a su importancia como cabecera de la cuenca binacional Mira, que se extiende desde el Ecuador hasta Colombia, con una superficie de 12.145,73 km² para desembocar en el Océano Pacífico (Figura 7).

La cuenca alta del río Mira se encuentra ubicada entre las provincias del Carchi e Imbabura (Figura 8), con un 33,45% y 13,63% respectivamente en relación a la totalidad de la extensión de cada provincia.

Figura 8

Mapa de ubicación de la cuenca alta del río Mira por división política administrativa



Fuente: Autor (2023)

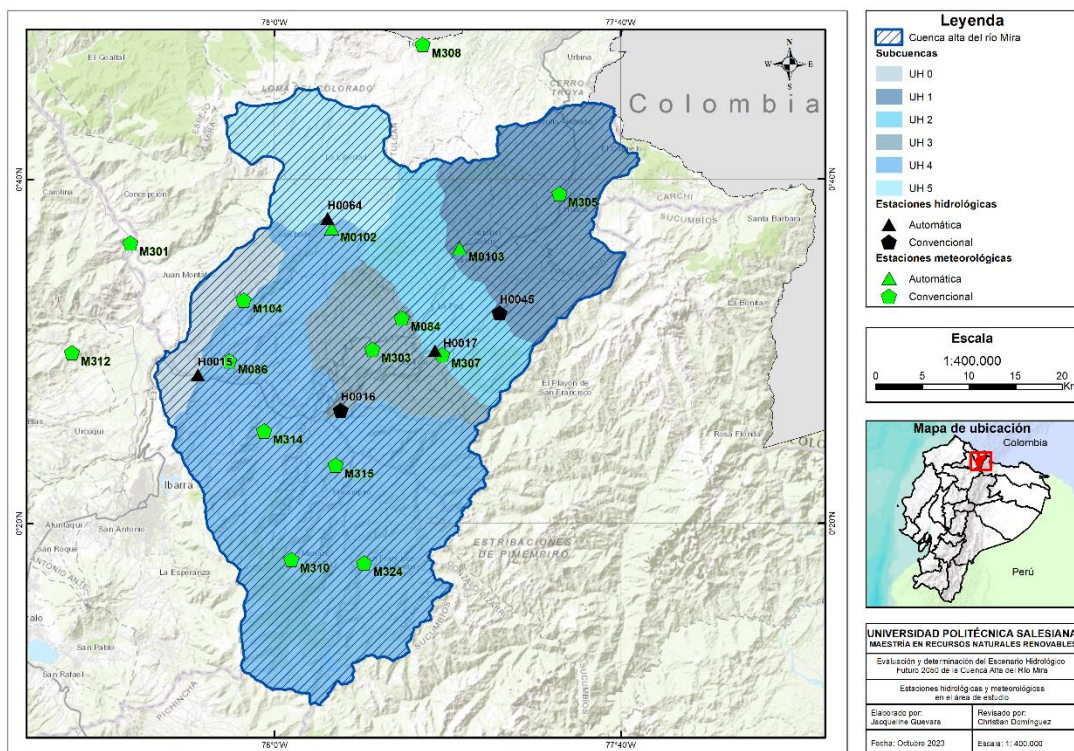
Los cantones que desarrollan dentro la cuenca son: Bolívar (99,98%), Espejo (45,83%), Mira (12,30%), Montufar (97,29%), San Pedro de Huaca (89,90%) y Tulcán (7,44%) correspondientes a la provincia del Carchi; mientras que, Ibarra (18,85%) y Pimampiro (99,62%) por parte de la provincia de Imbabura; estos cantones

representan una población de 434.655 habitantes para el año 2023, con tendencia a un crecimiento población del 6,6% para el año 2030, donde se espera una población estimada de 463.192 habitantes, con base a las proyecciones referenciales 2010 – 2030 del Censo 2010 del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

Como parte del análisis se dividió a la cuenca alta del río Mira, en 6 subunidades hidrográficas de menor extensión, con base a los puntos de descarga cercanos a las estaciones hidrológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI; así como la determinación de las estaciones meteorológicas con información disponible (Figura 9).

Figura 9

Mapa de subcuencas hidrográficas y estaciones hidrometeorológicas

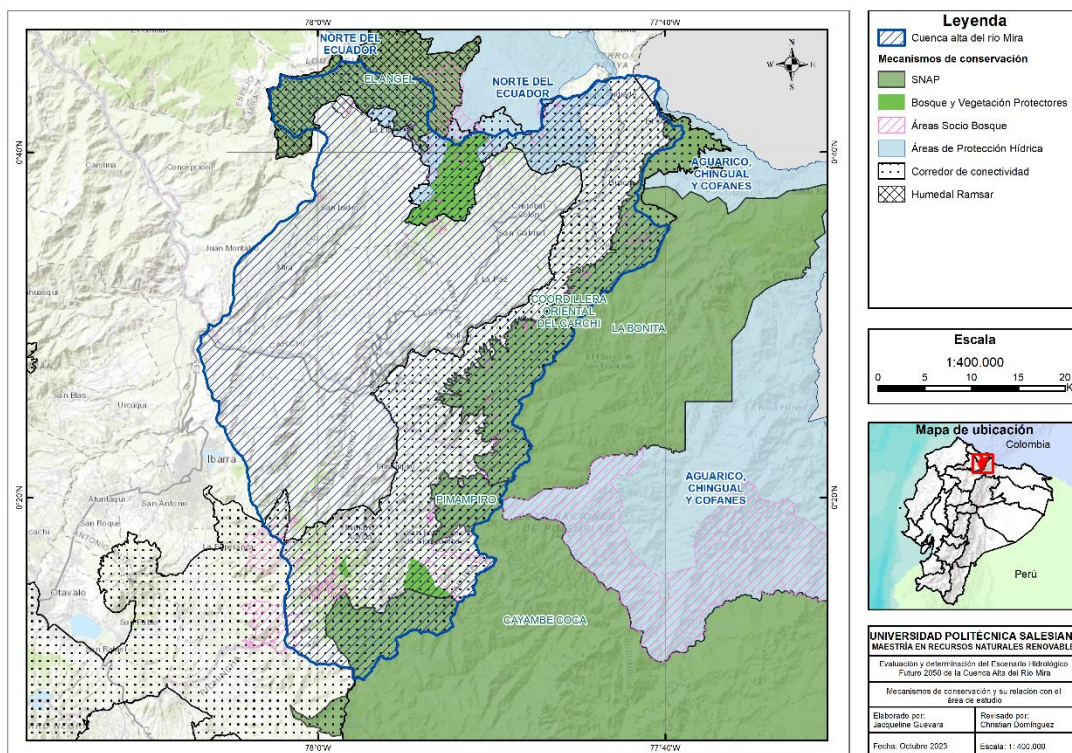


Fuente: Autor (2023)

La cuenca alta del río Mira presenta 6 mecanismos de conservación declarados por el Estado con el objetivo de conservar y proteger los recursos naturales e hídricos (Figura 10).

Figura 10

Mapa de mecanismos de conservación establecidos por el Estado



Fuente: Autor (2023)

A continuación, se describen los mecanismos presentes en la cuenca alta del río Mira y el porcentaje de la superficie de cada uno de ellos, que se encuentra en esta zona de estudio:

- Sistema Nacional de Áreas Protegidas: Área Protegida Autónoma Descentralizada Cordillera Oriental del Carchi (17.113,05ha, 83,72%), Reserva Ecológica El Ángel (7.978,02 ha, 49,94%), Parque Nacional Cayambe-Coca (6.977,06 ha, 1,71%), Refugio de Vida Silvestre Pimampiro (3.682,57 ha, 99,79%) y Área Ecológica de Conservación Municipal La Bonita (126,14 ha, 0,24%).
- Área de Protección Hídrica: Norte del Ecuador (7.888,17 ha, 25,83%) y Aguarico, Chingual y Cofanes (0,41 ha, 0%).

- Bosque y Vegetación Protectores – BVP: Tambo Grande La Florida (150,02 ha, 100%), Subcuenca del río Blanco – Pimampiro (1.060,79 ha, 100%), Lomas Corazón y Bretaña (17,40 ha, 100%), Los Arrayanes (17,16 ha, 100%) y El Hondon (4.164,34 ha, 98,88%).
- Convenio Socio Bosque: 105 convenios individuales y colectivos que van desde 1 a 8.000 ha de conservación.
- Corredor de conectividad: Andes Norte con 97.849,42 ha que representan el 35,87% del total de la superficie conservada que se encuentra dentro de la cuenca.
- Humedales Ramsar: El Ángel con 8.417,10 ha que representan el 49,82% del total de la superficie conservada que se encuentra dentro de la cuenca.

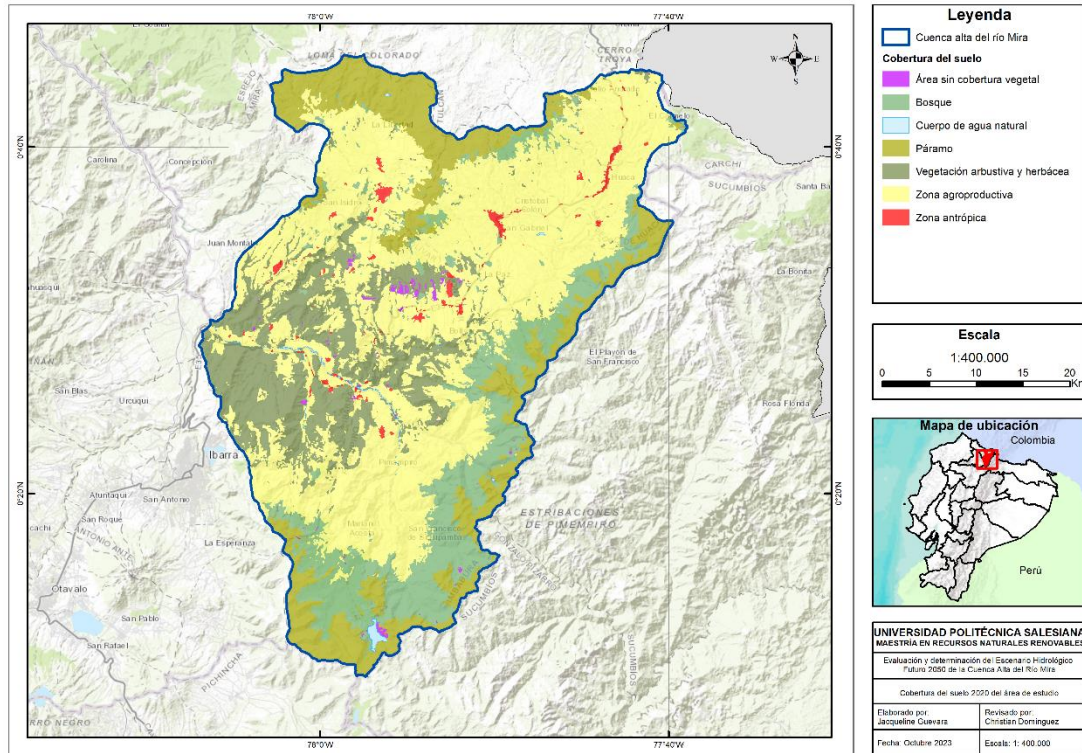
De esta manera, se puede reconocer la relevancia desde el ámbito natural que se posee esta cuenca hidrográfica y la necesidad inherente de evaluar la disponibilidad de recursos hídricos para periodos futuros.

La cuenca alta del río Mira se distingue por la presencia del "páramo de frailejones", que alberga la *Espeletia pycnophylla* subsp. *angelensis*, una especie endémica del norte de Ecuador y el sur de Colombia, así como musgos y pajonales (Figura 11). Este ecosistema actúa como una auténtica fábrica natural de agua, promoviendo la captación y regulación del recurso hídrico, así como la absorción de dióxido de carbono (CO₂). Cabe señalar que, este entorno alberga una fauna específica de macroartrópodos y achupallas, que desempeñan un papel crucial en la vida de las ranas, colibríes y osos andinos, que se alimentan de frailejones y achupallas. Por otra parte, la rana andina *Gastrotheca riobambae* como la *Gastrotheca espeletia*, que habitan estos páramos y bosques montanos, figuran como especies en peligro de extinción en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza – UICN. Con respecto al aspecto socioeconómico, la actividad predominante es la ganadería lechera, la cría de ovejas y cuyes, así como diversas actividades agrícolas, como el cultivo de papa, hortalizas, arveja, fréjol, cebada, maíz, haba, trigo y otros productos. Finalmente es importante señalar que, esta zona goza

de una riqueza cultural gracias al asentamiento de diferentes comunidades indígenas de la sierra ecuatoriana (PNUD, 2021; WWF Colombia, 2017).

Figura 11

Mapa de Coberturas y Uso de la Tierra 2020 de la cuenca alta del río Mira

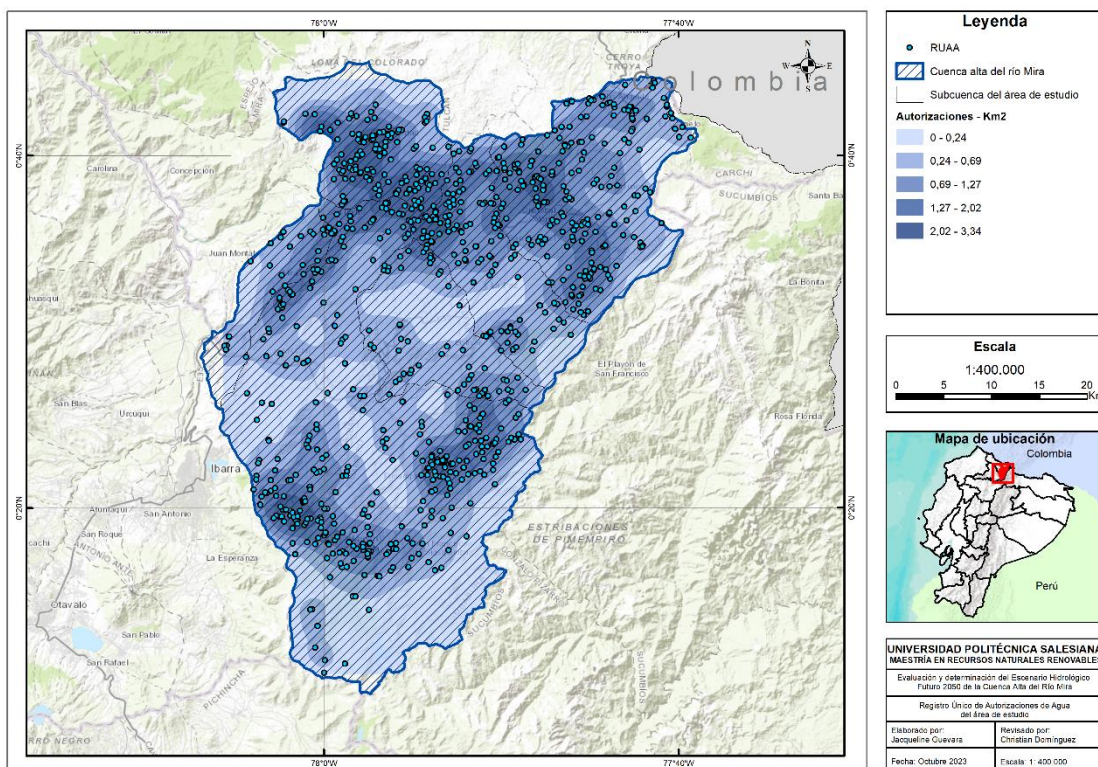


Fuente: Autor (2023)

La demanda hídrica reflejada a través de las autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua, para consumo humano, riego, acuicultura y abrevadero de animales, con el objetivo de garantizar la soberanía alimentaria (MAATE, 2023a), nos permite determinar que el 77,29% (74.061 autorizaciones de uso y aprovechamiento) se encuentran ubicadas en la región sierra del Ecuador, de estas 1.461 autorizaciones se ubican directamente en dentro de la cuenca alta del río Mira, siendo los 3 principales uso y aprovechamientos, los solicitados a través de autorizaciones de riego las que cuentan con el mayor caudal autorizado con 17.622 L/s, seguido la generación de hidroelectricidad y energía hidrotérmica con 8.691 L/s y el consumo humano con 1.150 L/s, con base a la información proporcionada por el MAATE, con corte a diciembre de 2022 (Figura 12).

Figura 12

Mapa de autorizaciones de uso y aprovechamiento del agua en la cuenca alta del río Mira

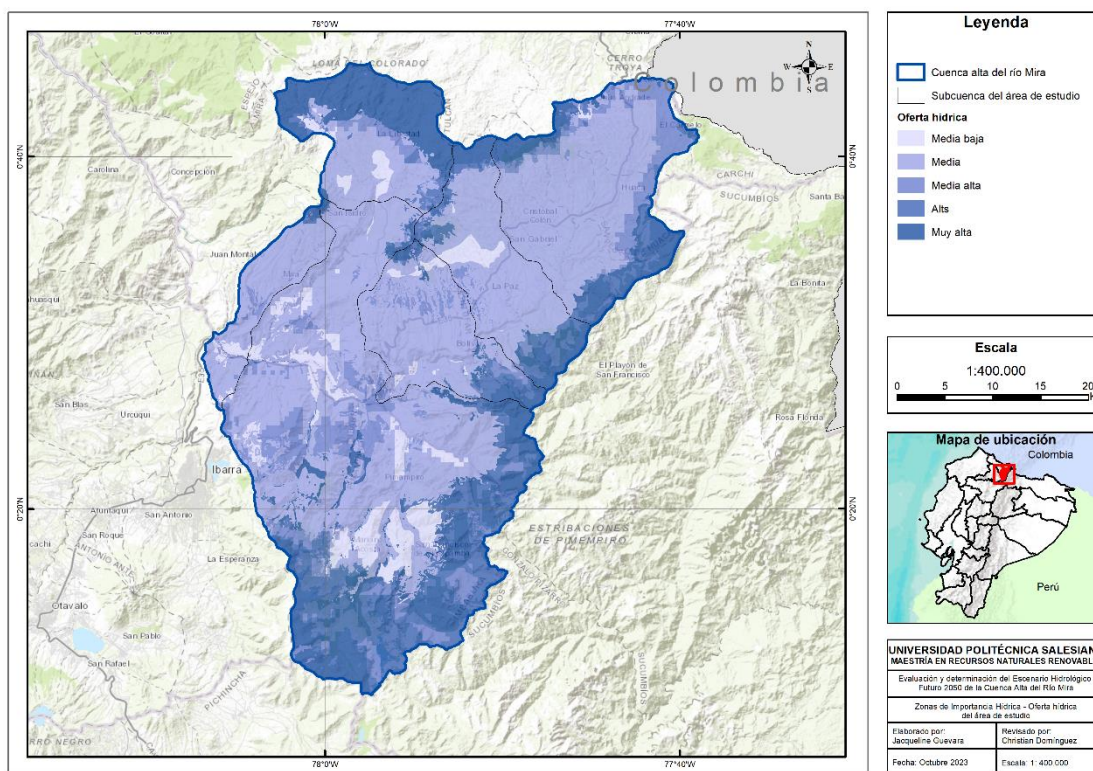


Fuente: Autor (2023)

Con referencia las Zonas de Importancia Hídrica según Oferta Hídrica (Figura 13), se puede establecer que la cuenca alta del río Mira se encuentra categorizada como entre las zonas de oferta media baja a una oferta muy alta, con una superficie de 104.997,54 ha (54,68%) categorizada como oferta media (Zona 2), seguido de 36.883,96 ha (19,21%) de oferta muy alta, 19.435,59 ha (10,12%) considerada como oferta media alta (Zona 3).

Figura 13

Mapa de Zonas de Importancia Hídrica en la cuenca alta del río Mira



Fuente: Autor (2023)

4.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Los insumos cartográficos y alfanuméricos requeridos para el proceso de modelo hidrológico semi-distribuido de la cuenca alta del río Mira, se detallan a continuación:

- Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas del INAMHI, tipo cartográfico.
- Delimitación hidrográfica del Ecuador, Nivel 4 de Pfafstetter, tipo cartográfico escala 1:50.000, del MAATE
- Coberturas de Uso de la Tierra – CUT, de los años 1990, 2000, 2008, 2014, 2016, 2018 y 2020, tipo cartográfico, escala 1:100.000, del MAATE.
- Cobertura y uso de la tierra y sistemas productivos agropecuarios 2009 – 2015, editada al 2020, tipo cartográfico, escala 1:25.000, del Ministerio de Agricultura y Ganadería – MAG.
- Unidades geopedológicas, tipo cartográfico, escala 1:25.000, del Ministerio de Agricultura y Ganadería – MAG.
- Modelo de elevación digital – DEM, tipo cartográfico, resolución de 30 metros de Vertex Alaska.
- Datos diarios de precipitación, temperatura y caudales del periodo 1985 – 2011, tipo alfanumérico, del Plan Nacional del Agua 2016 de Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research – CISPDR & Secretaría del Agua – SENAGUA (2016).
- Coeficientes de cultivo medios, tipo alfanumérico de FAO.
- Áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas, tipo alfanumérico, del INAMHI.

4.3. MODELO DE CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA

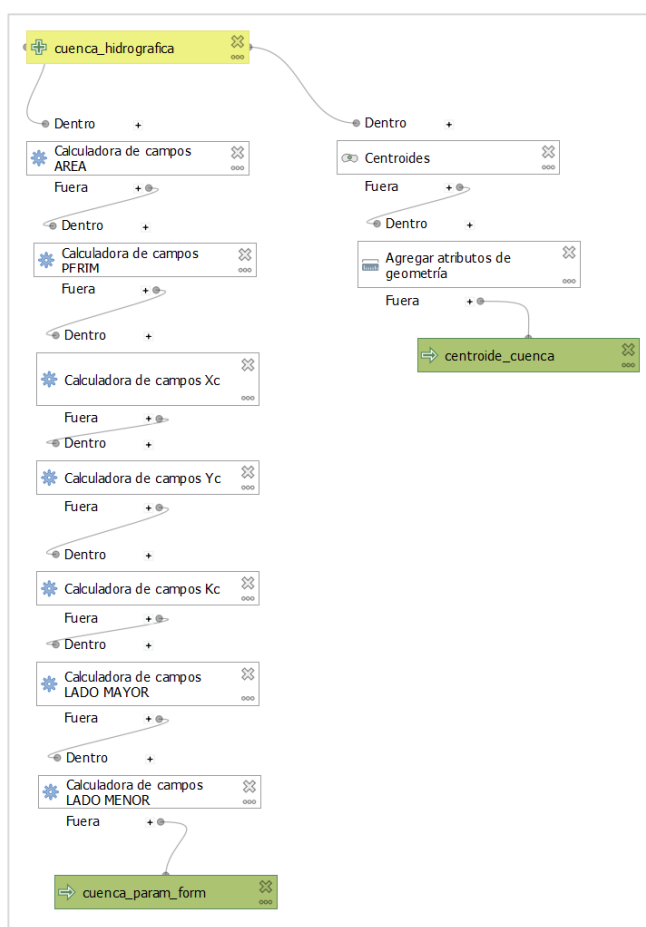
Con el objetivo de realizar la caracterización de la cuenca se aplicaron modelos hidrológicos desarrollados en una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de software libre denominada QGIS. Los inputs requeridos para

estos modelos fue la cuenca alta del río Mira en formato vector (shapefile), una imagen satelital de la cuenca en tipo ráster de Vertex Alaska que contiene el modelo de elevación digital (DEM), con una resolución de 30 metros, y la definición del sitio de captación al punto ubicado en las coordenadas UTM 822.246,375; 10.055.266,875.

- Modelo de parámetros de forma. Este modelo requiere como entrada el polígono de la cuenca hidrográfica en formato vector y permitirá calcular el área de la cuenca, perímetro, coordenadas del centroide, índice de compacidad, lado mayor y menor del rectángulo equivalente, utilizando la herramienta “Calculadora de campos”; el resultado de este modelo son 2 archivos tipo vector con los resultados de los parámetros calculados. La representación esquemática del modelo se presenta en la siguiente Figura 14.

Figura 14

Representación esquemática del modelo de parámetros de forma

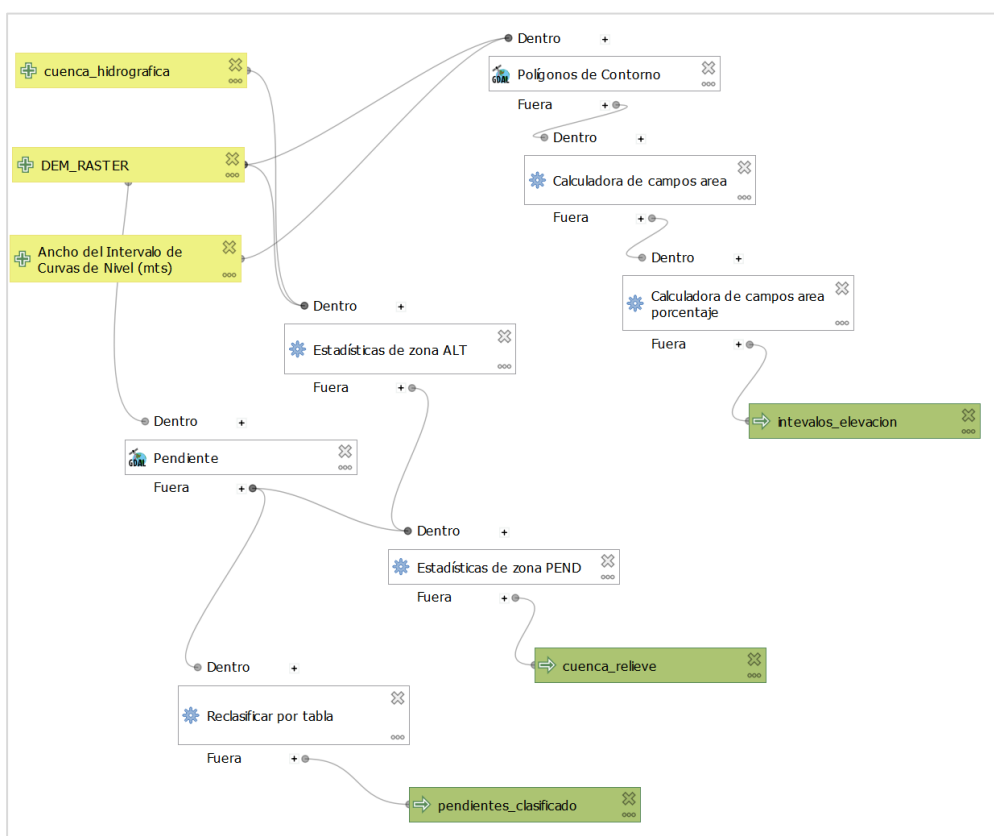


Fuente: Domínguez, (2021)

- Modelo de relieve de la cuenca. Las entradas para este modelo es el polígono y el DEM de la unidad hidrográfica, el modelo calcula la elevación máxima y mínima de la cuenca aplicando la herramienta “Estadísticas de zona”, y la elevación media; intervalos de elevación cada 500 metros para obtener el área entre ellos, utilizando la herramienta “Polígonos de contorno”, la cual permite dividir la cuenca en polígonos aplicando como límites los contornos de nivel; la pendiente media de la cuenca se calculará utilizando el ráster aplicando la herramienta “Pendiente de GDAL”, la pendiente media, máxima y mínima se obtendrá a través de la herramienta “Estadísticas de zona”, finalmente se genera un ráster de pendientes clasificadas a través de la herramienta “Reclasificar por tabla” con base a los criterios establecidos por Van Zuidam (1986) para evaluar las condiciones del terreno de la cuenca. La representación esquemática del modelo se presenta en la siguiente Figura 15.

Figura 15

Representación esquemática del modelo de relieve

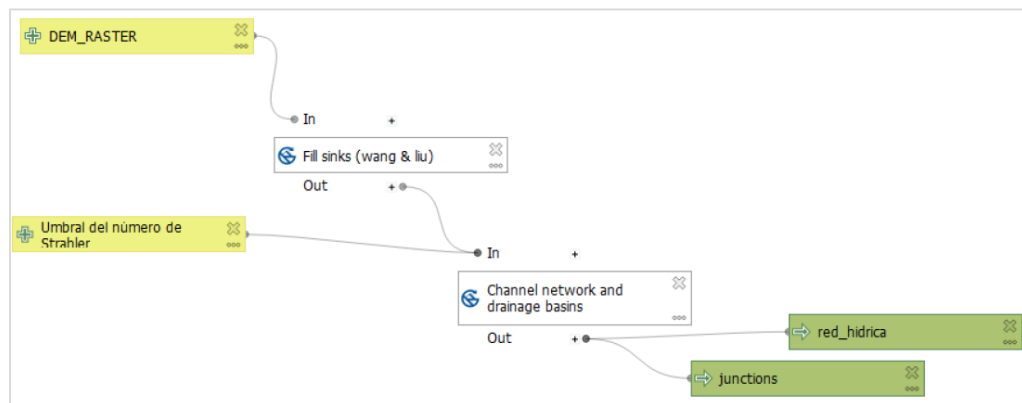


Fuente: Domínguez, (2021)

- Modelo de drenaje. La entrada es el ráster de elevaciones de la cuenca, se aplica el módulo “Fill Sinks de Wang & Liu”, de SAGA y “Channel network and drainage basins”, con el objetivo de obtener la red hídrica y los junctions; para ello, se establece el “Umbral del número de Strahler”. La representación esquemática del modelo se presenta en la siguiente Figura 16.

Figura 16

Representación esquemática del modelo de drenaje

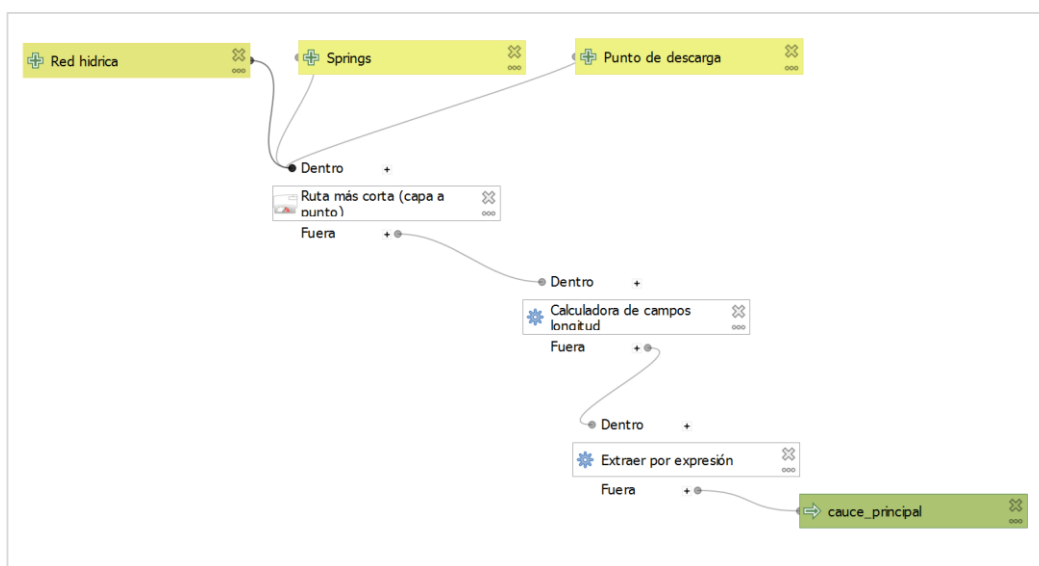


Fuente: Domínguez, (2021)

- Modelo de cauce principal. El input de modelo es la red hídrica, junctions y el punto de descarga de la cuenca que fueron obtenidas en el modelo anteriormente mencionado, aplicando la herramienta de “Ruta más corta capa a punto”, en conjunto con la “Calculadora de campos”, para extraer el elemento de mayor longitud que corresponderá a la longitud del cauce principal. La representación esquemática del modelo se presenta en la siguiente Figura 17.

Figura 17

Representación esquemática del modelo de cauce principal



Fuente: Domínguez, (2021)

4.4. USO Y TIPO DE SUELO DE LA CUENCA

Para realizar el análisis del uso de la cuenca alta del río Mira, utilizando la información cartográfica oficial del MAATE (2023) correspondientes al CUT, fue necesario realizar una reclasificación de las categorías de desagregación con el objetivo de unificar la información disponible desde el año 1990 hasta el año 2020, a fin de evaluar los diferentes cambios en el uso de suelo con respecto a la extensión de las superficies utilizando las herramientas “Disolver” e “Intersección” en QGIS. Por otro lado, para el caso de la información de tipo de suelo, se utilizó la capa de unidades geopedológicas del MAG, (2020), específicamente el campo de “Textura de suelo

profunda” la misma que va desde los 0,20 a 0,50 metros de profundidad de suelo. Las clases texturales de la capa fueron agrupadas respetando las categorías establecidas según United States Department of Agriculture (2022).

4.4.1. PROCESAMIENTO DE LA COBERTURA Y USO DE LA TIERRA

Para el análisis de la cobertura de uso de la tierra de la cuenca alta del río Mira, se utilizó la información cartográfica del MAATE de los años 1990, 2000, 2008, 2014, 2016, 2018 y 2020; donde en la mayor parte de los insumos se pudo encontrar una categorización diferente, por ello, cada capa geográfica fue reclasificada en 7 categorías (Tabla 2), para facilitar la comparación y procesamiento de la información.

Tabla 2

Reclasificación de las categorías del CUT

Categorías CUT	Reclasificación
Bosque nativo	Bosque
Plantación forestal	
Cuerpo de agua natural	Cuerpo de agua natural
Páramo	Páramo
Vegetación arbustiva	Vegetación arbustiva y herbácea
Vegetación herbácea	
Cultivo anual	Zona agroproductiva
Cultivo semipermanente	
Cultivo permanente	
Pastizal	
Tierra agropecuaria	
Mosaico agropecuario	
Área poblada	Zona antrópica
Infraestructura	
Área sin cobertura vegetal	Área sin cobertura vegetal

Fuente: Autor (2023)

4.4.2. PROCESAMIENTO DE LAS CLASES TEXTURALES DE SUELO

Con respecto a la información de clases textura, se obtuvo de la capa cartográfica de Unidades Geopedológicas del MAG (2019), utilizando el campo de textura de suelo profunda que, con referencia al Catálogo de Objetos Geográficos y Productos Cartográficos Agropecuarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería, Volumen V, (MAG, 2021), va desde los 0,20 a 0,30 metros de profundidad. Las clases texturales encontradas en la cuenca alta del río Mira fueron reclasificadas en su grupo macro por subunidad hidrográfica, a fin de facilitar el procesamiento de la información (Tabla 3).

Tabla 3

Reclasificación de las categorías de clases texturales

Clases texturales MAG	Reclasificación
Arcillo – Arenoso	Arcilloso
Arcilloso	
Arena	Arenoso
Arena Gruesa	
Areno Francoso	
Franco	Francoso
Franco Arcillo – Arenoso	
Franco Arcillo – Limoso	
Franco Arcilloso	
Franco Arenoso	
Franco Limoso	
No aplicable	No aplicable
Sin suelo	

Fuente: Autor (2023)

4.4.3. PROCESAMIENTO DE COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) ESCENARIO ACTUAL Y FUTURO

Para la obtención de los Coeficientes de Cultivo (Kc) según lo establecido por Deidos & Montero (2019); FAO (2023); Buytaert et al., (2006), de la cuenca alta del río Mira se utilizó la Cobertura y uso de la tierra y sistemas productivos agropecuarios 2009 – 2015, (editada 2020) del MAG, (2020), intersecada con el CUT 2016 y con las

subunidades hidrográficas para la determinación de un coeficiente único para cada una de ellas, como se describe a continuación.

Coefficiente de cultivo actual

El insumo cartográfico Cobertura y uso de la tierra y sistemas productivos agropecuarios 2009 – 2015, (editada 2020) permitió identificar 99 elementos en cuenca alta del río Mira, incluyendo los diferentes cultivos que se producen en la zona como: aguacate, ají, alfalfa, aliso, arrayán, arveja, avena forrajera, barbecho, bosque húmedo, nativo y seco; café, camote, caña de azúcar, cebada, cebolla, chocho, ciénegas, ciprés, ciruelo, durazno, eucalipto, fréjol, granadilla, haba, lagos/lagunas, limón, maíz, mandarina, mango, manzana, matorrales húmedos y secos, melloco, moro, nabo, naranjilla, nogal, oca, papa, páramo, pasto cultivada, pepinillo, pimiento, pino, plátano, quinua, remolacha, sandía taxo, tomate de árbol y riñón, trigo, uva, vegetación arbustiva y herbácea, yuca, zanahoria.

Con la información cartográfica de cultivos y coberturas del MAG, se genera un intersect con la capa de CUT del MAATE, por cada subcuenca hidrográfica para identificar todas las superficies que conforman cada área de estudio. Una vez, generado este insumo cartográfico, se asigna los valores de K_c a cada superficie, estos valores representan la proporción de agua de lluvia que se convierte en escorrentía para cada tipo de superficie. Para obtener un valor de K_c promedio para cada subcuenca, es necesario calcular la fracción de área que representa cada tipo de superficie, para lo cual se divide el área de cada tipo de superficie entre el área total cada unidad hidrográfica. Finalmente, se realiza una suma ponderada de los valores de K_c asignados a cada tipo de superficie, multiplicando cada valor de K_c por la fracción de área correspondiente y sumándolos, lo cual, proporciona un valor promedio de K_c para cada subcuenca.

Coefficiente de cultivo futuro 2050

La estimación del coeficiente de escorrentía (K_c) para el año 2050 implica la proyección de cambios en las superficies que componen el área de estudio hasta ese año, las cuales se basan en suposiciones de las tendencias pasadas que se

mantendrán en el futuro. Cabe señalar que, las áreas estimadas al 2050 plantea un escenario hipotético lineal, únicamente con el objetivo de evaluar como el cambio de uso de suelo afecta la disponibilidad de los recursos hídricos, por lo tanto, los datos no pueden ser tomados como una realidad, para un análisis del cambio de uso de suelo en un escenario futuro se requiere de estimaciones propias que deben ser objeto de otro estudio.

4.5. ESCENARIOS HÍDRICOS FUTUROS AL 2050

Para la simulación de los caudales futuros de la cuenca alta del río Mira, se seleccionaron las estaciones meteorológicas e hidrológicas ubicadas en la zona de estudio y que podían proporcionar datos observados de precipitación, temperatura media y caudal diario, definiéndose para ello, como periodo de evaluación desde el 01 de enero de 1985 hasta el 31 de diciembre de 2011. A continuación, se representa el listado de estaciones meteorológicas e hidrológicas seleccionadas (Tabla 4).

Tabla 4

Estaciones hidro-meteorológicas con información disponible en la cuenca alta del río Mira

Código	Nombre estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m.)
M0053	IBARRA AEROPUERTO – DAC	Meteorológica	-78,1	0,333333	2214
M0059	TULCÁN AEROPUERTO	Meteorológica	-77,7	0,816667	2934
M0082	CHALPATAN	Meteorológica	-77,813889	0,738056	3300
M0084	BOLÍVAR-CARCHI INERHI	Meteorológica	-77,875278	0,535556	2790
M0085	SALINAS-IMBABURA INERHI	Meteorológica	-78,148889	0,463056	1730
M0086	SAN VICENTE DE PUSIR	Meteorológica	-78,041389	0,494167	1891
M0102	EL ÁNGEL	Meteorológica	-77,944947	0,618975	3000
M0103	SAN GABRIEL	Meteorológica	-77,821889	0,599806	2860
M0104	MIRA-FAO GRANJA LA PORTADA	Meteorológica	-78,0275	0,553056	2275
M0301	FF CC CARCHI	Meteorológica	-78,136389	0,608333	1280
M0303	BOLÍVAR-CARCHI INAMHI	Meteorológica	-77,903611	0,505278	2800
M0305	JULIO ANDRADE	Meteorológica	-77,723611	0,655833	2890
M0307	GRUTA LA PAZ	Meteorológica	-77,836389	0,5	2470
M0308	TUFINNO	Meteorológica	-77,855	0,800833	3418
M0310	MARIANO ACOSTA	Meteorológica	-77,981667	0,301667	2980
M0312	PABLO ARENAS	Meteorológica	-78,192778	0,502222	2340
M0314	AMBUQUÍ	Meteorológica	-78,007778	0,426111	1880
M0315	PIMAMPIRO	Meteorológica	-77,941111	0,389722	2090
M0324	SAN FRANCISCO DE SIGSIPAMBA	Meteorológica	-77,911667	0,298056	2230
H0015	CHOTA EN PTE. CARRETERA	Hidrológica	-78,07594	0,47608	1515
H0016	APAQUI AJ CHOTA	Hidrológica	-77,936237	0,442796	1715
H0017	APAQUID GRUTA LA PAZ #3	Hidrológica	-77,84859	0,49731	2365
H0045	APAQUI DJ MINAS	Hidrológica	-77,7834	0,5366	2650
H0064	EL ANGEL EN PTE.AYORA	Hidrológica	-77,95184	0,63753	2850

Fuente: Autor (2023)

El análisis de la información se realizó mediante la combinación de R y R-Studio (Cran R Project, 2023) , con el objetivo de automatizar el procedimiento y facilitar el procesamiento de grandes volúmenes de datos debido a su flexibilidad, potencia y facilidad de uso. Adicionalmente, se utiliza información cartográfica en formato vector y ráster de cada una de las subcuencas, para de esta manera, implementar un modelo hidrológico de escenarios hídricos para la cuenca alta del río Mira.

4.5.1. HOMOGENIZACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DIARIA

Es importante señalar que, la información meteorológica para la evaluación de la cuenca alta del río Mira, debe ser homogenizada, para ello, se utilizó como entrada los datos diarios de precipitación y temperatura.

Las bibliotecas requeridas para este proceso son Tidyverse para manipulación y visualización de datos, limpieza, transformación y gráficos de manera estructurada; Ráster para el análisis de datos espaciales; Rgdal permite acceder a Geospatial Data Abstraction Library – GDAL para lectura y escritura de datos espaciales; Sf, análisis de datos geoespaciales vectoriales; Openxlsx para lectura y escritura de archivos en formato Excel; Climatol para análisis y procesamiento de datos climáticos con herramientas de homogenización, control de calidad y relleno de data ausente de series climatológicas para obtener estadísticas y rejillas de series resultantes (Guijarro, 2023); Leaflet para generación de mapas interactivos; Nanair para visualización de datos faltantes, identificación de patrones de valores faltantes; Ggmap integra funcionalidades de Google Maps; HydroTSM para análisis de series temporales hidrológicas incluyendo modelización de caudales y precipitación (R-project, 2023).

Con estas herramientas y un script de funciones, se puede ejecutar y obtener la visualización de un mapa con la ubicación de las estaciones a fin de seleccionar las más óptimas, posteriormente se realiza la homogenización de precipitación o temperatura, a través de dos etapas una exploratoria y otra real. De esta manera, se

puede realizar una revisión de los datos originales (observados) y los datos corregidos para las estaciones seleccionadas y su posterior exportación para continuar con el procedimiento de regionalización (Anexo 1).

4.5.2. REGIONALIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DIARIA

El proceso de regionalización se realiza través de la extrapolación de datos hidrometeorológicos desde un punto de medición a una zona más extensa dentro de la misma región (Zucarelli, 2017), este requiere la utilización de bibliotecas para importar la base de datos en formato “*.xls”, aplicación de datos espaciales y tipo ráster, análisis hidrológico y geoestadístico; y funciones adicionales requeridas. El procesamiento tanto para los datos de precipitación y temperatura se ejecutan por cada subcuenca, e inicia con la lectura de datos de las estaciones meteorológicas, el archivo en formato vector de la subunidad hidrográfica, y la transformación del Sistema de Coordenadas de Geográficas a Universal Transverse Mercator – UTM.

Por consiguiente, se obtendrá cálculo de la precipitación diaria y anual promedio a través de polígonos de Thiessen, que determina los pesos de las estaciones meteorológicas en función de las áreas que cubren (Fooladi et al., 2023).

En el Anexo 2, se presenta el script utilizado para la regionalización de la precipitación, para el caso de la temperatura, se ejecuta el mismo script y función.

4.5.3. TRATAMIENTO DE DATOS DE CAUDAL DIARIO

La información correspondiente a caudales mensuales observados de la cuenca alta del río Mira, debe ser estimada para las áreas específicas de las subunidades hidrográficas, en este sentido, se requiere de bibliotecas con funciones para importar las bases de datos en formato “*.xls”, análisis de tendencias a través de baytrends, funciones hidrológicas mediante hydroTSM y zoo para manejo de series de tiempo (R-project, 2023). Este script permite calcular el promedio diario de caudales y

ajustarlos utilizando las áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas, adicional se calcula la curva de duración de caudales tanto para los caudales observados como para los ajustados, esto permite analizar la distribución de caudales a lo largo del tiempo. En el Anexo 3 se presenta el script utilizado para el tratamiento de caudales.

4.5.4. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA

Con los valores obtenidos de precipitación, temperatura y caudales diarios de los procedimientos anteriores, se deberá ejecutar un script para estimar los valores de evapotranspiración potencial (ETP). Las bibliotecas requeridas son Lubridate, para realizar una modificación en los formatos de las fechas y airGR para análisis hidrológicos y modelización de cuencas hidrográficas, como cálculo de caudal y evapotranspiración (R-project, 2023) y funciones adicionales. De esta manera se estima la ETP utilizando las temperaturas mensuales, latitud de la ubicación de la subcuenca hidrográfica aplicando la ecuación de Oudin (Zhou et al., 2020), adicionalmente se puede generar un hidrograma con los datos de precipitación y caudal (Anexo 4).

4.5.5. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE CAUDALES

El proceso de calibración y validación de caudales mensuales, se ejecuta a través de un script para el modelo GR2M con datos mensuales (Anexo 5) y un script para el modelo GR4J con datos diarios (Anexo 6), para simular el caudal de cada subcuenca hidrográfica. Las bibliotecas requeridas son openxls, lubridate y airGR (R-project, 2023), y funciones personalizadas. La lectura de datos incluye la información de precipitación, caudal y fechas, el script requiere un cambio en el formato de fecha a uno específico para su funcionamiento, el paso siguiente es generar un gráfico de hidrograma para observar la relación entre la precipitación y el caudal a lo largo del tiempo. Posteriormente se ejecuta el modelo GR2M y GR4J respectivamente, lo cual requiere de dos fases i) calibración y ii) simulación, en la primera fase se convierten los caudales a milímetros y se generan las entradas del modelo con los datos de fecha,

precipitación y evapotranspiración potencial; en este punto se definen los periodos de preparación y calibración de la información, el método de calibración aplicado es Michel, posteriormente se calculan las estadísticas de rendimiento, como el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe Efficiency - NSE. Por consiguiente, se utilizan los parámetros calibrados para simular el caudal durante el periodo de calibración y paso siguiente compararlo con el caudal simulada con el caudal observado para calcular las estadísticas de rendimiento, finalmente se utiliza el modelo calibrado para simular el caudal para todo el periodo, y a su vez, se obtienen los resultados y gráficos respectivos. Cabe señalar que, al modelo hidrológico se le aplicará características de un enfoque de modelo semi-distribuido como es el análisis desagregado a nivel de subcuenca hidrográfica, datos hidrometeorológicos y uso de suelo por cada subcuenca.

4.5.6. EXTRACCIÓN DE DATOS FUTUROS Y CALIBRACIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS

La extracción de datos futuros se realiza mediante datos geospaciales que contienen información hidrometeorológica de modelos climáticos desarrollados por el MAATE y difundidos a través del Quinto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático – IPCC, relacionado a evaluaciones periódicas sobre un marco científico del cambio climáticos, impactos y futuros riegos y las alternativas de adaptación y mitigación (Armenta et al., 2016). En este contexto se utilizan las bibliotecas openxlsx, ncdf4, raster, rgdal, rgeos, para trabajar con datos geospaciales en formato vector y ráster y chron para fechas; adicionalmente, se utilizan funciones de modelación personalizadas. Con base a la delimitación de cada subcuenca hidrográfica, se interseca con los tres conjuntos de datos de precipitación histórica y futura para los modelos CSIRO desarrollado por – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, GISS por el NASA Goddard Institute for Space Studies y IPSL del Institut Pierre-Simon Laplace; para generar un ensamble de los modelos climáticos globales o ensamble multimodelo, es decir, una combinación individual de un conjunto de modelos climáticos, el resultado es un conjunto de proyecciones que

cubre el escenario del futuro probable, esto es necesario para reducir la incertidumbre asociada a la proyecciones y conocer el rango alrededor de la media del ensamble(Armenta et al., 2016). En este contexto, se los ensambles de la precipitación y temperatura histórica en la cuenca y se obtiene la información bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para finalmente, se extraer la información en formato Excel (Anexo 7).

La calibración de los datos de precipitación y temperatura obtenida de los modelos climáticos, se ejecuta mediante las bibliotecas de openxlsx y lubridate, así como un script con modelos de funciones adicionales, el objetivo es acoplar la información obtenida de los modelos para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 específicamente para la cuenca hidrográfica, ajustándolos a los datos observados para de esta manera mejorar la precisión de las proyecciones climáticas futuras. El proceso de downscalings de los datos de precipitación y temperatura permite ajustar el modelo de una escala a nivel regional a una escala zonal a través de la información de las estaciones meteorológicas. Este proceso se realizó con los modelos climáticos CSIRO, GISS e IPSL cada uno por separado y por subcuenca hidrográfica (Anexo 8).

4.5.7. MODELACIÓN DEL ESCENARIO HÍDRICO FUTURO 2050 POR CAMBIOS DE USO DE SUELO

Para generar el escenario hídrico futuro al año 2050 de la cuenca alta del río Mira por cada subcuenca hidrográfica, se debe analizar detenidamente la información de caudales calibrados del modelo GR2M y GR4J. La selección del modelo adecuado depende de los resultados obtenidos en la calibración tanto para el coeficiente de Nash-Sutcliffe Efficiency – NSE, como de los parámetros de cada modelos (2 parámetros para el GR2M y 4 parámetros para el GR4) y la adaptabilidad a la extensión de las subcuencas; debido a que, el modelo debe ser capaz de simular adecuadamente los caudales observados, para generar predicciones precisas de caudales futuros en cada subcuenca tanto para eventos extremos como inundaciones o sequías y la relación con los cambios de uso de suelo por las actividad antrópicas

que se desarrollan en la cuenca, que pueden alterar la disponibilidad de agua para uso y aprovechamiento

De esta manera a través de un script en R Studio se realiza un análisis de los escenarios hidrológicos para el año 2050, mediante los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 y el modelo hidrológico (GR2M o GR4J) que se detalla en el Anexo 9. En este caso se inicia con la carga de librerías `openxlsx`, `lubridate`, `airGR`, `ggplot2` y `zoo` y la lectura de datos futuros de precipitación y temperatura calibrados de cada escenario climático. El script permite generar gráficas de las series temporales de temperatura bajo los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP 8.5, con sus diferentes modelos climáticos CSIRO, GISS, IPSL y la combinación de los mismos a través de un ensamble hasta el año 2050. Adicionalmente, se calcula la media móvil de la temperatura para suavizar las series temporales de este parámetro tanto para el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5, lo cual, ayuda a reducir el ruido en los datos y facilita la identificación de tendencias.

Paso seguido, con los datos de temperatura futura calibrada y la latitud de la subcuenca, de esta manera se estimada la ETP mediante la ecuación de Oudin y se integra los resultados del Coeficiente de Cultivo (K_c) por subcuenca hidrográfica, que posteriormente permitirán determinar los cambios en la disponibilidad el recurso hídrico en relación al cambio de uso de suelo. Por consiguiente, se calculan los intervalos de confianza para los datos de lluvia y ETP, esto permite comprender la variabilidad en los datos y la incertidumbre asociada con las proyecciones climáticas.

Para la simulación de los caudales se selecciona el modelo hidrológico (GR2M o GR4J) que presente los mejores resultados de NSE y pertinencia en los parámetros calibración; adicional se utiliza la superficie de la subcuenca, conjuntamente con los periodos de corrida y periodo de preparación para el modelo. El script ejecuta el modelo hidrológico utilizando los datos observados y climáticos para los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), de esta manera se obtienen los caudales simulados, para cada escenario. Finalmente, se generan gráficos de hidrogramas que comparan los caudales observados con los caudales simulados para los dos escenarios, lo cuales,

permiten evaluar los cambios en la disponibilidad del agua en relación al cambio climático y al cambio en el uso de suelo, lo puede proporcionar información crucial para la toma de decisiones relacionadas a la gestión integral del recurso hídrico de la cuenca alta del río Mira.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS, USO Y TIPO DE SUELO DE LA CUENCA

5.1.1. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

Para el análisis morfológico de la unidad hidrográfica de la cuenca alta del Río Mira, se estableció como sitio de captación al punto ubicado en las coordenadas UTM 822.246,375; 10.055.266,875. Para la evaluación del área de estudio se utilizaron imágenes satelitales de Vertex Alaska con una resolución de 30 metros.

Con base a los resultados obtenidos en este apartado, se determinaron las características morfométricas de la cuenca alta del Río Mira, la misma que posee una extensión de 1.916,02 km², con un perímetro de 242,15 km; y un coeficiente de compacidad o índice de Gravelius de 1,56 lo cual indica que tiene una forma alargada o irregular, y puede presentar peligros torrenciales; con respecto al factor de forma presenta un valor de 0,27, con una tendencia de la cuenca hacia las crecidas lentas, con una relación del rectángulo equivalente de aproximadamente de 6:1, es decir, casi ≈6 (5,6) veces más largo que ancho.

El análisis de los parámetros fisiográficos de relieve de la cuenca alta del Río Mira, se observa que la elevación mínima es de 1.509 m.s.n.m. y una elevación máxima de 4.237 m.s.n.m., con un desnivel total de la cuenca de 2.728 m.s.n.m., esto nos permite determinar que la cuenca tiene un relieve bastante pronunciado, con un rango de elevación significativo. En este sentido, con base a su curva hipsométrica (Figura 27), se demuestra que se trata de una unidad hidrográfica relativamente joven, con base la ubicación de su punto equilibrio, por otra parte, aproximadamente el 60,99% del área total de la cuenca se encuentra bajo la altitud media, siendo la altitud más frecuente la que encuentra entre los 2000 – 3000 m.s.n.m. y una pendiente media de la cuenca de 36,59%.

La red de drenaje presenta 2.346,78 km de ríos con un orden de 6, esto sugiere que se trata de una red desarrollada y compleja, además se observa 1.173,81 km de longitud de ríos de orden 1, esto indica la presencia de números afluentes de menor tamaño. Con respecto a la densidad de drenaje es de 0,82 km/km², lo que apunta que la cuenca tiene una red de ríos densa en relación con su área.

Con respecto al cauce principal posee una longitud de 83,84 km, con una pendiente media de 2,09%; a su vez la pendiente media de la cuenca es de 36,59%, estos valores indican que la cuenca tiene una topografía montañosa o accidentada.

La sinuosidad del cauce principal es de 1,16 lo que sugiere que el cauce tiende a ser meandroso con un coeficiente de torrencialidad de 0,13 ríos/km² que señala que la cuenca tiene una propensión moderada a la ocurrencia de eventos torrenciales.

En la Tabla 5 que se presenta a continuación se muestran los resultados obtenidos del procesamiento morfológico de la cuenca alta del río Mira.

Tabla 5

Resultados de caracterización morfológica de la cuenca alta del río Mira

Grupo	Parámetro Fisiográfico	Unidad	Valor	
General	Área	km ²	1.916,02	
	Perímetro	km	242,15	
Forma	Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius		1,56	
	Rectángulo equivalente	Lado mayor	km	103,41
		Lado menor	km	18,53
	Ancho medio	km	22,85	
	Factor de forma		0,27	
	Relieve	Cota Mínima	m.s.n.m.	1.509
Cota Máxima		m.s.n.m.	4.237	
Desnivel total de la cuenca		m	2.728	
Elevación Media de la cuenca		m.s.n.m.	2.955	
Elevación Mediana de la cuenca		m.s.n.m.	2.746	
Pendiente media de la cuenca		%	36,59	
Orden de la Red Hídrica			6,00	
Drenaje	Longitud total de ríos	Orden 1	km	1.173,81
		Orden 2	km	637,46
		Orden 3	km	320,43
		Orden 4	km	104,60
		Orden 5	km	87,07
		Orden 6	km	23,41
	Longitud de cauce principal	km	83,84	
	Longitud de la red Hídrica	km	2.346,78	
	Densidad de drenaje	km/km ²	0,82	
	Extensión media de Ecurrimiento	km	0,20	
	Pendiente media del cauce principal	%	2,09	
	Sinuosidad del cauce principal		1,16	
	Coeficiente de torrencialidad	ríos/km ²	0,13	

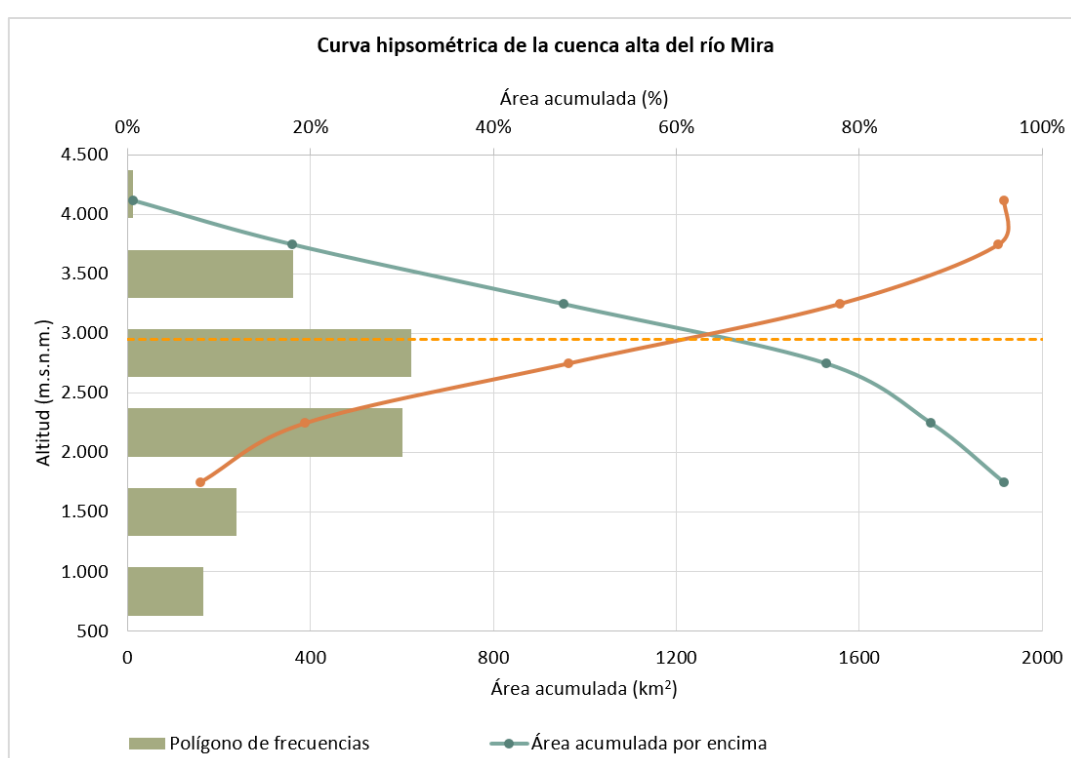
Fuente: Autor (2023)

Los resultados obtenidos de la construcción de una curva hipsométrica de la cuenca alta del río Mira, demuestran cómo se distribuyen las elevaciones de la cuenca en los

diferentes intervalos, en este caso, se puede observar que la mayor área de la cuenca, el 50,27%, se encuentra en un intervalo de elevación de 2.500 a 3.000 m.s.n.m.; cuyo valor es próximo al obtenido de la elevación mediana con un valor de 2.745.55 m.s.n.m., esta información apunta a que la unidad hidrográfica tiene una elevación promedio semejante a la elevación mediana, lo que podría sugerir que la cuenca se encuentra en equilibrio en términos de elevación (Figura 18).

Figura 18

Curva hipsométrica de la cuenca alta del río Mira



Fuente: Autor (2023)

5.1.2. ANÁLISIS DEL USO DE SUELO DE LA CUENCA

Los resultados que se obtuvieron de la reclasificación de las capas geográficas del CUT del MAATE, se pueden observar en la Tabla 6 que muestra las superficies de cada categoría en km² y la variación porcentual entre el año 1990 y 2020 (Figura 19), únicamente para la categoría de área sin cobertura vegetal, no se realiza la comparación en este periodo debido a que la cobertura de 1990 no se disponía esa categoría. Cabe señalar que, con el objetivo de facilitar el análisis porcentual del uso de suelo, las categorías área sin cobertura vegetal, cuerpo de agua natural y zona antrópica, fueron agrupadas en “otras coberturas”.

Tabla 6

Resultados de uso de suelo por tipo de cobertura en km²

Tipo de cobertura	Resultados de uso de suelo en km ²							% Var 1990- 2020
	1990	2000	2008	2014	2016	2018	2020	
Zona agroproductiva	826,0	940,5	946,6	946,8	965,2	971,8	972,2	17,70%
Vegetación arbustiva y herbácea	490,4	372,0	393,6	352,4	324,0	318,4	320,2	-34,71%
Paramo	295,4	292,7	289,2	316,6	315,8	315,8	315,8	6,91%
Bosque	297,4	299,2	271,9	283,0	284,9	281,7	279,6	-6,00%
Cuerpo de agua natural	7,8	7,8	7,8	5,9	5,8	6,4	6,4	-18,83%
Zona antrópica	2,8	6,1	10,7	15,4	16,8	19,3	19,3	577,75%
Área sin cobertura vegetal		1,6		0,0	7,6	6,7	6,7	

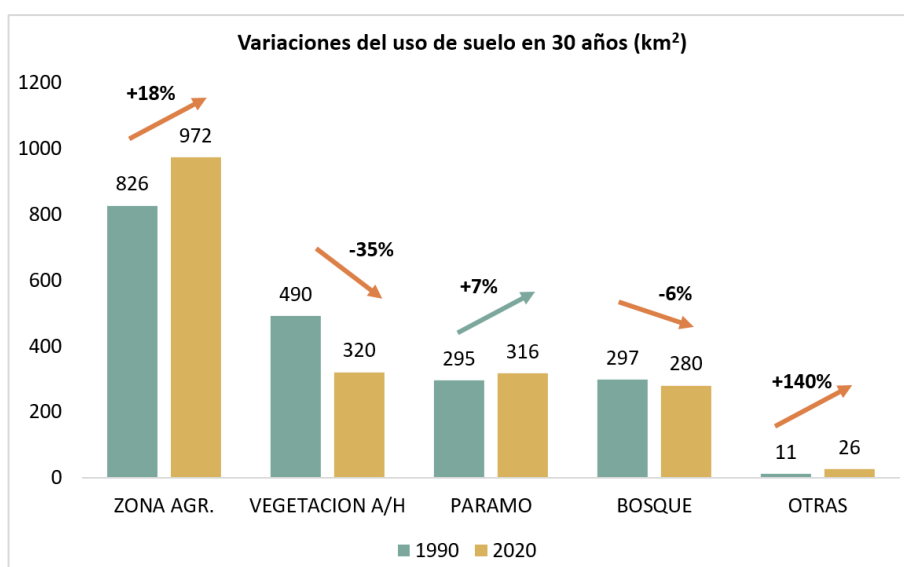
Fuente: Autor (2023)

El uso de suelo de la cuenca del río Mira ha experimentado una serie de cambios entre el periodo 1990 y 2020, como es el caso de la zona agroproductiva la cual se ha incrementado significativamente en 17,7% en este periodo, lo que responde al aumento en las actividades agropecuarias, mientras que la vegetación arbustiva y herbácea ha sufrido pérdidas de vegetación natural en 34,71%, mientras que la superficie de páramo se ha incrementado en 6,9%, esto puede estar relacionado a cambios en la clasificación del CUT, por otro lado, el patrimonio forestal ha

disminuido en 5,98% lo cual es negativo en términos de conservación y protección de los recursos, de igual manera que los cuerpos de agua natural que presentan un decrecimiento del 18,83%, que podría señalar un pérdida de la disponibilidad del agua y finalmente la zona antrópica que demuestra un crecimiento notable de 577,75% lo cual responde a su vez al crecimiento población que según las cifras del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2023), se observa un incremento del 52,5% de la población de los cantones ubicados en las aguas de la cuenca, donde la población paso de 276.334 habitantes en 1990 a 421.287 habitantes en el 2020.

Figura 19

Resultado de las variaciones porcentuales del uso de suelo en km² periodo 1990-2020



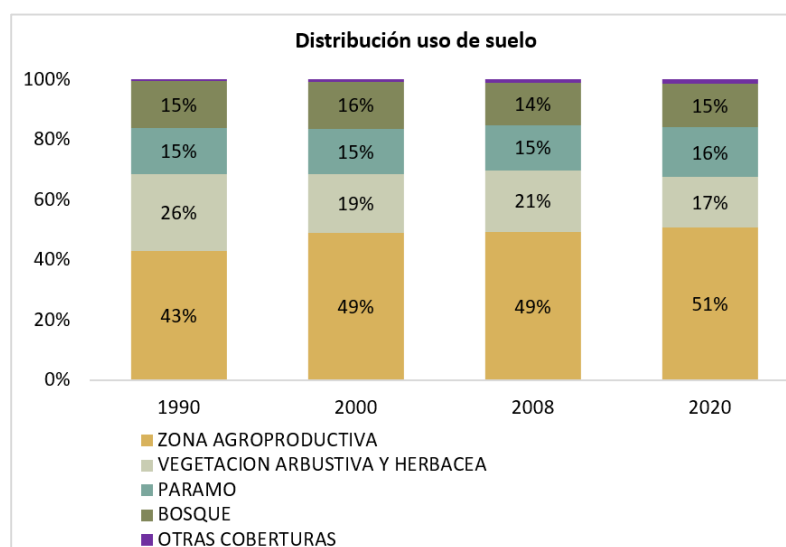
Fuente: Autor (2023)

Con respecto a la distribución porcentual del uso de suelo de la cuenca alta del río Mira, entre los años 1990, 2000, 2008 y 2020, es decir, cada década, exceptuando el año 2008 al no contar con una capa de cobertura 2010 oficial por parte del MAATE, que la zona agroproductiva tiene una mayor proporción en relación a las otras superficies de 48% en promedio, mientras que, la cobertura de páramo se mantiene relativamente constante entre el 15-16%, así como la cobertura boscosa entre el 14-16%, esto se debe al interés del Estado en proteger las fuentes de agua y los ecosistemas relacionados como se observó en los diferentes mecanismos de conservación de la cuenca, sin embargo, la vegetación arbustiva y herbácea se ha

visto reducida en proporción y varía del 26% en 1990 a 17% en el 2020, finalmente las otras categorías, infraestructura, cuerpo de agua natural y área sin cobertura vegetal, varían en alrededor del 1% con cambios poco significativos en relación en la proporción del uso de suelo de cada año (Figura 20).

Figura 20

Distribución del uso de suelo en los años 1990, 2000, 2008 y 2020

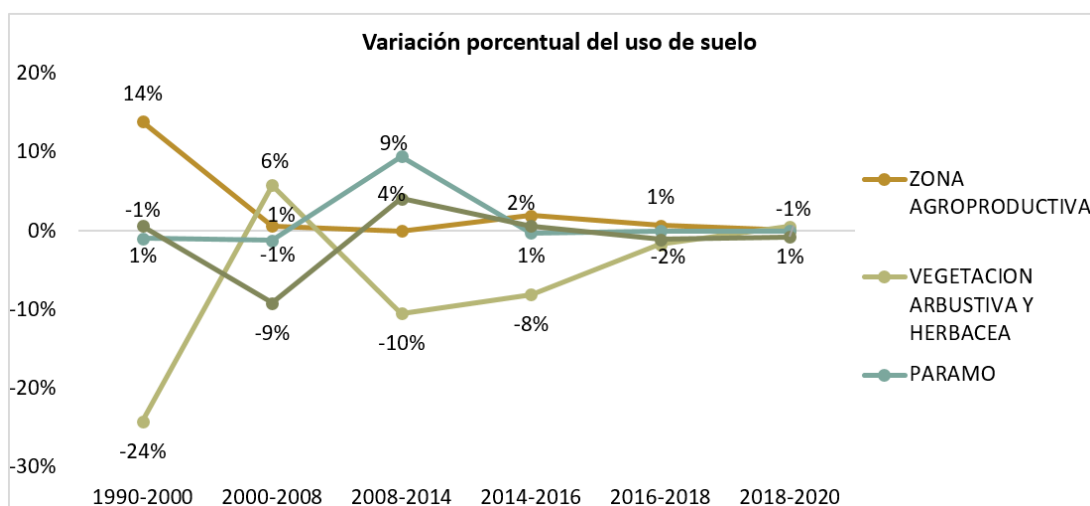


Fuente: Autor (2023)

En relación a las variaciones porcentuales entre los periodos de cada CUT (Figura 21), se puede evidenciar que en las zonas agroproductivas el período de mayor variación fue entre 1990 al 2000 con un 14%, mientras que entre el año 2000 al 2008 existió una estabilidad debido a que solo se observa una variación del 1%; en cuanto a la categoría de vegetación arbustiva y herbácea la pérdida más notable ocurrió entre 1990 y 2000 con una disminución del 24% lo que indica una pérdida importante de esta cobertura durante esa década, con una ligera recuperación entre el periodo 2000 y 2008, con un aumento del 6%; no obstante, la superficie de páramo presenta únicamente un periodo de cambio relevante entre 2008 y 2014 con un aumento del 9%, lo que podría deberse a cambios en la clasificación o métodos de medición, pero en términos generales se muestra estable entre cada periodo; a su vez, los bosques también se mantienen estables con variaciones del 1%, con una única disminución entre 2000 y 2008, pero que se recupera parcialmente en los siguientes periodos.

Figura 21

Variación porcentual del uso de suelo por periodos de coberturas

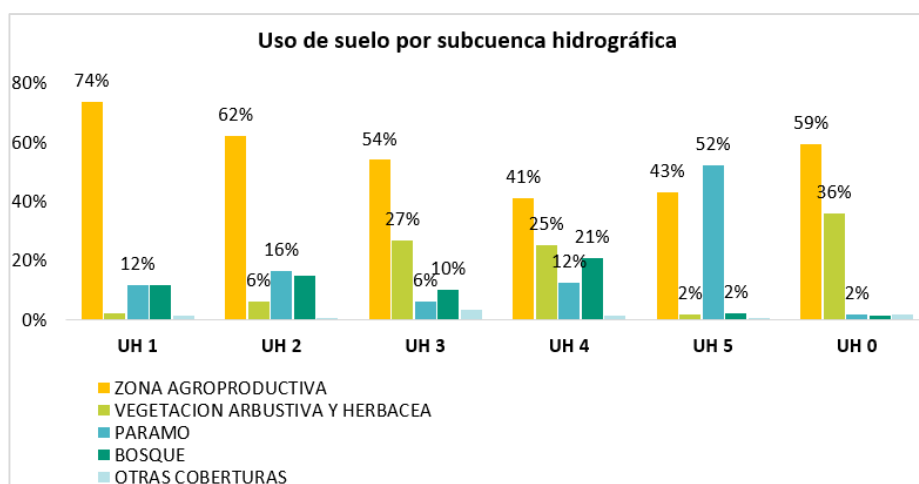


Fuente: Autor (2023)

Finalmente, realizando un análisis desagregado de las subcuencas hidrográficas de la cuenca alta del río Mira (Figura 22), donde la zona agroproductiva ocupa la mayor parte del uso, los porcentajes varían entre 41-74%, siendo la UH1 la que alberga mayor superficie de esta categoría, mientras que, la vegetación arbustiva es más significativa en la UH3 y UH0 con 27% y 36% respectivamente; por otra lado, la superficie de páramo se encuentra concentrada en la UH5 con 52% y en UH1 al igual que UH4 con el 12% de superficie; a su vez los bosques se encuentran en variaciones de 1-21%, donde la UH4 contiene a la mayor superficie forestal con 21%, seguido de la UH2 con 15% y UH1 con 12%.

Figura 22

Distribución del uso de suelo por subcuenca de la cuenca alta del río Mira

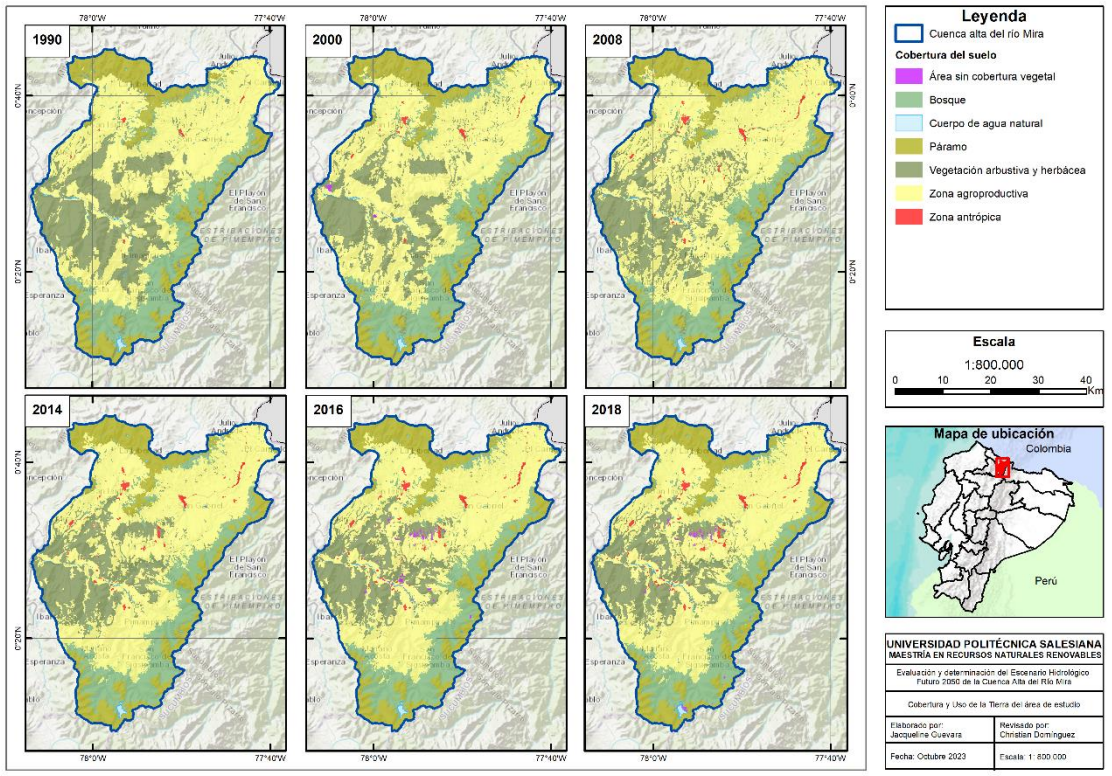


Fuente: Autor (2023)

Finalmente, en la Figura 23 se presenta un mapa que permite observar las variaciones en la distribución del uso de suelo durante 30 años, complementario a lo descrito en el numeral 4.1, Figura 1

Figura 23

Uso de suelo de la cuenca alta del río Mira



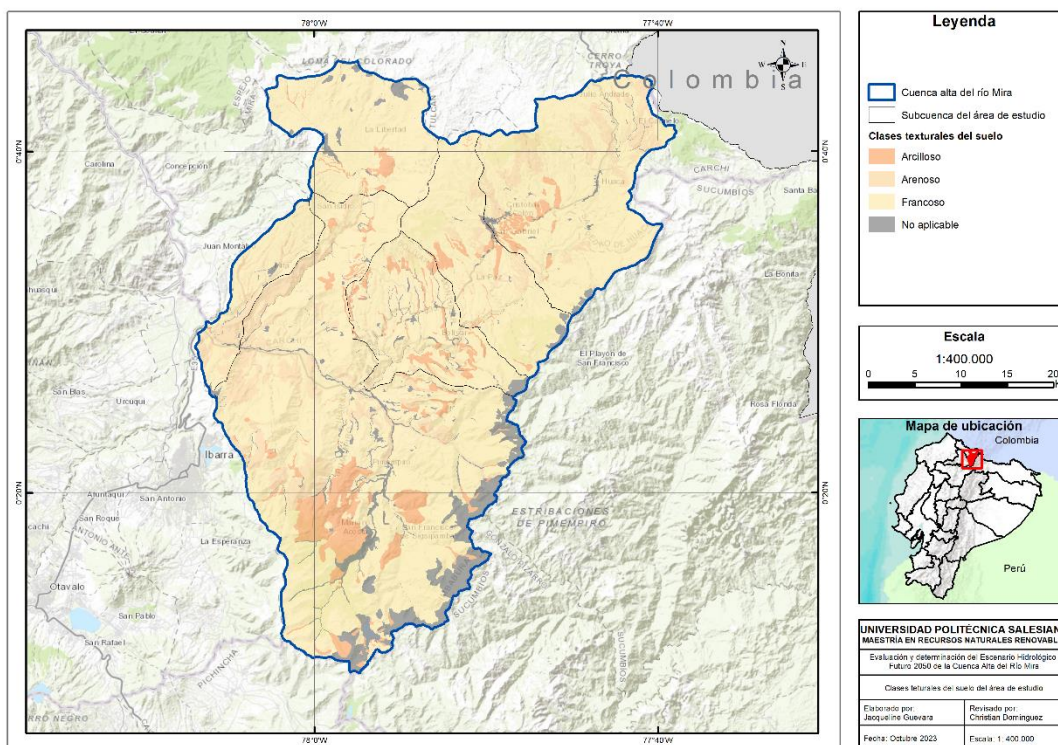
Fuente: Autor (2023)

5.1.3. ANÁLISIS DEL TIPO DE SUELO DE LA CUENCA

En términos generales la cuenca alta del río Mira, muestra la siguiente distribución de texturas: i) Arcilloso, ocupa el 7,5% (143 km²) de la cuenca, ii) Arenoso, representa el 10,3% (196,9 km²) y iii) Francoso, este abarca la mayor parte de la cuenca con una distribución del 75,4% (1447,9 km²). La categoría “No aplicable”, corresponde a áreas de clasificación de textura de suelo que no puede ser determinada y representan el 6,9% (131,8% km²) del total del área de la cuenca. En este contexto, se puede mencionar que la textura predominante es el suelo Francoso, sin embargo, las áreas de textura arcillosa y arenosa, pueden tener implicaciones en términos de infiltración, retención del agua y calidad del suelo (Figura 24).

Figura 24

Clases texturales de la cuenca alta del río Mira



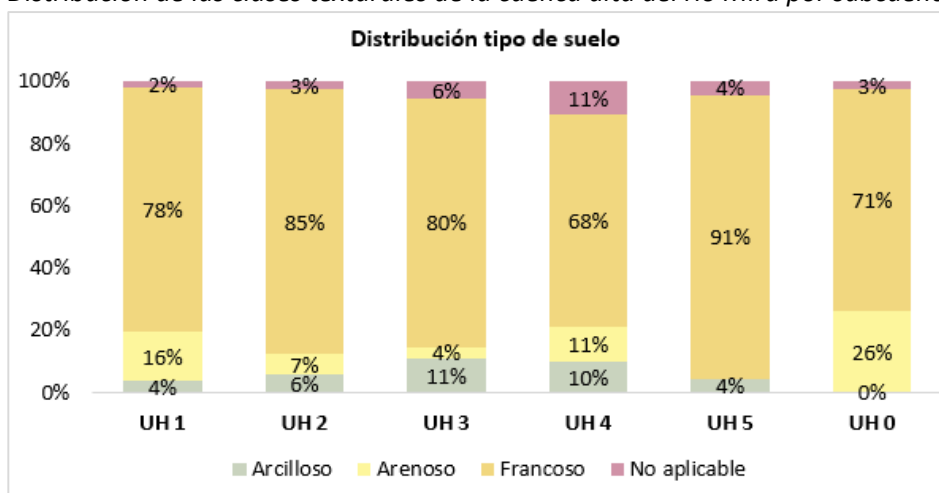
Fuente: Autor (2023)

La textura predominante de la cuenca es el suelo Francoso, puesto que, se encuentra presente en todas las subunidades hidrográficas, por otra parte, se puede observar las variaciones entre las diferentes clases texturales, como es el caso de la UH1 donde

la textura arenosa es significativamente alta 16%, en comparación a las otras subcuencas, mientras que, en la UH 2 la textura arenosa es la segunda más representativa, no obstante, en la UH 3 presenta un alto contenido de arcilla con 11%, al igual que en la UH 0 presenta un alto contenido de arcilla con 26%, caso contrario a la UH 5 que indica un bajo contenido del 4% (Figura 25).

Figura 25

Distribución de las clases texturales de la cuenca alta del río Mira por subcuenca



Fuente: Autor (2023)

5.2. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS

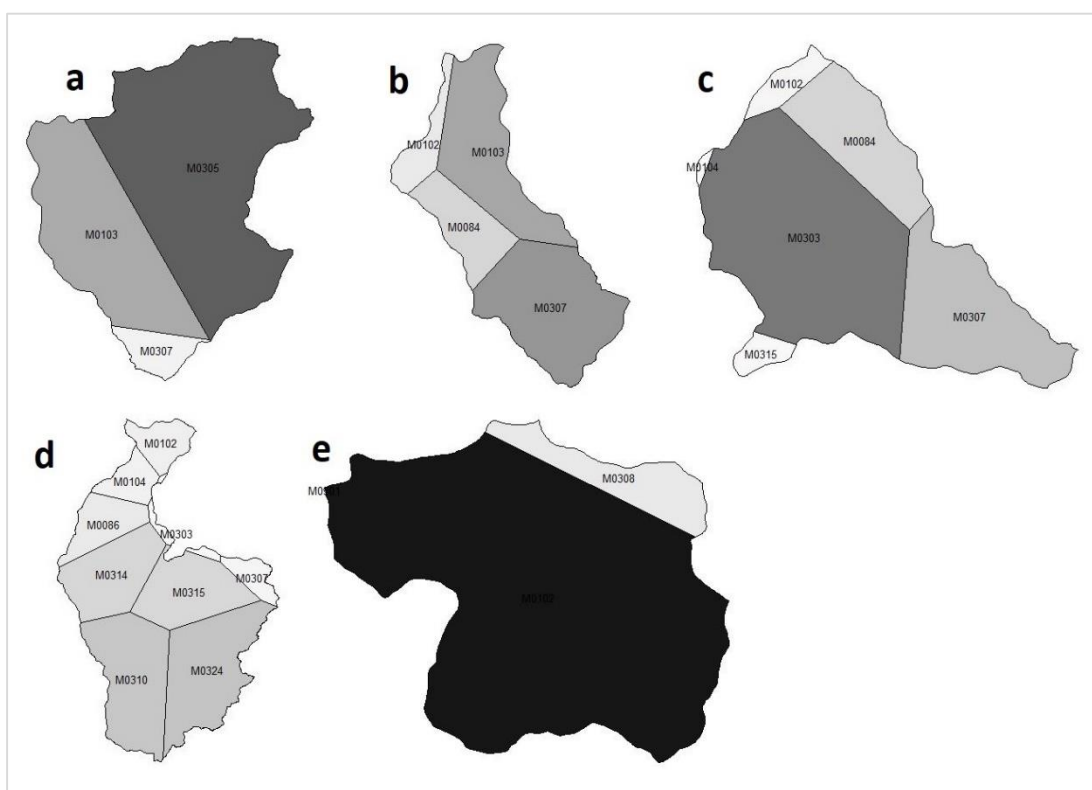
Para la simulación de escenarios futuros la cuenca alta del río Mira fue dividida en subunidades hidrográficas se generaron 5 unidades hidrográficas que presentan la siguiente extensión: UH1 (341 km²), UH2 (198 km²), UH3 (177,3 km²), UH4 (920,9 km²), UH5 (195,8 km²); en el caso la UH0 no forma parte del análisis al no contar con una estación hidrológica.

5.2.1. RESULTADOS DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

Los datos de precipitación y temperatura media fueron homogenizados y extrapolados a través del método de polígonos de Thiessen (Figura 26 y Figura 27).

Figura 26

Polígonos de Thiessen de precipitación de las subcuencas hidrográficas de la cuenca del río Mira a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 e) UH5



Fuente: Autor

Para la UH1, se determinó que el año con mayor precipitación fue 2011, con 1844,66 mm, mientras que, el año con menor precipitación fue 2001 con 613,57 mm, la precipitación promedio es de 1083,38 mm, con eventos extremos en los años 1988, 1999, 2008 y 2011. Por otra parte, la UH2 el año 2011 fue el de mayor precipitación con 1587,44mm; y el de menor precipitación fue 2001 con 584,38mm, con una precipitación promedio de 1000,28mm; con eventos extremos en los años 1988, 1989, 1999, 2008 y 2011. En el caso de la subcuenca UH3 la precipitación máxima es de 1444,46mm para el año 2011, una precipitación mínima para el año 2001 de

553,85mm, y una precipitación promedio de 939,33mm; con eventos extremos para los años 1988, 1999, 2008 y 2011. Con respecto a la UH4, la precipitación máxima encontrada es en el año 1989 con 1337,28mm, la precipitación mínima es de 517,58mm para el año 2001, y el promedio para el periodo es de 868,72mm. Para la subunidad hidrográfica UH5, se determinó que la precipitación máxima ocurrió en el año 1999 con 877,50mm, mientras que, el año 2001 registra la menor precipitación con 517,76mm, donde para el periodo de análisis se establece una precipitación promedio de 877,50mm, con evento extremos en los años 1988, 1993, 1994, 1996, 1999, 2008 y 2011.

Figura 27

Polígonos de Thiessen de temperatura de las subcuencas hidrográficas de la cuenca del río Mira, a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 e) UH5



Fuente: Autor

Con respecto a la temperatura media para la subcuenca UH1, se determinó un promedio de 11,49°C, donde el año 2009 fue el de mayor temperatura con alrededor de 12,08°C y por el contrario la temperatura más baja se determinó para el año 1990 con 10,91°C. Para la UH2 se obtuvo que el promedio de temperatura media es de 12,12°C, un máximo de 12,83°C y un mínimo de 11, 56°C. En referencia a la UH3, la temperatura máxima se registra en el año 1998 con 13,38°C y una temperatura mínima de 12,17°C en el año 1989, y un promedio de 12,69°C para el periodo de análisis. Para la UH4 la temperatura máxima se registra en el año 1998 con 15,20°C, la temperatura mínima en el año 1985 con 13,93°C, y un promedio de 14,49°C. Finalmente para la subcuenca UH5 la temperatura máxima fue de 12,70°C en el año 1998, la temperatura mínima fue de 11,13°C para el año 1985, y respecto a la temperatura promedio fue de 11,82°C.

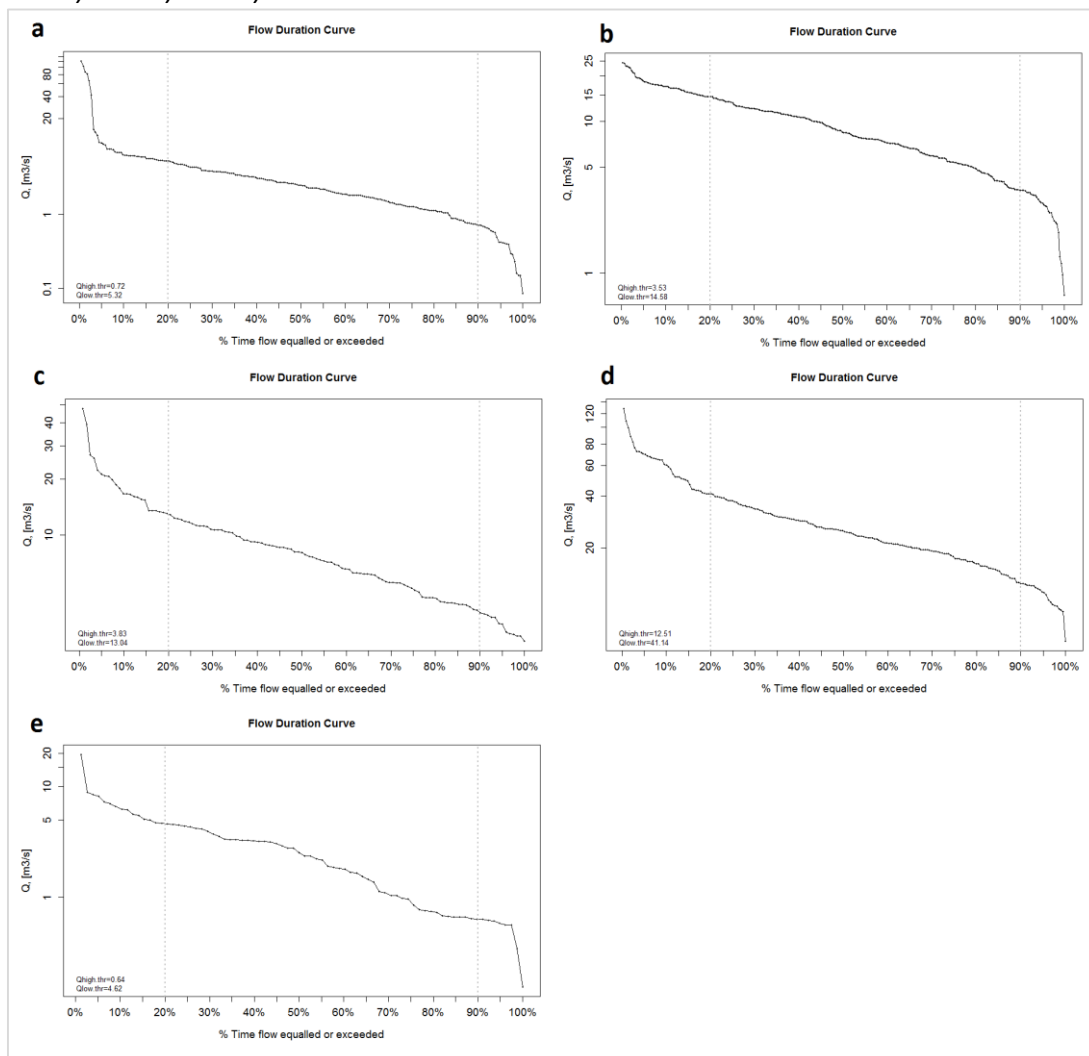
5.2.2. RESULTADO TRATAMIENTO DE CAUDALES

Para el tratamiento de los datos de caudales se utilizaron datos diarios con el objetivo de facilitar el procesamiento de la información en el proceso de calibración y validación. La Figura 28 muestra las curvas de duración para las diferentes subcuencas, excluyendo la subcuenca UH0, debido a que, no cuenta con una estación hidrológica. Las curvas de duración demuestran que se trata de una cuenca de alta montaña, con caudales elevados en periodos cortos, con variaciones entre cada subcuenca, lo cual puede deberse a diferentes factores como la impermeabilización del suelo, como zonas pavimentadas e infraestructura de las zonas urbanizadas, lo cual ocasiona que el agua tienda escurrir rápidamente hacia los sistemas de drenaje en lugar de infiltrarse por el suelo, esto puede ocasionar una respuesta hidrológica más rápida de la unidad hidrográfica, con picos de caudal más altos y cortos durante eventos de lluvias intensas; los cambios en la cobertura vegetal, como la deforestación o conversión de superficies forestales en zonas agroproductivas o urbanizadas, pueden reducir la capacidad de la vegetación para interceptar o retener el agua, ocasionando una mayor escorrentía superficial; en este contexto el tipo de cultivo y las prácticas agrícolas pueden influir en la curva de duración, como es el caso de la irrigación agrícola la cual puede aumentar el uso del agua afectando la

disponibilidad de la misma, erosionando el suelo e incrementar el transporte de sedimentos afecta la calidad y cantidad de agua disponible; finalmente, la cantidad de datos disponibles, es un factor de impacto que afectó la simulación caudales que se analiza en los siguientes puntos.

Figura 28

Curvas de duración por subcuenca hidrográfica de la cuenca alta del río Mira, a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 e) UH5



Fuente: Autor

5.2.3. COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Coefficiente de cultivo actual

Se estimaron los coeficientes de cultivo (Kc) actuales para cada subcuenca hidrográfica con base a los insumos cartográficos coberturas de uso, en la Tabla 7 se presentan los valores estimados de Kc, donde el valor dependerá según la extensión de las coberturas.

Tabla 7

Coefficiente de cultivo por unidad hidrográfica con base a las coberturas de suelo

Subcuenca hidrográfica	Cobertura	Kc cobertura	Kc UH
UH 1	BOSQUE	0,095	0,904
	CUERPO DE AGUA NATURAL	0,001	
	PARAMO	0,069	
	VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBACEA	0,010	
	ZONA AGROPRODUCTIVA	0,724	
	ZONA ANTROPICA	0,006	
UH 2	AREA SIN COBERTURA VEGETAL	0,000	0,890
	BOSQUE	0,128	
	PARAMO	0,102	
	VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBACEA	0,038	
	ZONA AGROPRODUCTIVA	0,620	
	ZONA ANTROPICA	0,002	
UH 3	AREA SIN COBERTURA VEGETAL	0,009	0,868
	BOSQUE	0,096	
	CUERPO DE AGUA NATURAL	0,000	
	PARAMO	0,044	
	VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBACEA	0,245	
	ZONA AGROPRODUCTIVA	0,470	
UH 4	ZONA ANTROPICA	0,004	0,870
	AREA SIN COBERTURA VEGETAL	0,002	
	BOSQUE	0,180	
	CUERPO DE AGUA NATURAL	0,004	
	PARAMO	0,084	
	VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBACEA	0,216	
UH 5	ZONA AGROPRODUCTIVA	0,381	0,722
	ZONA ANTROPICA	0,003	
	BOSQUE	0,020	
	CUERPO DE AGUA NATURAL	0,001	
	PARAMO	0,273	
	VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBACEA	0,010	
	ZONA AGROPRODUCTIVA	0,414	
	ZONA ANTROPICA	0,004	

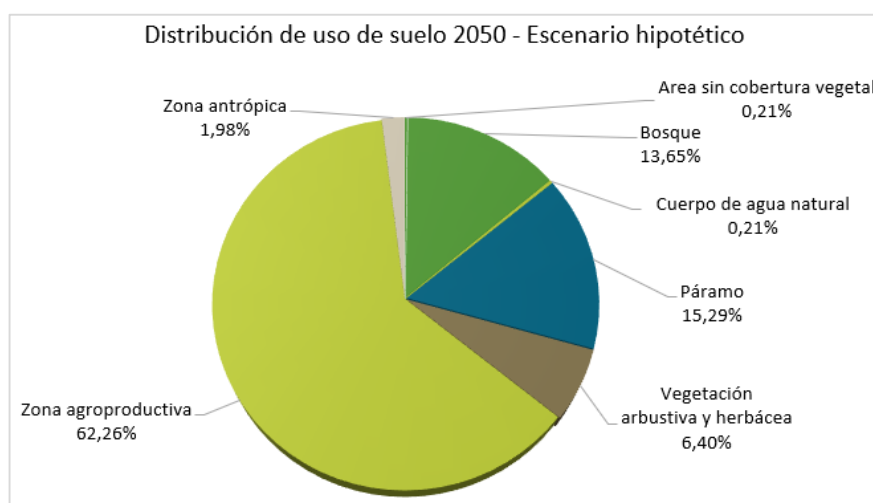
Fuente: Autor

Coefficiente de cultivo futuro

Como un escenario hipotético de uso de suelo al 2050 se planteó la siguiente distribución de las coberturas para la cuenca alta del río Mira (Figura 29), cabe señalar que, este escenario únicamente responde a una proyección lineal de las superficies para evaluar los cambios en la disponibilidad de agua en relación al uso de suelo

Figura 29

Distribución del uso de suelo 2050 de un escenario hipotético



Fuente: Autor

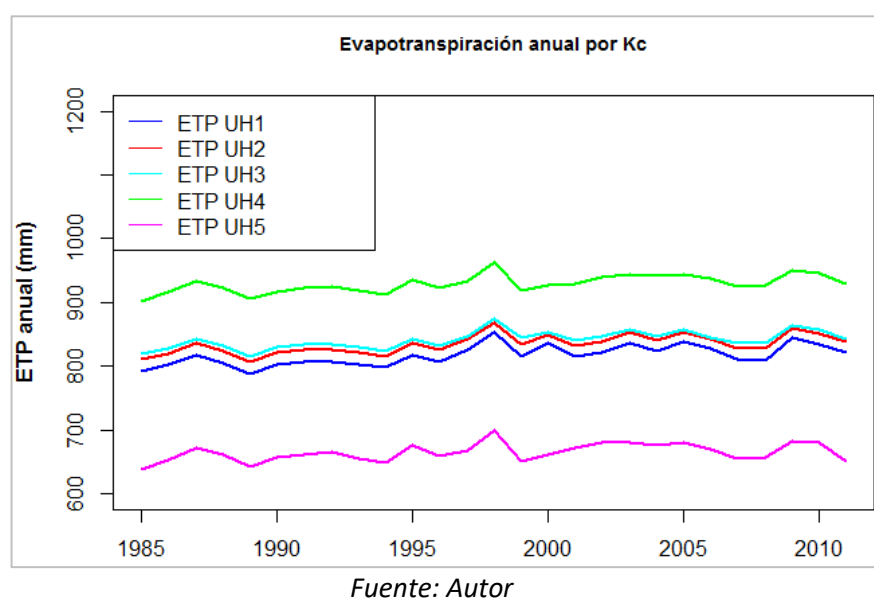
Con esta información se obtuvo como Kc 2050 los siguientes valores: UH1 un valor de 0,925, UH2 un valor de 0,998, UH3 un valor de 0,887, UH4 un valor de 0,880 y UH5 un valor de 0,737. Los cuáles serán aplicados en el escenario hidrológico 2050.

Evapotranspiración potencial (ETP) por coeficiente de cultivo

Con respecto a los resultados de ETP por Kc los datos varían entre 638 a 962 mm por año, en la Figura 30, los resultados anuales donde la UH4 presenta una mayor ETP en comparación con las otras subcuencas lo cual responde a la extensión total de la unidad hidrográfica y los tipos de coberturas presentes en la misma, mientras que UH5 muestra los valores más bajos.

Figura 30

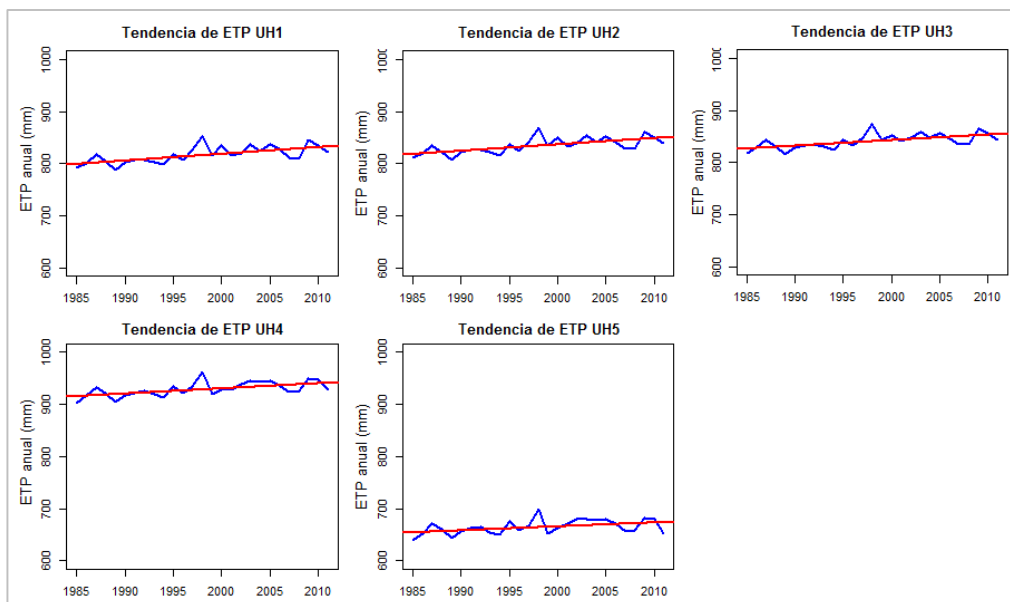
Resultados de Evapotranspiración Potencial (ETP) por Coeficiente de cultivo (Kc) por periodos de 3 años



Los resultados muestran una tendencia creciente a lo largo de los años, para todas las subcuencas (Figura 31).

Figura 31

Resultados de Evapotranspiración Potencial (ETP) por Coeficiente de cultivo (K_c) promedio anual



Fuente: Autor

5.2.4. RESULTADOS CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Los resultados de la calibración de la cuenca alta del río Mira para el modelo GR2M, proporcionan información sobre los valores de los parámetros X_1 y X_2 , así como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe – NSE. Estos valores se utilizaron para llevar a cabo simulaciones de caudal durante el período de corrida, y se realizaron comparaciones con los datos de caudal observados.

Con este antecedente, se realizaron 9 ejecuciones de calibración para cada subcuenca, donde se determinó que para la subcuenca UH1 se ejecutaron 23 iteraciones y 97 corridas, obteniendo como combinación de parámetros un X_1 de 6002,91 y X_2 de 0,67; con un valor de NSE de 0,16; lo cual indica que el modelo GR2M calibrado es mejor que los datos observados, sin embargo, el ajuste no es perfecto. Para la subcuenca UH2 se realizaron 20 iteraciones, 85 corridas, con una combinación de parámetros un X_1 de 7115,28 y X_2 de 1,04; y un valor de NSE de 0,21, indicando una mejora en el ajuste de los caudales observados, aunque el ajuste no podría ser óptimo. En el caso de la UH3 se ejecutaron 19 iteraciones, 81 corridas, con una combinación de parámetros un X_1 de 3751,83 y X_2 de 0,93; y el valor de NSE fue de 0,64, este último indica que el modelo GR2M calibrado se ajusta notablemente a los datos de caudal observados, dando un resultado positivo a la calibración hidrológica. Para la subcuenca UH4 se realizaron 25 iteraciones, 107 corridas, los parámetros obtenidos fueron X_1 de 4023,87 y X_2 de 1,28; con un valor de NSE de 0,12; en este se puede observar que los datos calibrados se ajustan mejor a los datos observados, sin embargo, la calidad de ajuste puede considerarse relativamente baja. En el último análisis de calibración para la subcuenca UH5 se realizaron 13 iteraciones, 56 corridas, obteniendo como combinación de parámetros un X_1 de 340,36 y X_2 de 1,05; con un valor de NSE de 0,62; lo que demuestra un buen ajuste del modelo calibrado los datos observados con un ajuste razonable.

En la Tabla 8, se presenta los resultados obtenidos del proceso de calibración y validación para cada subcuenca.

Tabla 8

Resultados del criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe Efficiency y parámetros de calibración del modelo agregado GR2M de las subcuencas de la cuenca alta del río Mira

Subcuenca	Simulaciones caudales calibrados NSE	Simulaciones caudales calibrados (caudales mínimos) NSE	Parámetro X ₁	Parámetro X ₂
UH1	0,16	0,16	6002,91	0,67
UH2	0,19	0,21	7115,28	1,04
UH3	0,62	0,64	3751,83	0,93
UH4	0,18	0,12	4023,87	1,28
UH5	0,44	0,62	340,36	1,05

Fuente: Autor

Con respecto a la calibración de los caudales para el modelo GR4J, muestran un desempeño deficiente para el coeficiente de NSE, por ejemplo, la UH4 que corresponde a la subcuenca con mayor extensión (1833 km²), se obtuvo un NSE negativo de -0,13, lo que indica que la simulación del modelo GR4J son peores que los datos observados, y únicamente la unidad hidrográfica UH5 presenta un valor de NSE de 0,19 indicando un relativo ajuste. Con referencia a los parámetros del modelo se presentan valores inusualmente altos para UH1, UH2 y UH4 con un X₁ de 4.511,20mm, 9.950,72mm y 9.566,99mm respectivamente, indican una capacidad de retención de humedad inusitado; caso similar ocurre en el parámetro X₂ en la UH1 y UH2 con valores bajos de 0,35 y 1,05 mm/día respectivamente, que señalan una capacidad de escorrentía excepcionalmente baja y poco realistas para estas subcuencas; lo mismo ocurre con el parámetro X₃ de la subcuenca UH3 de 7.942,63 días y para la subcuenca UH1 de 125,84 días, indican una respuesta extremadamente lenta y nada realista con la perspectiva hidrológica; finalmente para el parámetro X₄ los valores varían entre 0,88 y 1,99 lo que sugiere que el respuesta de las subcuencas al almacenamiento base puede ser incoherente. Por consiguiente, estos parámetros demuestran que las simulaciones pueden generar resultados que no reflejen adecuadamente la respuesta hidrológica real de las subcuencas, afectando a la precisión en las mismas (Tabla 9).

Tabla 9

Resultados del criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe Efficiency y parámetros de calibración del modelo GR4J de las subcuencas de la cuenca alta del río Mira

Subcuenca	Simulaciones caudales calibrados NSE	Parámetro X ₁	Parámetro X ₂	Parámetro X ₃	Parámetro X ₄
UH1	0,12	4.511,20	1,05	125,84	1,00
UH2	0,12	9.950,72	0,35	60,77	1,21
UH3	0,17	120,30	4,50	7942,63	1,99
UH4	-0,13	9.566,89	1,87	46,42	1,38
UH5	0,19	1.187,96	2,97	54,59	0,88

Fuente: Autor

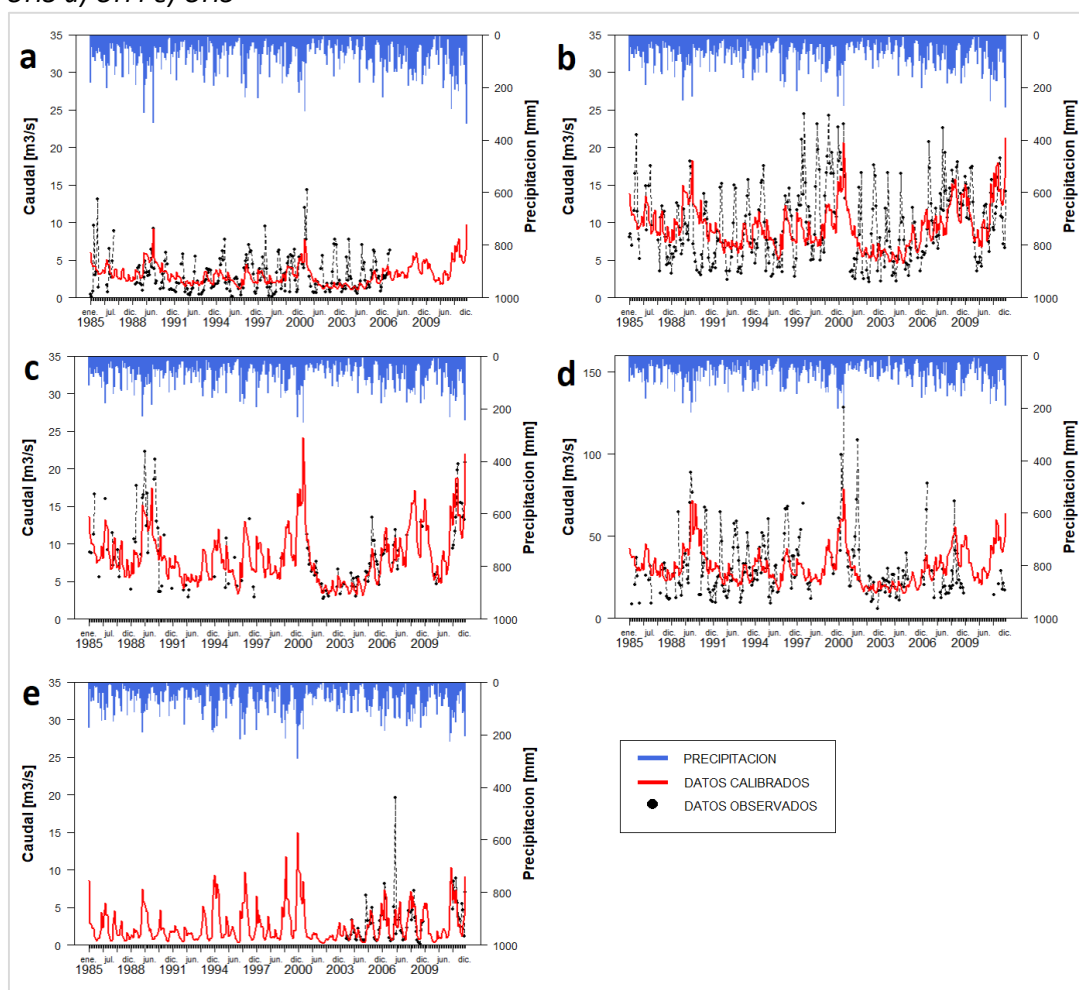
En síntesis, la calibración con el modelo GR4J, demuestra un bajo rendimiento demostrando que el modelo no es capaz de representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, y que requiere un análisis profundo de los datos observados de caudal diario para que las simulaciones sean más precisas y proporcionen resultados más fiables en caso de llevarlas a un escenario hídrico futuro. En este sentido, realizar la modelación semi-distribuida de toda la cuenca con funciones de enrutamiento acopladas al modelo GR4J no resulta pertinente y, por esta razón, se seleccionó el modelo GR2M con la incorporación de características de un enfoque de modelo semi-distribuido para la simulación de caudales futuros, al presentar los resultados más acoplados.

Por consiguiente, respecto al proceso de calibración y validación del modelo GR2M, se puede concluir que el ajuste del modelo a los datos de caudales observados, puede ser considerado como “Muy Bueno” con valores de $0,6 < NSE \leq 0,8$ (Tabla 1), específicamente en la subcuenca UH3 y UH5 y “Satisfactorio” para UH1, UH2 y UH4, a pesar de la variabilidad en la extensión de cada subcuenca, lo que sugiere que es capaz de adaptarse a diferentes dimensiones y características hidrológicas específicas, esto sugiere que el modelo puede generalizarse y aplicarse en diferentes regiones geográficas independientemente del tamaño de la cuenca. De esta manera se puede establecer que los resultados de NSE, son en su mayoría positivos, demostrando un ajuste razonable para todas las subcuencas, la variabilidad en este caso puede deberse a las diferencias en las condiciones hidrológicas y climáticas de

cada subcuenca; de igual manera, se observa una adecuada simulación de caudales mínimos, lo cual es un aspecto crítico en la gestión de recursos hídricos, debido a la importancia de garantizar la disponibilidad de agua en condiciones de sequía. Con respecto a los parámetros X_1 y X_2 se presenta un calibración exitosa para todas las subcuencas, los valores son adecuados, lo cual permitirá reproducir con precisión los caudales observados. Con estos antecedentes, se presentan la Figura 32, la misma que representa de forma gráfica la calibración del modelo GR2M, para cada subcuenca con base a los datos observados, donde todas las unidades presentan una misma tendencia, simulando los eventos extremos en los periodos 1989, 2000 y 2011.

Figura 32

Resultados de simulación de caudales calibrados y caudales observados, a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 e) UH5



Fuente: Autor

De esta manera en la literatura científica, diversos estudios han aplicado el modelo hidrológico GR2M en diferentes cuencas alrededor del mundo, evaluando su desempeño bajo distintas condiciones climáticas y topográficas. Estas investigaciones proporcionan valiosos insights sobre la capacidad del modelo para simular el escurrimiento mensual y sus variaciones en diferentes contextos geográficos.

En un estudio abarcando 1469 cuencas en Estados Unidos, Fathi et al., (2023) utilizaron el modelo GR2M y calibraron con el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), los resultados revelaron un buen desempeño en estaciones ubicadas en zonas de montaña, con valores de NSE entre 0,65 y 1; sin embargo, en regiones más secas, se observaron resultados insatisfactorios. Este patrón resalta la influencia del contexto topográfico y climático en el rendimiento del GR2M.

Ditthakit et al., (2023) llevaron a cabo un estudio en Tailandia, calibrando el modelo GR2M. Durante la etapa de calibración, los valores de NSE fluctuaron entre 0,165 y 0,880, con un promedio de 0,566. En la etapa de validación, los valores variaron entre 0,167 y 0,941, con un promedio de 0,587. Estos resultados sugieren una variabilidad en la capacidad del GR2M para simular el escurrimiento mensual en diferentes cuencas tailandesas. Mientras que, en la cuenca del Bouregreg en Marruecos, Mahdaoui et al., (2024) aplicaron el modelo GR2M para determinar caudales futuros hasta el año 2050 bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Durante el período de validación de 15 años, los valores de NSE indicaron un buen desempeño del modelo, con variaciones entre 0,6 y 0,8. Este estudio destaca la utilidad del GR2M en la predicción de caudales futuros en la región.

Finalmente, la investigación realizada en una cuenca de los Andes tropicales glaciares de Perú, por (Muñoz et al., 2021), se evaluó el modelo GR2M, donde se obtuvieron valores de NSE entre 0,65 y 0,73 durante los periodos de calibración y validación, y entre 0,73 y 0,78, sugiriendo un rendimiento aceptable. Además, se resalta que la complejidad del modelo no siempre se traduce en una mejora significativa y destaca

la importancia de estrategias integrales de calibración y evaluación, especialmente en regiones con limitaciones de datos y conocimiento.

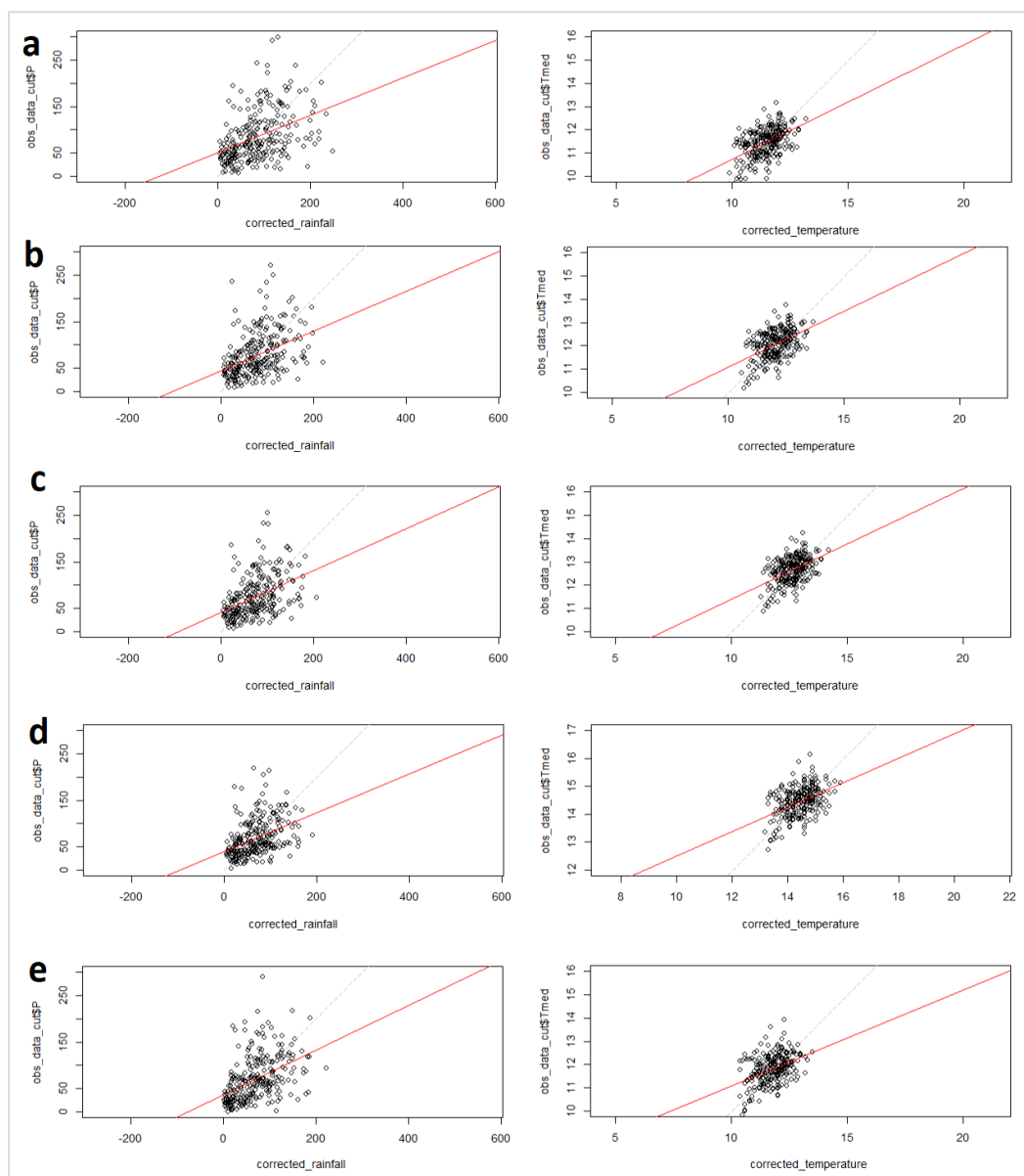
Con esta información previa, se revela la variabilidad en el rendimiento del modelo GR2M en diferentes condiciones geográficas y climáticas, señalando la importancia de la contextualización y la adaptación del modelo a las características específicas de cada cuenca, la evidencia respalda la necesidad de considerar cuidadosamente el contexto geográfico y climático al aplicar modelos hidrológicos, como el GR2M, en diferentes regiones del mundo.

5.2.5. OBTENCIÓN DE DATOS FUTUROS Y CALIBRACIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS

Los resultados de la calibración de los datos futuros de las subcuencas hidrográficas de la cuenca alta del río Mira, permiten observar las tendencias y patrones en la precipitación y temperatura estimada para el periodo simulado 2011 – 2050, a través de los modelos climáticos CSIRO, GISS, IPSL y el modelo Ensemble para los escenarios RCP45 y RCP85. Los datos calibrados y corregidos de precipitación demuestran una ligera dispersión en comparación con los datos de temperatura (Figura 33), esto puede deberse a la variabilidad de la precipitación entre los años, meses y días, con eventos extremos de precipitaciones prolongadas que se pudieron determinar con base a los datos observados como se mencionó en apartados anteriores.

Figura 33

Representación de la dispersión de los datos futuros calibrados, a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 e) UH5



Fuente: Autor

Con respecto a los resultados de los datos futuros mensuales de precipitación y temperatura calibrados para el escenario RCP 4.5, en la subunidad hidrográfica UH1, se ha registrado un notable incremento del 17,2% en la precipitación, el promedio de precipitación alcanzó los 98 mm, con un máximo de 251,1 mm y un mínimo de 11,66 mm. Con respecto a la subunidad hidrográfica UH2, se determinó un incremento del 17,5% en la precipitación, donde la precipitación promedio se situó en 91,2 mm, con

un máximo de 213,36 mm y un mínimo de 13,5 mm. Para la subcuenca UH3, se registró un promedio de precipitación de 85,95 mm, con un mínimo de 13,43 mm y un máximo de 200,4 mm, el incremento en la precipitación para esta unidad fue de 18,15%. Mientras que, la UH4 mostró un promedio de precipitación ligeramente inferior, con 80,62 mm, los valores mínimos y máximos de precipitación fueron de 14,23 mm y 189,04 mm, respectivamente, con un incremento del 18,68%. En contraste, en la subcuenca UH5, donde se observaron condiciones de precipitación distintas, aunque el promedio de precipitación fue de 81,53 mm, la variación en esta área fue notablemente más alta, alcanzando el 22,89%, además, el rango de precipitación fue amplio, con un mínimo de 7,26 mm y un máximo de 212,66 mm, esto indica una mayor variabilidad en los niveles de precipitación en UH5 a lo largo del período de registro. En consecuencia, cada subcuenca presenta su propia dinámica de precipitación, lo que destaca la importancia de analizar las condiciones climáticas de manera localizada para una planificación hídrica efectiva.

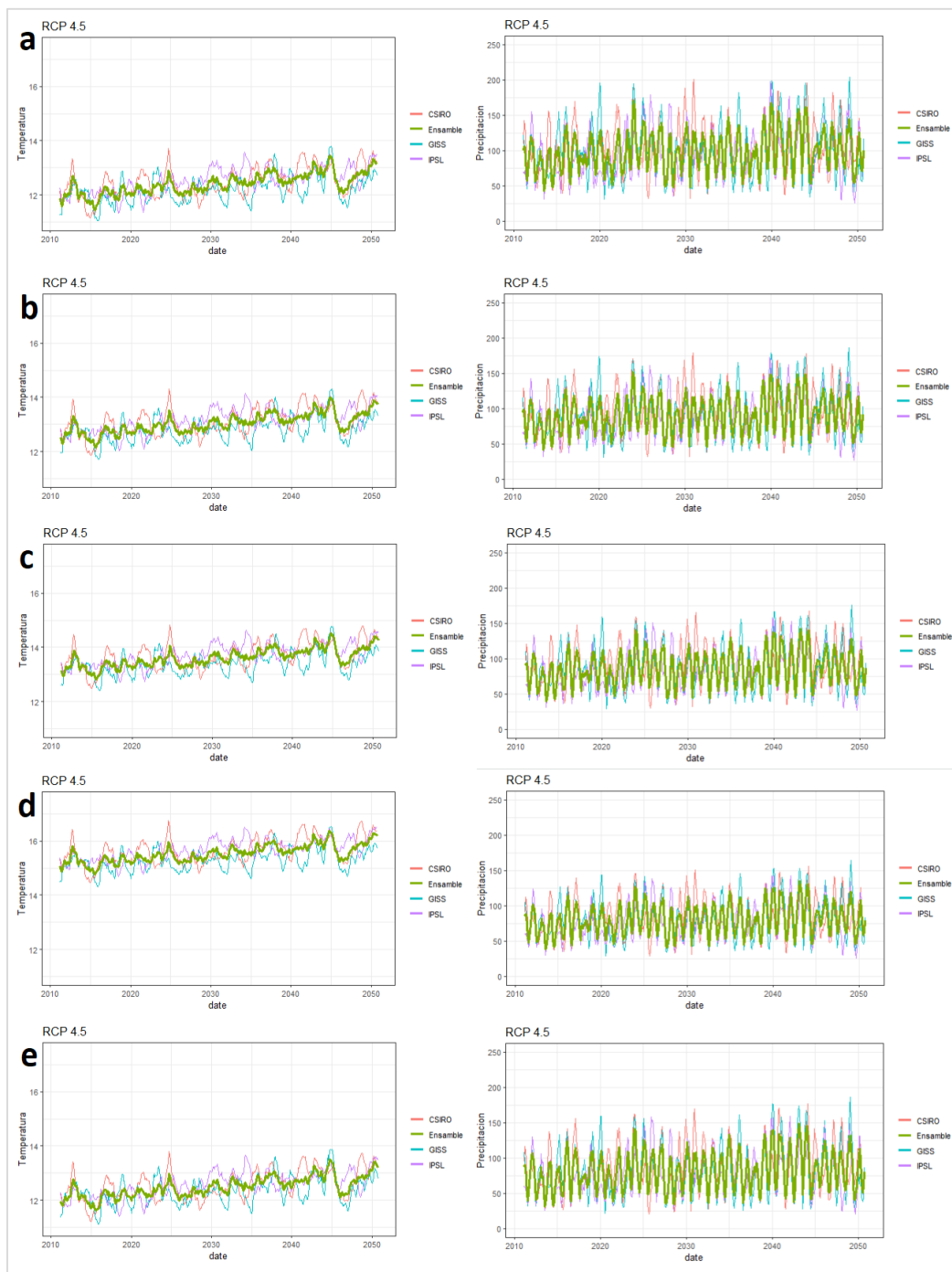
Por otra parte, en relación a los resultados de los datos futuros mensuales de precipitación y temperatura calibrados para el escenario RCP 4.5, en UH1 se registró una temperatura media de 12,40°C, con una temperatura máxima de 13,76°C y una mínima de 11,06°C, se observó un incremento del 11,53% en la temperatura promedio para esta cuenca. En relación a la UH2 la temperatura promedio fue de 13,03°C, con una temperatura máxima de 14,30°C y una mínima de 11,76°C, se detectó un incremento del 10,26% en la temperatura promedio. Mientras que, para la subcuenca UH3, la temperatura media alcanzó los 13,61°C, con una temperatura máxima de 14,76°C y una mínima de 12,50°C, se observó un aumento del 9,02% en la temperatura promedio. Para la UH4 se registró una temperatura media de 15,53°C, con una temperatura máxima de 16,60°C y una mínima de 14,46°C; aunque el incremento en la temperatura promedio fue del 7,59%, esta subunidad muestra temperaturas relativamente más cálidas en comparación con las subcuencas anteriores. Por último, en UH5 la temperatura media se situó en 12,48°C, con una temperatura máxima de 13,76°C y una mínima de 11,33°C, con un incremento del 11,06% en la temperatura promedio. En conclusión, estos resultados subrayan la variabilidad en las temperaturas entre diferentes subunidades hidrográficas y revelan

incrementos significativos en las temperaturas promedio en UH1, UH2 y UH5, estos cambios térmicos pueden tener implicaciones importantes para la adaptación al clima y la gestión de recursos en estas regiones específicas.

En la Figura 34, se presentan los resultados de los modelos climáticos CSIRO, GISS, IPSL y el Ensamble para los escenarios RCP 4.5 tanto para los datos de temperatura como de precipitación futuros calibrados.

Figura 34

Ensamble de datos futuros de temperatura y precipitación calibrados para RCP 4.5 con modelos climáticos CSIRO, GISS y IPSL para a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 y e) UH5



Fuente: Autor

Los resultados obtenidos para el escenario RCP 8.5 para los datos futuros de precipitación calibrados para la para la subcuenca UH1, muestra un significativo incremento del 25.2% en la precipitación, con un promedio de 99 mm, una máxima de 232.53 mm y una mínima de 11.2 mm. Por otro lado, para UH2, se determinó un incremento del 22.79% en la precipitación, con un promedio de 92.69 mm, una máxima de 209.83 mm y una mínima de 12.76 mm. Con respecto a la subcuenca UH3, el promedio de precipitación fue de 87.57 mm, con una precipitación máxima de 197.3 mm y una mínima de 12.56 mm, con un incremento en la cantidad del 22.36%. En relación a UH3, el promedio de precipitación fue de 87.57 mm, con una precipitación máxima de 197.3 mm y una mínima de 12.56 mm, el incremento en la precipitación en esta cuenca fue del 22.36%. Mientras que, para la subcuenca hidrográfica UH4, se observó un promedio de precipitación de 82.43 mm, con una precipitación máxima de 185.16 mm y una mínima de 12.9 mm, donde el incremento fue precipitación fue de 22.51%. Finalmente, para la UH5 se encontró un promedio de precipitación de 82.67 mm, con una precipitación máxima de 208.16 mm y una mínima de 6.16 mm, con una variación a la alza en la cantidad de precipitación notablemente alta, alcanzando el 26.61%. En este sentido con relación a la precipitación los incrementos para UH1, UH2 y UH5, plantean desafíos significativos para la gestión de estas cuencas con base a escenarios climáticos.

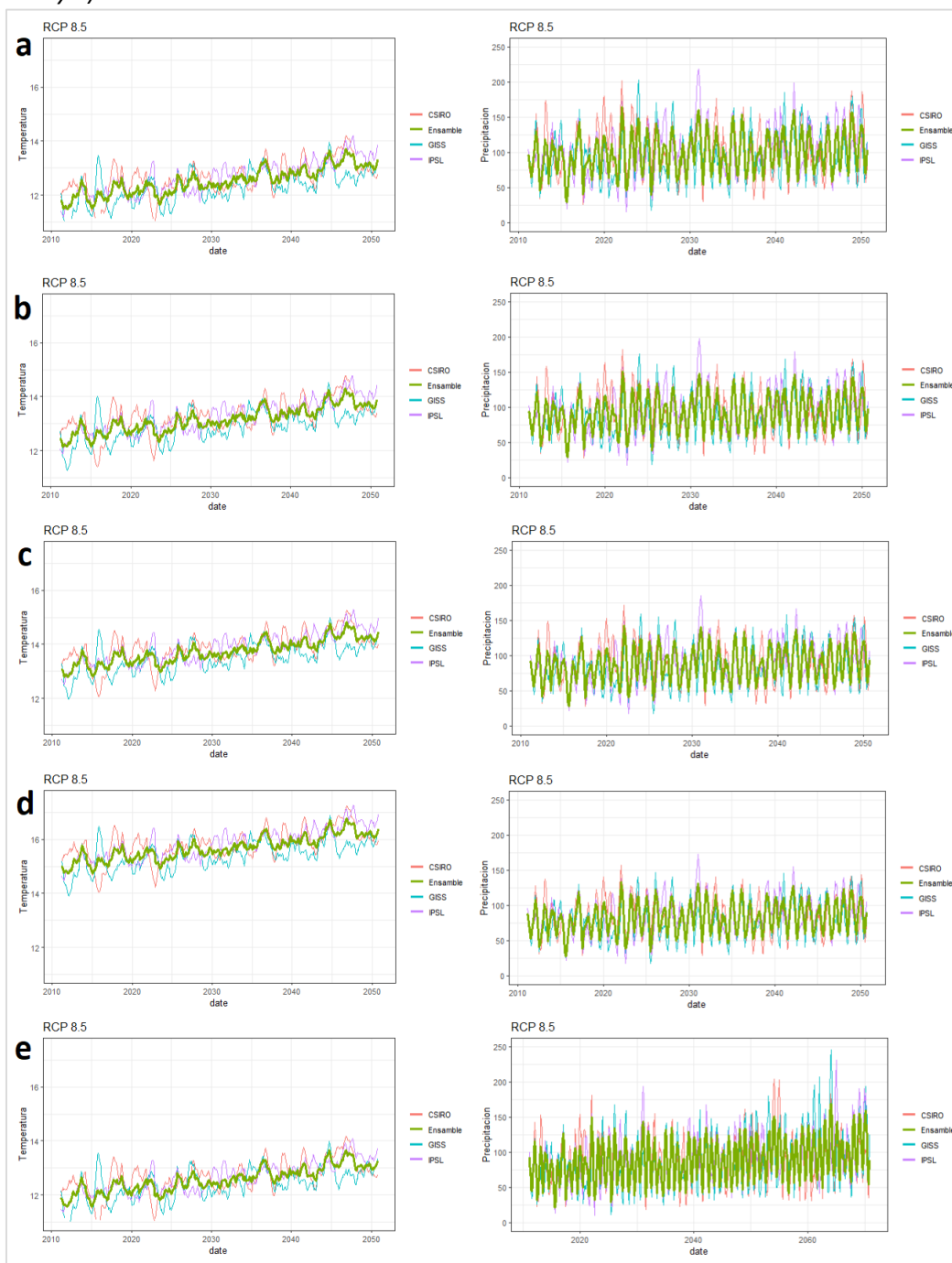
Con referencia los datos futuros de temperatura calibrados para el escenario RCP 8.5, se determinó que para la subcuenca UH1 la temperatura media fue de 12,51°C, con una temperatura máxima de 14,03°C y una mínima de 11,10°C, además se registra un incremento del 12,53% en la temperatura promedio. Mientras que, para UH2 la temperatura media se situó en 13,15°C, con una temperatura máxima de 14,63°C y una mínima de 11,80°C, con un incremento del 11,29% en la temperatura promedio. Por otra parte, para la unidad hidrográfica UH3 la temperatura media alcanzó los 13,73°C, con una temperatura máxima de 15,13°C y una mínima de 12,50°C, por consiguiente, se observa un aumento del 10,14% en la temperatura promedio en esta área. Para la UH4, se registró una temperatura media de 15,68°C, con una temperatura máxima de 17,13°C y una mínima de 14,40°C, aunque el incremento en la temperatura promedio fue del 8,84%, esta subunidad muestra temperaturas

relativamente más cálidas en relación a las otras subcuencas. Finalmente, para UH5, la temperatura media se situó en 12,56°C, con una temperatura máxima de 14,00°C y una mínima de 11,23°C, se presenta un incremento del 11,47% en la temperatura promedio. Al igual que en el escenario RCP 4.5, los datos resaltan la variabilidad en las temperaturas entre diferentes subunidades hidrográficas y revelan incrementos significativos en las temperaturas promedio en UH1, UH2 y UH5.

A continuación, se presentan los resultados de los modelos climáticos CSIRO, GISS, IPSL y el Ensamble para el escenario RCP 8.5 de los datos de temperatura y precipitación futuros calibrados (Figura 35).

Figura 35

Ensamble de datos futuros de temperatura y precipitación calibrados para escenarios climáticos RCP 8.5 con modelos climáticos CSIRO, GISS y IPSL para a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 y e) UH5



Fuente: Autor

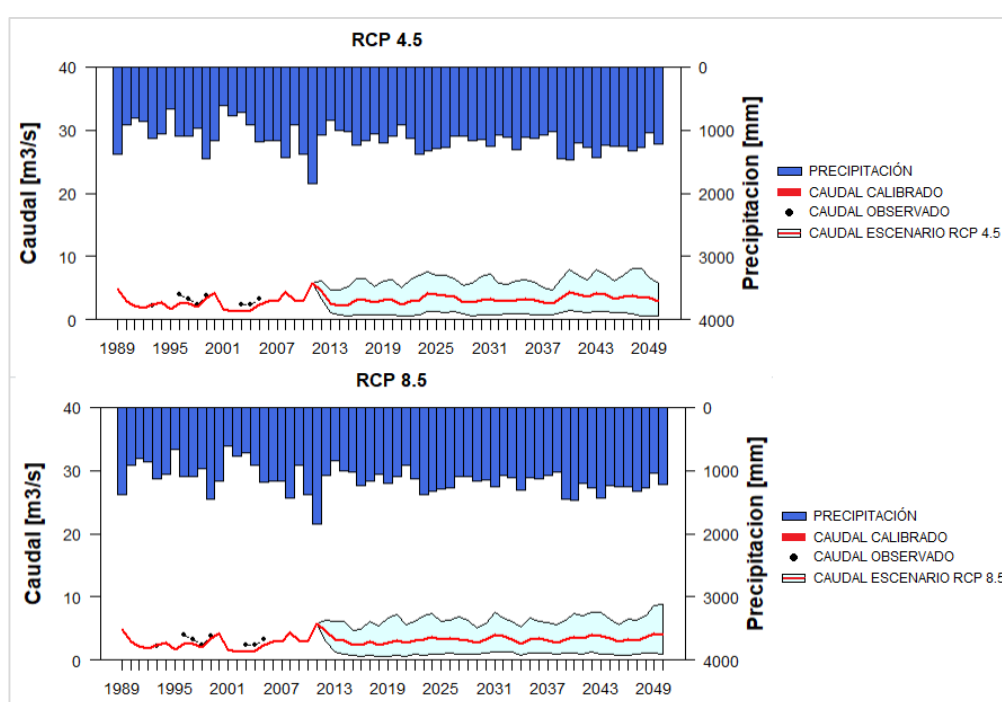
5.2.6. RESULTADOS MODELACIÓN DEL ESCENARIO HÍDRICO FUTURO 2050

Los resultados de los escenarios de cambio climáticos RCP4.5 y RCP8.5 obtenidos para la cuenca alta del río Mira al año 2050, muestran las variaciones de la precipitación y el caudal mensual a lo largo del periodo futuro para cada subcuenca hidrográfica. En las figuras que se presentan a continuación, se puede observar que en el eje Y izquierdo se encuentra representado el caudal simulado al 2050 en m^3/s , a través de una línea roja, con sus respectivos límites superiores e inferiores graficado en color celeste, el cual contienen los valores máximos y mínimos del flujo simulado. Los puntos negros corresponden a datos observados que dependiendo a la escala temporal tendrán un mayor detalle, como se pudo visualizar en las figuras de calibración de caudales. En el eje Y derecho, muestra la precipitación en mm y finalmente en el eje X el tiempo en años.

La simulación para la subcuenca UH1 para el escenario RCP 4.5 la simulación de caudales para el periodo futuro 2024 – 2050, muestra un caudal medio de 3,37 m³/s, con caudales mínimos de 1,72 m³/s y máximos de 6,06 m³/s. Por otro lado, para el escenario RCP 8.5 se espera una media similar al otro escenario con 3,38 m³/s, un caudal mínimos de 1,84 m³/s y un máximo de 5,87 m³/s (Figura 36). Para ambos escenarios se pueden observar resultados similares.

Figura 36

Escenario hídrico futuro 2050 por cambio de uso de suelo subcuenca hidrográfica UH1

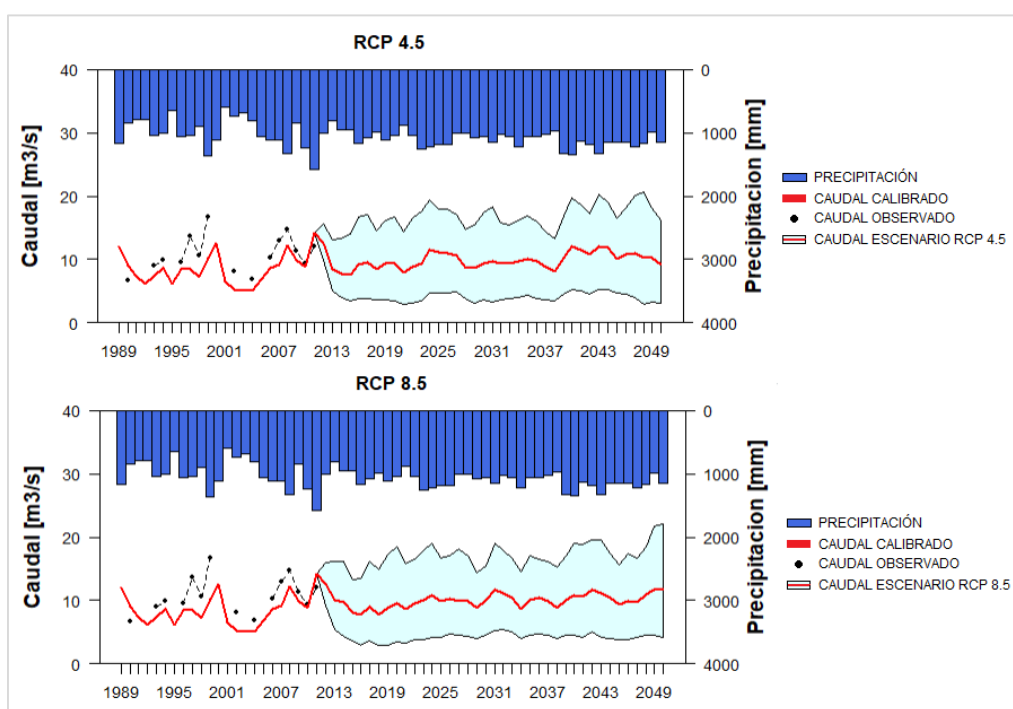


Fuente: Autor

Con respecto al escenario futuro 2024 – 2050 para la subcuenca UH2 el caudal medio esperado en el escenario RCP4.5 es de 10,18 m³/s, un caudal mínimo de 6,46 m³/s y máximo de 15,18 m³/s, por otro lado, el escenario RCP 8.5 estima un caudal medio 10,30 m³/s, mínimo de 6,79 m³/s y máximo de 15,42 m³/s, es decir, este un caudal ligeramente superior en comparación con el modelo RCP 4.5 (Figura 37).

Figura 37

Escenario hídrico futuro 2050 por cambio de uso de suelo subcuenca hidrográfica UH2

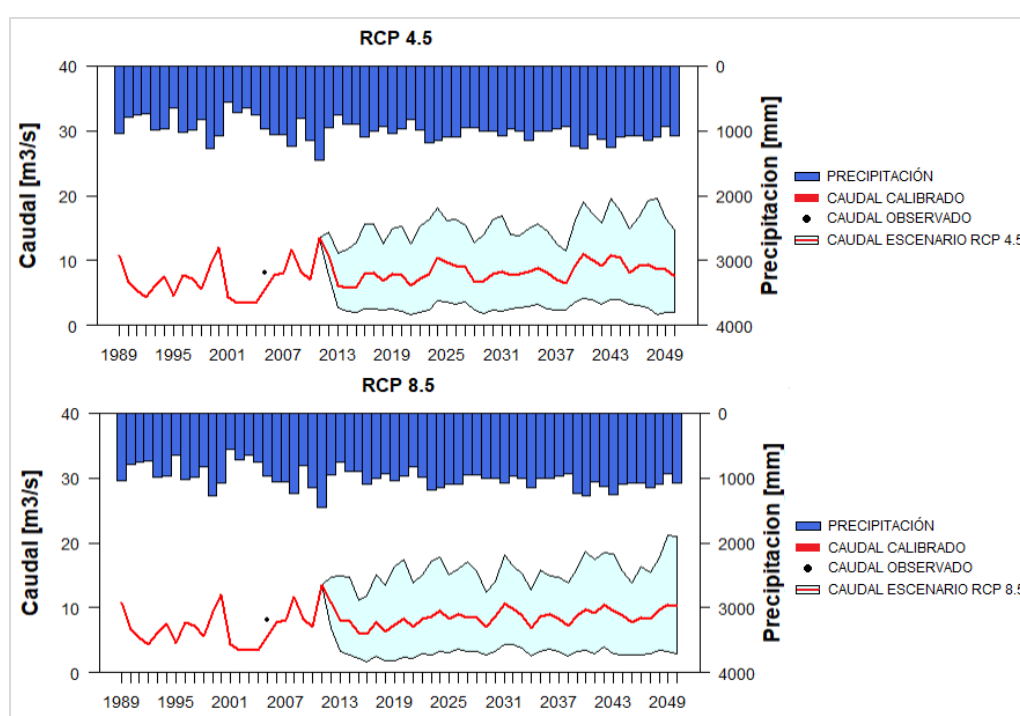


Fuente: Autor

En la relación a la subcuenca UH3 el escenario RCP 4.5 plantea un caudal medio para el periodo 2024 – 2050 de $8,67 \text{ m}^3/\text{s}$, con un caudal mínimo de $4,51 \text{ m}^3/\text{s}$ y máximo de $15,67 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que, el escenario RCP 8.5 presenta un caudal medio de $8,84 \text{ m}^3/\text{s}$, mínimo de $4,68 \text{ m}^3/\text{s}$ y máximo de $15,87 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 38). En este sentido ambos escenarios de cambio climáticos consideran impactos similares en los caudales proyectados.

Figura 38

Escenario hídrico futuro 2050 por cambio de uso de suelo subcuenca hidrográfica UH3

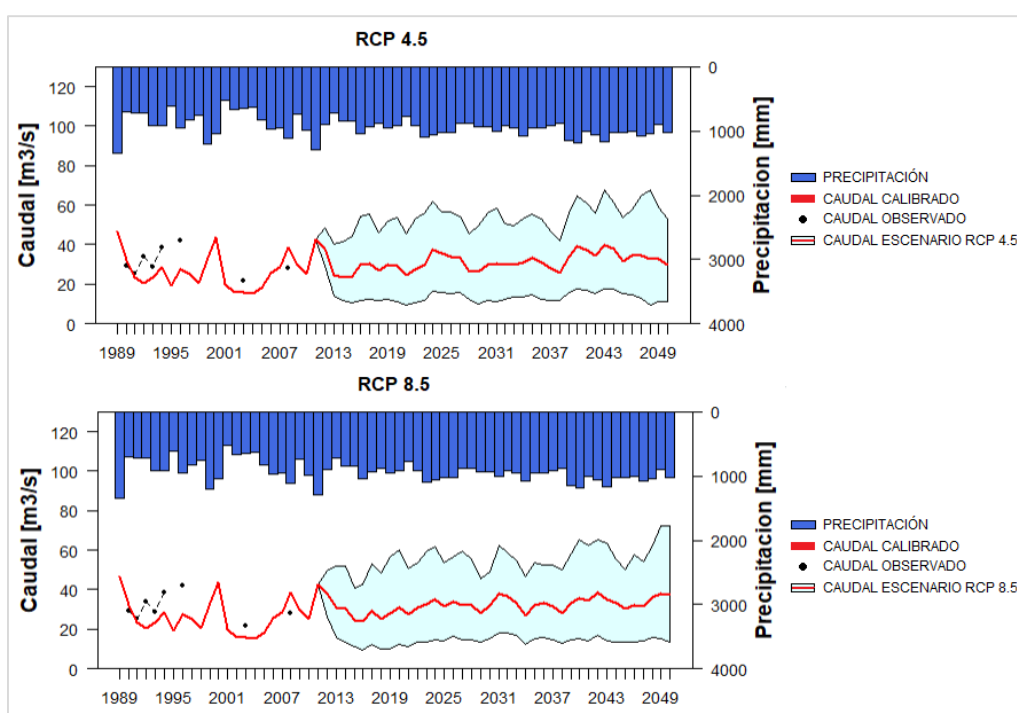


Fuente: Autor

El escenario futuro 2024 – 2050 para la subcuenca UH4, la más extensa de la zona de estudio, para el RCP 4.5 se esperarían caudales medios de 32,56 m³/s, mínimos de 19,61 m³/s y máximos de 53,26 m³/s, mientras que, para el escenario 8.5 el caudal medio simulado es de 33,31 m³/s, con un caudal mínimo de 20,35 m³/s y máximo de 58,81 m³/s (Figura 39). En este caso, el escenario RCP 8.5 pronostica caudales más elevados en comparación al escenario RCP 4.5.

Figura 39

Escenario hídrico futuro 2050 por cambio de uso de suelo subcuenca hidrográfica UH4

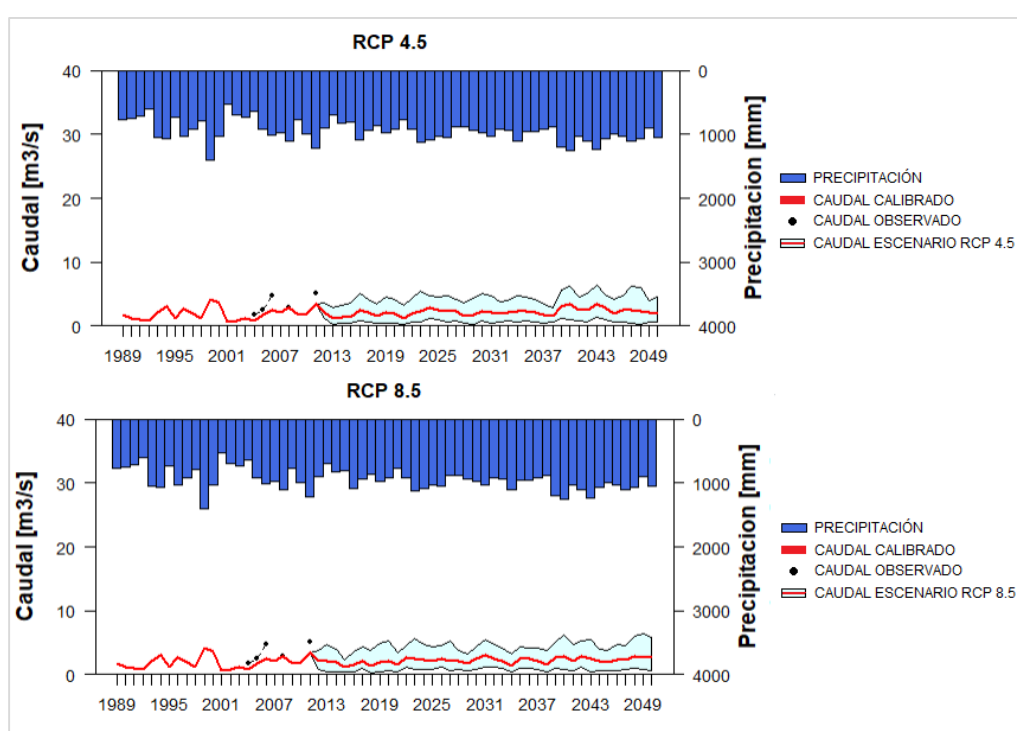


Fuente: Autor

Por otro lado, el escenario 2024 – 2050 de la cuenca UH5 presenta un valor medio de $2,26 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal mínimo de $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$ y caudal máximo de $7,93 \text{ m}^3/\text{s}$ para el escenario RCP 4.5; caso similar ocurre con el escenario RCP 8.5 donde el caudal medio se estima en $2,28 \text{ m}^3/\text{s}$, mínimo de $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ y máximo de $7,23 \text{ m}^3/\text{s}$. En general esta subcuenca presenta caudales bajos en comparación con las demás unidades hidrográficas (Figura 40).

Figura 40

Escenario hídrico futuro 2050 por cambio de uso de suelo subcuenca hidrográfica UH5



Fuente: Autor

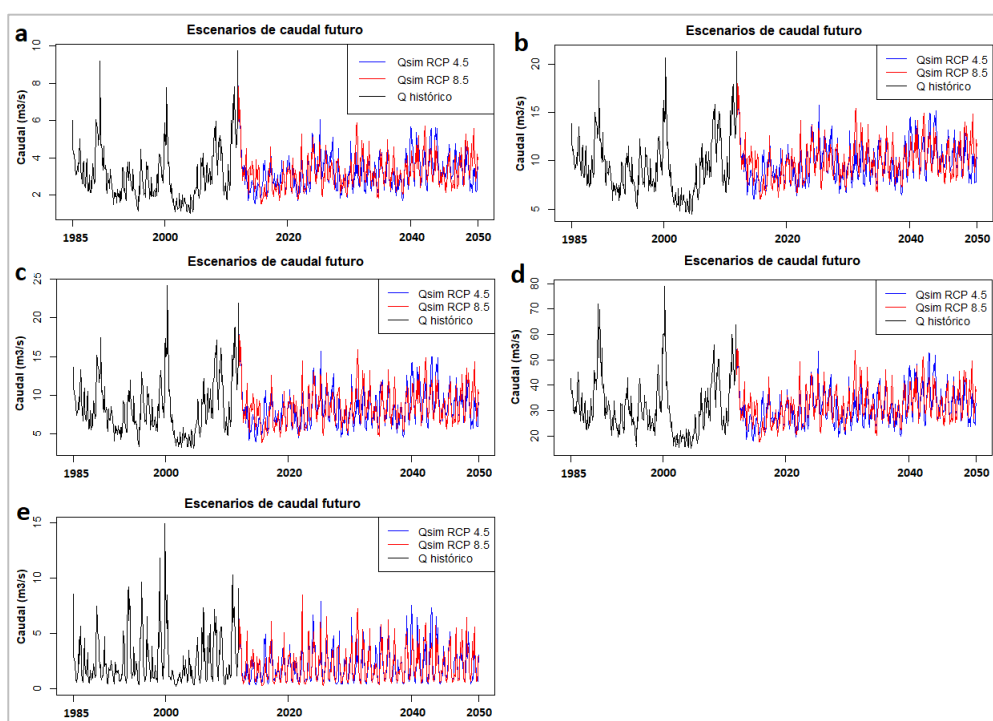
En conclusión, bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 se pudo observar resultados bastante similares en términos de caudales simulados para las subcuencas UH1, UH2 y UH3, mientras que, para la subcuenca UH4, el escenario RCP 8.5 pronostica caudales más altos, esto debido a su extensión, por último, en la subcuenca UH5 se presentaron caudales son bajos en ambos escenarios.

5.2.7. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CAUDAL CLIMÁTICO EN EL CAUDAL

Para determinar el efecto que tiene el cambio climático en el caudal de la cuenca alta del río Mira, se realizó una comparación de los caudales históricos (calibrados) con los caudales futuros simulados mediante los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 considerando únicamente el resultado del Ensemble de los modelos climáticos, para el periodo 1985 hasta 2050, es decir 66 años (Figura 41).

Figura 41

Escenario de caudal futuro en la cuenca alta del río Mira para a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 y e) UH5



Fuente: Autor

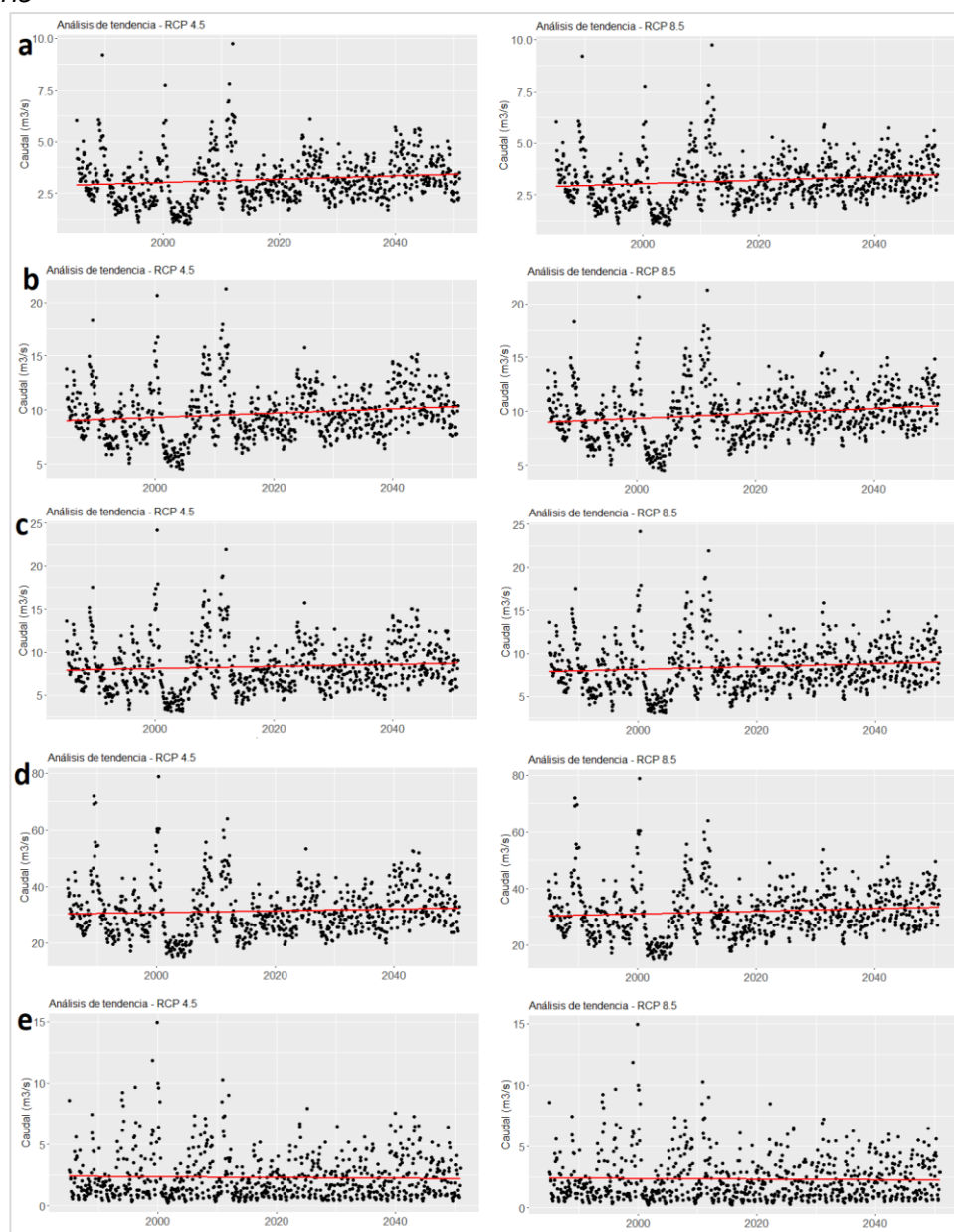
Esta información fue separada en dos periodos: i) periodo histórico que corresponde a los datos de caudal obtenidos desde 1985 hasta 2023 y ii) periodo futuro que corresponde la información del año 2024 hasta el 2050; para cada subcuenca hidrográfica.

De esta manera se pudo determinar que en la subunidad hidrográfica UH1 se estima un incremento del caudal en 12,36% para el RCP 4.5 y 11,62% RCP 8.5; de igual manera, para la subcuenca UH2 se observa un incremento de 9,76% y 10,16% para

el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5 respectivamente, caso similar pero con un menor crecimiento del caudal se encuentra la UH3 con valores del 8,09% (RCP 4.5) y 8,95% (RCP 8.5), por último UH4 con un incremento del flujo del 7,25% (RCP 4.5) y 8,46% (RCP 8.5); mientras que, la UH5 fue la única subcuenca que presenta un disminución del caudal para el escenario RCP 4.5 del 1,41% y de 2,57% para los escenarios RCP 4.5 (Figura 42), en este caso esto puede deberse a la falta de datos observados y se recomienda un análisis más profundo para la misma.

Figura 42

Análisis de tendencia en la cuenca alta del río Mira para a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 y e) UH5



Fuente: Autor

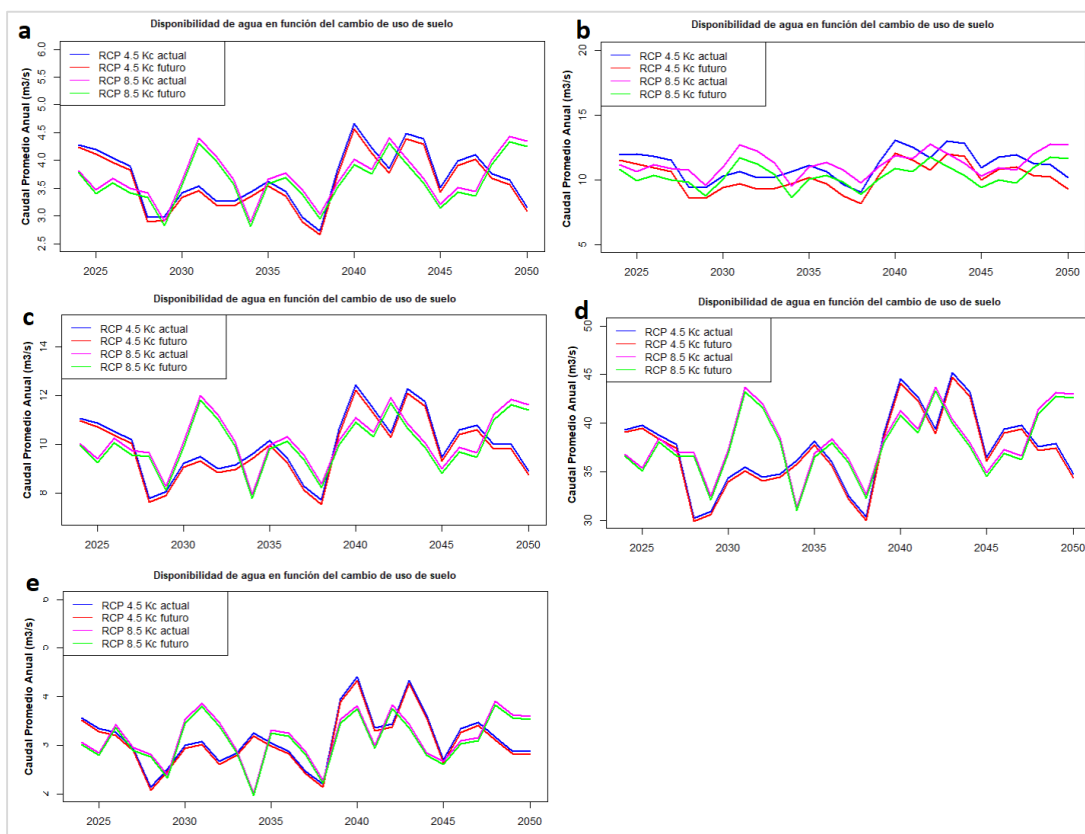
5.2.8. EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS POR CAMBIO DE USO DE SUELO

La evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico y su relación con el cambio de uso de suelo para el periodo 2024 - 2050, se realizó aplicando los coeficientes de cultivo (K_c) estimados tanto para el periodo actual, como para el periodo futuro, en este último caso con base a suposiciones futuras de cambios de uso por deforestación, incremento de la frontera agrícola, retroceso en la superficie de páramo y disminución de las áreas arbustivas y herbáceas, así como el crecimiento de las zonas urbanizadas, como bien se mencionó en el apartado correspondiente. De esta manera, relacionando los K_c con los valores de evapotranspiración potencial (ETP) se generaron nuevos escenarios hídricos que vinculan el agua con el uso de suelo tanto para el escenario climático RCP 4.5 y RCP 8.5.

En este sentido, en la Figura 43 se puede observar las variaciones encontradas para cada subunidad hidrográfica donde se presentó una disminución del caudal futuro en todas las cuencas debido a los cambios de uso de suelo, bajo ambos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Para la subcuenca UH1 la disminución del caudal para el periodo 2024 – 2050 se pronostica entre 2,16% (RCP 4.5) y 2,19% (RCP 8.5); por otro lado, para la cuenca UH2 se prevé un decrecimiento del caudal de 8,10% y 8,13% tanto para el escenario RCP 4.5 como para el RCP 8.5 respectivamente. Con respecto a la subcuenca UH3, UH4 y UH5 la disminución del caudal se estima en alrededor de 1,77%; 1,04 % y 2% para ambos escenarios.

Figura 43

Evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico en relación al cambio de uso de suelo para a) UH1 b) UH2 c) UH3 d) UH4 y e) UH5



Fuente: Autor

5.2.9. RECOMENDACIONES EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

En el marco de los escenarios hídricos futuros y en vista de los posibles cambios climáticos previstos para la cuenca alta del río Mira, que podrían ocasionar aumentos en la temperatura y la precipitación, existe la posibilidad de que la disponibilidad de agua se vea afectada debido a los cambios en el uso del suelo, por lo cual, el Estado, Gobiernos locales, las juntas de agua, las comunidades, las organizaciones no gubernamentales y todos los actores vinculados al agua, deben vincularse en la gestión integral del recurso hídrico para establecer con miras a un escenario futuro más sostenible.

La gestión del recurso hídrico necesariamente es de carácter integral y en el caso de Mira, tiene una connotación binacional, donde el agua traspasa fronteras y las actividades productivas son necesarias para el desarrollo económico de la población. En este sentido, es imperativo la generación de diferentes mecanismos normativos, incentivos económicos y acuerdos de cooperación entre Ecuador y Colombia que promuevan el fortalecimiento de la gestión del recurso hídrico, en especial la transparencia en la información y la liberación de datos hidrometeorológicos, para mejorar la red de monitoreo y contar con datos actualizados que incentiven a la investigación científica en especial en zonas de difícil acceso debido a condiciones geográficas o incluso de inseguridad como es el caso de esta cuenca.

La cuenca alta del río Mira, es agroproductiva y los datos lo uso de suelo lo han demostrado (51% de la superficie total de la superficie), es por ello, que los esfuerzos en la gestión integral del recurso hídrico deben estar encaminados a este sector, a través de programas que incentiven prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan la erosión del suelo con un uso eficiente del agua y que minimice el impacto a los cuerpos de agua por el uso agresivo de fertilizantes. Además, esta cuenca alberga una gran superficie de páramo y bosques los mismos que se han visto reducidos (5,98%), por lo tanto, la conservación de estas fuentes de agua es clave, para la

disponibilidad de agua en calidad y cantidad; evitando que la expansión de la frontera agrícola represente un riesgo para el recurso hídrico, considerando que la demanda de agua para riego es de $17 \text{ m}^3/\text{s}$, generación eléctrica y energía hidrotérmica de $8,6 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ para consumo humano, y que la tendencia de crecimiento poblacional se encuentra en aumento y por ende la demanda del recurso hídrico; por ello, la implementación de infraestructura de gestión hídrica como canales de riego y sistemas de drenaje deberán considerar las posibles condiciones futuras y de esta manera gestionar eficazmente el aumento del caudal y de las precipitaciones.

5.2.10. RECOMENDACIONES EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

El modelo GR2M a pesar de ser un modelo bien establecido muestra simulaciones deficientes en escalas de tiempo anual con valores de NSE negativos, un buen rendimiento en una escala de tiempo no garantiza un buen rendimiento en otra, por lo cual, se recomienda utilizar escalas temporales mensuales y verificar con detenimiento el ajuste a los datos observados como en este estudio (Fathi et al., 2019; Rwasoka et al., 2014)

En estudios se ha observado que el modelo GR2M puede no ser robusto cuando se aplican a una amplia gama de cuencas, además puede presentar sensibilidad a las características específicas de la cuenca como por ejemplo niveles de aridez, dando como resultado que la simulación de escorrentía en cuencas secas es significativamente peor que en cuencas húmedas, por otra parte, la relación entre la complejidad del modelo (número de parámetros) y el rendimiento, se puede mencionar que el modelo GR2M, con solo dos parámetros, logra un buen rendimiento (Bai et al., 2015), este punto puede ser discutido a través de nuevos estudios sobre las limitaciones en representación de ciertos procesos hidrológicos que mejoren la comprensión del modelo.

En estudios se ha determinado que a pesar de la calidad de las simulaciones hidrológicas según los criterios NSE, el modelo GR2M no reproducen la tendencia decreciente del caudal medio anual, lo que lleva a una sobreestimación sistemática de los volúmenes de agua recientes. La parametrización del modelo en ocasiones no se adapta adecuadamente al funcionamiento hidrológico de cuencas fluviales estudiadas, y las relaciones precipitación-escorrentía podrían haber cambiado durante el período de estudio. La aplicación directa de correcciones a condiciones climáticas futuras basadas en la calibración actual debe hacerse con precaución debido a la falta de claridad en las relaciones subyacentes. Los valores de los parámetros del modelo, calibrados para el clima actual, a menudo compensan las deficiencias en la estructura del modelo y los errores en los datos. Los modelos

conceptuales como el GR2M, aunque fáciles de implementar y que requieren pocos datos de entrada, están diseñados principalmente para reproducir la descarga de agua en condiciones estacionarias, por lo que su capacidad para reflejar tendencias en la descarga de agua debe evaluarse cuidadosamente. (Lespinas et al., 2014)

Para evaluar el rendimiento del modelo y explorar posibles mejoras, se sugiere considerar en futuras investigaciones, indicadores adicionales que fortalezcan la evaluación de la calibración y validación del modelo hidrológico, como la eficiencia de Kling-Gupta (KGE) (H. V. Gupta et al., 2009), el coeficiente de determinación (R^2) (Krause et al., 2005), el sesgo, el error cuadrático medio (RMSE) (Legates & McCabe, 1999), conjuntamente con el índice de eficiencia de NSE (Fathi et al., 2019).

En este sentido, para un análisis confiable del desempeño del modelo, es esencial contar con un extenso conjunto de datos que abarque diferentes climas y condiciones hidrológicas, se recomienda preferiblemente utilizar series con datos observados robustas con información de temperatura, precipitación, caudal y evapotranspiración. Además, se puede considerar regímenes climáticos de las cuencas, basados en el índice de aridez, para definir las regiones hiperhúmedas, húmedas, subhúmedas, semiáridas y áridas mediante rangos específicos del índice de aridez. En este sentido, para un análisis confiable del desempeño del modelo, es esencial contar con un extenso conjunto de datos que abarque diferentes climas y condiciones hidrológicas, se recomienda preferiblemente utilizar series con datos observados robustas con información de temperatura, precipitación, caudal y evapotranspiración. Además, se puede considerar regímenes climáticos de las cuencas, basados en el índice de aridez, para definir las regiones hiperhúmedas, húmedas, subhúmedas, semiáridas y áridas mediante rangos específicos del índice de aridez. Por consiguiente, para mitigar cualquier impacto asociado con los valores iniciales, se aconseja llevar a cabo una evaluación exhaustiva de los períodos de calentamiento del modelo (Fathi et al., 2019).

En esta investigación la evapotranspiración potencial fue obtenida mediante un cálculo, sin embargo, sería recomendable utilizar datos observados en campo, así

como nueva información cartográfica de los cambios en el uso de suelo; que permitan evidenciar de una mejor manera la relación con la disponibilidad de agua, de esta manera el modelo podría optimizar la simulación de datos futuros.

En investigaciones futuras, se podría validar el modelo en un número determinado de cuencas para luego aplicarlo a otras cuencas no calibradas, este enfoque puede basarse en métodos de regionalización, como la transferencia de parámetros de modelos de cuencas monitoreadas a cuencas no calibradas, considerando características físicas (área, pendiente, cobertura del suelo, etc.) y climáticas (precipitaciones, evapotranspiración potencial), de las cuencas como lo descrito por Oudin et al., (2008) quien exploró una evaluación de tres enfoques de regionalización (regresión, similitud física y proximidad espacial), para la predicción de la escorrentía en cuencas no aforadas utilizando dos modelos hidrológicos conceptuales con un modelo GR2M y GR4J (Ibrahim et al., 2015).

Finalmente, es importante reconocer que un aumento en la complejidad no garantiza un mejor rendimiento, modelos simples, como el GR2M, pueden lograr resultados comparables o incluso superiores a modelos más complejos, respaldando la idea de que la descripción detallada del proceso hidrológico no siempre aumenta la complejidad. GR2M, un modelo de dos parámetros, que se destaca por equilibrar efectivamente complejidad y precisión en la simulación de la escorrentía mensual (Bai et al., 2015).

6. CONCLUSIONES

- La obtención de los escenarios hídricos futuros para la cuenca alta del río Mira hasta el año 2050 se logró mediante la implementación exitosa del modelo hidrológico GR2M, donde se incorporaron características de un enfoque de modelo semi-distribuido como el nivel de desagregación por subcuencas, aplicando sus respectivos datos locales y las heterogeneidad en los cambios de uso de suelo para cada subcuenca, lo que permitió evaluar las diferencias hidrológicas en cada una de ellas. La elección de este modelo en lugar del modelo GR4J se fundamentó en la evidente falta de calibración adecuada de parámetros, la cual estuvo relacionada con deficiencias en los datos de caudal diario observados, motivo por el cuál no se realizó el acoplamiento de enrutamiento para realizar la modelación semi-distribuida. Esta elección fue esencial para evitar la generación de resultados poco realistas que no se ajustarían a la dinámica de la cuenca, garantizando así la precisión y relevancia de los escenarios hídricos futuros.
- La caracterización morfológica de la cuenca alta del río Mira demuestra que es una unidad hidrográfica de gran extensión, con una forma alargada o irregular, con una red de drenaje densa y bien desarrollada, los datos demuestran que corresponde a una cuenca hidrográfica montañosa, finalmente con base a los datos obtenidos de la sinuosidad del cauce principal y su coeficiente de torrencialidad moderado, se puede concluir que esta unidad hidrográfica puede experimentar eventos de inundaciones de forma ocasional, finalmente con respecto a la curva hipsométrica la cuenca se encuentra en equilibrio en términos de elevación.
- El análisis del uso de suelo de la unidad hidrográfica permitió evidenciar el aumento significativo de la zona agroproductiva, que responde a la expansión de las actividades agrícolas y agropecuarias, esto se complementa con la información relacionada a las autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua, donde el mayor número se encontraba en autorizaciones de riego; por el contrario, se encuentra la disminución de la vegetación arbustiva y herbácea o

que plantea preocupaciones importantes en términos de conservación del ecosistema y biodiversidad, mientras que, la cobertura de páramo y bosques presentaron fluctuaciones menores a los largo de 30 años, y finalmente se determinó un crecimiento significativo en la zona antrópica que responde al proceso de urbanización y crecimiento población de la cuenca.

- Los resultados del tipo de suelo de la cuenca demostraron que la textura predominante es el tipo franco, sin embargo, las áreas de suelo arcilloso y arenoso puede presentar afectaciones en la forma que se gestiona el recurso hídrico en términos de infiltración, retención de agua y calidad de suelo para las diferentes actividades socio-económicas y de protección ambiental que se desarrollan en la cuenca.
- En el caso de las variables de temperatura y precipitación de escenarios futuros, se determinó que las subunidades hidrográficas experimentan un incremento para ambos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, lo que demuestra la importancia de una planificación hídrica que considere las condiciones meteorológicas cambiantes de la cuenca alta del río Mira, que puedan afectar la gestión de los recursos hídricos y las actividades productivas que se desarrollan en la cuenca, en el marco de la adaptación al cambio climático.
- Los escenarios de caudales futuros para la cuenca alta del río Mira, considerando el RCP 4.5 y el RCP 8.5 para el período de 2024 a 2050, sugieren un posible aumento en el flujo de agua en todas las subcuencas hidrográficas, esto contrasta con la tendencia observada en el período histórico, que muestra una disminución del caudal, esta discrepancia entre las proyecciones futuras y los datos históricos resalta la importancia de considerar el impacto del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca alta del río Mira.
- La relación entre la disponibilidad del recurso hídrico y los cambios en el uso del suelo, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, revela un impacto bajo en el caudal, se pudo observar una disminución del caudal en todas las subunidades hidrográficas de la cuenca alta del río Mira debido a cambios en el uso del suelo, que consideran la expansión de la frontera agrícola, la reducción de las superficies boscosas, arbustivas y herbáceas, los cuales alteraron la evapotranspiración natural de las superficies y por lo tanto, modificaron el

comportamiento hidrológico de la cuenca, lo cual plantea desafíos significativos para asegurar la disponibilidad sostenible de agua para las futuras generaciones.

REFERENCIAS

- Aguilar, J., & Díaz, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*.
https://www.researchgate.net/publication/311558300_Serie_Cuadernos_de_Geomatica_4_Guia_practica_sobre_la_modelizacion_hidrologica_y_el_modelo_HEC-HMS_Series_Notes_on_Geomatics_4_A_practical_guide_on_hydrological_modeling_and_the_HEC-HMS_model/link/584c5a2008ae4bc8992c3f42/download
- Albrecht, T. R., & Gerlak, A. K. (2022). Beyond the basin: Water security in transboundary environments. *Water Security*, 17, 100124.
<https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100124>
- Armenta, G., Villa, J. L., & Pablo, J. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*.
<https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/14%20Proyecciones%20de%20Clima%20Futuro%20para%20Ecuador%20en%20base%20a%20IPCC-AR5.pdf>
- Bai, P., Liu, X., Liang, K., & Liu, C. (2015). Comparison of performance of twelve monthly water balance models in different climatic catchments of China. *Journal of Hydrology*, 529, 1030–1040.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.015>
- Banco Mundial. (2017). *El agua en la agricultura*.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#3>
- Botero-Acosta, A., Ficklin, D. L., Ehsani, N., & Knouft, J. H. (2022). Climate induced changes in streamflow and water temperature in basins across the Atlantic Coast of the United States: An opportunity for nature-based regional management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101202.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101202>

- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006). *Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador* (pp. 271–281). https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24
- Cabrera, J. (2009). *Modelos agregados: GR2M*. https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_6.pdf
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research (CISPDR) - Secretaría del Agua (SENAGUA). (2016). *Plan Nacional de la Gestión Integrada e Integral de los Recursos Hídricos de las Cuencas y Microcuencas Hidrográficas de Ecuador*. <http://suia.ambiente.gob.ec/files/MEMORIA%20PLAN%20NACIONAL%20DE%20L%20AGUA.pdf>
- Cousino, L. K., Becker, R. H., & Zmijewski, K. A. (2015). Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 762–775. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.017>
- Cran R Project. (2023). *R Studio Cran*. <https://cran.r-project.org/>
- Cruz, E., & Romero, J. (2018). *Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: GR2M, Temez y Lutz-Scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas*. [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/623192/CRUZ_AE.pdf?sequence=5

- Deidos, N., & Montero, M. (2019). *Metodología operativa para la obtención del coeficiente de Cultivo (Kc) desde imágenes de satélite en ecosistemas naturales y antrópicos* [Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMI - Universidad Nacional de Piura]. https://www.academia.edu/24526675/Metodolog%C3%ADa_operativa_para_la_obtenci%C3%B3n_del_coeficiente_de_Cultivo_Kc_desde_im%C3%A1genes_de_sat%C3%A9lite_en_ecosistemas_naturales_y_antr%C3%B3picos
- Ditthakit, P., Pinthong, S., Salaeh, N., Weekaew, J., Thanh Tran, T., & Bao Pham, Q. (2023). Comparative study of machine learning methods and GR2M model for monthly runoff prediction. *Ain Shams Engineering Journal*, *14*(4), 101941. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101941>
- Drenkhan, F., Huggel, C., Hoyos, N., & Scott, C. A. (2023). Hydrology, water resources availability and management in the Andes under climate change and human impacts. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *49*, 101519. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101519>
- Elkurdy, M., Binns, A. D., Bonakdari, H., Gharabaghi, B., & McBean, E. (2022). Early detection of riverine flooding events using the group method of data handling for the Bow River, Alberta, Canada. *International Journal of River Basin Management*, *20*(4), 533–544. <https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1906261>
- Ergün, E., & Demirel, M. C. (2023). On the use of distributed hydrologic model for filling large gaps at different parts of the streamflow data. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *37*, 101321. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101321>
- Fathi, M. M., Awadallah, A. G., Abdelbaki, A. M., & Haggag, M. (2019). A new Budyko framework extension using time series SARIMAX model. *Journal of Hydrology*, *570*, 827–838. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.037>
- Fathi, M. M., Awadallah, A. G., & Aldahshoory, W. (2023a). An Improved Monthly Water Balance GR2M Model with a Seasonally Variable Parameter. *Journal of Hydrology*, *617*, 129127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129127>

- Fathi, M. M., Awadallah, A. G., & Aldahshoory, W. (2023b). An Improved Monthly Water Balance GR2M Model with a Seasonally Variable Parameter. *Journal of Hydrology*, *617*, 129127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129127>
- Finck, L. F., Leite, I. R., Almeida, A. K., & de Almeida, I. K. (2024). A streamflow regionalization method using hydrological data and geoprocessing tools—a Brazilian midwest analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, *133*, 104695. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104695>
- Fooladi, M., Golmohammadi, M. H., Rahimi, I., Safavi, H. R., & Nikoo, M. R. (2023). Assessing the changeability of precipitation patterns using multiple remote sensing data and an efficient uncertainty method over different climate regions of Iran. *Expert Systems with Applications*, *221*, 119788. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119788>
- Guijarro, J. (2023). *The climatol R package*. <https://climatol.eu/>
- Guo, W., Yu, L., Huang, L., He, N., Chen, W., Hong, F., Wang, B., & Wang, H. (2023). Ecohydrological response to multi-model land use change at watershed scale. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *49*, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101517>
- Gupta, H. V., & Kling, H. (2011). On typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash-Sutcliffe Efficiency type metrics. *Water Resources Research*, *47*(10). <https://doi.org/10.1029/2011WR010962>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, *377*(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hadour, A., Mahé, G., & Meddi, M. (2020). Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *28*, 100671. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100671>
- Hrou, Y., Fovet, O., Lacombe, G., Rousseau-Gueutin, P., Sebari, K., Pichelin, P., & Thomas, Z. (2023). A framework to assess future water-resource under climate change in northern Morocco using hydro-climatic modelling and

- water-withdrawal scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 48, 101465. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101465>
- Ibrahim, B., Wisser, D., Barry, B., Fowe, T., & Aduna, A. (2015). Hydrological predictions for small ungauged watersheds in the Sudanian zone of the Volta basin in West Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 386–397. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.007>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2023). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - Población y Demografía*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- IPCC. (2023). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>
- Kapoor, A., Pathiraja, S., Marshall, L., & Chandra, R. (2023). DeepGR4J: A deep learning hybridization approach for conceptual rainfall-runoff modelling. *Environmental Modelling & Software*, 169, 105831. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105831>
- Kay, A. L., Davies, H. N., Lane, R. A., Rudd, A. C., & Bell, V. A. (2021). Grid-based simulation of river flows in Northern Ireland: Model performance and future flow changes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100967. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100967>
- Khorrarn, S. (2020). Bedload Sediment Rate Prediction for the Sand Transport Along Coastal Waters in Ocean Management Strategy. *China Ocean Engineering*, 34(6), 840–852. <https://doi.org/10.1007/s13344-020-0076-7>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Lespinas, F., Ludwig, W., & Heussner, S. (2014). Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology*, 511, 403–422. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.033>

- Mahdaoui, K., Chafiq, T., Asmlal, L., & Tahiri, M. (2024). Assessing hydrological response to future climate change in the Bouregreg watershed, Morocco. *Scientific African*, 23, e02046. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e02046>
- Mandeville, A. N., O'Connell, P. E., Sutcliffe, J. V., & Nash, J. E. (1970). River flow forecasting through conceptual models part III - The Ray catchment at Grendon Underwood. *Journal of Hydrology*, 11(2), 109–128. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90098-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90098-3)
- Mbaye, M. L., Sy, K., Faty, B., & Sall, S. M. (2020). Impact of 1.5 and 2.0 °C global warming on the hydrology of the Faleme river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100719. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100719>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2019). *Geoportal del Agro Ecuatoriano*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2020). *Geoportal de Agro Ecuatoriano*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021). *Catálogo de Objetos Geográficos y Productos Cartográficos Agropecuarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería, Volumen V*. https://fliphtml5.com/wtae/pdqd/Volumen_V_-_Catalogo_de_Objetos_Tematicos_del_MAG/
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2023a). *Atlas Geográfico y Estadístico Ambiental y de los Recursos Hídricos*. (Primera Edición). <https://nextcloud.ambiente.gob.ec/index.php/s/8iRcp4XszLPScNL?dir=undefined&openfile=4199409>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2023b). *Mapa Interactivo Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador*. <http://ide.ambiente.gob.ec:8080/mapainteractivo/>
- Ministerio del Ambiente de Perú. (2016). *Oferta Hídrica Superficial del Río Coata-Puno Bajo Escenarios de Cambio Climático*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-36.pdf>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

- Muñoz, R., Huggel, C., Drenkhan, F., Vis, M., & Viviroli, D. (2021). Comparing model complexity for glacio-hydrological simulation in the data-scarce Peruvian Andes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100932. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100932>
- Naciones Unidas Ecuador. (2023, marzo 24). *Día del Agua: garantizar la disponibilidad de agua y el saneamiento en la región andina*. Naciones Unidas Ecuador. <https://ecuador.un.org/es/224762-d%C3%ADa-del-agua-garantizar-la-disponibilidad-de-agua-y-el-saneamiento-en-la-regi%C3%B3n-andina#:~:text=En%20el%20caso%20del%20Ecuador,a%20agua%20segura%20y%20saneamiento>.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Núñez Mejía, S. X., Mendoza Paz, S., Tabari, H., & Willems, P. (2023). Climate change impacts on hydrometeorological and river hydrological extremes in Quito, Ecuador. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 49, 101522. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101522>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3). <https://doi.org/10.1029/2007WR006240>
- PNUD. (2021). Proyecto manejo integrado de los recursos hídricos de las cuencas binacionales Mira, Mataje y Carchi-Guáitarra, Colombia - Ecuador. En *Proyecto manejo integrado de los recursos hídricos de las cuencas binacionales Mira, Mataje y Carchi-Guáitarra, Colombia - Ecuador*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.ec.undp.org/content/ecuador/es/home/presscenter/articles/>

2021/lanzamiento-proyecto-de-manejo-de-cuencas-hidrograficas-binacion.html

- Posada-Arrubla, D. A., & García-Hernández, J. L. (2018). *Caracterización morfológica de cuencas hidrográficas en Colombia*. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. <https://revistas.udca.edu.co/index.php/udcaact/article/view/1085>
- Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Ross, E. R., & Randhir, T. O. (2022). Effects of climate and land use changes on water quantity and quality of coastal watersheds of Narragansett Bay. *Science of The Total Environment*, 807, 151082. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151082>
- R-project. (2023). *R-project Getting Help with R*. <https://search.r-project.org/>
- Rwasoka, D. T., Madamombe, C. E., Gumindoga, W., & Kabobah, A. T. (2014). Calibration, validation, parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2 – parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67–69, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.015>
- Salehpour Jam, A., & Mosaffaie, J. (2023). Introducing the concept of a ladder of watershed management: A stimulus to promote watershed management approaches. *Environmental Science & Policy*, 147, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.07.001>
- Secretaría de Gestión de Riegos. (2023). *Plan de Acción ante el Fenómeno “El Niño” en Ecuador*. https://alertasecuador.gob.ec/docs/PLAN-DE-ACCION_FENOMENO_EL-NIN%CC%83O_v-2023-09-13.pdf
- Secretaría del Agua. (2017). *Legalización, difusión e implementación de la división hidrográfica del Ecuador, para los niveles 5 y 6 a nivel nacional y nivel 7 para la vertiente del Amazonas a la escala 1:50.000, con el método Pfafstetter*.

- SENAMHI. (2019). *Modelamiento hidrológico mensual distribuido para el monitoreo de sequías hidrológicas en la vertiente hidrográfica del Atlántico*.
<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-85.pdf>
- The Nature Conservancy. (2023). *El último informe del IPCC: ¿Qué es y por qué es importante?* <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestra-vision/perspectivas/ultimo-informe-ipcc/#:~:text=El%20IPCC%20es%20el%20grupo,informe%20de%20evaluaci%C3%B3n%20del%20IPCC>.
- UNEP. (2022). *Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022*.
<https://www.unep.org/es/resources/informe/sexto-informe-de-evaluacion-del-ipcc-cambio-climatico-2022>
- UNESCO. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015. Agua para un Mundo Sostenible*.
https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272_spa?posInSet=36&queryId=9f098610-49a7-4a46-8760-d9572217f45f
- UNESCO. (2019). *Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos: Implementación de políticas públicas en América Latina y el Caribe*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000370289.locale=es>
- United States Department of Agriculture. (2022). *Soil Properties and Qualities*.
www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/texture-by-feel.pdf
- USAID. (2022). *Guía de modelación hidrológica Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica para la infraestructura natural*. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/01/Guia-de-Modelacion-Hidrologica-para-la-IN-2.pdf>
- Van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. R <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=7425296>
- Walker, D., Forsythe, N., Parkin, G., & Gowing, J. (2016). Filling the observational void: Scientific value and quantitative validation of hydrometeorological data from a community-based monitoring programme. *Journal of Hydrology*, 538, 713–725. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.062>

- Wijayarathne, D. B., & Coulibaly, P. (2020). Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100646>
- WWF Colombia. (2017). *Atlas socioambiental de las Cuencas Transfronterizas Mira y Mataje*. http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/atlas_socioambiental_de_las_cuencas_mira_y_mataje_aportes_para_su_ordenamiento_y_gestion.pdf
- Zhou, J., Wang, Y., Su, B., Wang, A., Tao, H., Zhai, J., Kundzewicz, Z. W., & Jiang, T. (2020). Choice of potential evapotranspiration formulas influences drought assessment: A case study in China. *Atmospheric Research*, 242, 104979. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104979>
- Zucarelli, G. (2017). *Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados* [Universidade da Coruña]. <https://core.ac.uk/reader/95054330>

ANEXOS

Anexo 1

Script de homogenización de precipitación y temperatura diaria

```
##### HOMOGENIZACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

#### LIBRERIAS
install.packages(c("tidyverse","raster","rgdal","sf","openxlsx","climatol","leaflet","nanair","ggmap","hydroTSM"))

install.packages("ggmap")
library(openxlsx)
library(climatol)
library(leaflet)
library(rgdal)
library(naniar)
library(ggplot2)
library(ggmap)

source("scripts/functions_homogen.R")

#### UBICACIÓN DE ESTACIONES
### Lectura de lista de estaciones
meteo_station_list<-readRDS("data/meteo_station_list.rds")
hydro_station_list<-readRDS("data/hydro_station_list.rds")

watershed<- readOGR("data/spatial_data/MiraGEO_c1.shp")
plot(watershed)

### Plot mapa
plot_loc <- leaflet(watershed)
plot_loc <- addTiles(plot_loc)
plot_loc <- addPolygons(plot_loc,fillOpacity = 0.2, fillColor =
"red",color="red")
plot_loc <- addCircleMarkers(plot_loc, lng=meteo_station_list$longitud,
radius=5, color="black", opacity=1, weight = 1,
lat=meteo_station_list$latitud, fillColor =
"blue", fillOpacity = 0.5,
label=meteo_station_list$codigo)
plot_loc <- addCircleMarkers(plot_loc, lng=hydro_station_list$longitud,
radius=5, color="black", opacity=1, weight = 1,
lat=hydro_station_list$latitud, fillColor =
"green", fillOpacity = 0.5,
label=hydro_station_list$codigo)

plot_loc

### Plot mapa diferenciando estaciones completas
id<-meteo_station_list$tipo %in% c("PV","CO")
plot_loc <- leaflet(watershed)
plot_loc <- addTiles(plot_loc)
plot_loc <- addPolygons(plot_loc,fillOpacity = 0.2, fillColor =
"red",color="red")
plot_loc <- addCircleMarkers(plot_loc, lng=meteo_station_list$longitud[id],
radius=5, color="black", opacity=1, weight = 1,
lat=meteo_station_list$latitud[id], fillColor =
"blue", fillOpacity = 0.5,
label=meteo_station_list$codigo[id], labelOptions
= labelOptions(noHide=F))
plot_loc <- addCircleMarkers(plot_loc, lng=meteo_station_list$longitud[!id],
radius=5, color="black", opacity=1, weight = 1,
```

```

lat=meteo_station_list$latitud[!id], fillColor =
"orange", fillOpacity = 0.5,
label=meteo_station_list$codigo[!id], labelOptions
= labelOptions(noHide=F))
plot_loc <- addCircleMarkers(plot_loc, lng=hydro_station_list$longitud,
radius=5, color="black", opacity=1, weight = 1,
lat=hydro_station_list$latitud, fillColor =
"green", fillOpacity = 0.5,
label=hydro_station_list$codigo)

plot_loc

#### ESTACIONES SELECCIONADAS
wb <- loadWorkbook(file = "data/homogen_data/rainfall_tables_c1.xlsx")
rain_station_info<-read.xlsx(wb, sheet=1, detectDates = TRUE)
plot_map <- ggplot() + geom_polygon(data=watershed,aes(x = long, y = lat),
color="red",fill=NA)
plot_map
plot_map + geom_point(data=rain_station_info,aes(X,Y, col=TIPO)) +
geom_text(data=rain_station_info,aes(X,Y,label=NAME),nudge_y = 0.01,
size=2)
sbbbox <- make_bbox(lon = rain_station_info$X, lat = rain_station_info$Y)
map <- get_map(location = sbbbox, maptype = "satellite", source = "google")
ggmap(map) + geom_polygon(data=watershed,aes(x = long, y = lat),
color="red",fill=NA) + geom_point(data=rain_station_info,aes(X,Y, col=TIPO)) +
geom_text(data=rain_station_info,aes(X,Y,label=NAME),nudge_y = 0.01,
size=2)

#### REVISIÓN DE DATOS
### ESTACIONES CLIMÁTICAS

## M0102 EL ANGEL
wb <- loadWorkbook(file = "data/homogen_data/climate_tables_c1.xlsx")
clim_station<-read.xlsx(wb, sheet="M0102", detectDates = TRUE)
summary(clim_station) # resumen de los datos
vis_miss(clim_station) # ver datos faltantes
clim_station$year<-format(clim_station$date,format="%Y")
gg_miss_fct(clim_station,year)

plot(clim_station$date,clim_station$P, type="l"
plot(clim_station$date,clim_station$Tmed, type="l", ylim=c(0,20)) # plot de la
variación de la precipitación
lines(clim_station$date,clim_station$Tmax, lty=2) # líneas de temp. máxima
lines(clim_station$date,clim_station$Tmin, lty=2) # líneas de temp. mínima

### ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS
wb <- loadWorkbook(file = "data/homogen_data/rainfall_tables_c1.xlsx")
rain_station<-read.xlsx(wb, sheet=2, detectDates = TRUE)

summary(rain_station)
vis_miss(rain_station)
rain_station$year<-format(rain_station$date,format="%Y")
gg_miss_fct(rain_station,year) # ver datos faltantes por año

## Visualización
months<-format(rain_station$date,format="%B")
months<-factor(months,level=months[1:12])

est_name<- "M0102"
# mensual
boxplot(rain_station[,est_name]~months)

# anual
rain_station_anual<-apply_year(rain_station,sum)
plot(rain_station_anual$date,rain_station_anual[,est_name],type="l")

```

```

abline(lm(rain_station_anual[,est_name]~rain_station_anual$date),col="red")

plot_several(rain_station_anual[,1:5])
#plot_several(rain_station_anual[,c(1,11:17)])

#### HOMOGENIZAR PRECIPITACION
parent_dir<-getwd()
setwd("data/homogen_data/")

### TODAS LAS ESTACIONES
## Leer los datos
wb <- loadWorkbook(file = "rainfall_tables_c1.xlsx")
clim_info<-read.xlsx(wb, sheet="Coordenadas", detectDates = TRUE)
clim_info
clim_data<-read.xlsx(wb, sheet="precipitacion_mensual", detectDates = TRUE)
head(clim_data)

## Crear archivos para usar en CLIMATOL
create_data_homogen(clim_info,clim_data,"Prec")

## Homogenizar
homogen("Prec",1980,2011, expl=TRUE, swa = 12)

### REDUCCIÓN DE ESTACIONES
## Leer los datos
id_st<-c(-2,-3,-4,-5)

## Crear archivos para usar en CLIMATOL
create_data_homogen(clim_info[id_st,],clim_data,"Prec")

## Homogenizar
homogen("Prec",1980,2011, std=2, expl=TRUE,swa = 12) # exploratorio
homogen("Prec",1980,2011, std=2, dz.max=6, snht1=20, snht2=25,swa = 48) # real
load("Prec_1980-2011.rda") # se cargan los resultados
est.c
dah[,1]

#Estación 1
plot(as.vector(dah[,1]), type="l",col="red")
lines(as.vector(dat[,1]))

#Estación 10
plot(as.vector(dah[,10]), type="l",col="red")
lines(as.vector(dah[,14]), type="l",col="green")
lines(as.vector(dat[,10]))
summary(as.vector(dah[,10]))
summary(as.vector(dah[,14]))

#Continuar con todas las estaciones
dah_rain<-dah
dah_rain[,11]<-dah[,16]
dah_rain<-dah_rain[,1:13] # solo se dejan las 13 estaciones
rain_corrected<-matrix(as.vector(dah_rain),ncol=13)
colnames(rain_corrected) <- clim_info$CODE[id_st]
rain_corrected<-cbind(data.frame(date=clim_data$date),rain_corrected) #crear
tabla con fecha

#Realizar el mismo proceso con los datos de temperatura

```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 2

Script de regionalización de precipitación y temperatura diaria

```
##### PRECIPITACION MEDIA
#### LIBRERIAS
library(openxlsx)
library(sf)
library(hydroTSM)
library(sp)
library(rgdal)
library(gstat)
library(raster)

source("scripts/prec_media_functions.R")

##### UNIDAD HIDROGRAFICA MIRA 1 #####
#### PRECIPITACION MEDIA
### LECTURA DE DATOS
## estaciones
wb <- loadWorkbook(file = "data/rain_corrected_daily.xlsx")
station_info <- read.xlsx(wb, sheet="Coordenadas", detectDates = TRUE)
station_data <- read.xlsx(wb, sheet="datos", detectDates = TRUE)

# cuenca
watershed<- st_read("data/spatial_data/UH_Mira_uh1.shp")
pj<-crs(watershed)

## crear puntos espaciales para estaciones
station_info <- station_info[order(station_info$CODE),]
sta_points<-st_as_sf(data.frame(x=station_info$X,y=station_info$Y),coords =
1:2,crs=4326) #4326 coordenadas geograficas
sta_points<-st_transform(sta_points, pj)

# Se cambian las coordenadas de la tabla a UTM
station_info$X<-unlist(lapply(sta_points$geometry, function(x) x[1]))
station_info$Y<-unlist(lapply(sta_points$geometry, function(x) x[2]))

## crear precipitacion anual media
year_station_data <- monthly2annual(station_data,sum)
year_prom <- apply(year_station_data,2,mean)

# crear precipitacion mensual media
month_prom <- get_month_variation(station_data,mean)

### POLIGONOS THIESEN
## poligonos
voronoi_grid <- st_voronoi(st_union(sta_points))

plot(voronoi_grid, col = NA)
plot(watershed,add=TRUE,col=NA)
plot(sta_points,pch=16,add=TRUE)

## poligonos en cuenca
voronoi_watershed <- get_voronoi_watershed(pts = sta_points, poly =
watershed, ID = station_info$CODE)

plot(voronoi_watershed$vor_wat,col=gray(1-voronoi_watershed$we))
text(st_coordinates(st_centroid(voronoi_watershed$vor_wat)),voronoi_watershed
$ID,cex=0.8)

## Year
get_Pmed_Thiessen(voronoi_watershed$ID,voronoi_watershed$we,year_prom)

# Daily
```

```

get_Pmed_Thiessen(voronoi_watershed$ID, voronoi_watershed$we, as.data.frame(mon
th_prom))

## Pmedia
Pmed_Th<-
get_Pmed_Thiessen(voronoi_watershed$ID, voronoi_watershed$we, station_data)

### RESUMEN
res_data<-data.frame(PT=Pmed_Th)
res_data<-cbind(data.frame(date=station_data$date), res_data)
rownames(res_data)<-station_data$date
summary(res_data)

wb <- createWorkbook()
addWorksheet(wb, sheetName = "datos")
writeData(wb, "datos", res_data)
saveWorkbook(wb, "outputs/Pmed_uh1_diario_TH.xlsx", overwrite = TRUE)
#Se repite el script para el resto de subunidades hidrográficas

```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 3

Script de tratamiento de datos de caudal diario

```

##### CAUDALES
#### LIBRERIAS
library(openxlsx)
library(baytrends)
library(hydroTSM)
library(zoo)

##### UNIDAD HIDROGRAFICA 1 ESTACIÓN H0045 #####

#### LIBRERIAS
library(openxlsx)
library(baytrends)
library(hydroTSM)
library(zoo)

#### CAUDALES
### LECTURA DE DATOS MENSUALES
## Estación
wb <- loadWorkbook(file = "data/Caudales_H0045.xlsx")
discharge_data <- read.xlsx(wb, sheet = "datos", detectDates = TRUE)
discharge <- read.zoo(discharge_data, index.column = 1)

## Estadística
summary(discharge)

id_na <- which(is.na(discharge))
plot(index(discharge[id_na]), rep(1, length(id_na)), pch = 3)

## Traspasar caudales
A_Mira <- 340.98 #km2
A_est <- 315 #km2 superficie de drenaje según INAMHI

QH0045 <- discharge_data$Q
QMira <- QH0045 * A_Mira / A_est

discharge_data$QMira <- QMira
discharge <- read.zoo(discharge_data, index.column = 1)
summary(discharge)

```



```

fdcQ <- fdc(discharge$Q, lQ.thr = 0.2, hQ.thr = 0.9)
fdcQIntag <- fdc(discharge$QMira, lQ.thr = 0.2, hQ.thr = 0.9)

m_discharge_data <- data.frame(date = index(discharge_data))
m_discharge_data <- cbind(m_discharge_data, discharge_data)

wb <- createWorkbook()
addWorksheet(wb, sheetName = "mensual")
writeData(wb, "mensual", m_discharge_data)
saveWorkbook(wb, "outputs/caudal_tratado_mensual_h0045.xlsx", overwrite = TRUE)

#Se repite el script para el resto de subunidades hidrográficas

```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 4

Script de estimación de evapotranspiración diaria

```

##### MODELACION HIDROLÓGICA MIRA DIARIOS

#### LIBRERIAS
library(openxlsx)
library(lubridate)
library(airGR)
source("scripts/model_functions.R")

##### UNIDAD HIDROGRAFICA 1 ESTACIÓN H0045 #####

### LECTURA DE DATOS
wb <- loadWorkbook(file = "data/datos_mira_uh1.xlsx")
model_data <- read.xlsx(wb, sheet="datos", detectDates = TRUE)
model_data$date<-change_date_format(model_data$date)
model_data$numdays<-days_in_month(model_data$date)

Awat <- 340.98 #km2

head(model_data)
summary(model_data)

plot_hydrogram(model_data$date,Px = model_data$P, Qx = model_data$Q,Q_units =
"m3/s")

### ETP
model_data$ETP<-month_PE_Oudin(model_data$date,
                               Temp=model_data$Tmed,
                               Lat=0.631, # latitud del centroide de la cuenca
                               LatUnit="deg")

# Guardar ETP serie completa
wb <- createWorkbook()
addWorksheet(wb,sheetName ="mensual")
writeData(wb, "mensual",model_data)
saveWorkbook(wb, "outputs/ETP/ETP_uh1_mensual.xlsx", overwrite = TRUE)

#Se repite el script para el resto de subunidades hidrográficas

```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 5

Script de calibración y validación de caudales mensuales GR2M

```
##### MODELACION HIDROLÓGICA GR2M MENSUALES

#### LIBRERIAS
library(openxlsx)
library(lubridate)
library(airGR)

source("scripts/model_functions.R")

##### UNIDAD HIDROGRAFICA 1 #####

### LECTURA DE DATOS
wb <- loadWorkbook(file = "data/datos_hm_mensual_mira.xlsx")
model_data <- read.xlsx(wb, sheet="datos_uh1", detectDates = TRUE)
model_data$date<-change_date_format(model_data$date)
model_data$numdays<-days_in_month(model_data$date)
model_data$Q<-as.numeric(model_data$Q)

Awat <- 340.98 #km2

plot_hydrogram(model_data$date,Px = model_data$P, Qx = model_data$Q,Q_units =
"m3/s")

#### MODELO GR2M
### CORRIDA

### CALIBRACIÓN
# Caudal a mm
Qobs<-model_data$Q*model_data$numdays*86400/(Awat*1e6)*1000

## Entradas del modelo
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M, DatesR =
model_data$date,
                                Precip = model_data$P, PotEvap =
model_data$ETP)
## Periodos de corrida
# Run period
Run_period <- get_dates_id(model_data$date,"1985-01-01","2011-12-01")

# prep period
Prep_period <- get_dates_id(model_data$date,"1985-01-01","1988-12-01")

# calibration period
Calib_period <- get_dates_id(model_data$date,"1989-01-01","2011-12-01")

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                              InputsModel = InputsModel,
                              IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                              #IniResLevels = c(0.5,0.5,NA,NA),
                              IndPeriod_Run = Calib_period)

## Calibración
# opciones de calibración
CalibOptions <- CreateCalibOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                                   FUN_CALIB = Calibration_Michel)
```

```

# criterio de calibración
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE,
                              InputsModel = InputsModel,
                              RunOptions = RunOptions, transfo="sqrt",
                              Obs = Qobs[Calib_period])

# calibración
OutputsCalib <- Calibration(InputsModel = InputsModel,
                            RunOptions = RunOptions,
                            CalibOptions = CalibOptions,
                            InputsCrit = InputsCrit,
                            FUN_MOD = RunModel_GR2M
)

param<-OutputsCalib$ParamFinalR

## Corrida del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               #IniResLevels = c(0.5,0.5,NA,NA),
                               IndPeriod_Run = Calib_period)

OutputsModel <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions,
                          Param = param, FUN = RunModel_GR2M)

#plot(OutputsModel,Qobs=Qobs[Calib_period])

Qsim<-
OutputsModel$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*model_data$numdays[Calib_period])
plot_hydrogram(model_data$date[Calib_period],Px = model_data$P[Calib_period], Qx =
model_data$Q[Calib_period], Qy=Qsim,Q_units = "m3/s")

get_performance_statistics(model_data$Q[Calib_period],Qsim)
get_performance_statistics(sqrt(model_data$Q[Calib_period]),sqrt(Qsim))

### CORRIDA
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                              InputsModel = InputsModel,
                              IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                              #IniResLevels = c(0.5,0.5,NA,NA),
                              IndPeriod_Run = Run_period)

OutputsModel <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions,
                          Param = param, FUN = RunModel_GR2M)

Qsim<-OutputsModel$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*model_data$numdays[Run_period])
# transformación a m3/s
plot_hydrogram(model_data$date[Run_period],Px = model_data$P[Run_period], Qx =
model_data$Q[Run_period], Qy=Qsim,Q_units = "m3/s",
               ylimP = c(0,1000),
               ylimQ = c(0,35),)

#Se repite el script para el resto de subunidades hidrográficas

```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 6

Script de calibración y validación de caudales diarios GR4J

```
##### MODELACION HIDROLÓGICA MIRA GR4J DIARIOS

#### LIBRERIAS
library(openxlsx)
library(lubridate)
library(airGR)

##### UNIDAD HIDROGRAFICA #####
source("scripts/model_functions.R")

### LECTURA DE DATOS
wb <- loadWorkbook(file = "data/datos_mira_uh1.xlsx")
model_data <- read.xlsx(wb, sheet="datos", detectDates = TRUE)
model_data$date<-change_date_format(model_data$date)

Awat <- 340.98 #km2

head(model_data)
summary(model_data)

plot_hydrogram(model_data$date,Px = model_data$P, Qx = model_data$Q,Q_units =
"l/s")

#### EVAPOTRANSPIRACION
model_data$days = yday(model_data$date)
model_data$ETP<-PE_Oudin(model_data$days,
                          Temp=model_data$Tmed,
                          Lat=0.631,
                          LatUnit = "deg")

#### MODELO GR4J
### CORRIDA
## Entradas del modelo
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR4J, DatesR =
model_data$date,
                                  Precip = model_data$P, PotEvap =
model_data$ETP)
## Periodos de corrida
# Run period
Run_period <- get_dates_id(model_data$date,"1985-01-01","2011-12-31")

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_Run = Run_period)

## Parámetros
X1 <- 350 #mm
X2 <- 0 #mm
X3 <- 90 #mm
X4 <- 1.7 #days

param<-c(X1,X2,X3,X4)

## Corrida del modelo
OutputsModel <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions = RunOptions,
                          Param = param, FUN = RunModel_GR4J)

plot(OutputsModel)
```

```

Qsim<-OutputsModel$Qsim/1000*(Awat*1e6)/86400*1000

plot_hydrogram(model_data$date[Run_period],Px = model_data$P[Run_period], Qx =
model_data$Q[Run_period], Qy=Qsim,Q_units = "lts/s")

get_performance_statistics(model_data$Q[Run_period],Qsim)

### CALIBRACIÓN
# Caudal a mm
Qobs<-model_data$Q/1000*86400/(Awat*1e6)*1000 # paso a mm

## Entradas del modelo
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR4J, DatesR =
model_data$date,
                                Precip = model_data$P, PotEvap =
model_data$ETP)
## Periodos de corrida
# prep period
Prep_period <- get_dates_id(model_data$date,"1985-01-01","1988-12-31")

# calibration period
Calib_period <- get_dates_id(model_data$date,"1989-01-01","2011-12-31")

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               IniResLevels = c(0.58,0.5,NA,NA),
                               IndPeriod_Run = Calib_period)

## Calibración
# opciones de calibración
CalibOptions <- CreateCalibOptions(FUN_MOD = RunModel_GR4J,
                                   FUN_CALIB = Calibration_Michel)

# criterio de calibración
InputsCrit <- CreateInputsCrit(FUN_CRIT = ErrorCrit_NSE,
                               InputsModel = InputsModel,
                               RunOptions = RunOptions, #transfo="sqrt",
                               Obs = Qobs[Calib_period])

# calibración
OutputsCalib <- Calibration(InputsModel = InputsModel,
                            RunOptions = RunOptions,
                            CalibOptions = CalibOptions,
                            InputsCrit = InputsCrit,
                            FUN_MOD = RunModel_GR4J)

param<-OutputsCalib$ParamFinalR

```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 7

Script extracción de datos futuros de precipitación y temperatura

```

##### CREAR TABLA DE DATOS A FUTURO
#### LIBRERIAS
library(openxlsx)

library(ncdf4)

```

```

library(raster)
library(rgdal)
library(rgeos)
library(chron)

source("scripts/model_functions.R")

##### UNIDAD HIDROGRAFICA 1 #####

## Datos
watershed<-readOGR("data/mira/spatial_data/UH_Mira_uh1.shp")

## Precipitacion
file_path<-c("data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_Hist_CSIRO-Mk3-6-0.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_Hist_GISS-E2-R.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_Hist_IPSL-CM5A-MR.nc")

var_names<-c("CSIRO","GISS","IPSL")
HIST<-calculate_mean_values_from_model(file_path,var_names,watershed,10,5000)

file_path<-c("data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_RCP45_CSIRO-Mk3-6-
0.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_RCP45_GISS-E2-R.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_RCP45_IPSL-CM5A-MR.nc")

var_names<-c("CSIRO","GISS","IPSL")
RCP45<-calculate_mean_values_from_model(file_path,var_names,watershed,10,5000)

file_path<-c("data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_RCP85_CSIRO-Mk3-6-
0.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_RCP85_GISS-E2-R.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Prec_RCP85_IPSL-CM5A-MR.nc")

var_names<-c("CSIRO","GISS","IPSL")
RCP85<-calculate_mean_values_from_model(file_path,var_names,watershed,10,5000)

wb <- createWorkbook()
addWorksheet(wb,sheetName = "hist")
writeData(wb, "hist",HIST)
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp45")
writeData(wb, "rcp45",RCP45)
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp85")
writeData(wb, "rcp85",RCP85)
saveWorkbook(wb, "data/mira/rain_future_tables_uh1.xlsx", overwrite = TRUE)

## Temperature
file_path<-c("data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_Hist_CSIRO-Mk3-6-0.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_Hist_GISS-E2-R.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_Hist_IPSL-CM5A-MR.nc")

var_names<-c("CSIRO","GISS","IPSL")
HIST<-calculate_mean_values_from_model(file_path,var_names,watershed,10,5000)

file_path<-c("data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_RCP45_CSIRO-Mk3-6-
0.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_RCP45_GISS-E2-R.nc",
             "data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_RCP45_IPSL-CM5A-MR.nc")

var_names<-c("CSIRO","GISS","IPSL")
RCP45<-calculate_mean_values_from_model(file_path,var_names,watershed,10,5000)

file_path<-c("data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_RCP85_CSIRO-Mk3-6-
0.nc",

```

```

"data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_RCP85_GISS-E2-R.nc",
"data/mira/spatial_data/79W_77W_0N_1N_Tmed_RCP85_IPSL-CM5A-MR.nc")

var_names<-c("CSIRO","GISS","IPSL")
RCP85<-calculate_mean_values_from_model(file_path,var_names,watershed,10,5000)

wb <- createWorkbook()
addWorksheet(wb,sheetName = "hist")
writeData(wb, "hist",HIST)
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp45")
writeData(wb, "rcp45",RCP45)
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp85")
writeData(wb, "rcp85",RCP85)
saveWorkbook(wb, "data/mira/temperature_future_tables_uh1.xlsx", overwrite =
TRUE)

#Se repite el script para el resto de subunidades hidrográficas

```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 8

Script de calibración de modelos climáticos con datos de precipitación y temperatura

```

##### CORRECCIÓN DE MODELOS CON LOS DATOS OBSERVADOS (DOWNSCALING)

#### LIBRERIAS
library(openxlsx)
library(lubridate)

source("scripts/model_functions.R")

##### UNIDAD HIDROGRAFICA 1 #####

### LECTURA DE DATOS
wb <- loadWorkbook(file = "data/datos_hm_mensual_mira.xlsx") # se carga el
archivo de excel
obs_data <- read.xlsx(wb, sheet="datos_uh1", detectDates = TRUE) # datos de las
valores medios de la cuenca

wb <- loadWorkbook(file = "data/mira/rain_future_tables_uh1.xlsx") # se carga
el archivo de excel
rain_clim_model_hist <- read.xlsx(wb, sheet="hist", detectDates = TRUE) # datos
de los modelos de clima
rain_clim_model_rcp45 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp45", detectDates = TRUE) #
datos de los modelos de clima
rain_clim_model_rcp85 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp85", detectDates = TRUE) #
datos de los modelos de clima

wb <- loadWorkbook(file = "data/mira/temperature_future_tables_uh1.xlsx") # se
carga el archivo de excel
temp_clim_model_hist <- read.xlsx(wb, sheet="hist", detectDates = TRUE) # datos
de los modelos de clima
temp_clim_model_rcp45 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp45", detectDates = TRUE) #
datos de los modelos de clima
temp_clim_model_rcp85 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp85", detectDates = TRUE) #
datos de los modelos de clima

### CALIBRACIÓN DE MODELOS
## Precipitación
summary(obs_data)
summary(rain_clim_model_hist)

```

```

id_obs<-get_dates_id(obs_data$date,"1985-01-01","2005-12-01")
obs_data_cut<-obs_data[id_obs,]

id_mod<-get_dates_id(rain_clim_model_hist$date,"1985-01-01","2005-12-01")
rain_clim_model_hist<-rain_clim_model_hist[id_mod,]

plot(rain_clim_model_hist$ensamble,obs_data_cut$P,xlim=c(0,300),ylim=c(0,300),a
sp=1)
segments(0,0,1000,1000,lty=2,col="gray")
abline(lm(obs_data_cut$P~rain_clim_model_hist$ensamble),col="red") # sin
intercepto

id_cal <- which(isoyear(obs_data_cut$date) %in% seq(1985,2005,2))

ParaCal_mod(obs_c = obs_data_cut$P[id_cal], mod_c =
rain_clim_model_hist$ensamble[id_cal],
           obs_v = obs_data_cut$P[-id_cal], mod_v =
rain_clim_model_hist$ensamble[-id_cal])

ResVal_mod(obs_c = obs_data_cut$P[id_cal], mod_c =
rain_clim_model_hist$ensamble[id_cal],
           obs_v = obs_data_cut$P[-id_cal], mod_v =
rain_clim_model_hist$ensamble[-id_cal])

corrected_rainfall<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$P,
                                mod_c = rain_clim_model_hist$ensamble,
                                mod_fut = rain_clim_model_hist$ensamble)

plot(corrected_rainfall,obs_data_cut$P,xlim=c(0,300),ylim=c(0,300),asp=1)
segments(0,0,1000,1000,lty=2,col="gray")
abline(lm(obs_data_cut$P~corrected_rainfall),col="red") # sin intercepto

# rcp45.
rain_clim_model_rcp45$CSIRO<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$P,
                                           mod_c = rain_clim_model_hist$CSIRO,
                                           mod_fut =
rain_clim_model_rcp45$CSIRO)
rain_clim_model_rcp45$GISS<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$P,
                                           mod_c = rain_clim_model_hist$GISS,
                                           mod_fut = rain_clim_model_rcp45$GISS)
rain_clim_model_rcp45$IPSL<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$P,
                                           mod_c = rain_clim_model_hist$IPSL,
                                           mod_fut = rain_clim_model_rcp45$IPSL)

# rcp8.5
rain_clim_model_rcp85$CSIRO<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$P,
                                           mod_c = rain_clim_model_hist$CSIRO,
                                           mod_fut =
rain_clim_model_rcp85$CSIRO)
rain_clim_model_rcp85$GISS<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$P,
                                           mod_c = rain_clim_model_hist$GISS,
                                           mod_fut = rain_clim_model_rcp85$GISS)
rain_clim_model_rcp85$IPSL<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$P,
                                           mod_c = rain_clim_model_hist$IPSL,
                                           mod_fut = rain_clim_model_rcp85$IPSL)

rain_clim_model_rcp45$ensamble <- apply(rain_clim_model_rcp45[,2:4],1,mean)
rain_clim_model_rcp85$ensamble <- apply(rain_clim_model_rcp85[,2:4],1,mean)

wb <- createWorkbook()
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp45")
writeData(wb, "rcp45",rain_clim_model_rcp45)
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp85")
writeData(wb, "rcp85",rain_clim_model_rcp85)

```



```

saveWorkbook(wb, "data/mira/calibrated_rain_future_tables_uh1.xlsx", overwrite
= TRUE)

## Temperature
id_mod<-get_dates_id(temp_clim_model_hist$date,"1985-01-01","2005-12-01")
temp_clim_model_hist<-temp_clim_model_hist[id_mod,]

plot(temp_clim_model_hist$ensamble,obs_data_cut$Tmed,xlim=c(10,16),ylim=c(10,16
),asp=1)
segments(0,0,1000,1000,lty=2,col="gray")
abline(lm(obs_data_cut$Tmed~temp_clim_model_hist$ensamble),col="red") # sin
intercepto

#id_cal <- which(years(obs_data_cut$date) %in% seq(1985,2005,2))
id_cal <- which(isoyear(obs_data_cut$date) %in% seq(1985,2005,2))

ParaCal_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed[id_cal], mod_c =
temp_clim_model_hist$ensamble[id_cal],
           obs_v = obs_data_cut$Tmed[-id_cal], mod_v =
temp_clim_model_hist$ensamble[-id_cal])

ResVal_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed[id_cal], mod_c =
temp_clim_model_hist$ensamble[id_cal],
           obs_v = obs_data_cut$Tmed[-id_cal], mod_v =
temp_clim_model_hist$ensamble[-id_cal])

corrected_temperature<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed,
                                   mod_c = temp_clim_model_hist$ensamble,
                                   mod_fut = temp_clim_model_hist$ensamble)

plot(corrected_temperature,obs_data_cut$Tmed,xlim=c(10,16),ylim=c(10,16),asp=1)
segments(0,0,1000,1000,lty=2,col="gray")
abline(lm(obs_data_cut$Tmed~corrected_temperature),col="red") # sin intercepto

# rcp4.5
temp_clim_model_rcp45$CSIRO<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed,
                                           mod_c = temp_clim_model_hist$CSIRO,
                                           mod_fut =

temp_clim_model_rcp45$CSIRO)
temp_clim_model_rcp45$GISS<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed,
                                           mod_c = temp_clim_model_hist$GISS,
                                           mod_fut = temp_clim_model_rcp45$GISS)
temp_clim_model_rcp45$IPSL<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed,
                                           mod_c = temp_clim_model_hist$IPSL,
                                           mod_fut = temp_clim_model_rcp45$IPSL)

# rcp8.5
temp_clim_model_rcp85$CSIRO<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed,
                                           mod_c = temp_clim_model_hist$CSIRO,
                                           mod_fut =

temp_clim_model_rcp85$CSIRO)
temp_clim_model_rcp85$GISS<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed,
                                           mod_c = temp_clim_model_hist$GISS,
                                           mod_fut = temp_clim_model_rcp85$GISS)
temp_clim_model_rcp85$IPSL<-downscale_mod(obs_c = obs_data_cut$Tmed,
                                           mod_c = temp_clim_model_hist$IPSL,
                                           mod_fut = temp_clim_model_rcp85$IPSL)

temp_clim_model_rcp45$ensamble <- apply(temp_clim_model_rcp45[,2:4],1,mean)
temp_clim_model_rcp85$ensamble <- apply(temp_clim_model_rcp85[,2:4],1,mean)

wb <- createWorkbook()
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp45")
writeData(wb, "rcp45",temp_clim_model_rcp45)
addWorksheet(wb,sheetName = "rcp85")

```

```
writeData(wb, "rcp85",temp_clim_model_rcp85)
saveWorkbook(wb, "data/mira/calibrated_temperature_future_tables_uh1.xlsx",
overwrite = TRUE)

#Se repite el script para el resto de subunidades hidrográficas
```

Autor: Domínguez, (2021)

Anexo 9

Script de modelación del escenario hídrico futuro 2050 por cambios de uso de suelo

```
##### ESCENARIO HIDRICO FUTURO 2050 CUENTA ALTA MIRA

#### LIBRERIAS
library(openxlsx) # abrir archivos en excel
library(lubridate) # manejar fechas
library(airGR) # modelos hidrologicos
library(ggplot2) # graficos
library(zoo) # manejo de datos temporales

source("scripts/model_functions.R")

##### UNIDAD HIDROGRAFICA 1 #####
### LECTURA DE DATOS
wb <- loadWorkbook(file = "data/datos_hm_mensual_mira.xlsx") # se carga el
archivo de excel
obs_data <- read.xlsx(wb, sheet="datos_uh1", detectDates = TRUE) # datos de las
valores medios de la cuenca

wb <- loadWorkbook(file = "data/mira/calibrated_rain_future_tables_uh1.xlsx") #
se carga el archivo de excel
rain_data_rcp45 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp45", detectDates = TRUE) # datos de
los modelos climáticos
rain_data_rcp85 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp85", detectDates = TRUE) # datos de
los modelos climáticos

wb <- loadWorkbook(file =
"data/mira/calibrated_temperature_future_tables_uh1.xlsx") # se carga el
archivo de excel
temp_data_rcp45 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp45", detectDates = TRUE) # datos de
los modelos climáticos
temp_data_rcp85 <- read.xlsx(wb, sheet="rcp85", detectDates = TRUE) # datos de
los modelos climáticos

#### TEMPERATURA FUTURA
temp_data_rcp45 <- temp_data_rcp45[temp_data_rcp45$date <= as.Date("2050-12-
31"), ]
ggplot(temp_data_rcp45) + geom_line(aes(date,CSIRO,col="CSIRO")) +
  geom_line(aes(date,GISS,col="GISS")) +
  geom_line(aes(date,IPSL,col="IPSL")) +
  geom_line(aes(date,ensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1) +
  ylab("Temperatura") + ggtitle("RCP 4.5") +
  theme_bw() + theme(legend.title = element_blank())

temp_data_rcp85 <- temp_data_rcp85[temp_data_rcp85$date <= as.Date("2050-12-
31"), ]
ggplot(temp_data_rcp85) + geom_line(aes(date,CSIRO,col="CSIRO")) +
  geom_line(aes(date,GISS,col="GISS")) +
```

```

geom_line(aes(date,IPSL,col="IPSL")) +
geom_line(aes(date,ensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1) +
ylab("Temperatura") + ggtitle("RCP 8.5") +
theme_bw() + theme(legend.title = element_blank())

temp_data_rcp45$mvCSIRO<-rollmean(temp_data_rcp45$CSIRO,5, fill = list(NA,
NULL, NA))
temp_data_rcp45$mvGISS<-rollmean(temp_data_rcp45$GISS,5, fill = list(NA, NULL,
NA))
temp_data_rcp45$mvIPSL<-rollmean(temp_data_rcp45$IPSL,5, fill = list(NA, NULL,
NA))
temp_data_rcp45$mvensamble<-rollmean(temp_data_rcp45$ensamble,5, fill =
list(NA, NULL, NA))

temp_data_rcp85$mvCSIRO<-rollmean(temp_data_rcp85$CSIRO,5, fill = list(NA,
NULL, NA))
temp_data_rcp85$mvGISS<-rollmean(temp_data_rcp85$GISS,5, fill = list(NA, NULL,
NA))
temp_data_rcp85$mvIPSL<-rollmean(temp_data_rcp85$IPSL,5, fill = list(NA, NULL,
NA))
temp_data_rcp85$mvensamble<-rollmean(temp_data_rcp85$ensamble,5, fill =
list(NA, NULL, NA))

ggplot(temp_data_rcp45) + geom_line(aes(date,mvCSIRO,col="CSIRO")) +
geom_line(aes(date,mvGISS,col="GISS")) +
geom_line(aes(date,mvIPSL,col="IPSL")) +
geom_line(aes(date,mvensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1) +
ylab("Temperatura") + ggtitle("RCP 4.5") +
theme_bw() + theme(legend.title = element_blank()) +
scale_y_continuous(limits = c(11, 17.5))

ggplot(temp_data_rcp85) + geom_line(aes(date,mvCSIRO,col="CSIRO")) +
geom_line(aes(date,mvGISS,col="GISS")) +
geom_line(aes(date,mvIPSL,col="IPSL")) +
geom_line(aes(date,mvensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1) +
ylab("Temperatura") + ggtitle("RCP 8.5") +
theme_bw() + theme(legend.title = element_blank()) +
scale_y_continuous(limits = c(11, 17.5))

##### PREC FUTURA
rain_data_rcp45 <- rain_data_rcp45[rain_data_rcp45$date <= as.Date("2050-12-
31"), ]
ggplot(rain_data_rcp45) + geom_line(aes(date,CSIRO,col="CSIRO")) +
geom_line(aes(date,GISS,col="GISS")) +
geom_line(aes(date,IPSL,col="IPSL")) +
geom_line(aes(date,ensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1) +
ylab("Temperatura") + ggtitle("RCP 4.5") +
theme_bw() + theme(legend.title = element_blank())

rain_data_rcp85 <- rain_data_rcp85[rain_data_rcp85$date <= as.Date("2050-12-
31"), ]
ggplot(rain_data_rcp85) + geom_line(aes(date,CSIRO,col="CSIRO")) +
geom_line(aes(date,GISS,col="GISS")) +
geom_line(aes(date,IPSL,col="IPSL")) +
geom_line(aes(date,ensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1) +
ylab("Temperatura") + ggtitle("RCP 8.5") +
theme_bw() + theme(legend.title = element_blank())

rain_data_rcp45$mvCSIRO<-rollmean(rain_data_rcp45$CSIRO,5, fill = list(NA,
NULL, NA))
rain_data_rcp45$mvGISS<-rollmean(rain_data_rcp45$GISS,5, fill = list(NA, NULL,
NA))
rain_data_rcp45$mvIPSL<-rollmean(rain_data_rcp45$IPSL,5, fill = list(NA, NULL,
NA))

```

```

rain_data_rcp45$mvensamble<-rollmean(rain_data_rcp45$ensamble,5, fill =
list(NA, NULL, NA))

rain_data_rcp85$mvCSIRO<-rollmean(rain_data_rcp85$CSIRO,5, fill = list(NA,
NULL, NA))
rain_data_rcp85$mvGISS<-rollmean(rain_data_rcp85$GISS,5, fill = list(NA, NULL,
NA))
rain_data_rcp85$mvIPSL<-rollmean(rain_data_rcp85$IPSL,5, fill = list(NA, NULL,
NA))
rain_data_rcp85$mvensamble<-rollmean(rain_data_rcp85$ensamble,5, fill =
list(NA, NULL, NA))

ggplot(rain_data_rcp45) + geom_line(aes(date,mvCSIRO,col="CSIRO")) +
  geom_line(aes(date,mvGISS,col="GISS")) +
  geom_line(aes(date,mvIPSL,col="IPSL")) +
  geom_line(aes(date,mvensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1,) +
  ylab("Precipitacion") + ggtitle("RCP 4.5") +
  theme_bw() + theme(legend.title = element_blank()) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 250))

ggplot(rain_data_rcp85) + geom_line(aes(date,mvCSIRO,col="CSIRO")) +
  geom_line(aes(date,mvGISS,col="GISS")) +
  geom_line(aes(date,mvIPSL,col="IPSL")) +
  geom_line(aes(date,mvensamble,col="Ensamble"), lwd=1.1) +
  ylab("Precipitacion") + ggtitle("RCP 8.5") +
  theme_bw() + theme(legend.title = element_blank()) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 250))

### ETP por Kc 2024 - 2050

etp_data_rcp45<-temp_data_rcp45[,1:5]
etp_data_rcp85<-temp_data_rcp85[,1:5]

Kc2024_2050 <- 0.925

escenario2024_2050 <- which(year(etp_data_rcp45$date) >= 2024 &
year(etp_data_rcp45$date) <= 2050)

etp_data_rcp45$CSIRO<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp45$date,
                                     Temp=etp_data_rcp45$CSIRO,
                                     Lat=0.631,
                                     LatUnit="deg")
etp_data_rcp45$CSIRO[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp45$CSIRO[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

etp_data_rcp45$GISS<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp45$date,
                                     Temp=etp_data_rcp45$GISS,
                                     Lat=0.631,
                                     LatUnit="deg")
etp_data_rcp45$GISS[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp45$GISS[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

etp_data_rcp45$IPSL<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp45$date,
                                     Temp=etp_data_rcp45$IPSL,
                                     Lat=0.631,
                                     LatUnit="deg")
etp_data_rcp45$IPSL[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp45$IPSL[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

etp_data_rcp45$ensamble<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp45$date,
                                         Temp=etp_data_rcp45$ensamble,
                                         Lat=0.631,
                                         LatUnit="deg")
etp_data_rcp45$ensamble[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp45$ensamble[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

```

```

escenario2024_2050 <- which(year(etp_data_rcp85$date) >= 2024 &
year(etp_data_rcp45$date) <= 2050)

etp_data_rcp85$CSIRO<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp85$date,
                                     Temp=etp_data_rcp85$CSIRO,
                                     Lat=0.631,
                                     LatUnit="deg")
etp_data_rcp85$CSIRO[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp85$CSIRO[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

etp_data_rcp85$GISS<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp85$date,
                                     Temp=etp_data_rcp85$GISS,
                                     Lat=0.631,
                                     LatUnit="deg")
etp_data_rcp85$GISS[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp85$GISS[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

etp_data_rcp85$IPSL<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp85$date,
                                     Temp=etp_data_rcp85$IPSL,
                                     Lat=0.631,
                                     LatUnit="deg")
etp_data_rcp85$IPSL[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp85$IPSL[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

etp_data_rcp85$ensamble<-month_PE_Oudin(etp_data_rcp85$date,
                                     Temp=etp_data_rcp85$ensamble,
                                     Lat=0.631,
                                     LatUnit="deg")
etp_data_rcp85$ensamble[escenario2024_2050] <-
etp_data_rcp85$ensamble[escenario2024_2050] * Kc2024_2050

### Intervalos
int_conf<-c(0.025,0.975)

rain_data_rcp45$inf<-apply(rain_data_rcp45[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[1])
rain_data_rcp45$sup<-apply(rain_data_rcp45[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[2])
rain_data_rcp85$inf<-apply(rain_data_rcp85[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[1])
rain_data_rcp85$sup<-apply(rain_data_rcp85[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[2])
etp_data_rcp45$inf<-apply(etp_data_rcp45[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[1])
etp_data_rcp45$sup<-apply(etp_data_rcp45[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[2])
etp_data_rcp85$inf<-apply(etp_data_rcp85[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[1])
etp_data_rcp85$sup<-apply(etp_data_rcp85[,2:4],1,quantile, probs=int_conf[2])

### Arreglo de datos
id_fut<-get_dates_id(rain_data_rcp45$date,"2012-01-01","2050-12-01") # datos
observados hasta 2011
rain_data_rcp45<-rain_data_rcp45[id_fut,]
rain_data_rcp85<-rain_data_rcp85[id_fut,]
etp_data_rcp45<-etp_data_rcp45[id_fut,]
etp_data_rcp85<-etp_data_rcp85[id_fut,]

##### MODELO GR2M
## Area
Awat <- 340.98 #km2

## Parámetros
param<-c(6002.91, 0.67) # de la calibración del modelo

## Periodos de corrida
# Run period
dates_model<-c(obs_data$date,rain_data_rcp45$date)
dates_model<-change_date_format(dates_model)
numdays_model<-days_in_month(dates_model)

```

```

Run_period <- get_dates_id(dates_model,"1989-01-01","2050-12-01")

# prep period
Prep_period <- get_dates_id(dates_model,"1985-01-01","1988-12-01")

#### RCP 4.5
### ENSAMBLE
## Entradas del modelo
PP<-c(obs_data$P,rain_data_rcp45$ensamble)
ETP<-c(obs_data$ETP,etp_data_rcp45$ensamble)
PP45<-PP
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M, DatesR = dates_model,
                                  Precip = PP, PotEvap = ETP)

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               IndPeriod_Run = Run_period)

## Corrida del modelo
OutputsModel_rcp45_ens <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions =
                                   RunOptions,
                                   Param = param, FUN = RunModel_GR2M)

Qsim_rcp45_ens <-
OutputsModel_rcp45_ens$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*numdays_model[Run_period])

Qsim_rcp45_ens_2050 <- Qsim_rcp45_ens[substr(dates_model[Run_period], 1, 4) ==
"2050"]

### LÍMITE SUPERIOR
## Entradas del modelo
PP<-c(obs_data$P,rain_data_rcp45$sup)
ETP<-c(obs_data$ETP,etp_data_rcp45$inf)

InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M, DatesR = dates_model,
                                  Precip = PP, PotEvap = ETP)

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               IndPeriod_Run = Run_period)

## Corrida del modelo
OutputsModel_rcp45_sup <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions =
                                   RunOptions,
                                   Param = param, FUN = RunModel_GR2M)

Qsim_rcp45_sup <-
OutputsModel_rcp45_sup$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*numdays_model[Run_period])

### LÍMITE INFERIOR
## Entradas del modelo
PP<-c(obs_data$P,rain_data_rcp45$inf)
ETP<-c(obs_data$ETP,etp_data_rcp45$sup)

InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M, DatesR = dates_model,
                                  Precip = PP, PotEvap = ETP)

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               IndPeriod_Run = Run_period)

## Corrida del modelo

```

```

OutputsModel_rcp45_inf <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions =
RunOptions,
                                Param = param, FUN = RunModel_GR2M)
Qsim_rcp45_inf <-
OutputsModel_rcp45_inf$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*numdays_model[Run_period])

#### RCP 8.5
### ENSAMBLE
## Entradas del modelo
PP<-c(obs_data$P,rain_data_rcp85$ensamble)
ETP<-c(obs_data$ETP,etp_data_rcp85$ensamble)
PP85<-PP
InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M, DatesR = dates_model,
                                Precip = PP, PotEvap = ETP)

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               IndPeriod_Run = Run_period)

## Corrida del modelo
OutputsModel_rcp85_ens <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions =
RunOptions,
                                Param = param, FUN = RunModel_GR2M)

Qsim_rcp85_ens <-
OutputsModel_rcp85_ens$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*numdays_model[Run_period])

### LÍMITE SUPERIOR
## Entradas del modelo
PP<-c(obs_data$P,rain_data_rcp85$sup)
ETP<-c(obs_data$ETP,etp_data_rcp85$inf)

InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M, DatesR = dates_model,
                                Precip = PP, PotEvap = ETP)

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               IndPeriod_Run = Run_period)

## Corrida del modelo
OutputsModel_rcp85_sup <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions =
RunOptions,
                                Param = param, FUN = RunModel_GR2M)

Qsim_rcp85_sup <-
OutputsModel_rcp85_sup$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*numdays_model[Run_period])

### LÍMITE INFERIOR
## Entradas del modelo
PP<-c(obs_data$P,rain_data_rcp85$inf)
ETP<-c(obs_data$ETP,etp_data_rcp85$sup)

InputsModel <- CreateInputsModel(FUN_MOD = RunModel_GR2M, DatesR = dates_model,
                                Precip = PP, PotEvap = ETP)

## Opciones del modelo
RunOptions <- CreateRunOptions(FUN_MOD = RunModel_GR2M,
                               InputsModel = InputsModel,
                               IndPeriod_WarmUp = Prep_period,
                               IndPeriod_Run = Run_period)

## Corrida del modelo
OutputsModel_rcp85_inf <- RunModel(InputsModel = InputsModel, RunOptions =
RunOptions,

```

```

Param = param, FUN = RunModel_GR2M)
Qsim_rcp85_inf <-
OutputsModel_rcp85_inf$Qsim/1000*(Awat*1e6)/(86400*numdays_model[Run_period])

### HIDROGRAMAS
## RCP 4.5
plot_hydrogram(dates_model[Run_period],
               Px = PP45[Run_period],
               Qx = obs_data$Q[Run_period],
               main="RCP 4.5",
               Qy=Qsim_rcp45_ens,
               Qinf=Qsim_rcp45_inf,
               Qsup=Qsim_rcp45_sup,
               Q_units = "m3/s")

plot_hydrogram(dates_model[Run_period],
               Px = PP45[Run_period],
               Qx = obs_data$Q[Run_period],
               main = "RCP 4.5",
               Qy=Qsim_rcp45_ens,
               Qinf=Qsim_rcp45_inf,
               Qsup=Qsim_rcp45_sup,
               Q_units = "m3/s",
               ylimP = c(0,4000),
               ylimQ = c(0,50),
               show_year = TRUE)

## RCP 8.5
plot_hydrogram(dates_model[Run_period],
               Px = PP45[Run_period],
               Qx = obs_data$Q[Run_period],
               main="RCP 8.5",
               Qy=Qsim_rcp85_ens,
               Qinf=Qsim_rcp85_inf,
               Qsup=Qsim_rcp85_sup,
               Q_units = "m3/s")

plot_hydrogram(dates_model[Run_period],
               Px = PP45[Run_period],
               Qx = obs_data$Q[Run_period],
               main = "RCP 8.5",
               Qy=Qsim_rcp85_ens,
               Qinf=Qsim_rcp85_inf,
               Qsup=Qsim_rcp85_sup,
               Q_units = "m3/s",
               ylimP = c(0,4000),
               ylimQ = c(0,50),
               show_year = TRUE)

future_period<-get_dates_id(dates_model[Run_period],"2012-01-01","2050-12-01")

par(mfrow=c(2,1))
fdcu2(obs_data$Q[Run_period],
      sim=Qsim_rcp45_ens,
      lband = Qsim_rcp45_inf[future_period],
      uband = Qsim_rcp45_sup[future_period],
      lQ.thr = 0.2, hQ.thr = 0.8, ylim=c(1,16),
      main = "Curva de Duración General RCP 4.5",
      leg.txt = c("Q observado", "Q simulado", "Percentil (95%)"))

fdcu2(obs_data$Q[Run_period],
      sim=Qsim_rcp85_ens,
      lband = Qsim_rcp85_inf[future_period],

```



```
uband = Qsim_rcp85_sup[future_period],  
lQ.thr = 0.2, hQ.thr = 0.8, ylim=c(1,16),  
main = "Curva de Duración General RCP 8.5",  
leg.txt = c("Q observado", "Q simulado", "Percentil (95%)"))
```

```
#####EXTRAER DATOS 2050 KC ACTUAL  
Qsim_rcp45_85_ens_24_50 <- data.frame(date = dates_model[Run_period],  
Qsim_rcp45_ens, Qsim_rcp85_ens)  
wb <- createWorkbook()  
addWorksheet(wb, sheetName = "Qsim_rcp_24_50")  
writeData(wb, "Qsim_rcp_24_50", Qsim_rcp45_85_ens_24_50)  
saveWorkbook(wb, "outputs/Kc_2050/2024_2050_rcp_uh1_kc2050.xlsx", overwrite =  
TRUE)
```

Autor: Domínguez, (2021)