

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
CARRERA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL FUTURO EN BASE A
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SITUACIONES
CLIMÁTICAS EXTREMAS OBSERVADAS EN EL PASADO: EL
CASO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA**

**MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL TIPO GLOBAL
CONCEPTUAL A FUTURO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA
BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA
ALTA DEL RÍO GUAYLLABAMBA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

ALEX FERNANDO TENELEMA YÁNEZ

alfercho_10inm@hotmail.com

DIRECTOR: Dr. MARCOS JOSHUA VILLACÍS ERAZO

marcos.villacis@epn.edu.ec

Quito, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Alex Fernando Tenelema Yáñez, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ALEX FERNANDO TENELEMA YÁÑEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Alex Fernando Tenelema Yáñez, bajo mi supervisión.

Dr. MARCOS JOSHUA VILLACÍS ERAZO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ESTUDIANTE: ALEX FERNANDO TENELEMA YÁNEZ

DIRECTOR: Dr. MARCOS JOSHUA VILLACÍS ERAZO

DEDICATORIA

A Dios por darme salud y sabiduría para poder culminar con bien una etapa más de mi vida. A mis padres, Fausto y Rosario por brindarme su apoyo y amor incondicional, por su ejemplo de perseverancia y todos sus valores que lograron sembrar en mí. A mis hermanos Eduardo y Galo por sus consejos y pláticas muy oportunas. A mis abuelos María Julia y Miguel Ángel que me vieron crecer y me supieron transmitir su experiencia a través de sus sabios consejos y que ahora estarán orgullosos en el lugar al que Dios los llamo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por permitirme culminar de manera exitosa esta etapa de mi formación profesional.

A mi director del proyecto, Dr. Marcos Villacís por depositar su confianza en mí y estar siempre dispuesto a colaborar y resolver cada una de mis innumerables dudas e inquietudes, por todo su tiempo y disposición para sacar adelante este proyecto.

A mi madre, Rosario Margarita, por ser uno de los pilares fundamentales para mí, por todo su amor y cuidados, por ser la mujer más sencilla, amorosa y el corazón de toda mi familia, por poseer toda esa magia y la capacidad para mantener siempre el horizonte hasta en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi padre, Manuel Fausto, por ser mi ejemplo a seguir, que con humildad siempre ha logrado cumplir con lo que se propone, por su bondad, por su apoyo a educarme en la búsqueda de un mejor futuro para mí, pero sobre todo porque ha sabido enseñarme que la responsabilidad, puntualidad y honestidad, son los valores morales y éticos que describen a una persona correcta.

A mis hermanos, Eduardo y Galo por compartir conmigo alegrías y tristezas, días buenos y malos, pero sobre todo con compartir conmigo ese amor por el deporte y espero poder compartir aún, muchos momentos más juntos.

A mis dos estimados y mejores amigos Juanito y Luchito por formar una amistad tan sincera, que sé que nadie y nunca se va a quebrantar, una amistad de hermanos que solo los verdaderos amigos saben cultivar. También a Hjalmar, Esteban, Maximo y Dianita que compartimos momentos inolvidables, en las aulas, asociación, novatadas, y en la cancha de fútbol, como olvidar a los innumerables amigos que deja el deporte que más amo “el fútbol”, Daniel Cisneros y los LVDS, Alexander “Compa Quinita”, Fernando Naranjo “Osito”, Yorman “El Cyborg” un bacán y excelente amigo que supo brindarme su amistad sincera y forma parte de la gran familia de amigos GYM EPN.

A mi querida y hermosa “buddie” Winyfred y Pauli Baquero, dos grandes mujeres que se ganaron un pedacito de mi corazón y mi amistad sincera e incondicional, pero sobre todo una gran admiración y respeto por ser un ejemplo a seguir, espero que sus vidas estén llenas de éxitos, bendiciones y conservar nuestra amistad por la eternidad. Y sin olvidarme de Ma. Inés Rivadeneira Guillem “Maru”, una amiga muy jovial y alegre, que me supo

transmitir la importancia de la madre en nuestras vidas, y lo orgullosos que debemos sentirnos de ellas.

A Verito, mi princesa hermosa y la más consentida, gracias por ser la persona tan especial y sincera que pude conocer, gracias por todo tu amor incondicional que me transmites cada día, por brindarme tu apoyo, por todas tus palabras que me incentivan a seguir superándome, gracias por permitirme conocer esa nobleza interna que hay en ti, por enseñarme que siempre se puede mejorar, por ser quién supo conocer la mejor versión de mí, siempre estaré eternamente agradecido a la vida por permitirme coincidir y compartir momentos muy felices a tu lado. Sé que en la vida existirán muchos tropiezos, pero también grandes éxitos y sueños que me encantaría seguir compartiendo y cumpliendo juntos.

Al Ingeniero Carlos Arellano, que entro por la ventana en la parte final de mi carrera, agradecerle por su colaboración y ayuda desinteresada en sus valiosas correcciones de redacción de mi trabajo final, gracias por su apertura y buena vibra, que siga obteniendo muchísimos éxitos más en su vida.

A la Escuela Politécnica Nacional, por permitirme superarme en mi vida profesional, que se convirtió en mi segundo hogar durante toda la carrera, por brindarme el espacio para desarrollar mis capacidades intelectuales, mis aptitudes y destrezas.

Finalmente, a todos mis profesores que aportaron con un granito de conocimiento, para formar un profesional capaz y con libertad de pensamiento, gracias por transmitirme sus enseñanzas invaluable que me servirán para toda la vida. Además, agradecer a todos los profes de la selección de fútbol de la EPN que me permitieron compartir y conocer a incontables personas, que siempre dejaron en mí enseñanzas muy valiosas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Alcance.....	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Ciclo Hidrológico.....	4
1.4.2 Elementos del Ciclo Hidrológico	4
1.4.2.1 Precipitación	4
1.4.2.2 Temperatura	4
1.4.2.3 Evaporación	5
1.4.2.4 Transpiración	5
1.4.2.5 Evapotranspiración	5
1.4.2.6 Humedad relativa.....	5
1.4.3 Cuencas hidrográficas.....	5
1.4.3.1 Definición de Cuenca hidrográfica.....	5
1.4.3.2 Ciclo hidrológico en las cuencas	5
1.4.3.3 Lluvias en las cuencas alto andinas	6
1.4.4 Flujo de agua en la atmósfera	6
1.4.4.1 Escorrentía superficial.....	6
1.4.4.2 Escorrentía subsuperficial	6
1.4.4.3 Escorrentía subterránea.....	6
1.4.5 Régimen climático en la región andina de Ecuador	6
1.4.5.1 Variabilidad estacional y espacial de la lluvia	6
1.4.6 Modelo Hidrológico.....	7
1.4.7 Modelos GR.....	7
2 METODOLOGÍA.....	8

2.1	Aplicabilidad del modelo	8
2.2	Esquema Metodológico para la aplicación del modelo GR2M	10
2.2.1	Modelo GR2M	10
2.3	Descripción del modelo GR2M	11
2.3.1	Función de Producción	11
2.3.2	Función de Transferencia	12
2.4	Calibración	13
2.5	Validación	13
2.6	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	13
3	RESULTADOS, ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	15
3.1	Resultados	15
3.1.1	Calibración y Validación del modelo hidrológico GR2M	15
3.1.2	Calibración y Validación inversa del modelo hidrológico GR2M.....	20
3.1.3	Simulación para los escenarios de vías de concentración representativa RCP 4.5 y RCP 8.5 empleando el par de parámetros X1 y X2 , más eficientes obtenidos de las calibraciones realizadas previamente.....	21
3.2	Análisis de resultados	28
3.2.1	Calibración y validación del modelo hidrológico GR2M.....	28
3.2.2	Calibración y validación inversa del modelo hidrológico GR2M	28
3.2.3	Simulación para los escenarios de vías de concentración representativa RCP 4.5 y RCP 8.5 empleando el par de parámetros X1 y X2 , más eficientes obtenidos de las calibraciones realizadas previamente.....	29
3.2.4	Análisis de las gráficas presentadas en los resultados	30
3.3	Conclusiones	33
3.4	Recomendaciones	35
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
5	ANEXOS.....	42

RESUMEN

Es evidente que el impacto del cambio climático afectará en la variabilidad de precipitaciones a nivel global. Por ello, el presente trabajo se desarrolla en base al análisis de un modelo hidrológico lluvia-escorrentía que permita simular los caudales máximos y mínimos, mediante un método de evaluación para un periodo de referencia con toda la serie de datos y tres subperiodos húmedo, seco, y un subperiodo del periodo de referencia. La finalidad fue la de obtener la simulación más satisfactoria que sea capaz de replicarse para escenarios de precipitaciones futuras. En cuanto a la obtención de los parámetros de cada modelo se empleó el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe que describe el ajuste y fiabilidad que presentan las simulaciones realizadas para cada uno de los subperiodos. Para realizar el análisis se empleó una serie de tiempo a escala mensual entre 1981 – 2000, además para la entrada de los datos se emplea un análisis para el año hidrológico que está comprendido entre los meses de septiembre – agosto. Para la calibración se utilizó los 2/3 de la serie de tiempo de cada subperiodo o periodo, mientras que para la validación se utilizó el 1/3 restante de la serie temporal. Además, cada subperiodo simulado fue ajustado bajo el criterio de Nash-Sutcliffe, que dejó como resultados que las mejores modelaciones obtenidas fueron para el periodo de referencia con toda la serie de datos y subperiodo húmedo con valores entre 60% y 80% de eficiencia, lo que indica que el modelo es confiable y puede ser replicado para predecir los futuros eventos que se presenten en la cuenca del río Guayllabamba. De esta manera también se llegó a la conclusión de que para el subperiodo seco es importante contar con una serie de datos más robusta o extensa, que permita obtener un mejor ajuste. Sin embargo, en líneas generales el modelo lluvia-escorrentía GR2M, puede ser usado de manera confiable basándose en el criterio de ajuste de Nash, que los caracterizó como “muy buenos” al periodo de referencia y subperiodo húmedo, pero “insuficiente” para el subperiodo seco.

PALABRAS CLAVE: modelo hidrológico, calibración, validación, criterio de eficiencia, Nash-Sutcliffe, subperiodos, lluvia-escorrentía, GR2M.

ABSTRACT

It is evident that the impact of climate change will affect global precipitation variability. Therefore, the present work is based on the analysis of a rainfall-runoff hydrological model that allows the simulation of maximum and minimum flows, using an evaluation method for a reference period with the entire data series and three subperiods: wet, dry, and a subperiod of the reference period. The purpose was to obtain the most satisfactory simulation capable of being replicated for future precipitation scenarios. The Nash-Sutcliffe efficiency criterion was used to obtain the parameters of each model, which describes the fit and reliability of the simulations carried out for each of the subperiods. To perform the analysis, a time series on a monthly scale between 1981 and 2000 was used, and an analysis for the hydrological year between September and August was also used for data input. For calibration, 2/3 of the time series of each subperiod or period was used, while the remaining 1/3 of the time series was used for validation. In addition, each simulated subperiod was adjusted under the Nash-Sutcliffe criterion, which left as results that the best modeling obtained were for the reference period with the entire data series and wet subperiod with values between 60% and 80% efficiency, indicating that the model is reliable and can be replicated to predict future events in the Guayllabamba river basin. It was also concluded that for the dry subperiod it is important to have a more robust or extensive data series to obtain a better fit. However, in general terms, the GR2M rainfall-runoff model can be used reliably based on the Nash adjustment criteria, which characterized them as "very good" for the reference period and the wet subperiod, but "insufficient" for the dry subperiod.

KEYWORDS: hydrologic model, calibration, validation, efficiency criterion, Nash-Sutcliffe, subperiods, rainfall-runoff, GR2M.

INTRODUCCIÓN

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Debido a su geografía, las zonas andinas sufren una variabilidad en su régimen de lluvias tanto por fenómenos atmosféricos como por los ocasionados por el cambio climático (Buytaert et al., 2009). Debido a este último, en los próximos años se podrá apreciar una disminución de las precipitaciones, provocando, entre otros efectos, la escases de disponibilidad de agua dulce (Carrasco et al., 2011; Celleri et al., 2007). Debido a la gran demanda de agua por parte de la población, se busca precautelar su protección, mediante el cuidado íntegro de las cuencas ubicadas en los Andes Ecuatorianos, ya que almacenan y proveen entre un 60 – 80% de agua dulce a todo el país (Buytaert et al., 2009; Schoolmeester et al., 2018). Así mismo, se evidencia una aceleración en la desglaciación de las zonas montañosas. Aproximadamente, en las últimas cuatro décadas, se estima que la mitad de los glaciares Ecuatorianos han desaparecido, siendo el indicador más visible de la afectación del cambio climático (Ceballos et al., 2014; Pouget et al., 2017). Algunas proyecciones realizadas en los Andes determinan que el umbral de congelación se reducirá algunos cientos de metros al finalizar este siglo, produciéndose un retroceso de los glaciares y estrés hídrico dentro de toda región (Kohler et al., 2014). Dentro de otros indicadores, el aumento de la dinámica poblacional y uso del suelo, afectan a la interacción natural de almacenamiento de precipitaciones en el suelo (Paturel et al., 2017).

Las alteraciones en el régimen anual de las precipitaciones impiden predecir una tendencia, lo que afecta directamente a la disponibilidad en las fuentes superficiales y producen una disminución del almacenamiento subterráneo (Vuille, 2013; Vuille et al., 2018). Por otro lado, al producirse incrementos de temperatura, disminuye la escorrentía superficial, lo que involucra una sobresaturación de los cuerpos de agua subterráneos (Buytaert & Bievre, 2012a). Además, el volumen de precipitaciones pueden variar por la influencia de los fenómenos atmosféricos y la localidad (Buytaert & Bievre, 2012b; Schoolmeester et al., 2018). Frente a los distintos fenómenos, alteraciones e implicaciones que ocasionará el Cambio Climático sobre los recursos hídricos, se han desarrollado algunas técnicas de simulación o modelaciones hidrológicas que permitirán predecir el comportamiento de la lluvia y la temperatura. (Serrano Vincenti et al., 2016; S. Wang & Zhang, 2011a). Según proyecciones climáticas de precipitación, se espera que estas aumenten, produciendo una mayor presencia de precipitaciones para el periodo entre 2011 - 2070, junto con la variabilidad climática que se asocia los eventos de El Niño y La Niña en América del Sur (Armenta et al., 2016; Grimm et al., 2000).

A medida que los efectos del cambio climático aumenten, incrementará la incertidumbre sobre los ciclos hidrológicos y, por ende, los recursos hídricos disponibles (S. Wang & Zhang, 2011b). La incertidumbre generada por el cambio climático a nivel mundial sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, la calidad del agua, los sistemas biológicos naturales, y sobre las actividades que su uso conlleva, aún no es posible de ser determinada (Useros, 2013). Por otra parte, es necesario conocer el comportamiento de los parámetros climatológicos dentro de una localidad para precisar el escenario climático influyente. Como en este caso, para el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) nos lleva al análisis de modelos climáticos globales (GCMs) cuyas proyecciones no son lo suficientes precisas como para permitir una proyección a nivel local del cambio climático (Yates et al., 2013). A medida que se van generando nuevas versiones y mejoras en los GCMs y mediante un análisis estadístico de las distintas variables climatológicas observadas, las simulaciones de estos modelos permitirán predecir las relaciones climáticas de un localidad o región en particular. (Buytaert et al., 2009). Los GCMs implementan estimaciones del clima regional, con características precisas tal como: temperaturas y precipitaciones diarias o mensuales, así como la orografía, que caractericen los escenarios de impacto climatológico a una escala más fina, que permita obtener una resolución espacial precisa (Fowler et al., 2007; Serrano Vincenti et al., 2016).

La modelación hidrológica busca representar ciertos eventos de lluvia, determinación de caudales, uso de suelo disponibilidad de agua en eventos esporádicos y continuos que se presenten a nivel regional o global, así como la utilización del promedio de los datos tomados de estaciones meteorológicas (Jorquera, 2012; Salathé et al., 2007). El análisis de datos estadístico-hidrológico son la respuesta para el planteamiento de estrategias y mitigación de los distintos escenarios de cambio climático futuros, mediante una evaluación del rendimiento del modelo aplicado, a través de simulaciones hidrológicas (Dibike & Coulibaly, 2007; H. M. Wang et al., 2020). En muchos casos, la diferencia en los resultados obtenidos, radica en la representación espacial o escala apropiada, en las proyecciones hidrológicas, y en la simulación a emplearse dependiendo de los eventos presentados (J. Chen et al., 2011). Existen una variedad de modelos, dentro de los cuales se encuentran modelos GR de precipitación-escorrentía, que se caracterizan por utilizar únicamente como datos de ingreso la precipitación y temperatura (Cabrera, 2012). En el presente trabajo se empleó el modelo GR2M que involucra un análisis global a tiempo mensual de lluvia-escorrentía. Este modelo tiene como función reconstruir la precipitación, y la evapotranspiración en base a la temperatura (Merz et al., 2009). Este es un modelo que simula caudales a intervalos de tiempo mensuales, y lo hace mediante la transformación

de la precipitación en escorrentía, empleando una función de producción y otra de transferencia (Cabrera, 2012).

Pregunta Científica

De acuerdo a la bibliografía revisada sobre el tema en estudio y en base a la metodología (Pérez et al., 2015) de cómo formular una adecuada pregunta de investigación, se plantea la siguiente interrogante:

¿Es posible que el modelo hidrológico lluvia-escorrentía de dos parámetros libres, sea el más apropiado y confiable, al momento de pronosticar la disponibilidad de agua para las condiciones climáticas futuras, tomando en cuenta la escasez de información a nivel regional?

1.1 Objetivo general

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación del modelo hidrológico (GR2M) lluvia-escorrentía, a escala mensual, para predecir la disponibilidad de los recursos hídricos, ante la variabilidad de los parámetros climatológicos en la cuenca alta del río Guayllabamba.

1.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo propuesto, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Describir los parámetros hidrológicos y consistencia de los datos de entrada para la aplicación del modelo lluvia-escorrentía GR2M.
2. Calibrar y validar el modelo climatológico lluvia-escorrentía, para los distintos subperiodos climáticos que se presentan.
3. Evaluar la eficiencia y analizar el comportamiento de las simulaciones del modelo hidrológico, aplicado a los distintos periodos.

1.3 Alcance

El propósito del presente trabajo investigativo fue evaluar la aplicabilidad del modelo hidrológico lluvia-escorrentía GR2M a escala mensual, en la cuenca del río Guayllabamba ubicada en la zona alto andina ecuatoriana. Para ello, se realizó la calibración y validación del modelo para una serie de tiempo mensual comprendida entre (1981 - 2000). El análisis fue dividido en dos subperiodos estacionales húmedo y seco, un periodo de referencia con toda la serie de datos, y un subperiodo del periodo de referencia, que se evaluaron para obtener el mejor modelo y los parámetros más óptimos que permitan describir el

comportamiento de los caudales en escenarios hidrológicos bajo la influencia del cambio climático. Primeramente, se seleccionaron los meses más lluviosos y secos de la serie temporal, para así establecer cuál de los subperiodos húmedo, seco o subperiodo del periodo de referencia, presentaba los parámetros más óptimos. Esto con el fin de generar una base de datos de entrada para cada subperiodo, en conjunto con el análisis de eficiencia estadística de Nash-Sutcliffe, que permite conocer si el ajuste realizado a cada subperiodo es de utilidad para estimar tanto condiciones máximas y mínimas de precipitaciones en los próximos años. Posteriormente, mediante el uso de la herramienta de análisis RStudio y aplicando el paquete de modelos AirGR, se realizó la calibración y validación para cada subperiodo. De esta modelación se esperó obtener el mejor escenario que se pueda replicar a futuro o que pueda ser trasladable a otras áreas de similares características al área del estudio. Además, se esperó que el modelo planteado permita predecir y evaluar las condiciones climáticas con una alta fiabilidad y eficiencia del modelo hidrológico aplicado.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Ciclo Hidrológico

Según (Ball, 2000) el ciclo hidrológico es un sistema que describe el movimiento del agua entre la atmósfera y la tierra, lo que indica que se convierte en un sistema continuo de circulación. Se puede describir también este ciclo desde el punto de vista global y terrestre, en donde el ciclo hidrológico terrestre está orientado hacia la producción o captación de recursos hídricos en un área determinada, conocida como cuenca fluvial, mientras que el global ocupa un papel más importante sobre el clima del planeta (Balasubramanian & Nagaraju, 1994).

1.4.2 Elementos del Ciclo Hidrológico

1.4.2.1 Precipitación

Se refiere a la condensación del vapor de agua presente en la atmósfera, la cual proviene de la evaporación del agua presente en los suelos, plantas, océanos y mares, y que reingresa al ciclo hidrológico en forma de lluvia, generando una escorrentía e infiltración en el suelo (Easton & Bock, 2015).

1.4.2.2 Temperatura

Es una propiedad que permite establecer el equilibrio térmico de un sistema. Esta es una variable que se asocia al tiempo o clima, con el fin de describir si hace frío o calor, siendo esta una sensación cuando un cuerpo o sistema gana o pierde calor (Inzunza, 2019).

1.4.2.3 Evaporación

Según Balasubramanian & Nagaraju, (1994), la evaporación es un proceso mediante el cual un sólido o líquido se convierte en gas. Dentro del ciclo hidrológico se habla de conversión en vapor de agua, la cual ocurre cuando se produce un aumento de temperatura y presencia de vientos constantes. Factores como la temperatura de aire, humedad relativa, radiación entrante, heliofanía y otras condiciones propias de la región afectan directamente a la evaporación (Balasubramanian & Nagaraju, 1994).

1.4.2.4 Transpiración

Según Easton & Bock, (2015), la transpiración es un proceso realizado por las plantas, en donde el agua es transportada desde el suelo hasta las hojas y que posteriormente se libera a la atmósfera. Esta se puede ver afectada por una baja humedad en el suelo, la cantidad y tamaño de vegetación, viento y heliofanía, ya que la mayor parte de la transpiración se produce durante el día (Balasubramanian & Nagaraju, 1994).

1.4.2.5 Evapotranspiración

Es una combinación de la evaporación del agua que está en el suelo, aguas superficiales e inclusive del hielo, junto con la transpiración que producen las plantas. (Easton & Bock, 2015) Al estar estas dos condiciones muy ligadas no es posible separarlas por lo cual se habla de la evapotranspiración, proceso que ocurre en mayor parte en los periodos de verano y de crecimiento de vegetación, tanto que hasta un 75% de agua puede regresar como evapotranspiración a la atmósfera (Balasubramanian & Nagaraju, 1994; Easton & Bock, 2015).

1.4.2.6 Humedad relativa

Es un término utilizado para explicar la relación existente entre el contenido de vapor de agua en el aire y la capacidad de vapor de agua del aire, en otras palabras, es una medida de la humedad del aire expresada en porcentaje como la cantidad máxima de vapor que el aire puede contener a una determinada temperatura (Balasubramanian & Nagaraju, 1994; Easton & Bock, 2015).

1.4.3 Cuencas hidrográficas

1.4.3.1 Definición de Cuenca hidrográfica

De acuerdo con Vásquez et al., (2016), una cuenca hidrográfica representa una área definida o delimitada por la orografía presente, con la capacidad de albergar las lluvias y drenar el agua hacia el punto más bajo, en otras palabras se describe como un sistema abierto donde ocurre el ciclo hidrológico.

1.4.3.2 Ciclo hidrológico en las cuencas

La dinámica del ciclo hidrológico en las cuencas alto andinas está influenciada por la presencia de la Cordillera de los Andes, la Amazonía y la presencia de los océanos, estos

factores afectan a disponibilidad de agua y se hace evidente en las partes bajas de la cuenca (Vásquez et al., 2016). Lo más importante es estudiar el movimiento del agua tanto vertical como horizontal en todas sus fases y entre los componentes que involucran el ciclo hidrológico se encuentran: la atmósfera, y la superficie de la tierra. Sin embargo, los factores del ciclo hidrológico en las zonas altoandinas también realizan los mismos procesos de: condensación, precipitación, escorrentía, transpiración, evaporación. Cada uno de estos factores se relacionan con las condiciones del páramo andino (Borja et al., 2012).

1.4.3.3 Lluvias en las cuencas alto andinas

Las lluvias en las cuencas alto andinas son producida por el relieve de las zonas, producidas por el ascenso de las nubes hacia las zonas altas y frías, proceso llamado “valle-montaña”, estas lluvias son generalmente de larga duración, pero de baja intensidad, en muchos de los casos las precipitaciones son uniformes a lo largo de todo el año (Borja et al., 2012). Además, el 97% de agua que es utilizada en las distintas actividades en todo el país es generada por la presencia de los páramos ubicados a lo largo de la Cordillera de los Andes (Borja et al., 2012; Vásquez et al., 2016).

1.4.4 Flujo de agua en la atmósfera

1.4.4.1 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial puede ocurrir cuando se excede la capacidad de retención del suelo, y las lluvias se presentan a una mayor intensidad, entonces como el agua no se infiltra, esta se va acumulando en la superficie y posteriormente se escurre hacia las quebradas formando un cauce de río. Dentro de los ecosistemas altoandinos, la escorrentía es producida por la geología de los páramos (Borja et al., 2012).

1.4.4.2 Escorrentía subsuperficial

Ocurre en zonas que presentan suelos permeables, capaces de infiltrar mayor cantidad de agua en presencia de precipitaciones constantes y de baja intensidad, además es escurrida a poca profundidad bajo la superficie del suelo (Borja et al., 2012).

1.4.4.3 Escorrentía subterránea

Es conocida como el flujo base en las zonas acuíferas que pertenecen a una cuenca hidrográfica, y fluye permanentemente desde acuíferos profundos hacia los ríos (Borja et al., 2012).

1.4.5 Régimen climático en la región andina de Ecuador

1.4.5.1 Variabilidad estacional y espacial de la lluvia

La distribución de las estaciones año tras año en toda la región Sudamericana está bajo la influencia de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), las corrientes de aire cargadas de humedad provenientes del océano Pacífico, la provenientes de la Amazonía, que

conjuntamente por la presencia de la cordillera de los Andes influyen en esta distribución espacial de las precipitaciones y en su periodo de ocurrencia anual (Andrade & Ríos, 2019). Al fenómeno de El Niño que ocurre cada año y afecta a toda la región de América Latina, se le atribuyen estos cambios climáticos y anomalías hidrológicas, junto con las variaciones de lluvias de intensas especialmente en la zona costera (Andrade & Ríos, 2019; Vuille et al., 2018).

En cambio, los lugares localizados en la zona interandina, entre las cordilleras interandinas, tienen la influencia de corrientes tanto oceánicas como continentales, con una distribución periódica que establece periodos húmedos comprendidos entre febrero-mayo y octubre – noviembre, y dos periodos secos junio – septiembre y diciembre – enero, siendo los primeros periodos los más notables de cada condición climática. Sin embargo, la media de climática en la zona andina ha variado considerablemente desde el siglo pasado, en cuanto a temperatura se observó incremento entre 1939 – 2006 de aproximadamente 0.7 °C, lo que se refleja en la pérdida de los glaciares. (Andrade & Ríos, 2019; Ceballos et al., 2014; Vuille et al., 2018).

1.4.6 Modelo Hidrológico

Un modelo hidrológico involucra la distribución de precipitaciones y generación de caudales, que busca establecer una aproximación mediante el uso de ecuaciones que transforman las entradas y salidas, asemejando un sistema real para una cuenca determinada cuenca. El objetivo es estudiar de los recursos hídricos como un sistema continuo, que permita predecir su comportamiento, a través de múltiples modelos que involucran distintas condiciones en base a los componentes que se requieren analizar (Jorquera, 2012; Rincón, 2019).

1.4.7 Modelos GR

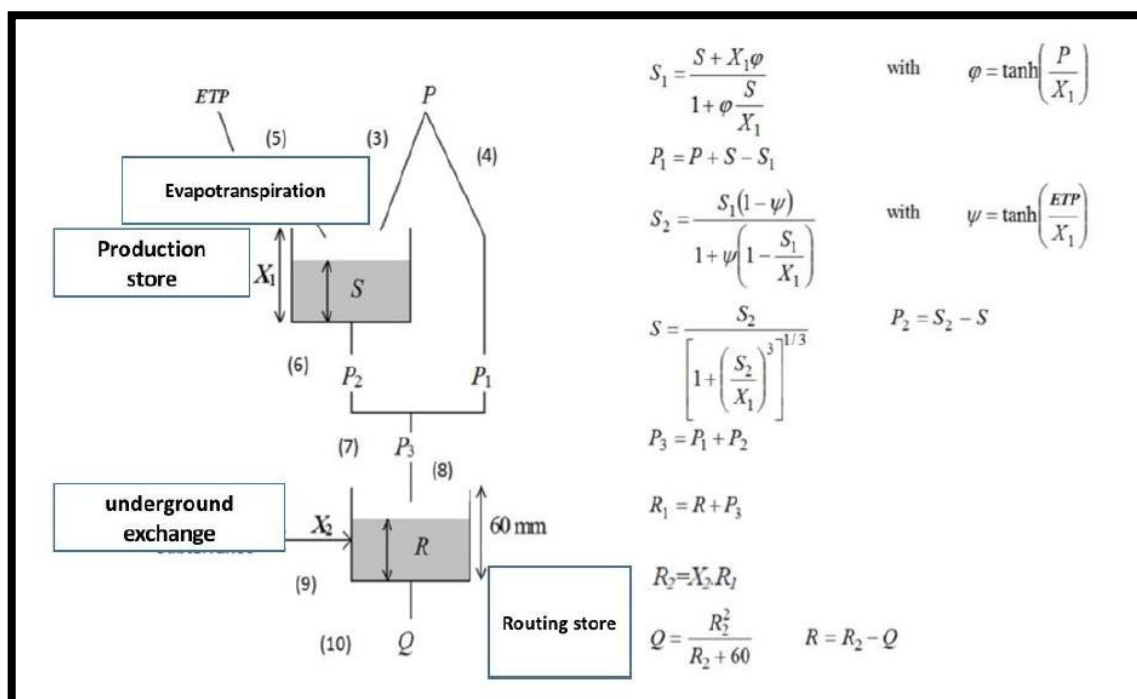
El paquete airGR está incluido en R, que contiene un grupo modelos GR de lluvia-escorrentía, desarrollados en Francia (Mouelhi, 2003). Los modelos GR fueron lanzados por Claude Michel en inicios de 1980, basándose en el mismo enfoque de Nash y Sutcliffe realizado en 1970, que consistía realizar pruebas empíricas e ir aumentando la complejidad del modelo hasta alcanzar un mejor rendimiento, estos modelos fueron desarrollados para tiempos de análisis específicos anual, mensual, diario y horario, cada uno de ellos con su complejidad establecida en término del número de parámetros libres y datos de precipitación y temperatura para su entrada. Dentro de este grupo existen varias versiones: *GR1A*, para simular caudales anuales; *GR2M*, para simular caudales mensuales; *GR3J* y *GR4J*, para simular caudales diarios (Cabrera, 2012; Coron et al., 2017).

2 METODOLOGÍA

2.1 Aplicabilidad del modelo

En relación con la incertidumbre del régimen de precipitaciones dentro de las zonas andinas a causa del aumento de temperatura provocado por efectos del cambio climático (Vormoor et al., 2015), se han diseñado modelos hidrológicos y algoritmos de calibración que permiten obtener predicciones sobre la distribución de los recursos hídricos (H. Chen et al., 2012; Coron et al., 2017; Graham et al., 2007). En el caso del presente trabajo se eligió el modelo GR2M, que es un modelo de lluvia escurrentía elaborado por (Mouelhi et al., 2006). Su estructura asocia la reserva de producción, reserva de enrutamiento y una apertura al medio externo que difiere del atmosférico, permitiendo simular el comportamiento hidrológico dentro de una cuenca (Dounia et al., 2014).

En la **figura 2.** se puede observar un esquema de la estructura del modelo GR2M



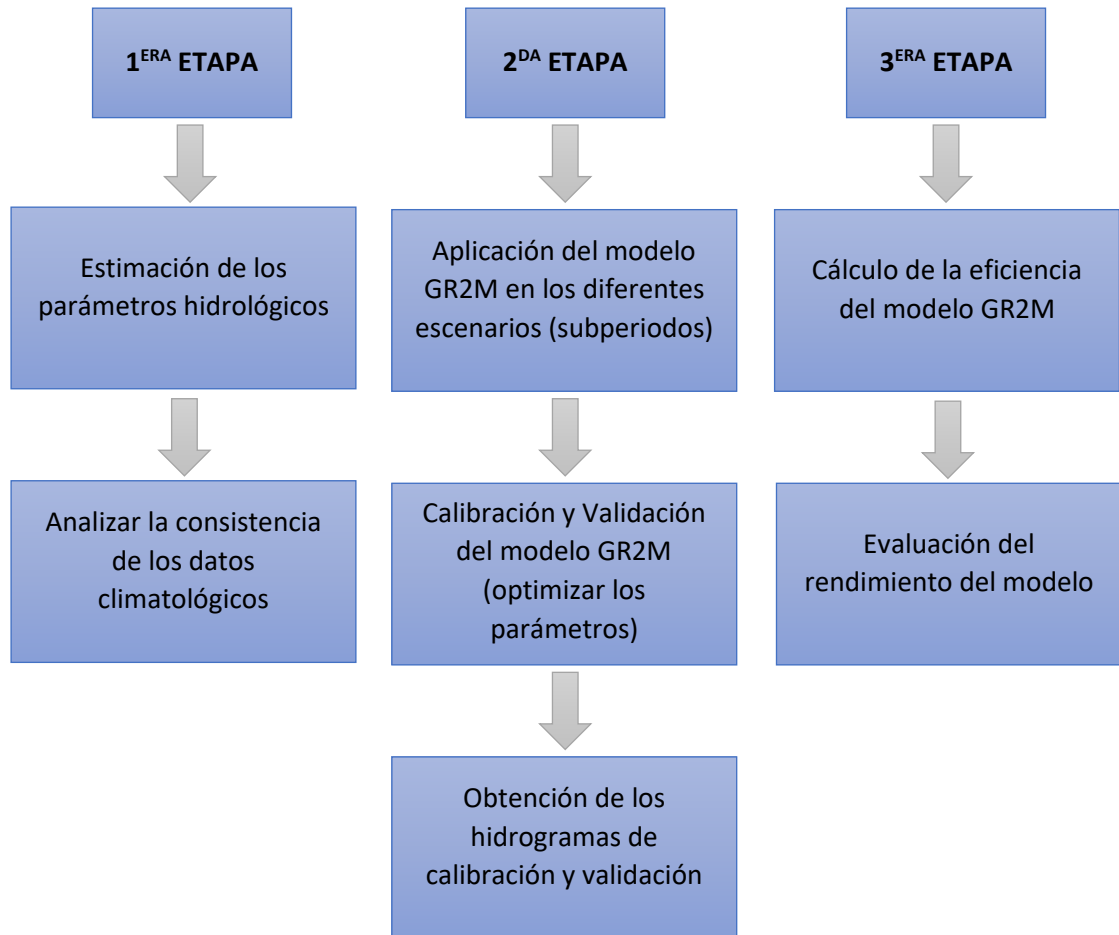
Fuente: (Zubieta et al., 2018).

El modelo GR2M posee dos parámetros X_1 , X_2 definidos como máxima capacidad de almacenamiento del reservorio en (mm) y coeficiente de intercambio de agua subterránea (adimensional), respectivamente, además, estos parámetros deben ser ajustados en las mismas proporciones (Lespinas et al., 2014). Las variables de estructura del modelo son: P que es precipitación media de la cuenca, P_1 es la evapotranspiración, P_2 la percolación

profunda, S es el reservorio de agua gravitacional al inicio del análisis y Q el caudal de salida final de la cuenca (Arévalo et al., 2011; Cruz & Romero, 2018). Para la simulación se necesitan variables de precipitación media, temperatura (mínima, media y máxima) y caudales medios mensuales en un rango mínimo de 10 años, con la finalidad de que sean suficientes y obtener una mayor precisión (Llauca, 2019; Mamani, 2020; Rincón, 2019).

La calibración para modelo GR2M está basada en la maximización de la magnitud de la eficiencia del criterio de Nash-Sutcliffe (NSE) (Lespinas et al., 2014; Okkan & Fistikoglu, 2014). Este criterio compara la desviación cuadrática media de las raíces del flujo observado con la varianza del flujo simulado (Hadour et al., 2020; Seiller et al., 2017), que consiste en igualar los eventos de alto flujo entre los valores observados y simulados, permitiendo verificar la capacidad del modelo para producir caudales medios, mínimos y máximos (Traore, 2014; Vormoor et al., 2015). Este proceso identifica los valores de los parámetros del modelo, donde la serie de datos simulados se ajusta y optimiza a la serie de datos observados (Buguña, 2019). En este sentido, la validación consiste en demostrar que el modelo puede ser replicado en un periodo de tiempo diferente al calibrado y este se considera válido si las condiciones futuras son similares a las actuales (Mamani, 2020). También se puede realizar un muestreo doble o dividido, donde se subdivide el periodo de observación en subperiodos con calibración sobre uno de ellos y validación sobre las demás observaciones, reservando un periodo de inicio (Hadour et al., 2020). Así también, se pueden realizar varias pruebas de calibración para un periodo X y validación para un periodo Y en cortos periodos dentro de la base de datos que se analizará, por otra parte, se puede calibrar para el periodo Y, mientras se valida para el periodo X, ajustando los parámetros hidrológicos (Louvet et al., 2016).

2.2 Esquema Metodológico para la aplicación del modelo GR2M



Elaboración Propia. *Fuente:* (Bugüña, 2019; Mamani, 2020; Rincón, 2019).

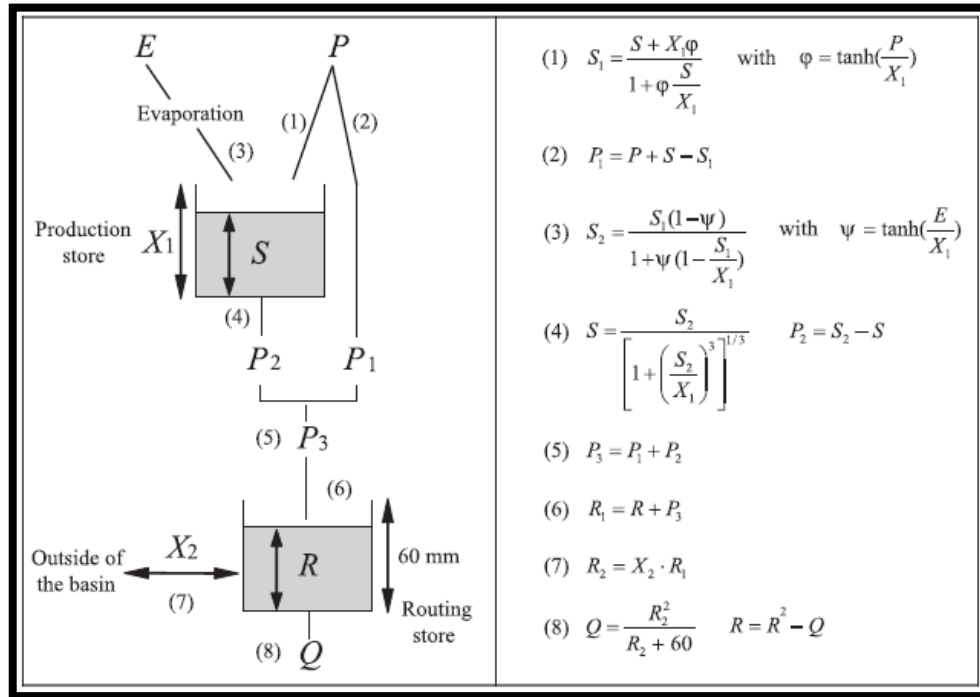
2.2.1 Modelo GR2M

El modelo agregado de paso de tiempo mensual GR2M se desarrolló por primera vez por Makhoul y Michel en 1994, en Francia donde se comparó el desempeño frente a otros modelos hidrológicos en varias cuencas de la misma localidad, presentando una mejor aproximación y desempeño. Este modelo agrupa de manera conceptual, la temporalidad, y espacialidad de los procesos hidrometeorológicos, mediante el análisis de una función de producción o almacenamiento y una función de transferencia que transforman la precipitación entrante en un área o cuenca en escorrentía (Cabrera, 2012; Lespinas et al., 2014).

2.3 Descripción del modelo GR2M

Para el desarrollo de la descripción del modelo GR2M se presenta el esquema en la **figura 1**.

Figura1. Esquema del modelo GR2M con sus respectivas ecuaciones



Fuente: (Lespinas et al., 2014).

La estructura del modelo posee dos reservorios: reservorio de almacenamiento en el suelo (S) y reservorio gravitacional (R), como se muestra en la siguiente figura. En donde se presenta la estructura del modelo GR2M y sus principales procesos hidrológicos, de donde se obtiene la escorrentía que será empleada por el modelo. Este esquema se lee: P como la precipitación media, P_1 la escorrentía superficial, P_2 la percolación, E la evapotranspiración, S almacenamiento en el reservorio inicial para cada periodo, R el almacenamiento en el reservorio gravitacional inicial para el periodo en análisis, Q caudal de salida de la cuenca. La máxima capacidad del reservorio de almacenamiento en el suelo X_1 y la del reservorio gravitacional se asume 60 mm (Cabrera, 2012).

2.3.1 Función de Producción

En la figura anterior se puede observar que parte de la precipitación es absorbida por el reservorio suelo y otra (P_1) se dirige al reservorio de agua gravitacional. El nuevo volumen de agua en el reservorio suelo (S_1) se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{S+X_1\varphi}{1+\varphi\frac{S}{X_1}} \quad (1)$$

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

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (1.1)$$

Si en el sistema no existe perdidas el volumen de agua debe ser el mismo antes de infiltrarse, tenemos:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2)$$

En consecuencia, el reservorio suelo se verá afectado por la evapotranspiración, reflejando un volumen S_2 , que se calcula:

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1+\psi(1-\frac{S}{X_1})} \quad (3)$$

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

Continuando la transferencia para de S_2 , se transfiere al gravitacional (R), y el restante vuelve a formar parte del volumen inicial S, quedando:

$$S = \frac{S_2}{\left(1+\left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

Finalmente, la percolación de P_2 , se estima:

$$P_2 = S_2 - S \quad (4.1)$$

2.3.2 Función de Transferencia

Conociendo el volumen de percolación, la precipitación efectiva que ingresa al reservorio de agua gravitacional R se calcula (P_3):

$$P_3 = P_1 - P_2 \quad (5)$$

Entonces el nuevo nivel del reservorio gravitacional R es:

$$R_1 = R - P_3 \quad (6)$$

Sin embargo, este debe ser corregido mediante un factor X_2 debido a que existe un intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial:

$$R_2 = X_2 - R_1 \quad (7)$$

En consecuencia, el reservorio de agua gravitacional R es vaciado siguiendo una función cuadrática, obteniendo el caudal de salida:

$$Q = \frac{(R_2)^2}{R_2 + 60} \quad (8)$$

Es evidente que todos los volúmenes, son dependientes de las dos variables o parámetros que deben ser optimizados: X_1 y X_2 , en donde:

X_1 : capacidad de reservorio o almacenamiento en el suelo (*mm*)

X_2 : coeficiente de intercambio de agua subterránea (*adimensional*)

Finalmente, el nivel en el tanque transitorio para el inicio del próximo mes se calcula:

$$R = (R_2)^2 - Q \quad (9)$$

2.4 Calibración

Es un proceso mediante el cual se eligen el grupo de parámetros del modelo, ajustando la serie de datos simulados a la serie de datos observados, para evaluar este ajuste el modelo emplea una “función objetivo” que comúnmente es la medida de bondad de ajuste como puede ser el coeficiente de correlación, eficiencia de Nash-Sutcliffe, entre otros, o también una combinación de estas que la transformaría en función “multiobjetivo”, y la aplicación exitosa de un modelo hidrológico, depende exclusivamente de la calibración del modelo (Cabrera, 2012; Traore, 2014).

2.5 Validación

La validación de un modelo se basa en emplear indicadores estadísticos para verificar si su replicabilidad y la capacidad predictiva para una zona específica, pero en periodos fuera del periodo de calibración, y a su vez muestra errores dentro de los límites aceptables. (Cabrera, 2012; Traore, 2014).

2.6 Eficiencia de Nash-Sutcliffe

Este criterio es uno de los más usados en Hidrología, debido a la capacidad de reproducir caudales máximos, mínimos y promedio (Seiller et al., 2017). Definido como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (10)$$

La ecuación (10) se lee: Q_{sim} : caudal simulado, Q_i : caudal observado, \bar{Q} : caudal medio observado. Esta ecuación fue diseñada para medir que porcentaje de variabilidad en las observaciones son representadas en simulación (Dounia et al., 2014; Seiller et al., 2017). Una simulación perfecta es cuando, $E = 1$, pero, si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E = 0$ (Cabrera, 2012).

Tabla 1. Rango de valores obtenidos aplicando el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe:

Criterio de NSE	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Elaboración propia. Fuente: (Cruz & Romero, 2018)

En la **Tabla 1.** se observa cinco rangos de valores que permiten caracterizar la eficiencia de ajuste de los datos observados, desde valores inferiores a 0.2 que denotaría una insuficiencia en el ajuste, hasta valores por sobre 0.8 como un excelente ajuste.

3 RESULTADOS, ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Para llevar a cabo la evaluación de los escenarios climáticos se realizó una representación de los caudales observados y simulados mediante la aplicación del modelo hidrológico conceptual GR2M, permitiendo así visualizar los efectos que produce la variabilidad de temperatura y las precipitaciones en la generación de caudales. A pesar de relacionar únicamente dos parámetros libres, este modelo ha demostrado presentar una excelente funcionalidad ante otros modelos similares, donde algunos cuentan hasta con cinco parámetros libres (Okkan & Fistikoglu, 2014).

Tabla 3.1. Ejemplo de los datos para la entrada del modelo GR2M (1981, 2000)

FECHA	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)
Sep-81	28,89	82,08	20,90
Oct-81	79,44	85,15	17,12
Nov-81	87,04	79,73	27,60
Dec-81	111,61	83,19	33,44
Jan-00	143,50	79,03	100,06
Feb-00	159,38	71,87	105,89
Mar-00	178,19	83,04	144,75
Apr-00	185,59	78,68	144,87
May-00	186,06	76,94	141,21
Jun-00	93,57	71,70	82,30
Jul-00	23,98	75,03	43,60
Aug-00	13,47	80,64	30,73
Sep-00	93,77	78,40	33,98
Oct-00	39,47	87,49	27,84

La **Tabla 3.1.** presenta un ejemplo de los datos de entrada al modelo GR2M que fueron: la precipitación (*mm*), evapotranspiración (*mm*) y caudal (*mm*) y en la **Tabla del ANEXO I** se encuentra la serie de datos completa.

3.1.1 Calibración y Validación del modelo hidrológico GR2M

Se considera el año hidrológico comprendido entre septiembre hasta agosto de cada año, para realizar tanto la calibración como validación del modelo. Además, los valores obtenidos están realizados bajo el siguiente criterio: para la calibración se utilizaron los 2/3 del total del subperiodo seleccionado, mientras que para la validación el 1/3 restante de dicho subperiodo. Estas consideraciones fueron aplicadas para cada uno de los subperiodos, establecidos de la siguiente manera: un subperiodo húmedo, considerando

los años más lluviosos comprendidos entre (1983-1984, 1984-1985, 1989-1990, 1993-1994, 1994-1995, 1996-1997, 1999-2000), un subperiodo seco, que considera los años más secos que comprendidos entre (1985-1986, 1987-1988, 1988-1989, 1990-1991, 1991-1992, 1992-1993, 1995-1996), y otro subperiodo del periodo de referencia comprendido entre (1983-2000) y finalmente se realizó únicamente la calibración para un periodo de referencia que contiene el rango completo de la serie de datos, comprendidos entre (1981-2000). Además, los años de inicialización para cada subperiodo fueron los siguientes, para subperiodo del periodo de referencia, subperiodo húmedo y periodo de referencia fueron (1981/09 – 1982/08), mientras que para el subperiodo seco se tomó (1985/09 – 1986/08) por ser un año seco.

Los parámetros $X_1 = 6$ y $X_2 = 1$, se aplicaron de bibliografía para realizar la inicialización de la simulación y se aplicó una transformación exponencial a X_1 para obtener el valor real para la entrada en la simulación del modelo GR2M.

Tabla 3.2. Parámetros de inicialización del modelo

Parámetros del modelo	Valor a transformar	Real
X_1 : Capacidad de almacenamiento (mm)	6	403,4287935
X_2 : Parámetro de intercambio	1	1

La **Tabla 3.2.** presenta los valores de X_1 y X_2 capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y parámetro de intercambio, respectivamente. Así como, el valor de X_1 a transformar exponencialmente para finalmente obtener el valor real de X_1 y X_2 que ingresaron al modelo.

Así también, se aplicó el criterio de Nash-Sutcliffe para determinar qué tan eficiente era el modelo antes de realizar la optimización de los parámetros para cada subperiodo en estudio.

Tabla 3.3. Criterio de Nash-Sutcliffe previo a la optimización de los parámetros

Año Hidrológico	Crit. NSE[Q]
Periodo de referencia	0.1861
Subperiodo del periodo de referencia	0.1861
Subperiodo húmedo	0.3546
Subperiodo seco	-0.8984

La **Tabla 3.3.** presenta los valores de eficiencia del criterio de Nash-Sutcliffe, obtenidos luego de la simulación inicial para cada subperiodo y periodo analizado.

De las calibraciones de los distintos subperiodos establecidos, mediante la aplicación del modelo GR2M se obtuvieron los valores presentados en la siguiente tabla:

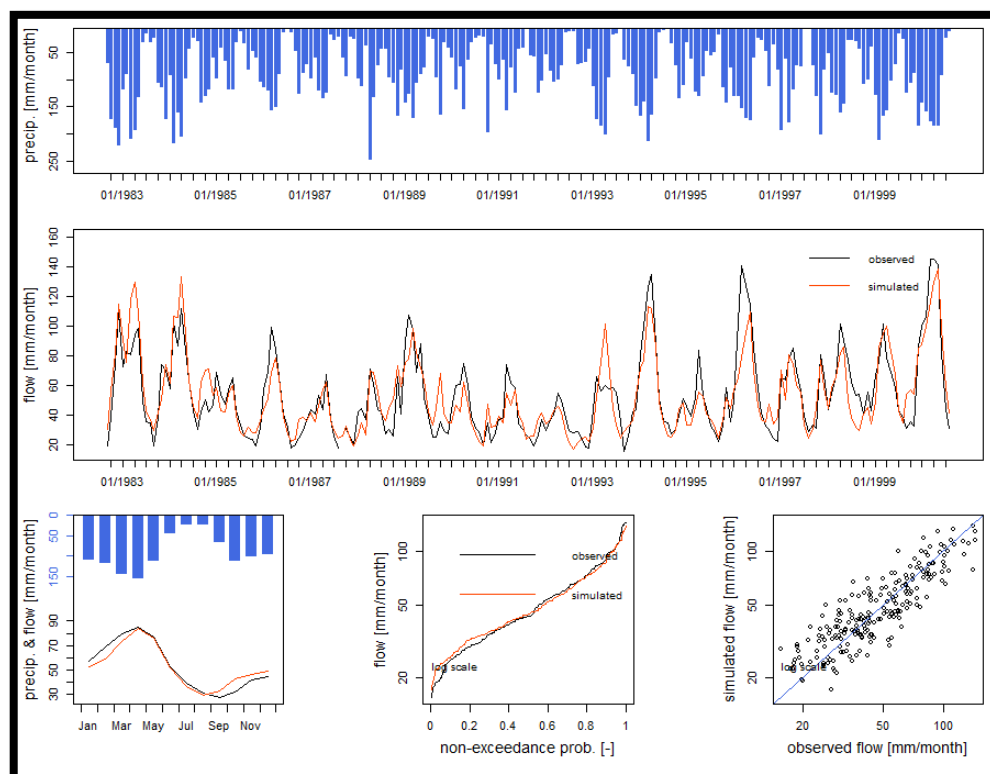
Tabla 3.4. Valores de los parámetros obtenidos de la calibración del modelo

VALORES OBTENIDOS CALIBRACIÓN					
Año Hidrológico		Periodo de referencia	Subperiodo del periodo referencia	Subperiodo húmedo	Subperiodo seco
Param	X_1	1737.148	2059.050	1853.79	3124.664
	X_2	1.23	1.192	1.163	1.191
Crit. NSE[Q]		0.7607	0.7524	0.7216	0.6093
Años de Cal		83 - 2000	83 - 94	83-84 , 84-85, 89-90, 93-94, 94-95	87-88, 88-89, 90-91, 91-92

La **tabla 3.4.** presenta un resumen de los valores de los parámetros X_1 , X_2 , obtenidos para cada subperiodo luego de la calibración, el valor del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe luego de la calibración, así como los años en los cuales se realizó cada calibración. Además, de los valores de los mismos parámetros para el periodo de referencia total.

A continuación, se presentan los gráficos obtenidos de la modelación para el periodo de referencia, que servirá como base de comparación con los demás subperiodos simulados, véase el **ANEXO II** para las figuras de las otras simulaciones.

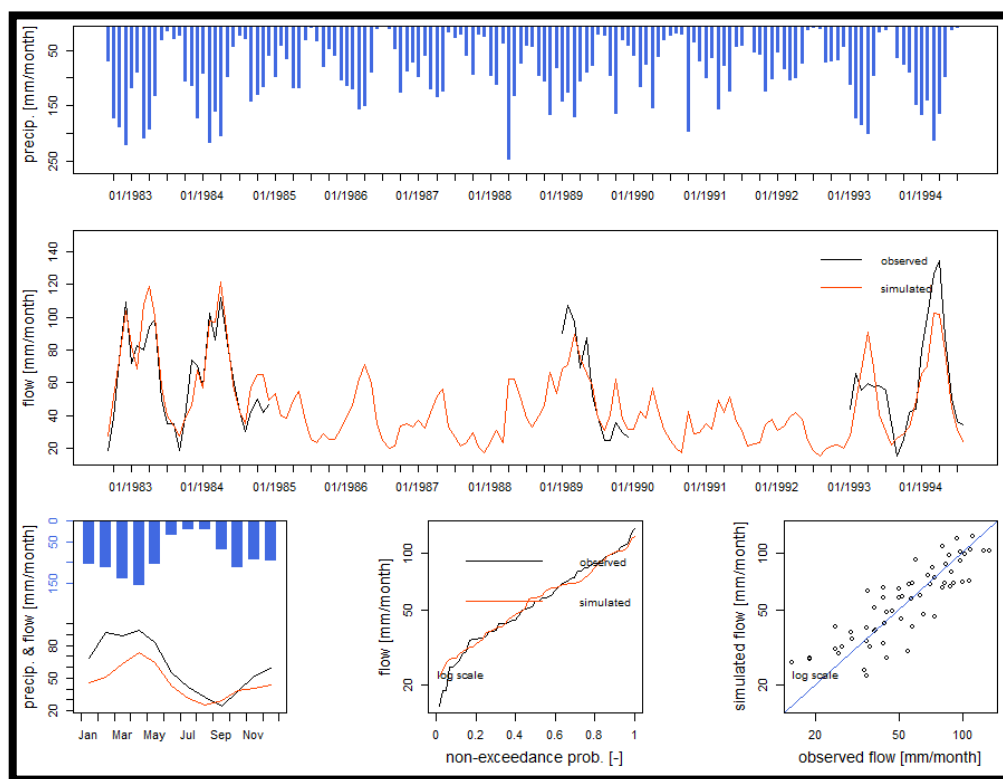
Figura 3. Calibración del periodo de referencia entre los años (1983-2000)



En la **figura 3.** se observa las precipitaciones para el periodo de referencia (1983 - 2000), representadas en un hidrograma que simula los caudales observados y simulados, calibrados, de donde se obtienen los siguientes valores de X_1 , X_2 , presentados en la **Tabla 3.4.** Así también, las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y flujo anual, la probabilidad de no excedencia del flujo mensual y finalmente la correlación de los caudales observados frente a los simulados.

Además, a manera de ejemplo el gráfico obtenido de la modelación para el subperiodo húmedo:

Figura 4. Calibración del subperiodo húmedo entre los años (1983 - 1994)



En la **figura 4.** se observa las precipitaciones para el subperiodo húmedo (1983 - 1994), que contiene los meses más lluviosos, representados en un hidrograma que simula los caudales observados y simulados, calibrados, de donde se obtienen los siguientes valores de X_1 , X_2 , presentados en la **Tabla 3.4.**, conjuntamente con las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y caudal en un año, la probabilidad de no excedencia del caudal mensual y finalmente la correlación de los caudales observados frente a los simulados.

En seguida se presentan los valores del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenidos luego de validar las calibraciones realizadas para cada subperiodo.

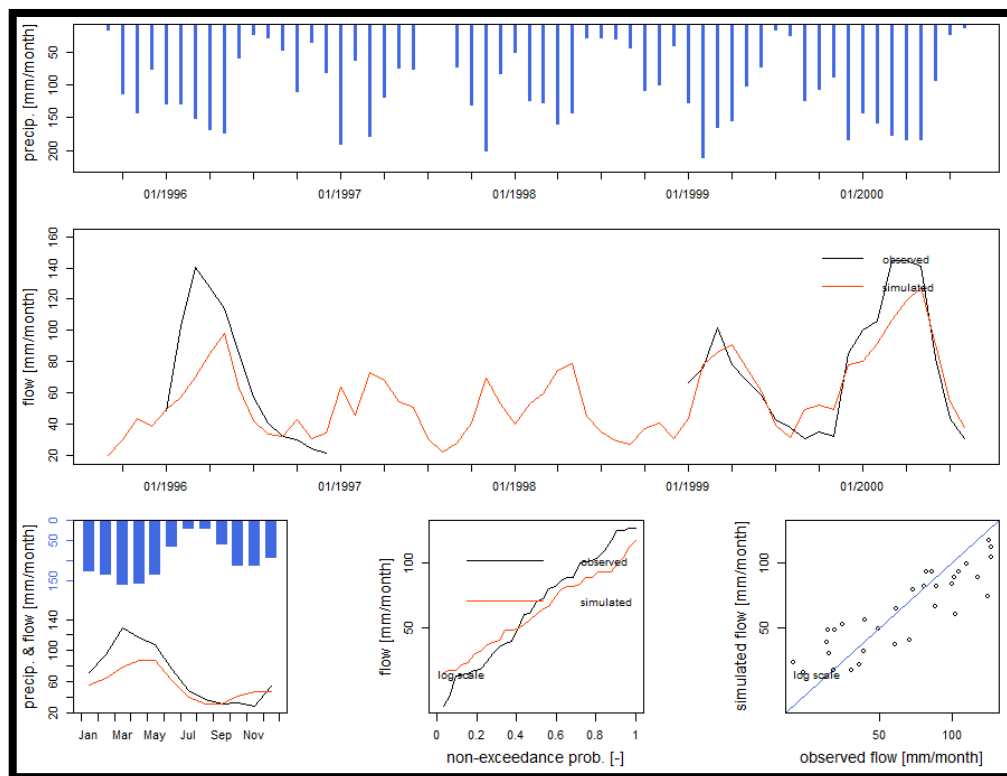
Tabla 3.5. Valores de los parámetros obtenidos de la validación del modelo

VALORES OBTENIDOS VALIDACIÓN				
Año Hidrológico		Subperiodo del periodo referencia	Subperiodo húmedo	Subperiodo seco
Param	X_1	2059.050	1853.79	3124.664
	X_2	1.192	1.163	1.191
Crit. NSE[Q]		0.7185	0.6837	0.6622
Años de Val		95 - 2000	96-97, 99-2000	92-93, 95-96

La **tabla 3.5.** presenta un resumen de los valores de los parámetros X_1 , X_2 , obtenidos para cada subperiodo luego de la calibración, el valor del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe luego de la validación, así como los años en los cuales se realizó la validación de cada subperiodo calibrado anteriormente.

En consecuencia, a la **Tabla 3.5.** se presenta la gráfica de validación para el subperiodo húmedo.

Figura 5. Validación del subperiodo húmedo para los años (96-97, 99-2000)



En la **figura 5.** se observa las precipitaciones para los años los años (96-97, 99-2000) del subperiodo húmedo, empelados para validar la calibración, representados en un hidrograma que simula los caudales observados y simulados, validados, de donde se obtienen los siguientes valores de X_1 , X_2 , $Crit. NSE[Q]$, presentados en la **Tabla 3.5.**, junto con las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y caudal en un año, la probabilidad de no excedencia del caudal mensual y finalmente la correlación de los caudales observados frente a los simulados.

3.1.2 Calibración y Validación inversa del modelo hidrológico GR2M

Se realizó bajo las mismas consideraciones anteriormente mencionadas. El año hidrológico tanto para la calibración como validación del modelo, no obstante, los valores obtenidos están realizados bajo el siguiente criterio. Los valores usados anteriormente para la calibración que fueron los 2/3 del total del subperiodo seleccionado, ahora se utilizará para la validación, mientras el 1/3 empleado en la validación ahora se utilizará en la calibración para cada uno de los subperiodos. Cabe recalcar que criterio de Nash-Sutcliffe para determinar la eficiencia del modelo antes de realizar la optimización de los parámetros para cada subperiodo en estudio, fueron los mismos.

A continuación, se presentan las tablas resumen de la calibración y validación, respectivamente:

Tabla 3.6. Valores de los parámetros obtenidos de la calibración inversa del modelo

VALORES OBTENIDOS CALIBRACIÓN INVERSA					
Año Hidrológico		Periodo de referencia	Subperiodo del periodo de referencia	Subperiodo húmedo	Subperiodo seco
Param	X_1	1737.148	1248.877	870.958	906.871
	X_2	1.23	1.29	1.261	1.365
Crit. NSE[Q]		0.7607	0.7883	0.8017	0.7105
Años de Cal		83 - 2000	95 - 2000	96-97, 99-2000	92-93, 95-96

La **tabla 3.6.** presenta un resumen de los valores de los parámetros X_1 , X_2 , obtenidos para cada subperiodo luego de la calibración inversa, el valor del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe luego de la calibración, así como los años en los cuales se realizó la calibración para los subperiodos. Además, de los valores de los mismos parámetros para el periodo de referencia total.

Tabla 3.7 Valores de los parámetros obtenidos de la validación inversa del modelo

VALORES OBTENIDOS VALIDACIÓN INVERSA				
Año Hidrológico		Subperiodo del periodo de referencia	Subperiodo húmedo	Subperiodo seco
Param	X_1	1248.877	870.958	906.871
	X_2	1.29	1.261	1.365
Crit. NSE[Q]		0.6549	0.8070	0.2493
Años de Val		83 - 94	83-84 , 84-85, 89-90, 93-94, 94-95	87-88, 88-89, 90-91, 91-92

La **tabla 3.7.** presenta un resumen de los valores de los parámetros X_1 , X_2 , obtenidos para cada subperiodo luego de la calibración inversa, el valor del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe luego de la validación inversa, así como los años en los cuales se realizó la validación de cada subperiodo.

3.1.3 Simulación para los escenarios de vías de concentración representativa RCP 4.5 y RCP 8.5 empleando el par de parámetros X_1 y X_2 , más eficientes obtenidos de las calibraciones realizadas previamente.

Para caracterizar los posibles escenarios futuros se seleccionó únicamente el par de parámetros de todas las calibraciones realizadas anteriormente, presentadas en las **Tabla 3.4.** que fueron previamente validadas, véase en la **Tabla 3.5.**, que corresponden a los periodos de referencia y subperiodo húmedo.

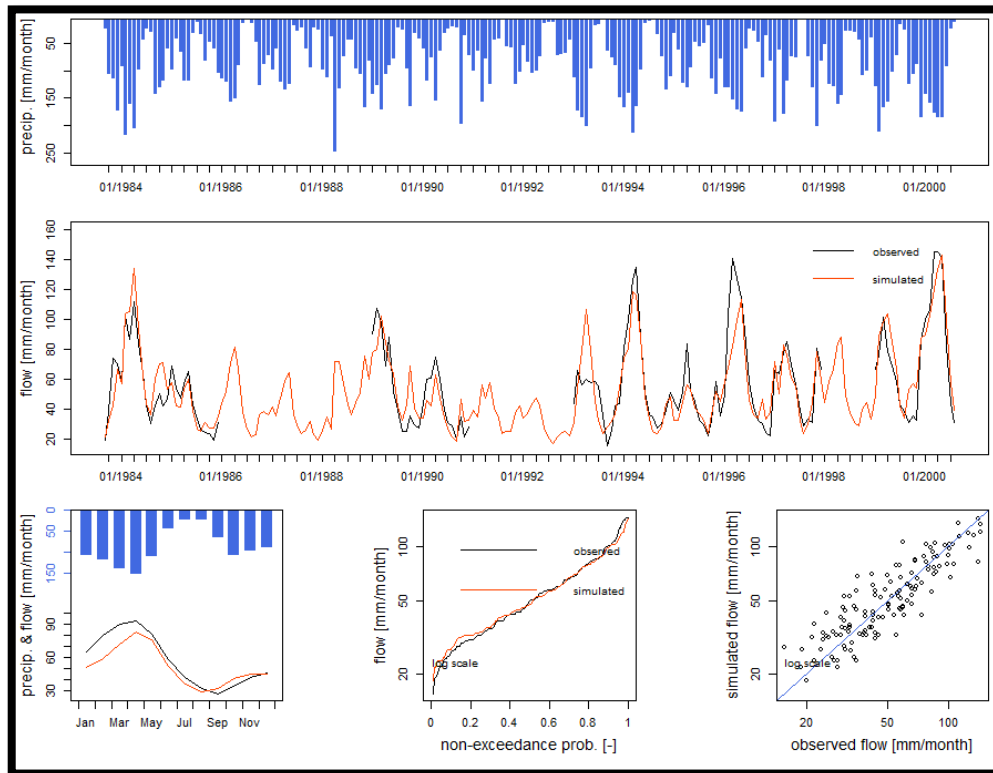
Tabla 3.8. Valores de los parámetros obtenidos de la calibración

Valores de la Calibración			
Año Hidrológico		Periodo de referencia	Subperiodo húmedo
Param	X_1	1737.148	1529.12386
	X_2	1.23	1.24677
Crit. NSE[Q]		0.7607	0.7754
Años de Cal		83 - 2000	83- 84, 84-85, 89-90, 93-94, 94-95, 96-97, 99-2000

La **Tabla3.8.** presenta los valores de los parámetros X_1 y X_2 obtenidos de una nueva calibración en donde se incluyen todos los periodos húmedos de la serie de datos observados entre (1983-2000) y para el periodo de referencia antes realizado.

De acuerdo con la **Tabla 3.8.** las gráficas correspondientes son **Figura 3.** Presentada anteriormente y la figura, a continuación:

Figura 6. Calibración del periodo húmedo para periodo comprendido entre (1984-2000)



En la **figura 6.** se observa las precipitaciones para los años los años (1984-2000) del subperiodo húmedo, representados en un hidrograma que modela los caudales observados y simulados, que fueron previamente calibrados, de donde se obtienen los siguientes valores de X_1 , X_2 , $Crit.NSE[Q]$, presentados en la **Tabla 3.8.**, junto con las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y caudal en un año, la probabilidad de no excedencia del caudal mensual y finalmente la correlación de los caudales observados frente a los simulados.

La tabla siguiente presenta los caudales promedios de las simulaciones del periodo de referencia y subperiodo húmedo.

Tabla 3.9. Valores de caudal promedio obtenidos de la simulación para el periodo de tiempo (1983 - 2000)

Valores de la simulación (1983-2000)			
Año Hidrológico		Periodo de referencia	Subperiodo húmedo
Param	X_1	1737.148	1529.12386
	X_2	1.23	1.24677
Promedio Qsim		51.21672	51.66617
Años de Cal		83 - 2000	83 - 2000

La **Tabla 3.9.** presenta los valores del caudal promedio obtenidos de la simulación para el periodo de referencia y subperiodo húmedo, con los parámetros X_1 y X_2 de la nueva calibración.

A continuación, se presenta las tablas con los valores de los caudales promedio de las simulaciones, RCP 4.5 y RCP 8.5.

Tabla 3.10. Valores de caudal promedio obtenidos de la simulación para el periodo de tiempo (2011 - 2070) en el escenario RCP 4.5

Valores de la simulación (2011 - 2070) escenario RCP 4.5			
Año Hidrológico		Periodo de referencia	Subperiodo húmedo
Param	X_1	1737.148	1529.12386
	X_2	1.23	1.24677
Promedio Qsim (mm/mes)		68.37994	68.98209
Años de Sim		2011 - 2070	2011 - 2070

La **Tabla 3.10.** presenta los valores de los caudales obtenidos de la simulación para el escenario RCP 4.5, en el periodo de tiempo futuro (2011 - 2070).

De igual forma se presenta la siguiente tabla:

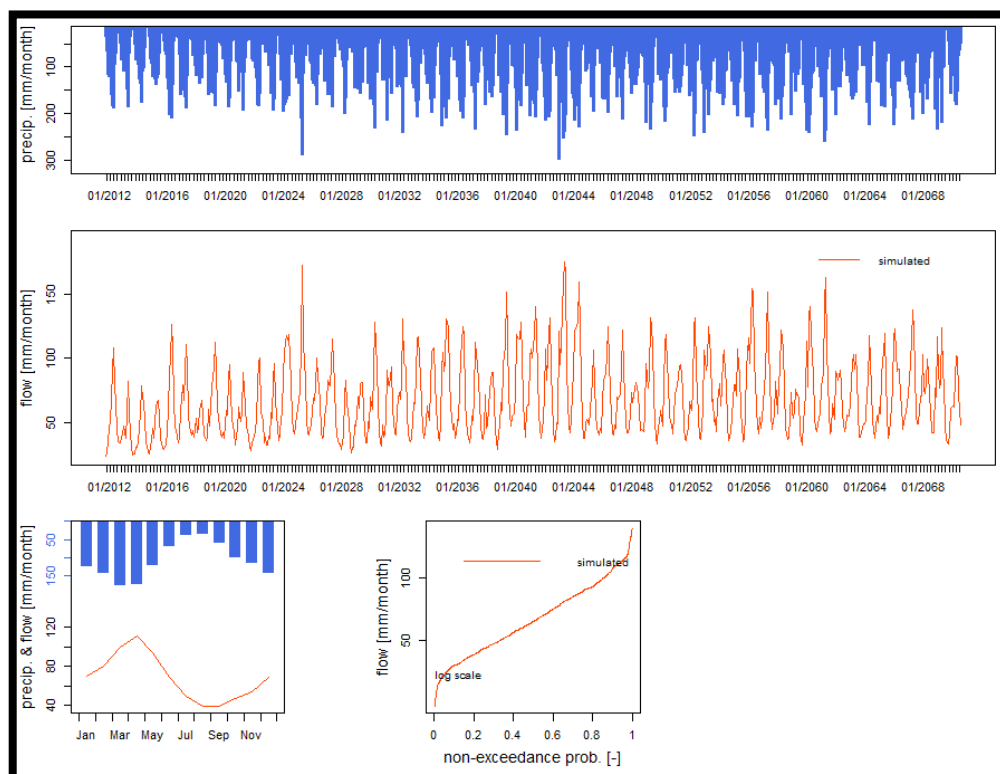
Tabla 3.11. Valores de caudal promedio obtenidos de la simulación para el periodo de tiempo (2011 - 2070) en el escenario RCP 8.5

Valores de la simulación (2011 - 2070) escenario RCP 8.5		
Año Hidrológico	Periodo de referencia	Subperiodo húmedo
Param	X_1	1737.148
	X_2	1.23
Promedio Q_{sim} (mm/mes)	75.19764	75.89271
Años de Sim	2011 - 2070	2011 - 2070

La **Tabla 3.11.** presenta los valores de los caudales obtenidos de la simulación para el escenario RCP 8.5, en el periodo de tiempo futuro (2011 - 2070).

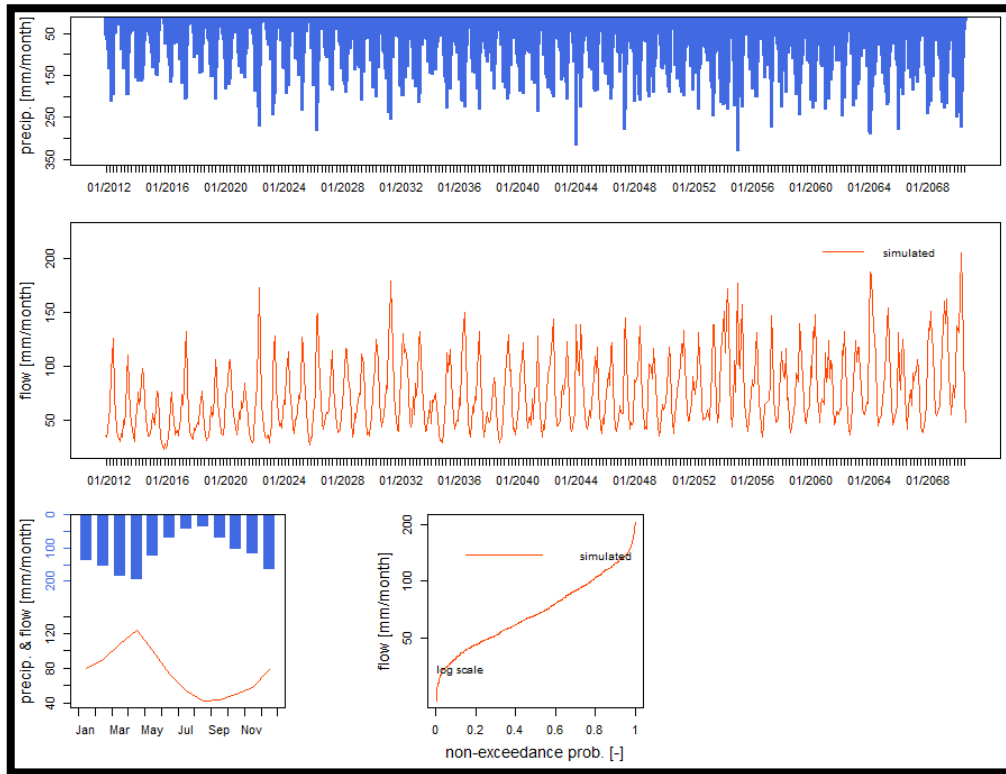
En consecuencia, a la **Tabla 3.10.** y **Tabla 3.11.** se presentan las gráficas 7 y 8, de la simulación para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, aplicando los parámetros obtenidos del periodo de referencia, respectivamente.

Figura 7. Simulación del escenario RCP 4.5 para los años (2011 - 2070)



En la **figura 7.** se observa los caudales simulados (2011-2070) del escenario RCP 4.5, empleando los valores de X_1 , X_2 , presentados en la **Tabla 3.10.**, que corresponden a los parámetros obtenidos de la calibración del periodo de referencia. Además, se presentan las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y caudal en un año, y la probabilidad de no excedencia del caudal mensual.

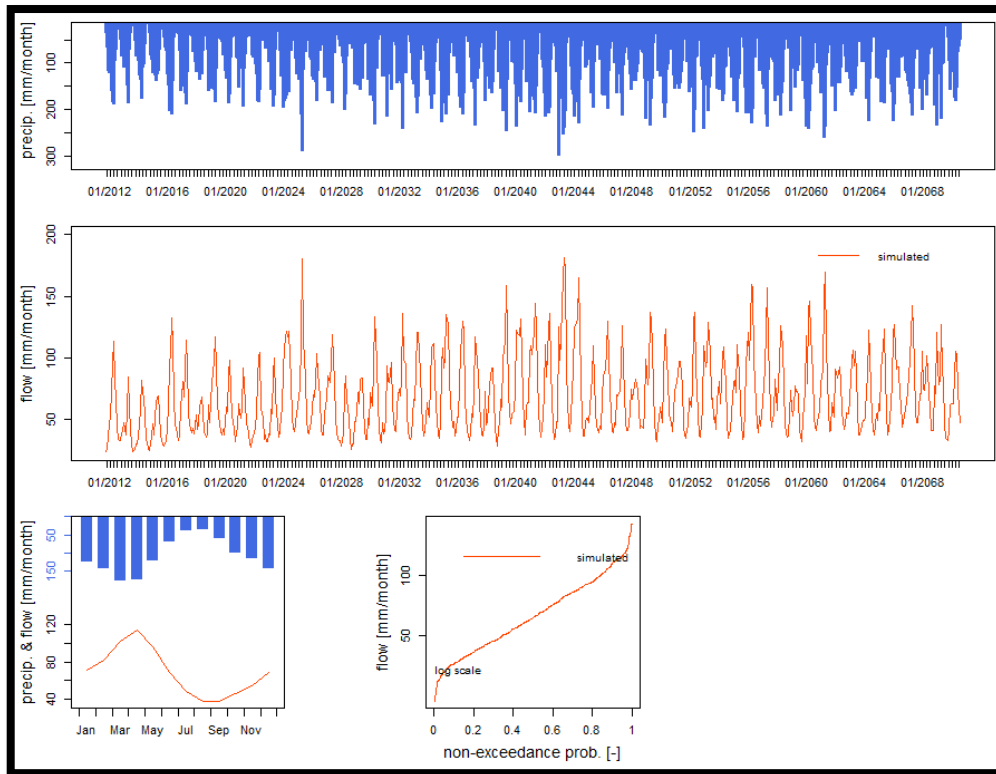
Figura 8. Simulación del escenario RCP 8.5 para los años (2011 - 2070)



En la **figura 8.** se observa los caudales simulados (2011-2070) del escenario RCP 8.5, empleando los valores de X_1 , X_2 , presentados en la **Tabla 3.11.**, que corresponden a los parámetros obtenidos de la calibración del periodo de referencia. Además, se presentan las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y caudal en un año, y la probabilidad de no excedencia del caudal mensual.

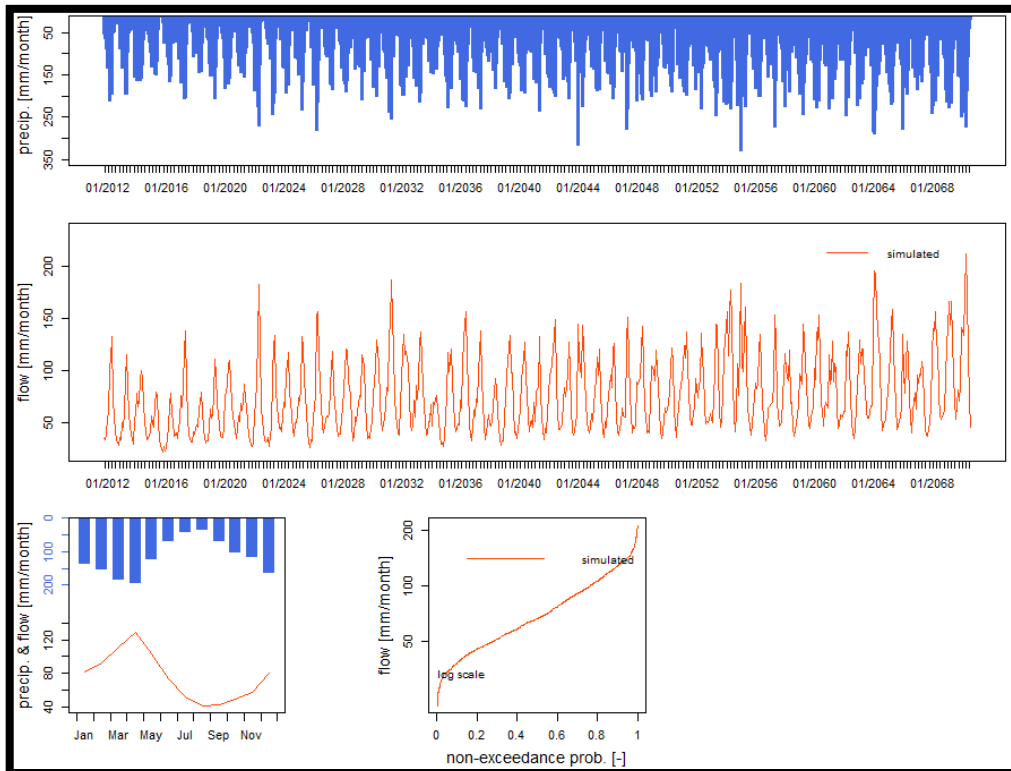
De la misma manera, se presentan las gráficas 9 y 10, de la simulación para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, aplicando los parámetros obtenidos del periodo húmedo, respectivamente.

Figura 9. Simulación del escenario RCP 4.5 para los años (2011 - 2070)



En la **figura 9.** se observa los caudales simulados (2011-2070) del escenario RCP 4.5, empleando los valores de X_1 , X_2 , presentados en la **Tabla 3.10.**, que corresponden a los parámetros obtenidos de la calibración del subperiodo húmedo. Además, se presentan las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y caudal en un año, y la probabilidad de no excedencia del caudal mensual.

Figura 10. Simulación del escenario RCP 8.5 para los años (2011 - 2070)



En la **figura 10.** se observa los caudales simulados (2011-2070) del escenario RCP 8.5, empleando los valores de X_1 , X_2 , presentados en la **Tabla 3.11.**, que corresponden a los parámetros obtenidos de la calibración del subperiodo húmedo. Además, se presentan las gráficas que describen la variabilidad de precipitación y caudal en un año, y la probabilidad de no excedencia del caudal mensual.

3.2 Análisis de resultados

3.2.1 Calibración y validación del modelo hidrológico GR2M

Los resultados se obtuvieron mediante la aplicación del modelo GR2M del paquete AirGR del programa RStudio, y aplicando la eficiencia de Nash-Sutcliffe para determinar la eficiencia de ajuste del modelo. En la calibración del periodo de referencia se obtuvieron los valores $X_1= 1737.148$, $X_2= 1.23$ y Crit. $NSE[Q]= 0.7607$ los cuales sirven como base de comparación para el análisis de los subperiodos simulados. Los resultados de la calibración obtenidos para el subperiodo del periodo de referencia fueron: $X_1= 2059.050$, $X_2= 1.192$ y Crit. $NSE[Q]= 0.7524$, para el subperiodo húmedo fueron: $X_1= 1853.79$, $X_2= 1.163$ y Crit. $NSE[Q]= 0.72.16$ y finalmente para el subperiodo seco fueron: $X_1= 3124.664$, $X_2= 1.191$ y Crit. $NSE[Q]= 0.6093$, de estos resultados obtenidos se puede observar que el parámetro X_1 que indica la capacidad de almacenamiento es mucho mayor que el periodo de referencia, tanto para el subperiodo del periodo de referencia, como para el subperiodo seco, con un parámetro X_2 de intercambio que es relativamente igual para todos los subperiodos, así también el valor de Nash indica que el ajuste realizado en la simulación es “muy bueno”. Sin embargo, el subperiodo que presenta una mayor semejanza al periodo de referencia es el subperiodo húmedo que también se caracteriza como “muy bueno”. Por consiguiente, se realiza la validación para cada una de las calibraciones de los distintos subperiodos determinándose los siguientes valores de Nash, para el subperiodo del periodo de referencia un valor Crit. $NSE[Q]= 0.7185$, para el subperiodo húmedo un valor Crit. $NSE[Q]= 0.6837$ y para el subperiodo seco un valor Crit. $NSE[Q]= 0.6622$, lo que indica claramente que la simulación realizada para cada subperiodo entra dentro de rango establecido “muy bueno”, Pero, sería correcto realizar una calibración y validación inversa o cruzada, para determinar si estos valores de los parámetros y el comportamiento del modelo es similar y poder afirmar o descartar ciertas consideraciones al momento de simular en otros periodos externos o futuros.

3.2.2 Calibración y validación inversa del modelo hidrológico GR2M

De la misma manera para realizar la evaluación de los resultados obtenidos al invertir los años de entrada para la calibración y validación, de la calibración de cada subperiodo se obtuvieron los siguientes valores, para el subperiodo del periodo de referencia se obtuvieron los siguientes valores $X_1= 1248.877$, $X_2= 1.29$ y Crit. $NSE[Q]= 0.7883$, para el subperiodo húmedo se obtuvo $X_1= 870.958$, $X_2= 1.261$ y Crit. $NSE[Q]= 0.8017$ y finalmente para el periodo seco se obtuvo $X_1= 906.871$, $X_2= 1.365$ y Crit. $NSE[Q]= 0.7105$. De igual

forma, bajo el mismo contexto de la eficiencia de Nash se puede determinar que la calibración para el subperiodo del periodo de referencia y para el subperiodo húmedo el ajuste realizado es “muy bueno”, mientras que para el periodo húmedo es “excelente”. Posteriormente, se realiza la validación de las calibraciones realizadas anteriormente y se obtuvieron los siguientes valores de Nash, para el subperiodo del periodo de referencia un valor Crit. NSE[Q]= 0.6549, para el subperiodo húmedo un valor Crit. NSE[Q]= 0.8070 y para el subperiodo seco un valor Crit. NSE[Q]= 0.2493, lo que nos indican estos valores es que, para el subperiodo del periodo de referencia el ajuste realizado bajo el criterio de Nash es “muy bueno”, en cambio para el subperiodo húmedo la eficiencia de la simulación es “excelente”, mientras que para el subperiodo seco es “insuficiente”.

3.2.3 Simulación para los escenarios de vías de concentración representativa RCP 4.5 y RCP 8.5 empleando el par de parámetros X_1 y X_2 , más eficientes obtenidos de las calibraciones realizadas previamente.

Basado en análisis anterior de las dos calibraciones y validaciones, se toma como la mejor opción a la calibración del periodo de referencia y subperiodo húmedo como los más óptimos a emplearse en la simulación que caracterice el comportamiento de los parámetros seleccionados, y predecir los caudales en escenarios futuros. Para predecir el comportamiento de dentro de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Primeramente, se realizó una calibración para todos los periodos húmedos y obtener los parámetros X_1 y X_2 presentados en la **Tabla 3.8.**, para determinar el caudal promedio en el periodo observado (1983 - 2000) y poderlos comparar con caudales promedios obtenidos de las simulaciones para los dos escenarios futuros en el periodo de tiempo (2011 - 2070), presentados en la **Tabla 3.9.**, **Tabla 3.10.** y **Tabla 3.11.**

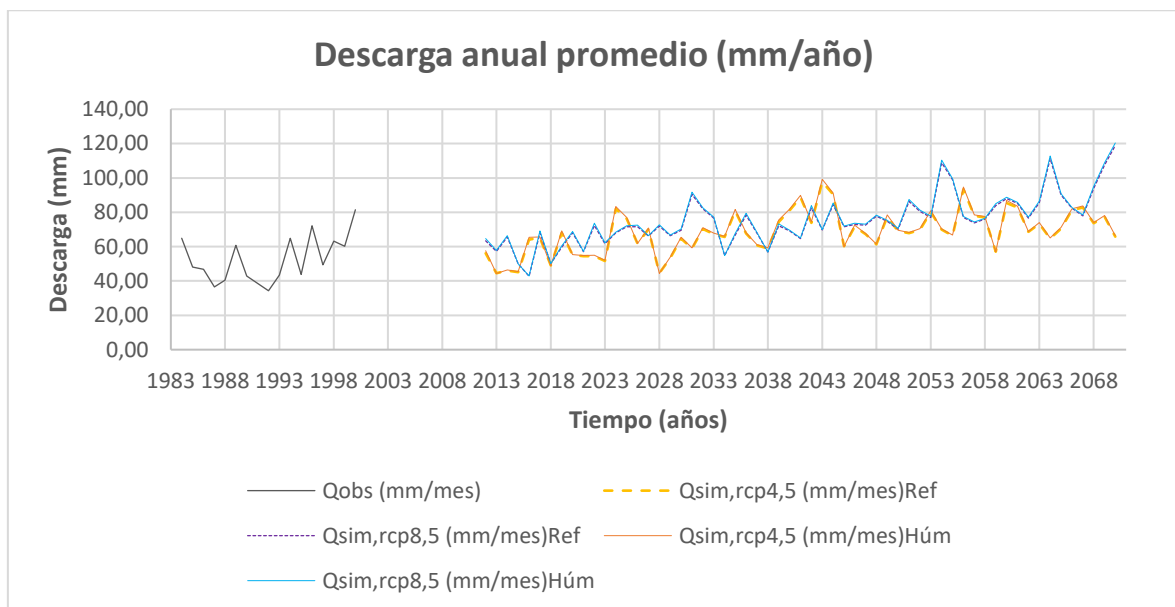
De los datos presentados en las tablas anteriormente mencionadas, se puede observar que el caudal promedio para para el periodo de referencia entre (1983-2000) es de 51.22 *mm/mes*, mientras que el caudal promedio para el subperiodo húmedo es de 51.67 *mm/mes*, reflejando lo antes mencionado, que estos dos pares de parámetros son los óptimos a emplearse en las simulaciones a futuro. Por otra parte, de la simulación del escenario RCP 4.5, se obtuvieron los siguientes valores, en el periodo de referencia un caudal promedio de 68.38 *mm/mes*, y para el subperiodo húmedo un valor del caudal promedio de 68.98 *mm/mes*. En cambio, para el escenario RCP 8.5 se obtuvieron los siguientes valores, en el periodo de referencia se obtuvo un caudal promedio de 75.19 *mm/mes*, y para el subperiodo húmedo un se obtuvo un valor del caudal promedio de 75.89 *mm/mes*.

De los resultados obtenidos de los caudales promedios tanto para el periodo observado (1983 -2000), como para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 para el periodo de tiempo (2011-2070), se observa que, sí se puede predecir la producción de caudales en el futuro, mediante la aplicación de los parámetros encontrados tanto para el periodo de referencia, como para el subperiodo húmedo. Es decir, los parámetros describen un comportamiento de incremento de producción del caudal generado entre estos dos escenarios futuros con el escenario observado en el pasado, lo que indica que en el futuro se espera una mayor producción de precipitaciones.

3.2.4 Análisis de las gráficas presentadas en los resultados

A continuación, se presentan un resumen de las gráficas que permiten visualizar una comparación la modelación realizada en el pasado entre (1981 - 2000), con los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para el futuro entre (2011 – 2070).

Figura 11. Descarga anual promedio (*mm/año*) para periodo (1981 - 2000) y RCP 4.5, RCP8.5 en el periodo (2011 - 2070)

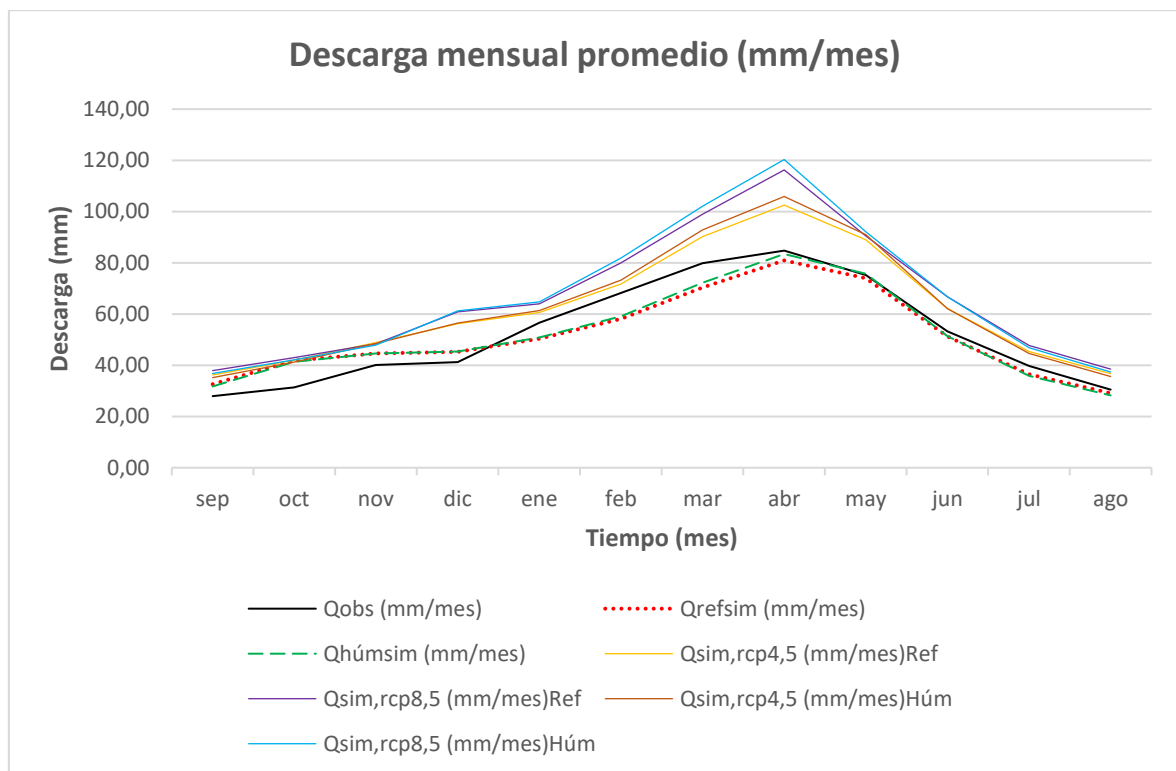


En la **figura 11.** se observa el caudal promedio anual observado (*Qobs*), para el periodo (1981 – 2000) en (*mm/año*), y los caudales promedios de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. En donde se observa que el escenario RCP 8.5 presenta una mayor variación en la generación de caudales, en comparación con los caudales del escenario RCP 4.5. Lo que indica que el modelo predice una mayor variación de las condiciones climatológicas que harán aumentar la disponibilidad de agua en los próximos 60 años. También de puede observar que para los primeros treinta años (2011 – 2041) la generación de caudales es

menor y sigue una tendencia similar a las observadas en el pasado, mientras que, en los últimos treinta años (2041 - 2070) el incremento es mucho mayor, por encima de los 80 $mm/año$ aproximadamente, mucho mayor que el caudal máximo observado en el pasado.

Por consiguiente, se presenta la comparación de las observaciones en el pasado con la simulación realizada a futuro.

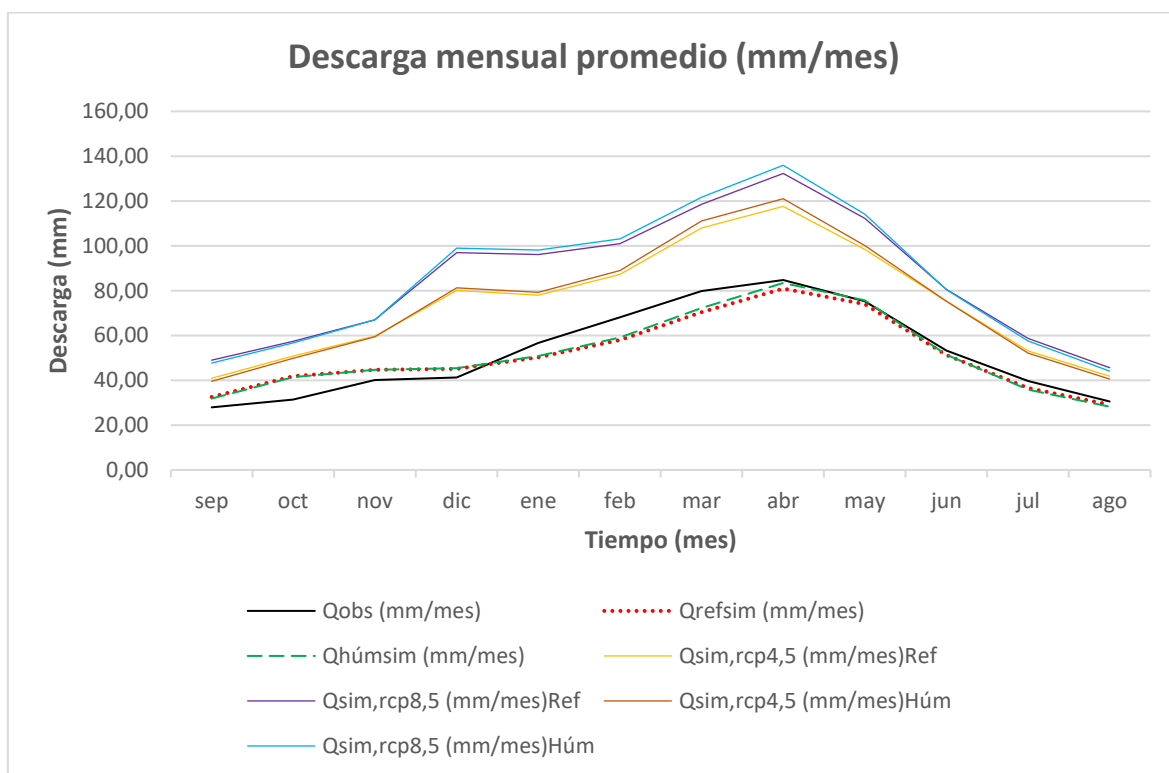
Figura 12. Descarga mensual promedio ($mm/año$) para periodo (1981 - 2000) y RCP 4.5, RCP8.5 en el periodo (2011 - 2040)



En la **figura 12.** se observa los caudales obtenidos de la simulación en el periodo (1981 – 2000) en (mm/mes), el caudal observado ($Qobs$), el caudal del modelo de referencia ($Qrefsim$) y el caudal promedio obtenido del subperiodo húmedo ($Qhúmsim$), junto con los caudales simulados de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. para el periodo (2011 -2040), utilizando los parámetros obtenidos de la calibración del periodo de referencia y del subperiodo húmedo.

En donde se observó que los caudales promedios obtenidos en base los parámetros de referencia son menores a los generados en base a los parámetros del subperiodo húmedo. Además, que para el mes de abril se presentará un incremento significativo en comparación al caudal promedio generado en el pasado.

Figura 13. Descarga mensual promedio ($mm/año$) para periodo (1981 - 2000) y RCP 4.5, RCP8.5 en el periodo (2041 - 2070)



En la **figura 13**, se observa los caudales obtenidos de la simulación en el periodo (1981 – 2000) en (mm/mes), el caudal observado (Q_{obs}), el caudal del modelo de referencia (Q_{refsim}) y el caudal promedio obtenido del subperiodo húmedo ($Q_{húmsim}$), junto con los caudales simulados de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5., para el periodo (2041 – 2070), utilizando los parámetros obtenidos de la calibración del periodo de referencia y del subperiodo húmedo.

En base al mismo análisis anterior, de esta gráfica se observó una mayor generación de caudales por encima de $120 mm/mes$, tanto para el RCP 4.5, como para el RCP 8.5, y de igual manera este mayor pico de generación se ve reflejado en el mes de abril.

Por consiguiente, es evidente que para el periodo (2041 -2070) la generación de caudal para los distintos escenarios será superiores a los generados en el periodo (2011 - 2040) y muy por encima de los caudales observados en el pasado.

3.3 Conclusiones

- Se concluye que, entre todos los valores de los parámetros X_1 y X_2 obtenidos, de las calibraciones, los parámetros del periodo de referencia y subperiodo húmedo son los óptimos a emplearse para la simulación que permita predecir los escenarios futuros.
- En conclusión, la variabilidad en los valores de los parámetros X_1 , X_2 obtenidos para cada subperiodo, establece que el parámetro X_1 que denota la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, posee una mayor influencia sobre el resultado final del modelo, pero las pequeñas variaciones en los valores del parámetro X_2 , es el que influye en la capacidad de generación de caudales.
- El coeficiente de Nash-Sutcliffe permite establecer los parámetros más óptimos para iniciar la calibración, donde se obtuvo un coeficiente de eficiencia entre 60% - 75% tanto para la calibración, y para la validación se obtuvo un coeficiente de eficiencia entre 66% - 71%. Estos resultados indican que el modelo presenta un ajuste de los datos es "muy bueno". Así también, del análisis inverso de calibración se obtuvo un coeficiente de eficiencia entre 71% - 80% y para la validación se obtuvo un coeficiente de eficiencia entre 65% - 80% lo que de igual manera indica que el modelo presenta un ajuste "muy bueno".
- Es importante aclarar que, tras el análisis inverso de cada subperiodo el coeficiente de eficiencia para el periodo seco fue de 24%, lo que indica que el modelo no satisface las necesidades para poder replicarlo. Sin embargo, es un valor atípico en comparación con los valores obtenidos de los otros subperiodos. Posiblemente se deba a la robustez de los datos o consideraciones que no son tomadas por el modelo en la simulación.
- Tras el análisis de los caudales promedio generados para los dos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, se concluye que para el periodo (2041 - 2070) , se presentará la mayor variabilidad en la generación de caudales y por ende en la disponibilidad de agua. Mientras que los caudales generados para estos dos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, dentro del periodo (2011 - 2040) se observó que la generación de los caudales fue levemente superior a los obtenidos en el periodo (1981 -2000) que son los observados en el pasado.

- Finalmente, el modelo GR2M es confiable para realizar simulaciones de caudales mensuales, lo que en definitiva permite concluir que el modelo se puede aplicar para predecir los caudales futuros que se presenten en la cuenca del río Guayllabamba.

3.4 Recomendaciones

- Al utilizar el modelo GR2M como herramienta de análisis o de predicción de caudales en el futuro, es recomendable emplear una modelación para todo el periodo, en donde se empleen toda la serie de datos y de ser posible manejar una serie de datos más larga, que permita tener una mayor robustez al momento de la modelación, permitiendo que el modelo sea más preciso y ajustable.
- Por otro lado, no es recomendable aplicar un análisis inverso para el subperiodo seco, debido a que la entrada de serie de tiempo tanto para la calibración y validación, carece de la robustez necesaria para la validación. Esto impide que el modelo considere ciertos parámetros que permitan un mejor ajuste de la serie de tiempo para su modelación.
- Así también, se recomienda realizar un análisis de generación de caudales, en dos o tres periodos más cortos, con la finalidad de obtener una representación más precisa del comportamiento de las variables climáticas al momento de la generación de los caudales, y así obtener una conceptualización a corto, mediano y largo plazo de lo que ocurrirá con la disponibilidad de agua y generación de caudales en el futuro.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, L., & Ríos, C. (2019). Variabilidad Climática y Caudales Mínimos en los Andes Ecuatorianos. *Revista Politécnica*.
- Arévalo, H. V., Obando, O. F., Vera, H., & Al, E. T. (2011). *Modelización de los caudales medios mensuales en la cuenca del río Ramis Monthly means flow modeling into Ramis basin*. 124(3), 116–124.
- Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador , bajo distintos escenarios de cambio climático*.
- Balasubramanian, A., & Nagaraju, D. (1994). The Hydrologic Cycle. *International Geophysics*, 56(C), 115–135. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)60562-8](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)60562-8)
- Ball, P. (2000). The hydrological cycle. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/news000127-12>
- Borja, P., De Bievre, B., Célleri, R., Llambí, L. D., Ochoa, B., & Soto-W, A. (2012). *Páramos Andinos Ecología , hidrología y suelos de páram os*.
- Buguña, N. (2019). Aplicación de modelos hidrológicos para la estimación de caudales mensuales en la sub cuenca del río Bigote. *Tesis de Máster En Ingeniería Civil Con Mención En Recursos Hídricos. Facultad de Ingeniería.*, 380. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4016/MAS_ICIH_1901.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Buytaert, W., & Bievre, B. De. (2012a). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8). <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Buytaert, W., & Bievre, B. De. (2012b). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Buytaert, W., Célleri, R., & Timbe, L. (2009). Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: Effects of GCM uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 36(7), 7406. <https://doi.org/10.1029/2008GL037048>
- Cabrera, J. (2012). Modelos agregados : GR2M. *Instituto Para La Mitigación de Los Efectos Del Fenómeno El Niño - Universidad Nacional de Ingeniería*, 4. <http://www.imefen.uni.edu.pe/modhidro.htm>
- Carrasco, J., Casassa, G., Pizarro, R., & Saravia, M. (2011). Impactos del Cambio Climático

- , Adaptación y Desarrollo en las Regiones Montañosas de América Latina. *Iniciativa Estratégica Sobre Los Impactos Del Cambio Climático, Adaptación y Desarrollo En Las Regiones de Montañas*, December, 19. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2926.6804>
- Ceballos, M., Lehmann, J. L., Anthelme, B., Dangles, F., Gomez, O., Favier, J., Maisincho, V., Jomelli, L., Vuille, V., Wagnon, M., Lejeune, P., Ramallo, Y., & Mendoza, C. (2014). *Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático*.
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327. <https://doi.org/10.1002/HYP.6575>
- Chen, H., Xu, C. Y., & Guo, S. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434–435, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.040>
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., & Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010602>
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling and Software*, 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
- Cruz, E., & Romero, J. (2018). *Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: GR2M, TEMEZ y LUTZ-SCHOLZ aplicados en la subcuenca del río Callazas*.
- Dibike, Y. B., & Coulibaly, P. (2007). Validation of hydrological models for climate scenario simulation: The case of Saguenay watershed in Quebec. *Hydrological Processes*, 21(23), 3123–3135. <https://doi.org/10.1002/HYP.6534>
- Dounia, M., Sabri, D., & Yassine, D. (2014). Rainfall – Rain off Modeling Using Artificial Neural Network. *APCBEE Procedia*, 10, 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.10.048>
- Easton, Z., & Bock, E. (2015). *Hydrology Basics and the Hydrologic Cycle*. www.ext.vt.edu
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. In *International Journal of Climatology* (Vol. 27, Issue 12, pp. 1547–1578).

<https://doi.org/10.1002/joc.1556>

- Graham, L. P., Hagemann, S., Jaun, S., & Beniston, M. (2007). On interpreting hydrological change from regional climate models. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 97–122. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9217-0>
- Grimm, A. M., Barros, V. R., & Doyle, M. E. (2000). Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13(1), 35–58. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)
- 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(April), 100671. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100671>
- Inzunza, J. (2019). Cap. 4 Temperatura. *Meteorología Descriptiva*, 85–111.
- Jorquera, E. et al. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *1º Encuentro de Investigadores En Formación En Recursos Hídricos, October 2014*, 18.
- Kohler, T., Wehrli, A., & Jurek, M. (2014). *Las Montañas y el Cambio Climático. Una preocupación Mundial. Serie sobre el desarrollo sostenible de las regiones de montaña.*
- 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>
- Llauca, H. (2019). *Modelamiento hidrológico a paso mensual para el monitoreo de sequías hidrológicas en cuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. Dirección de hidrología - DHI.* (p. 63). <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-82.pdf>
- Louvet, S., Paturel, J. E., Mahé, G., Rouché, N., & Koité, M. (2016). Comparison of the spatiotemporal variability of rainfall from four different interpolation methods and impact on the result of GR2M hydrological modeling—case of Bani River in Mali, West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1–2), 303–319. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1357-y>
- Mamani, E. (2020). *Aplicación de un modelo hidrológico agragado lluvia-escorrentía a paso de tiempo mensual en la cuenca del río Callacame, Perú.* 051, 363543.

- Merz, R., Parajka, J., & Blöschl, G. (2009). Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, 45(9), 9405. <https://doi.org/10.1029/2009WR007872>
- Mouelhi, S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. 1–323. http://www.cemagref.fr/webgr/Download/Rapports_et_theses/2003-MOUELHI-THESE.pdf
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- Okkan, U., & Fistikoglu, O. (2014). Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1), 343–361. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1005-y>
- Paturel, J. E., Mahé, G., Diello, P., Barbier, B., Dezetter, A., Dieulin, C., Karambiri, H., Yacouba, H., & Maiga, A. (2017). Using land cover changes and demographic data to improve hydrological modeling in the Sahel. *Hydrological Processes*, 31(4), 811–824. <https://doi.org/10.1002/hyp.11057>
- Pérez, J. M., Sandoval, M. B., & Rodríguez, O. (2015). ¿Cómo formular una buena pregunta de investigación? 7650, 74–78. <http://www.medigraphic.com/orthotips>
- Pouget, J. C., Proaño, D., Vera, A., Villacís, M., Condom, T., Escobar, M., Le Goulven, P., & Calvez, R. (2017). Modélisation glacio-hydrologique et gestion des ressources en eau dans les Andes équatoriennes: l'exemple de Quito. *Hydrological Sciences Journal*, 62(3), 431–446. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1131988>
- Rincón, V. (2019). Aplicación de los modelos lluvia-escorrentía GR2M y GR4J en la cuenca del río Guali para la gestión de los recursos hídricos. *ペインクリニック学会治療指針* 2, 1–9.
- Salathé, E. P., Mote, P. W., & Wiley, M. W. (2007). Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States pacific northwest. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1611–1621. <https://doi.org/10.1002/JOC.1540>
- Schoolmeester, T., Johansen, K., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., & Verbist, K. (2018). Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: El impacto del retroceso de los glaciares sobre

los recursos hídricos. In *Ediciones UNESCO*.

- Seiller, G., Roy, R., & Anctil, F. (2017). Influence of three common calibration metrics on the diagnosis of climate change impacts on water resources. *Journal of Hydrology*, *547*, 280–295. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.004>
- Serrano Vincenti, S., Ruiz, J. C., & Bersosa, F. (2016). Heavy Rainfall and Temperature Projections in a Climate Change Scenario Over Quito, Ecuador. *La Granja*, *25*(1), 16. <https://doi.org/10.17163/lgr.n25.2017.02>
- Traore, V. B. (2014). Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. *American Journal of Environmental Protection*, *3*(1), 36. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.15>
- Useros, J. (2013). El Cambio Climático: sus causas y efectos medioambientales. *Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, *50*, 71–98.
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Díaz, J., Vásquez, C., Castro, A., Tapia, M., & Alcántara, J. (2016). Manejo Y Gestión de Cuencas Hidrográficas. In *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://www.fondoeditorialunalm.com/wp-content/uploads/2020/09/CUENCAS-HIDROGRAFICAS.pdf>
- Vormoor, K., Lawrence, D., Heistermann, M., & Bronstert, A. (2015). Climate change impacts on the seasonality and generation processes of floods – Projections and uncertainties for catchments with mixed snowmelt/rainfall regimes. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(2), 913–931. <https://doi.org/10.5194/hess-19-913-2015>
- Vuille, M. (2013). *El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en los El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales*. 1–35.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., & Rabatel, A. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes-Impacts, uncertainties and challenges ahead Earth-Science Reviews Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts , uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, *176*(January), 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Wang, H. M., Chen, J., Xu, C. Y., Zhang, J., & Chen, H. (2020). A Framework to Quantify the Uncertainty Contribution of GCMs Over Multiple Sources in Hydrological Impacts of Climate Change. *Earth's Future*, *8*(8). <https://doi.org/10.1029/2020EF001602>
- Wang, S., & Zhang, Z. (2011a). Effects of climate change on water resources in China. *Climate Research*, *47*(1–2), 77–82. <https://doi.org/10.3354/cr00965>

- Wang, S., & Zhang, Z. (2011b). The Effects of Climate Change on Water Resources. *Climate Research*, 47(1–2), 77–82. <https://doi.org/10.3354/cr00965>
- Yates, D., Purkey, D., Flores-lopez, F., Estacio, J., Depsky, N., Mehta, V., & Tehelen, K. (2013). Contexto general de cambio climático y de adaptación del DMQ. *Análisis Integrado de Amenazas Relacionado Con El Cambio Climático, Aspectos Naturales y Socioeconómicos. Distrito Metropolitano de Quito.*, 1–33.
- Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Hydrological modeling using observed and satellite precipitation datasets for the llave River basin, 2011-2015 period, Puno, Peru. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(5), 85–101. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-04>

5 ANEXOS

ANEXO I

TABLA DE LA SERIE DE DATOS COMPLETA (1981 - 2000) PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)	Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)
Jan-81	71,78	82,63	46,33	Jan-91	100,45	84,82	36,91
Feb-81	118,45	77,00	74,55	Feb-91	64,25	79,67	37,79
Mar-81	176,55	86,29	97,45	Mar-91	157,48	89,29	73,86
Apr-81	173,38	81,73	131,77	Apr-91	79,02	82,85	61,08
May-81	86,55	79,35	36,18	May-91	124,85	81,01	58,03
Jun-81	33,01	73,42	40,87	Jun-91	44,06	75,99	34,00
Jul-81	29,87	74,59	36,23	Jul-91	42,01	77,89	30,12
Aug-81	49,47	80,76	21,58	Aug-91	9,14	81,88	26,82

Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)	Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)
Sep-81	28,89	82,08	20,90	Sep-91	55,87	84,34	23,52
Oct-81	79,44	85,15	17,12	Oct-91	58,45	86,93	19,12
Nov-81	87,04	79,73	27,60	Nov-91	125,35	80,83	26,23
Dec-81	111,61	83,19	33,44	Dec-91	102,80	84,25	37,16
Jan-82	136,92	81,59	71,93	Jan-92	55,40	84,93	29,22
Feb-82	110,81	79,34	82,94	Feb-92	84,61	78,67	36,87
Mar-82	124,78	87,67	80,21	Mar-92	105,71	88,79	40,08
Apr-82	153,47	81,85	92,55	Apr-92	101,85	82,32	54,69
May-82	180,76	79,46	90,90	May-92	74,40	79,92	49,15
Jun-82	15,95	76,20	49,79	Jun-92	14,78	76,63	38,22
Jul-82	29,01	78,06	35,03	Jul-92	11,68	76,83	29,40
Aug-82	5,65	85,00	24,75	Aug-92	11,85	81,94	27,87
Sep-82	70,50	84,58	18,73	Sep-92	73,04	81,49	28,89
Oct-82	174,19	84,65	38,15	Oct-92	70,88	85,76	25,24
Nov-82	188,46	82,17	74,02	Nov-92	69,40	80,31	18,25
Dec-82	221,66	83,89	109,35	Dec-92	44,81	83,19	17,38
Jan-83	119,97	86,50	72,01	Jan-93	113,56	82,39	43,84
Feb-83	91,04	81,29	82,94	Feb-93	173,00	75,66	65,78
Mar-83	210,01	90,48	80,21	Mar-93	185,97	84,17	55,74
Apr-83	193,79	83,91	94,16	Apr-93	201,44	80,91	59,72
May-83	133,40	82,62	98,38	May-93	96,21	79,69	57,87
Jun-83	31,87	75,40	49,79	Jun-93	18,22	76,41	58,11
Jul-83	16,62	78,90	35,02	Jul-93	15,75	77,72	55,30
Aug-83	31,76	83,53	34,99	Aug-93	7,10	82,88	35,28
Sep-83	24,46	83,68	18,74	Sep-93	64,64	81,84	15,42
Oct-83	106,93	85,58	38,14	Oct-93	76,81	86,75	25,83
Nov-83	115,58	82,46	73,98	Nov-93	91,11	80,08	42,11
Dec-83	173,60	80,06	70,25	Dec-93	149,28	82,36	43,72
Jan-84	92,83	79,73	57,47	Jan-94	167,35	82,56	80,25
Feb-84	218,42	74,21	102,19	Feb-94	141,04	76,94	99,70
Mar-84	160,30	85,67	86,28	Mar-94	213,74	86,23	126,71
Apr-84	206,06	79,97	111,88	Apr-94	164,62	81,67	134,42
May-84	98,88	78,78	83,79	May-94	98,51	80,96	88,29
Jun-84	45,50	73,42	63,17	Jun-94	14,21	74,92	51,04
Jul-84	25,28	75,15	42,64	Jul-94	9,81	78,39	36,36
Aug-84	31,26	82,53	29,98	Aug-94	7,35	81,88	34,43
Sep-84	143,91	79,70	42,36	Sep-94	34,76	84,93	27,21
Oct-84	132,00	84,53	50,19	Oct-94	74,13	86,87	30,53
Nov-84	117,97	78,57	41,95	Nov-94	134,86	80,25	38,94
Dec-84	61,59	83,19	46,29	Dec-94	110,03	83,66	50,88
Jan-85	99,35	80,65	69,04	Jan-95	33,44	84,18	45,45
Feb-85	42,95	76,22	54,05	Feb-95	63,38	77,95	39,20
Mar-85	67,26	87,92	47,54	Mar-95	122,43	86,73	50,75
Apr-85	118,94	80,91	57,14	Apr-95	131,37	83,32	83,23
May-85	118,55	79,69	65,34	May-95	94,92	80,33	52,52
Jun-85	32,10	75,34	42,48	Jun-95	49,61	75,40	45,21
Jul-85	11,48	74,36	33,18	Jul-95	56,47	77,22	32,55
Aug-85	34,55	79,35	26,58	Aug-95	49,91	82,35	29,67
Sep-85	81,93	81,84	23,99	Sep-95	17,55	84,28	21,83

Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)	Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)
Oct-85	49,29	85,52	23,51	Oct-95	114,73	86,81	32,70
Nov-85	60,94	78,91	19,04	Nov-95	143,77	78,97	58,15
Dec-85	105,50	81,18	30,89	Dec-95	77,83	80,06	35,33
Jan-86	114,15	83,02	56,86	Jan-96	130,88	81,40	49,11
Feb-86	121,01	75,16	68,68	Feb-96	130,75	75,83	102,59
Mar-86	157,84	84,23	98,74	Mar-96	153,13	86,23	140,57
Apr-86	151,66	82,14	84,39	Apr-96	170,73	81,62	127,31
May-86	91,04	80,33	65,70	May-96	175,43	79,81	114,05
Jun-86	13,57	75,93	40,35	Jun-96	60,39	74,38	85,31
Jul-86	7,09	78,90	31,64	Jul-96	23,58	76,77	57,75
Aug-86	13,72	82,94	17,84	Aug-96	28,39	81,82	40,95
Sep-86	48,64	83,09	19,80	Sep-96	48,19	84,34	32,05
Oct-86	126,28	84,96	24,52	Oct-96	111,98	84,47	30,16
Nov-86	89,46	80,72	29,28	Nov-96	35,87	80,25	24,13
Dec-86	72,49	83,60	36,24	Dec-96	81,94	81,89	21,86
Jan-87	99,38	84,82	43,20	Jan-97	192,86	80,13	65,95
Feb-87	61,59	81,35	40,71	Feb-97	62,56	76,27	63,17
Mar-87	120,86	88,67	52,93	Mar-97	179,87	87,35	77,88
Apr-87	134,49	83,38	43,24	Apr-97	119,26	80,97	84,67
May-87	125,08	81,53	67,07	May-97	75,58	80,84	69,20
Jun-87	17,89	78,66	37,43	Jun-97	77,05	73,79	56,26
Jul-87	28,99	78,95	25,74	Jul-97	6,79	79,96	39,44
Aug-87	22,43	83,59	17,96	Aug-97	7,67	84,65	28,36
Sep-87	60,19	83,74		Sep-97	73,86	84,22	33,32
Oct-87	94,45	86,87	31,01	Oct-97	131,18	87,98	30,94
Nov-87	22,06	83,68	25,37	Nov-97	202,20	80,72	80,17
Dec-87	26,57	85,43	19,73	Dec-97	83,03	84,72	66,55
Jan-88	98,04	85,22	42,20	Jan-98	51,91	88,23	43,40
Feb-88	112,68	79,51	44,45	Feb-98	125,45	82,96	54,41
Mar-88	38,09	88,54	36,92	Mar-98	129,00	91,10	65,66
Apr-88	246,98	80,32	70,77	Apr-98	161,57	85,67	101,51
May-88	133,79	80,27	60,44	May-98	144,44	83,77	90,18
Jun-88	75,74	73,74	43,80	Jun-98	28,01	75,40	77,04
Jul-88	43,68	75,48	42,24	Jul-98	29,19	77,22	62,29
Aug-88	44,24	80,52	27,52	Aug-98	31,18	81,76	53,41
Sep-88	96,33	80,66	30,32	Sep-98	44,07	81,90	53,93
Oct-88	107,80	83,67	25,93	Oct-98	108,87	86,19	40,59
Nov-88	167,52	78,33	65,42	Nov-98	101,35	80,72	55,30
Dec-88	83,35	77,65	40,63	Dec-98	40,71	81,24	42,84
Jan-89	143,69	79,73	90,46	Jan-99	129,19	80,65	66,39
Feb-89	126,71	74,77	107,42	Feb-99	212,28	72,88	76,11
Mar-89	171,01	83,17	97,25	Mar-99	166,87	84,17	101,51
Apr-89	107,74	81,15	69,00	Apr-99	156,88	80,91	78,32
May-89	91,07	79,35	87,57	May-99	103,05	77,40	68,48
Jun-89	78,05	71,81	52,00	Jun-99	72,85	71,06	58,47
Jul-89	23,24	76,27	38,85	Jul-99	17,22	74,92	42,76
Aug-89	25,58	81,35	24,91	Aug-99	26,10	78,76	38,29
Sep-89	97,35	81,49	24,95	Sep-99	125,08	78,28	30,67
Oct-89	165,47	83,91	35,48	Oct-99	107,48	83,67	35,01

Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)	Fecha	Lluvia (mm)	ETP (mm)	Caudal (mm)
Nov-89	32,41	83,22	29,42	Nov-99	88,66	80,08	32,54
Dec-89	42,75	82,01	26,88	Dec-99	185,48	78,24	85,60
Jan-90	61,32	84,01	43,48	Jan-00	143,50	79,03	100,06
Feb-90	118,08	77,22	60,08	Feb-00	159,38	71,87	105,89
Mar-90	76,72	88,42	60,44	Mar-00	178,19	83,04	144,75
Apr-90	154,62	82,55	74,59	Apr-00	185,59	78,68	144,87
May-90	63,82	80,73	60,16	May-00	186,06	76,94	141,21
Jun-90	32,17	75,77	39,16	Jun-00	93,57	71,70	82,30
Jul-90	25,38	76,49	31,17	Jul-00	23,98	75,03	43,60
Aug-90	20,33	83,94	28,45	Aug-00	13,47	80,64	30,73
Sep-90	22,96	84,69	19,96	Sep-00	93,77	78,40	33,98
Oct-90	198,33	84,78	34,50	Oct-00	39,47	87,49	27,84
Nov-90	37,02	82,29	21,17	Nov-00	38,42	79,03	21,30
Dec-90	71,93	83,42	28,17	Dec-00	78,45	81,30	32,21

ANEXO II

**GRÁFICAS DE LOS HISTOGRAMAS OBTENIDOS DE LAS
MODELACIONES**

Figura 5.1 Calibración para el subperiodo del periodo de referencia (1983 – 1994)

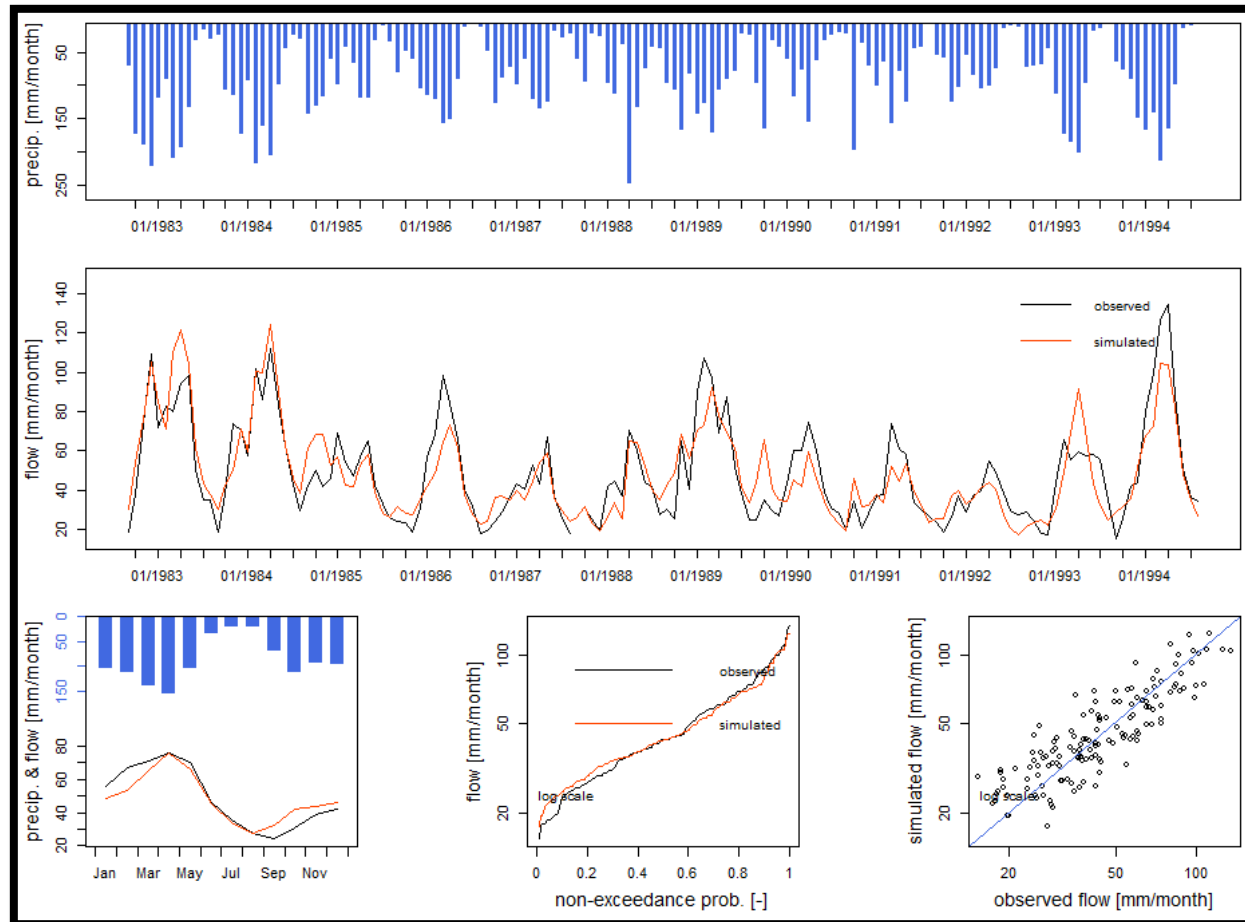


Figura 5.1. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 2059.05

X2 = 1.192

Crit.NSE [Q] = 0.7524

Figura 5.2. Validación para el subperiodo del periodo de referencia (1995 - 2000)

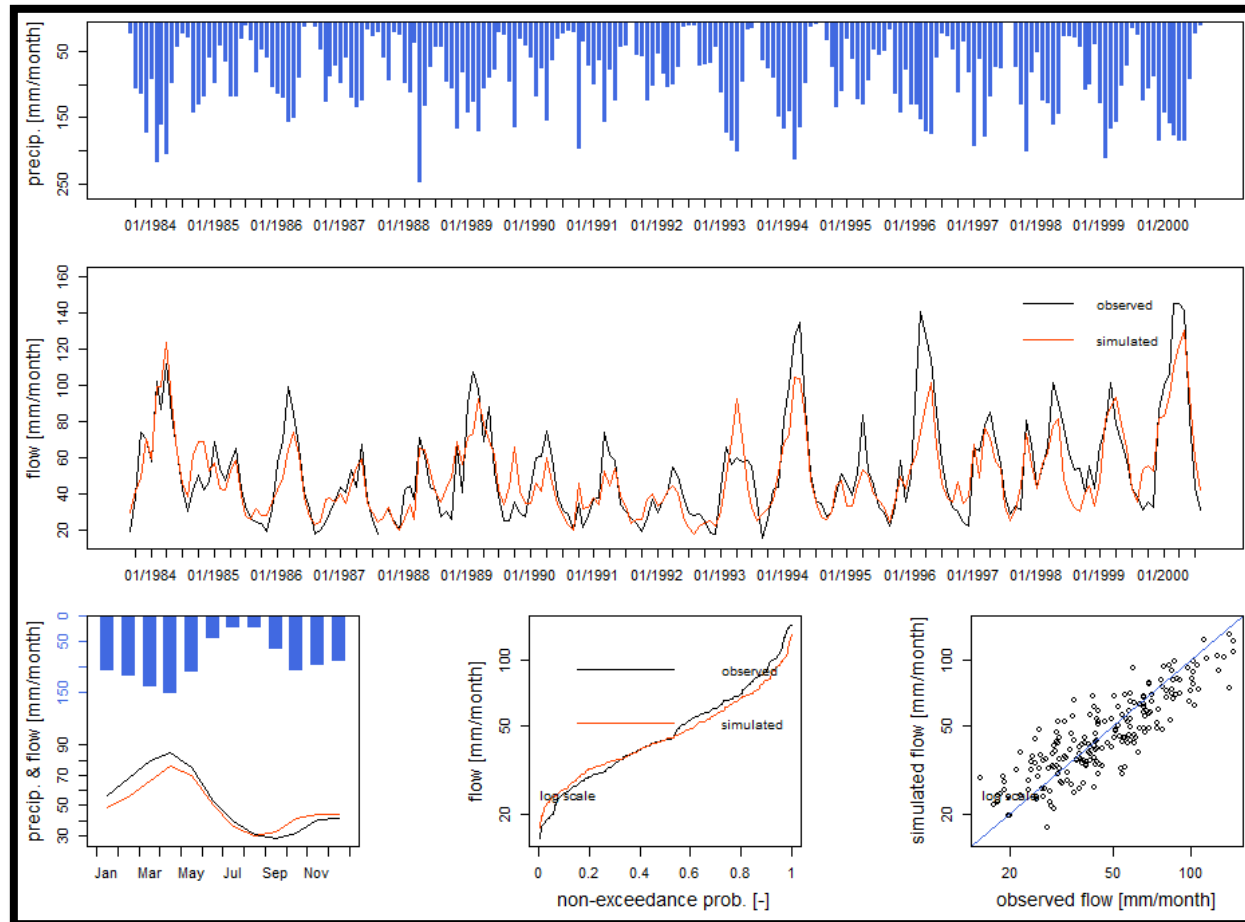


Figura 5.2. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 2059.05

X2 = 1.192

Crit.NSE [Q] = 0.7491

Figura 5.3. Calibración para el subperiodo del periodo de referencia inverso (1995 - 2000)

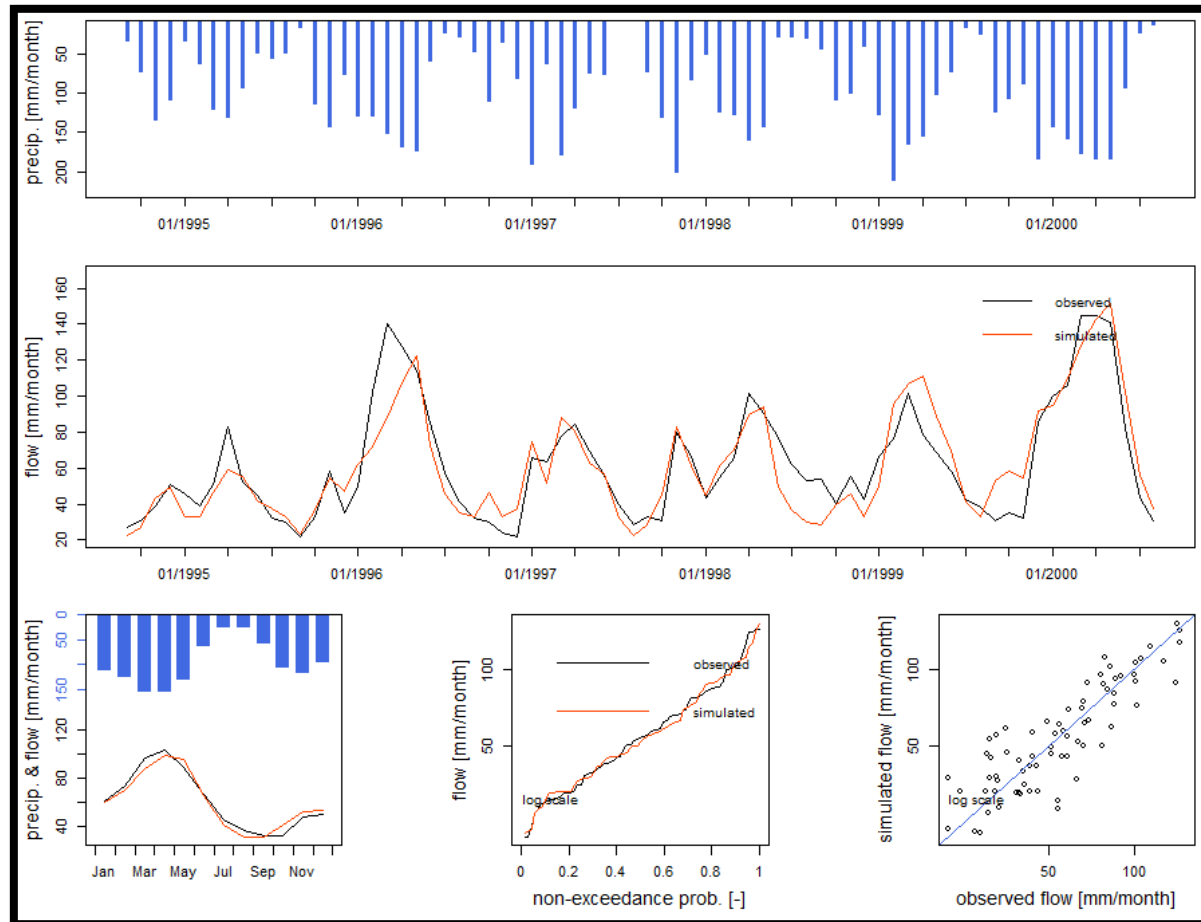


Figura 5.3. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 1248.877

X2 = 1.29

Crit.NSE [Q] = 0.7883

Figura 5.4. Validación para el subperiodo del periodo de referencia inverso (1983 – 1994)

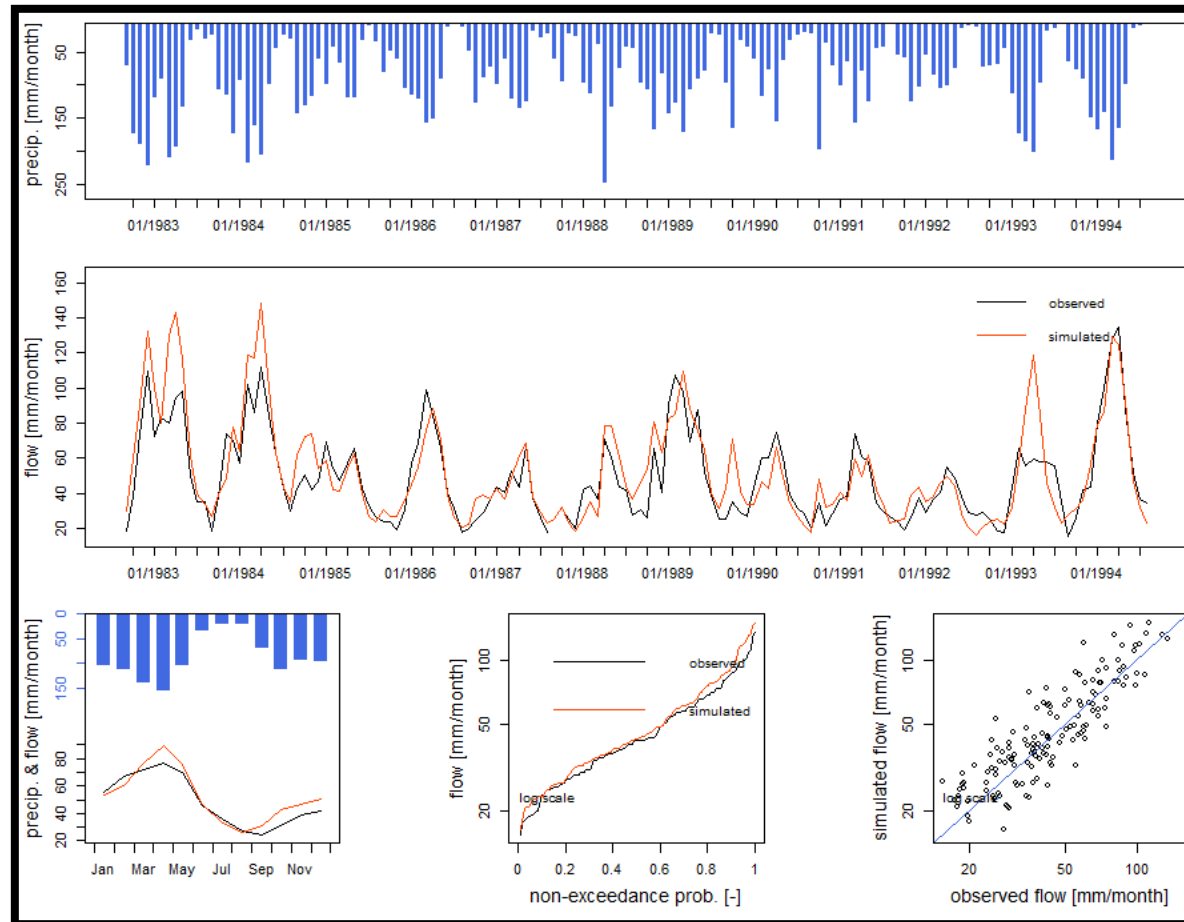


Figura 5.4. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 1248.877

X2 = 1.29

Crit.NSE [Q] = 0.6549

Figura 5.5. Calibración para el periodo de húmedo (83, 84, 89, 93, 94)

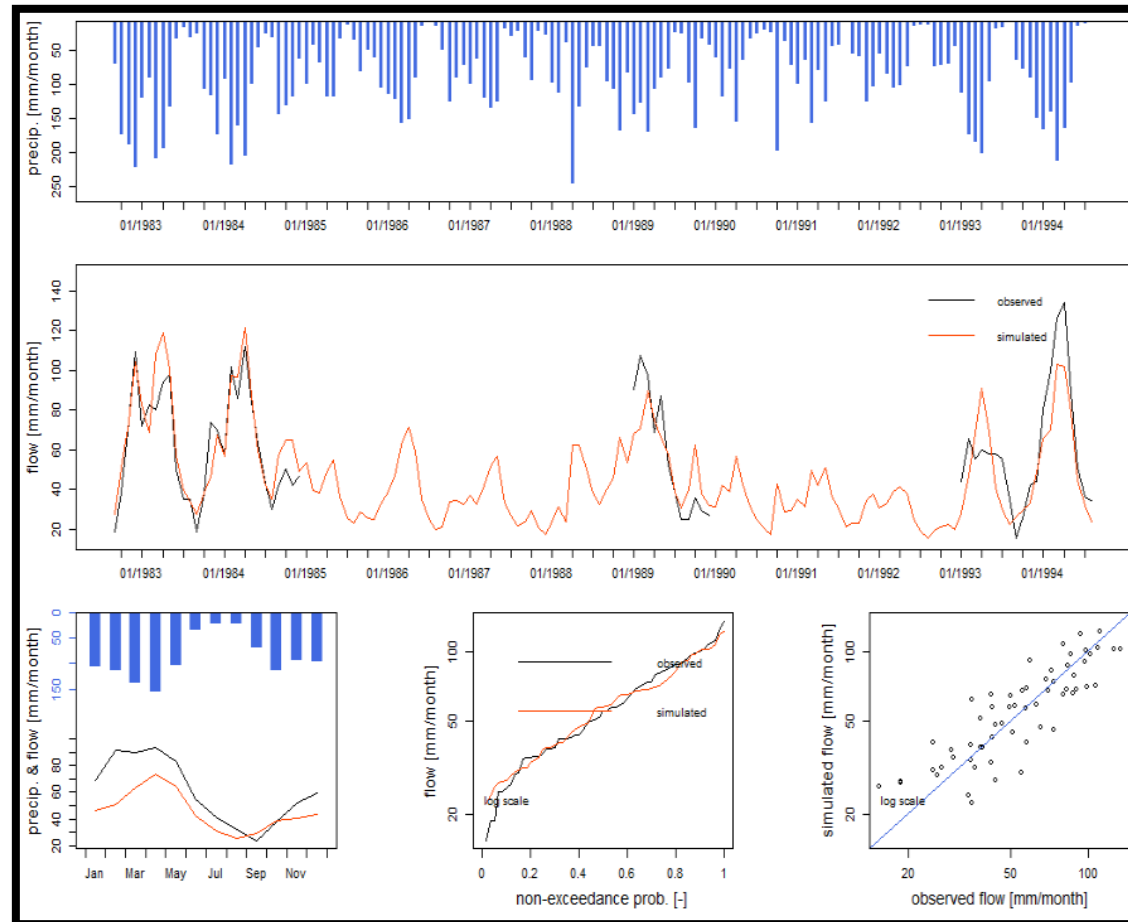


Figura 5.5. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 1853.79

X2 = 1.163

Crit.NSE [Q] = 0.7216

Figura 5.6. Validación para el periodo de húmedo (96, 99, 2000)

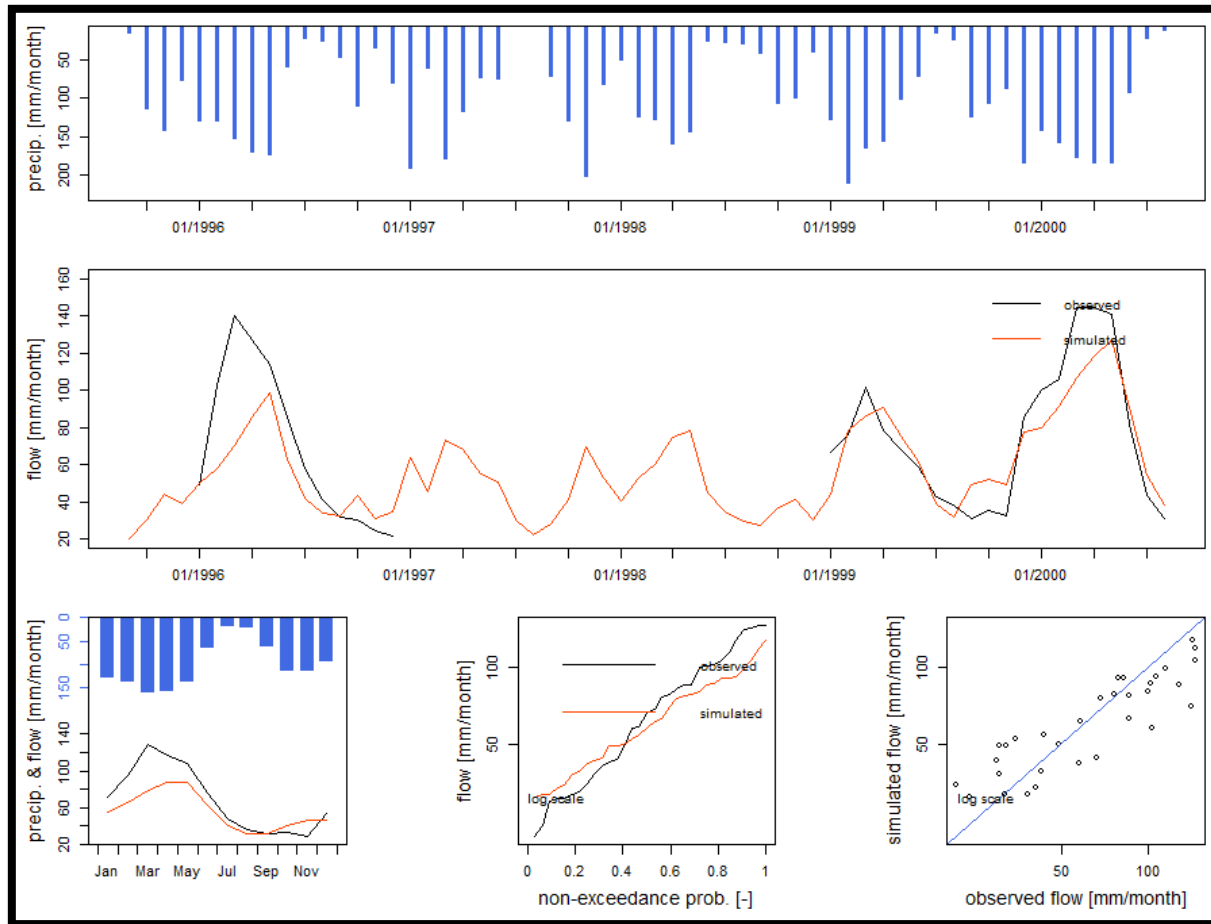


Figura 5.6. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 1853.79

X2 = 1.163

Crit.NSE [Q] = 0.6837

Figura 5.7. Calibración para el periodo de húmedo inverso (96, 99, 2000)

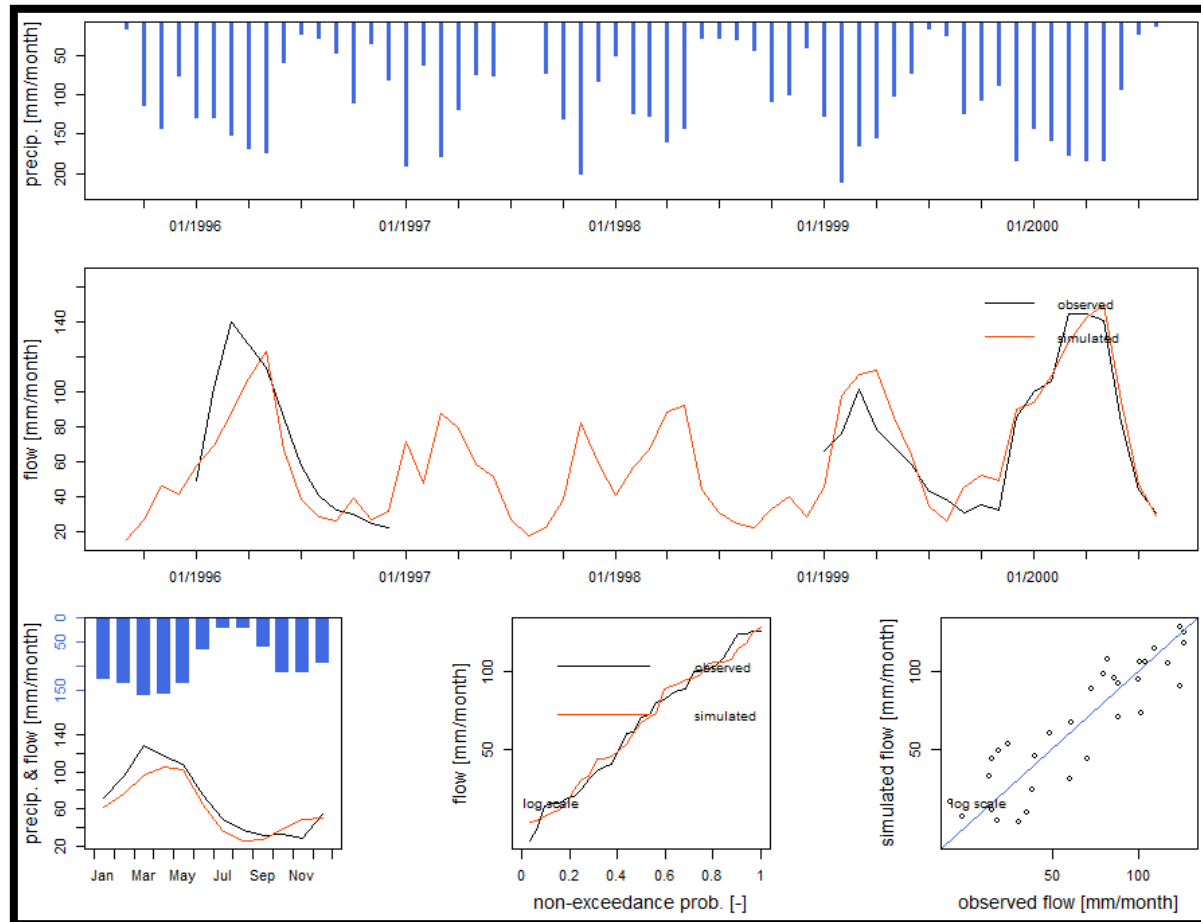


Figura 5.7. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 870.958

X2 = 1.261

Crit.NSE [Q] = 0.8017

Figura 5.8. Validación para el periodo de húmedo inverso (83, 84, 89, 93, 94)

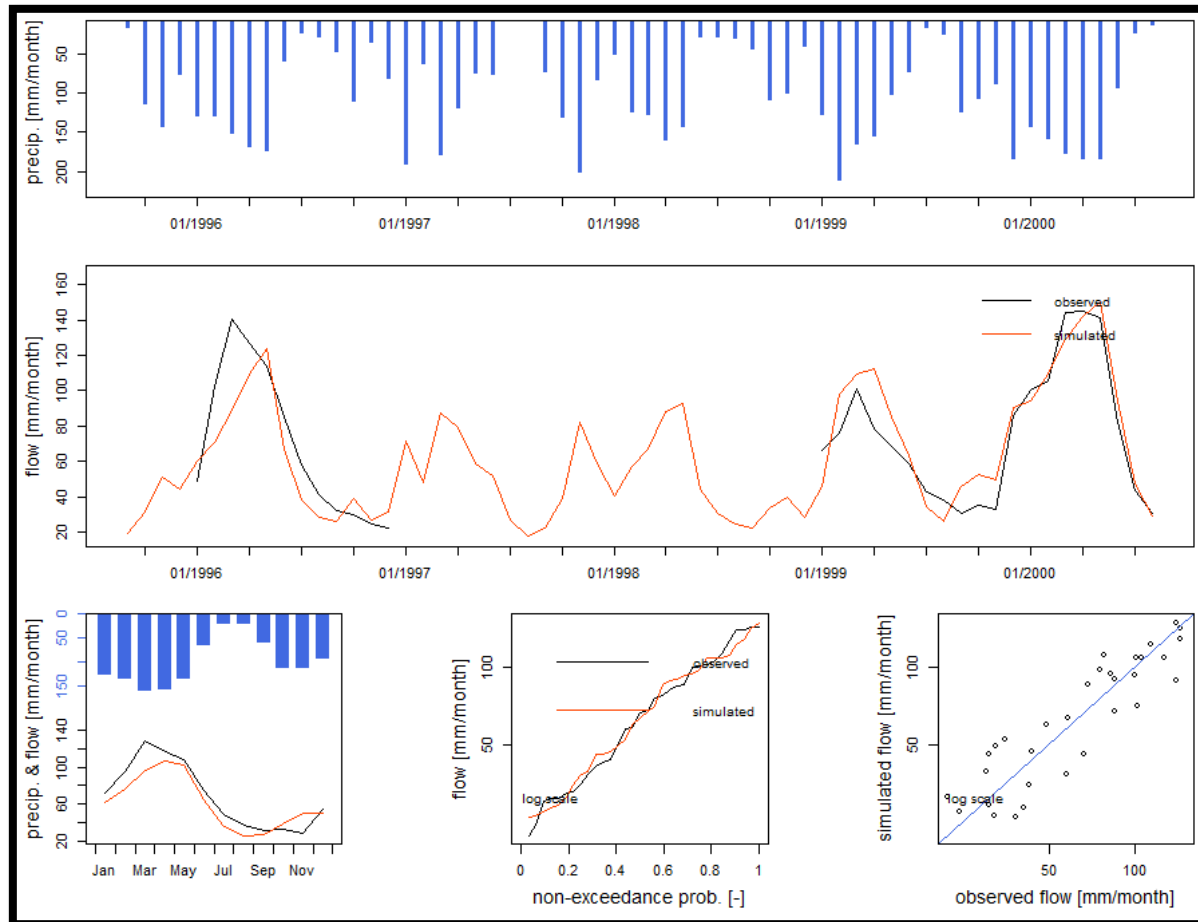


Figura 5.8. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 870.958

X2 = 1.261

Crit.NSE [Q] = 0.8070

Figura 5.9. Calibración para el periodo de seco (87, 88, 90, 91)

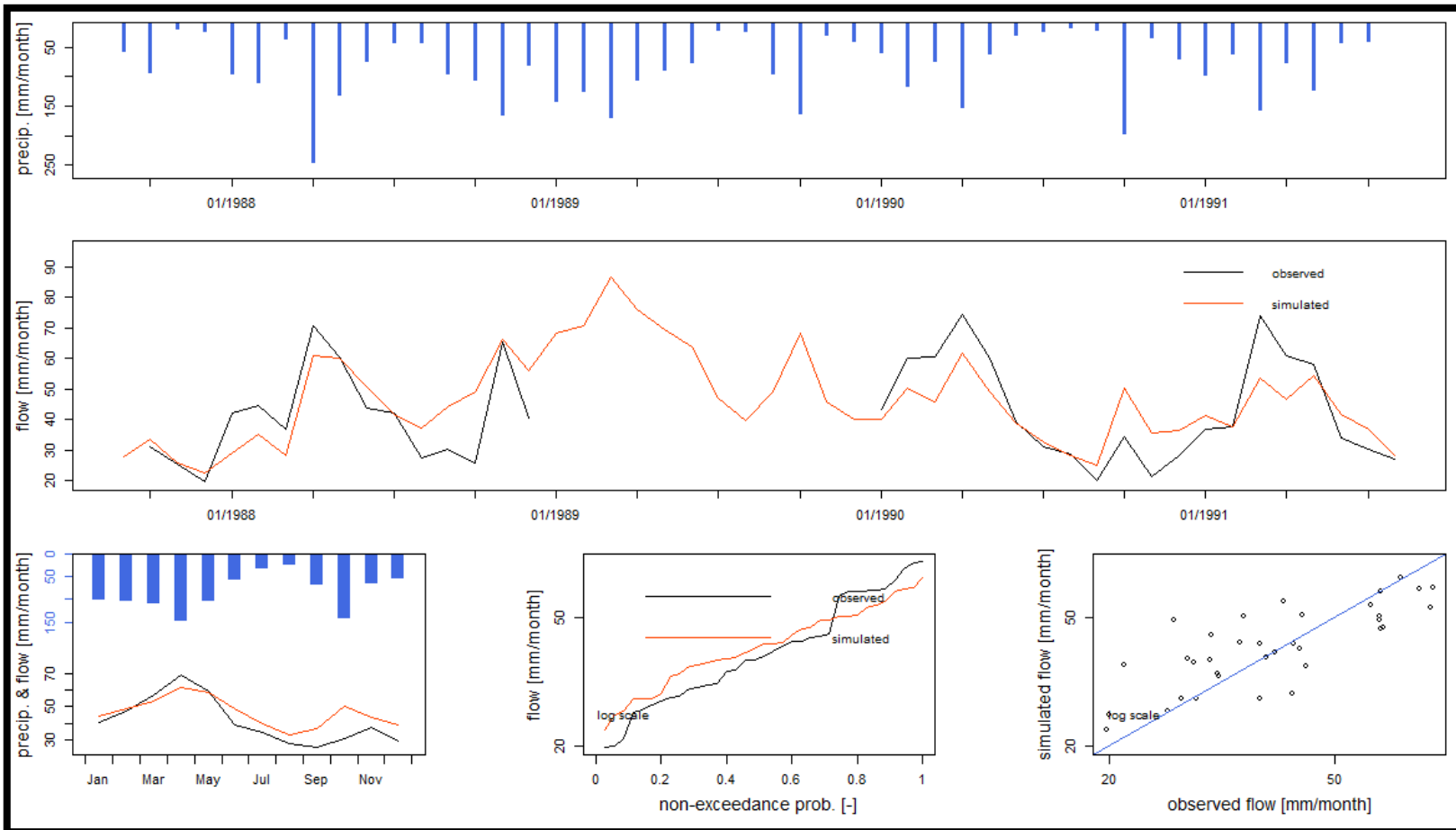


Figura 5.9. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 3124.664

X2 = 1.191

Crit.NSE [Q] = 0.6093

Figura 5.10. Validación para el periodo de seco (92, 95)

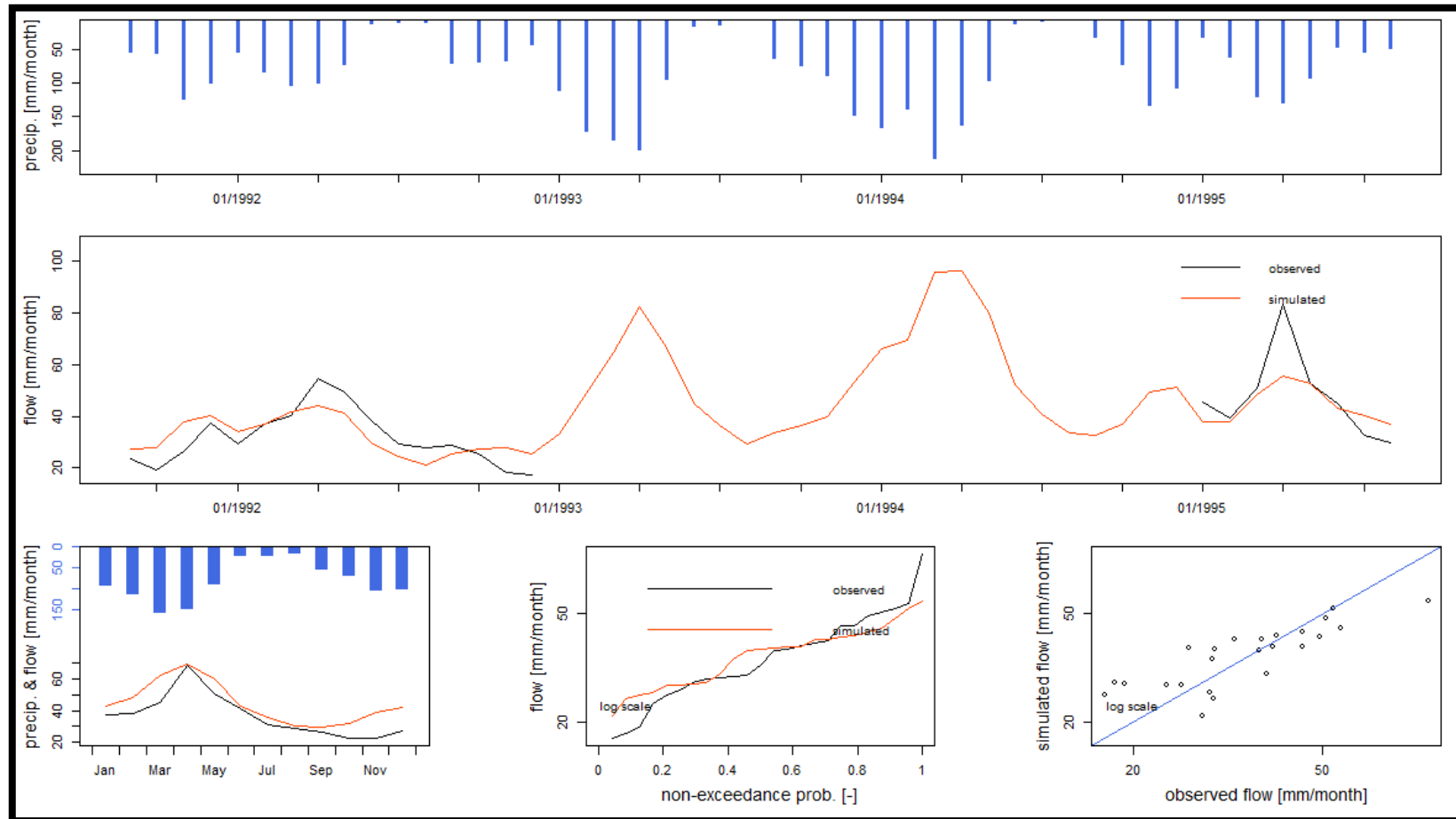


Figura 5.10. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 3124.664

X2 = 1.191

Crit.NSE [Q] = 0.6622

Figura 5.11. Calibración para el periodo de seco inverso (92, 95)

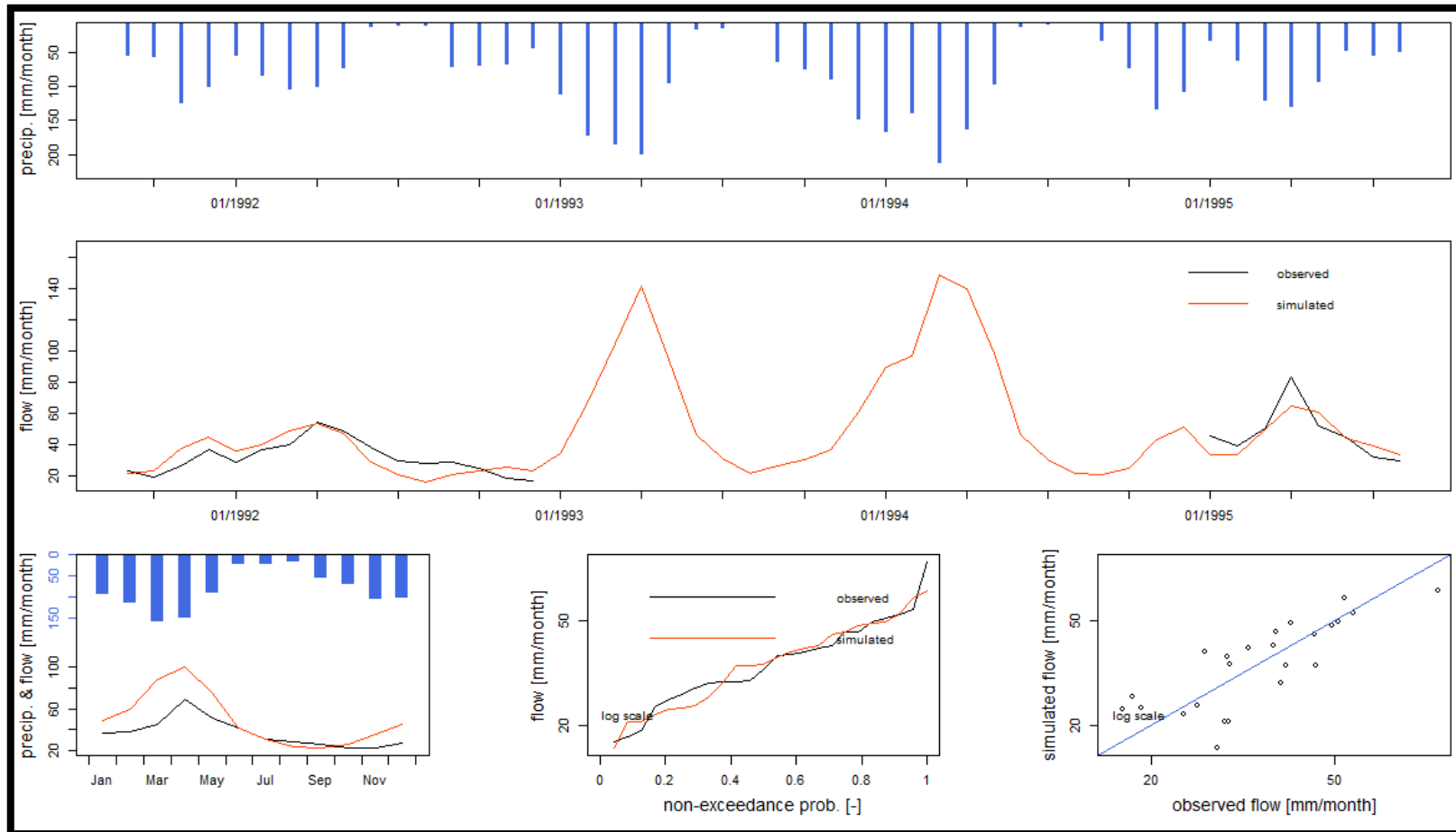


Figura 5.11. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 906.871

X2 = 1.365

Crit.NSE [Q] = 0.7105

Figura 5.12. Validación para el periodo de seco inverso (87, 88, 90, 91)

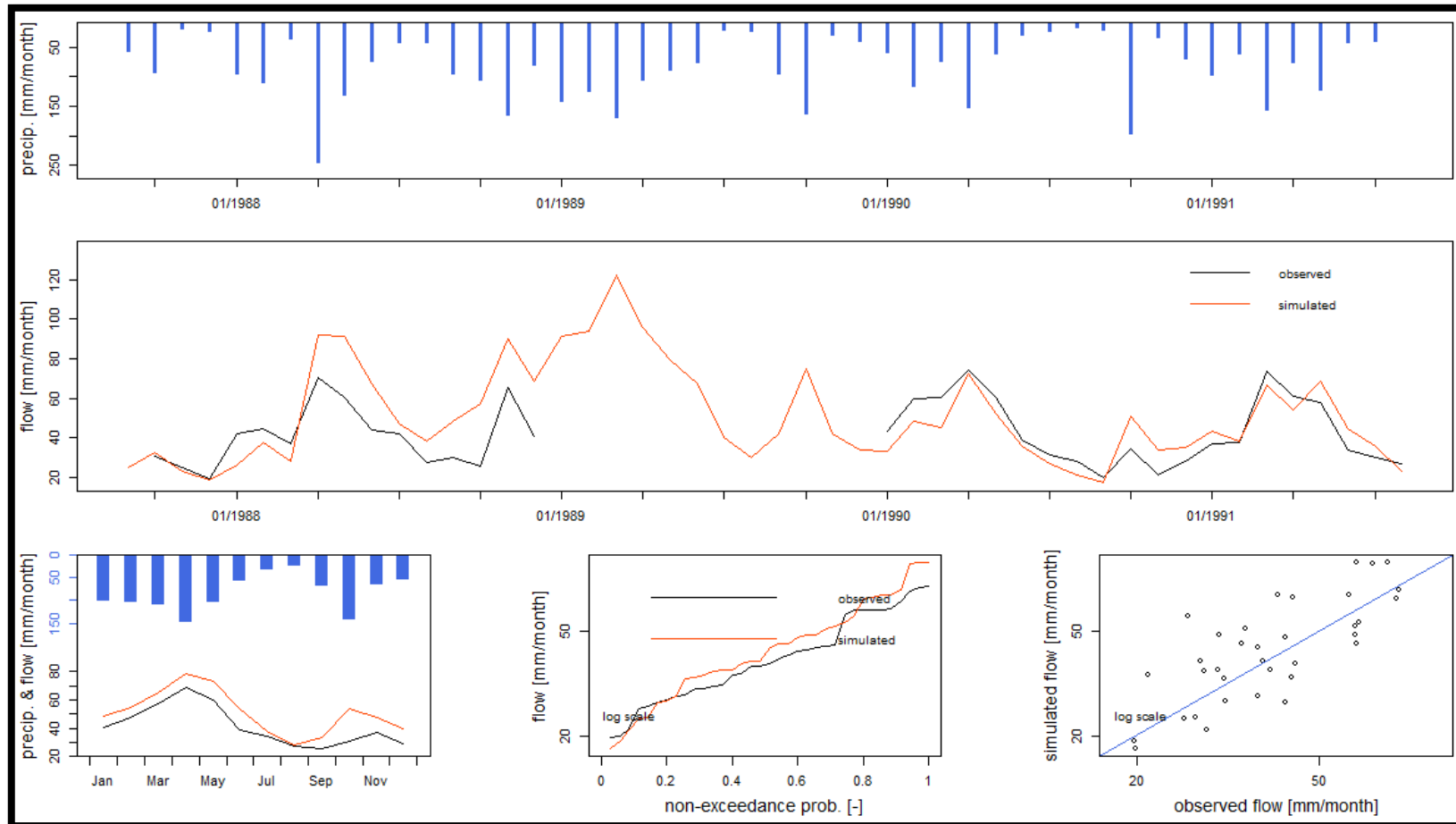


Figura 5.12. Resultados de las pruebas realizadas

X1 = 906.871

X2 = 1.365

Crit.NSE [Q] = 0.2493