



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**APLICACIÓN DE LOS MODELOS LLUVIA-ESCORRENTIA GR2M Y GR4J EN
LA CUENCA DEL RIO GUALI PARA LA GESTION DE LOS RECURSOS
HIDRICOS.**

AUTOR

LAURA VIVIANA RINCON ACHURY

COD: 2156888

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTA D.C., COLOMBIA
2019**



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**APLICACIÓN DE LOS MODELOS LLUVIA-ESCORRENTIA GR2M Y GR4J EN
LA CUENCA DEL RIO GUALI PARA LA GESTION DE LOS RECURSOS
HIDRICOS.**

AUTOR

LAURA VIVIANA RINCON ACHURY

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL**

DIRECTOR:

**MIGUEL ANGEL CAÑÓN RAMOS
INGENIERO AMBIENTAL
MSC(C) EN HIDROSISTEMAS**

CODIRECTOR:

**DARWIN MENA RENTERIA
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL
MAGISTER EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2019**

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha de presentación

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de grado va dedicado a mis papas, quienes hicieron de este sueño posible, con su esfuerzo y dedicación lograron brindarme una carrera universitaria, gracias por apoyarme, este logro es para ustedes. Evidentemente debo agradecer a mi Director, profesor, amigo Miguel Angel Cañon Ramos, por su inmensa paciencia, porque me dedico su tiempo y me apoyo en muchos momentos. A mi profesor guía Darwin Mena quien fue la persona que me motivo a realizar esta tesis de grado, sin el nada de esto hubiese sido posible. Finalmente agradezco a los lectores y evaluadores de este documento, para mí es un honor hacer parte de esta Universidad y de esta facultad, es un orgullo para mí que ustedes docentes sean evaluadores de mi trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	15
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3.	MARCO TEORICO.....	19
3.1	Hidrología	19
3.2	Modelos Hidrológicos.....	19
3.3	Modelos GR.....	20
3.3.1	Modelo GR2M.....	21
3.3.2	Modelo GR4J.....	25
3.3.3	Calibración y validación de los modelos hidrológicos	32
3.3.4	Oferta hídrica.....	32
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	Fase 1.	34
4.1.1	Series a grupos	35
4.1.2	Análisis de consistencia.....	35
4.1.3	Filtrar de datos por completitud y catalogo	37
4.1.4	Series a grupos y rellenado por aleatoriedad	37
4.1.5	Interpolación IDW.....	37
4.1.6	Prueba de aleatoriedad	37
4.1.7	Archivos datos sin rellenar y tendencias sin rellenar	37
4.1.8	Calculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite	37
4.2	Fase 2.	39
4.3	Fase 3.	41
5	RESULTADOS	42
5.1	Resultados GR2M.....	42

5.1.1	Fase 1.....	42
5.1.2	Fase 2.....	42
5.1.3	Fase 3. Calculo de la eficiencia del modelo GR2M	48
5.2	RESULTADOS GR4J	49
5.2.1	fase 1	49
5.2.2	fase 2	49
5.2.3	Fase 3. calculo de la eficiencia del modelo GR4J.....	55
5.3	Calculo oferta hídrica para la Cuenca del Rio Guali.	55
5.3.1	Calculo oferta hídrica mensual para la cuenca del Rio Guali.	55
5.3.2	Calculo oferta hídrica diaria para la Cuenca del Rio Guali.....	57
6	ANALISIS DE RESULTADOS.....	59
6.1	Análisis de resultados modelo GR2M	59
6.1.1	Fase 1.....	59
6.1.2	Fase 2.....	59
6.1.3	Fase 3.....	60
6.2	Análisis de resultados modelo GR4J	60
6.2.1	Fase 1.....	60
6.2.2	Fase 2.....	61
6.2.3	Fase 3.....	62
7	IMPACTO SOCIAL	63
8	CONCLUSIONES.....	64
9	RECOMENDACIONES.....	66
10	BIBLIOGRAFIA.....	67

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación área de estudio	16
Figura 2 Esquema del modelo GR2M	21
Figura 3 Descripción del modelo lluvia-escorrentía,	25
Figura 4. Metodología estimación oferta hídrica ENA 2014.	32
Figura 5 Esquema metodológico.	33
Figura 6 Esquema metodológico fase 1.	34
Figura 7 Mapa estaciones hidroclimatologicas a analizar.	34
Figura 8 Esquema metodológico fase 2.	39
Figura 9 Mapa subcuencas Rio Guali.	40
Figura 10 Esquema metodológico fase 3.	41

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del modelo GR4J.	26
Tabla 2. Parámetros y valores iniciales del modelo GR2M etapa de calibración.	43
Tabla 3. Parámetros y valores iniciales del modelo GR2M etapa de validación.	45
Tabla 4. División subcuencas- Cuenca del Rio Guali.	47
Tabla 5. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de calibración modelo GR2M.	48
Tabla 6. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de validación modelo GR2M.	48
Tabla 7. Parámetros y valores iniciales del modelo GR4J etapa de calibración.	50
Tabla 8. Parámetros y valores iniciales del modelo GR4J etapa de validación.	52
Tabla 9. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de calibración modelo GR4J.	55
Tabla 10. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de validación modelo GR4J.	55
Tabla 11. Clasificación de los rangos de valores par el índice de retención y regulación hídrica (IRH).	56
Tabla 12. Calculo oferta hídrica / modelo GR2M.	57
Tabla 13. Calculo oferta hídrica / modelo GR4J.	58

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1 Volumen de agua en el reservorio suelo	22
Ecuación 2 Volumen de agua antes de la infiltración	22
Ecuación 3 Volumen reservorio	23
Ecuación 4 Evaporación real	23
Ecuación 5 Despeje evaporación real	23
Ecuación 6 Almacenamiento inicial	23
Ecuación 7 Volumen de agua por percolación	23
Ecuación 8 Precipitación efectiva	24
Ecuación 9 Nivel inicial del tanque de tránsito	24
Ecuación 10 Corrección del volumen del reservorio	24
Ecuación 11 Caudal de salida	24
Ecuación 12 Nivel del tanque de tránsito	25
Ecuación 13 Precipitación neta	26
Ecuación 14 Despeje precipitación neta	27
Ecuación 15 Almacenamiento de producción	27
Ecuación 16 Tasa real de evaporación	27
Ecuación 17 Cantidad de agua corregida	27
Ecuación 18 Percolación en el tanque de producción	28
Ecuación 19 Valor de Percolación	28
Ecuación 20 Cantidad total de agua	28
Ecuación 21 Proporción acumulada de la entrada Vs tiempo	29
Ecuación 22 Calculo SH1 vs tiempo	29
Ecuación 23	29
Ecuación 24 Calculo SH2 vs tiempo	29
Ecuación 25	29
Ecuación 26	29
Ecuación 27	30
Ecuación 28	30
Ecuación 29	30
Ecuación 30 Intercambio de agua en la cuenca	30
Ecuación 31 Almacenamiento de distribución no lineal	31
Ecuación 32 Caudal de salida del tanque	31
Ecuación 33 Nivel de almacenamiento del tanque	31
Ecuación 34 Caudal total	31
Ecuación 35	31
Ecuación 36 Ecuación de Grubbs	36
Ecuación 37 Análisis de completitud	36
Ecuación 38 Índice de calor mensual	38
Ecuación 39 Índice de calor anual	38
Ecuación 40 ETP mensual sin corregir	38
Ecuación 41	38
Ecuación 42 Ecuacion de Thornthwaite	38
Ecuación 43. Índice de regulación hídrica	56

CONTENIDO DE GRAFICAS

Grafica 1 Hidrograma precipitación mensual Vs caudal mensual etapa de calibración modelo GR2M.	44
Grafica 2 Gráfico de dispersión caudales simulados / caudales observados, etapa de calibración.	44
Grafica 3 Hidrograma precipitación mensual Vs caudal mensual etapa de calibración. .	46
Grafica 4. Gráfico de dispersión caudales simulados / caudales observados, etapa de validación.	46
Grafica 5 Resultados simulación para la subcuenca Quebrada el Guarumo.	47
Grafica 6. Hidrograma precipitación diaria Vs caudal diario etapa de calibración modelo GR4J.	51
Grafica 7. Gráfico de dispersión modelo GR4J.	51
Grafica 8. Resultados validación del modelo GR4J.	53
Grafica 9. Gráfico de dispersión caudales simulados / caudales observados, etapa de validación modelo GR4J.	54
Grafica 10. Simulación subcuenca Rio Padilla modelo GR4J.	54
Grafica 11 Curva de duración de caudales mensuales Cuenca del Rio Guali.	56
Grafica 12. Curva de duración de caudales diarios Cuenca del Rio Guali.	57

LISTA DE SIGLAS Y ACRONIMOS.

CEMAGREF Centro de investigación agrícola e ingeniería ambiental de Francia

GR4J Ingeniería rural con 4 parámetros.

GR2M Ingeniería rural con 2 parámetros.

ZCIT Zona de confluencia intertropical

ETP Evapotranspiración

IDW Distancia inversa ponderada

CO Estación climatológica ordinaria

CP Estación climatológica principal

LG Estación Limnigráfica

LM Estación Limnimétrica

ME Estación Meteorológica

PG Estación Pluviográfica

PM Estación Pluviométrica

SS Estación Sinóptica Suplementaria

LISTA DE UNIDADES

°C - grados centígrados

mm - milímetros

km² - kilómetros cuadrados

mm/mes- milímetros por mes

m³/seg - metro cubico por segundo

m.s.n.m - Metros sobre el nivel del mar

RESUMEN

El objetivo de este proyecto, fue evaluar la aplicabilidad de los modelos hidrológicos lluvia- escorrentía GR2M y GR4J para la determinación de caudales diarios y caudales mensuales. Dicha evaluación fue llevada a cabo tomando como área de estudio a la cuenca del río Guali ubicada al norte del departamento del Tolima, esto con el fin de atender una de las problemáticas que se presentan en dicha cuenca debido a la escasez de información en sus estaciones. Así mismo se determinó la eficiencia de los modelos hidrológicos, teniendo en cuenta el ajuste de estos a las condiciones de la cuenca evaluada, para así determinar finalmente si los modelos GR2M y GR4J son eficientes al aplicarlos en Colombia.

Se realizó un análisis hidroclimatológico programado en el software PYTHON con el fin de determinar la calidad de los datos climatológicos disponibles y a su vez realizar una depuración y reclasificación de las estaciones climatológicas, de tal forma que se obtuviera una base de datos completa que hiciera más eficiente los modelos. Posterior a esto, se calibraron ambos modelos teniendo en cuenta la precipitación y evapotranspiración potencial, dicha evapotranspiración fue calculada por el método de thornthwaite.

Seguido a esto se ejecutaron los dos modelos con los datos correctamente calibrados, para esto se utilizó un lenguaje de programación PYTHON y las hojas de Excel programadas por CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia, que ayudo a que los modelos fueran aún más eficientes, en cuanto al tiempo de ejecución. De acuerdo a los resultados obtenidos con las modelaciones, se pudo evidenciar que el modelo GR2M obtuvo una eficiencia en la etapa de calibración según el criterio de Nash del 67 % y del 79.1% en la etapa de validación que indica que el modelo GR2M fue ajustable en la cuenca del Río Guali. Para el modelo GR4J se obtuvo una eficiencia en la etapa de calibración del 76,2% y en la etapa de validación del 80%, lo que indica que este modelo es aplicable y ajustable en la cuenca del Río Guali. Se calculó la oferta hídrica total con el fin de darle una aplicación a los dos modelos en la cuenca del Río Guali. Finalmente se concluye que estos modelos son de gran importancia e impacto debido a que con sólo con datos de precipitación, evapotranspiración y caudal se logra un proceso de optimización efectivo, y de esta manera obtener la mejor aproximación entre los caudales estimados y los observados. Se recomienda finalmente aplicar este tipo de modelos a cuencas en Colombia que presenten dicho problema por la falta de disponibilidad de datos en sus estaciones de monitoreo.

ABSTRACT

The objective of this project was to evaluate the applicability of the hydrological rainfall-runoff models GR2M and GR4J to determine the daily and monthly flows. This evaluation was made taking as a study area the basin of the Guali river located in the north of the department of Tolima, with the purpose of helping to solve the problems that appeared in this basin, for not having enough information in its stations. that's why we determine the efficiency of the hydrological models, having this information and adjusting this to the conditions of the evaluated basin, we can finally determine if the GR2M and GR4J models are efficient to apply them in Colombia

we made a hydroclimatological analysis programmed in the software PYTHON, to get to determine the quality of the available climatological data and at the same time to make a purification and reclassification of the climatological stations, to obtain a complete database that would make the models more efficient. After this, both models were calibrated having the data of precipitation and potential evapotranspiration, said evapotranspiration was calculated by the thornthwaite method.

After this the two models were executed with the correctly calibrated data, to achieve this we used a PYTHON programming language and the Excel pages programmed by CEMAGREF (Center for Agricultural Research and Environmental Engineering of France), which helped to make the models even more efficient, in terms of execution time. According to the results obtained with the modeling, it was observed that the GR2M model shows an efficiency in the calibration stage according to the Nash criterion of 67% and 79.1% in the stage of validation that indicates that the GR2M model was adjustable in the Guali River basin. For the GR4J model, an efficiency in the calibration stage of 76.2% and in the validation stage of 80% is obtained, which indicates that the The model is applicable and adjustable in the Guali River basin.

Finally we can conclude that these models are of great importance and impact because with only data of precipitation, evapotranspiration and flows, we can achieve an optimal and effective process, in this way we obtain better approximation between the estimated and observed flows. Finally, it is recommended to apply this type of models in the basins in Colombia that present this problem for not having enough data available in their monitoring stations.

1. INTRODUCCION

Los modelos hidrológicos ahorran tiempo y dinero debido a su capacidad de realizar simulaciones a largo plazo de los efectos en los procesos de las cuencas y las actividades de manejo sobre la calidad del agua, cantidad de agua y la calidad del suelo. Estos modelos facilitan la simulación de diversos efectos del programa de conservación y el diseño de políticas para mitigar la degradación de la calidad del agua y del suelo. Así mismo se logran usar los resultados de los modelos para tareas que van desde la regulación hasta la investigación [1].

En muchas regiones de Colombia es común encontrar información de variables como precipitación y temperatura, la problemática inicial es que los registros de caudales son un poco más complejos de encontrar, dicho problema puede deberse a que las herramientas de medición son costosas, se deterioran fácilmente o los lugares a los que se pretende llegar son de difícil acceso. De tal forma que evaluar los caudales a partir de la precipitación y temperatura se ha convertido en un importante tema de investigación.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad de los modelos lluvia – escorrentía GR4J Y GR2M en la cuenca del Rio Guali, como alternativa para la gestión de los recursos hídricos en la zona. La cuenca hidrográfica del río Gualí, se ubica entre los 4° 35' y 3° 44' de latitud, al norte del Ecuador, sobre la vertiente oriental de la cordillera central, en la zona andina colombiana, el clima de la región es de carácter tropical, determinado principalmente por las variaciones altimétricas, la topografía del relieve y la influencia que ejerce el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), la cual genera a su paso dos períodos húmedos y dos secos (de menores precipitaciones), que se intercalan a lo largo del año [2].

Esta cuenca esta ubica al norte del departamento del Tolima entre las cuencas de los ríos Guarinó, Lagunilla y Sabandija, donde se encuentran los municipios de: Honda, Mariquita, Falan, Fresno, Herveo, Casabianca, Palocabildo. Es una cuenca compartida con el Parque Nacional Natural Los Nevados; el río nace a los 4.850 m.s.n.m en la vereda Agua Caliente del municipio Casabianca, sus aguas desembocan a la cuenca del río grande del Magdalena, sobre los 200 m.s.n.m en el municipio de Honda (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Su precipitación media anual es de 2516,71 mm, presenta una humedad relativa aproximadamente del 77,1% y una Temperatura promedio de 18.7°C [3].

El principal interés de este proyecto es mejorar el conocimiento del régimen hidrológico de los ríos Medina, Sucio, Aguacatal y Cajones principales afluentes de la cuenca [2]. En donde los resultados de la modelación, permitirán tener una mejor estimación espacio – temporal de la oferta del recurso hídrico en esta cuenca y así comprobar la eficiencia y el ajuste de estas herramientas en Colombia, y la

posibilidad de utilizarlas para la correcta gestión del recurso hídrico en las cuencas hidrográficas colombianas.

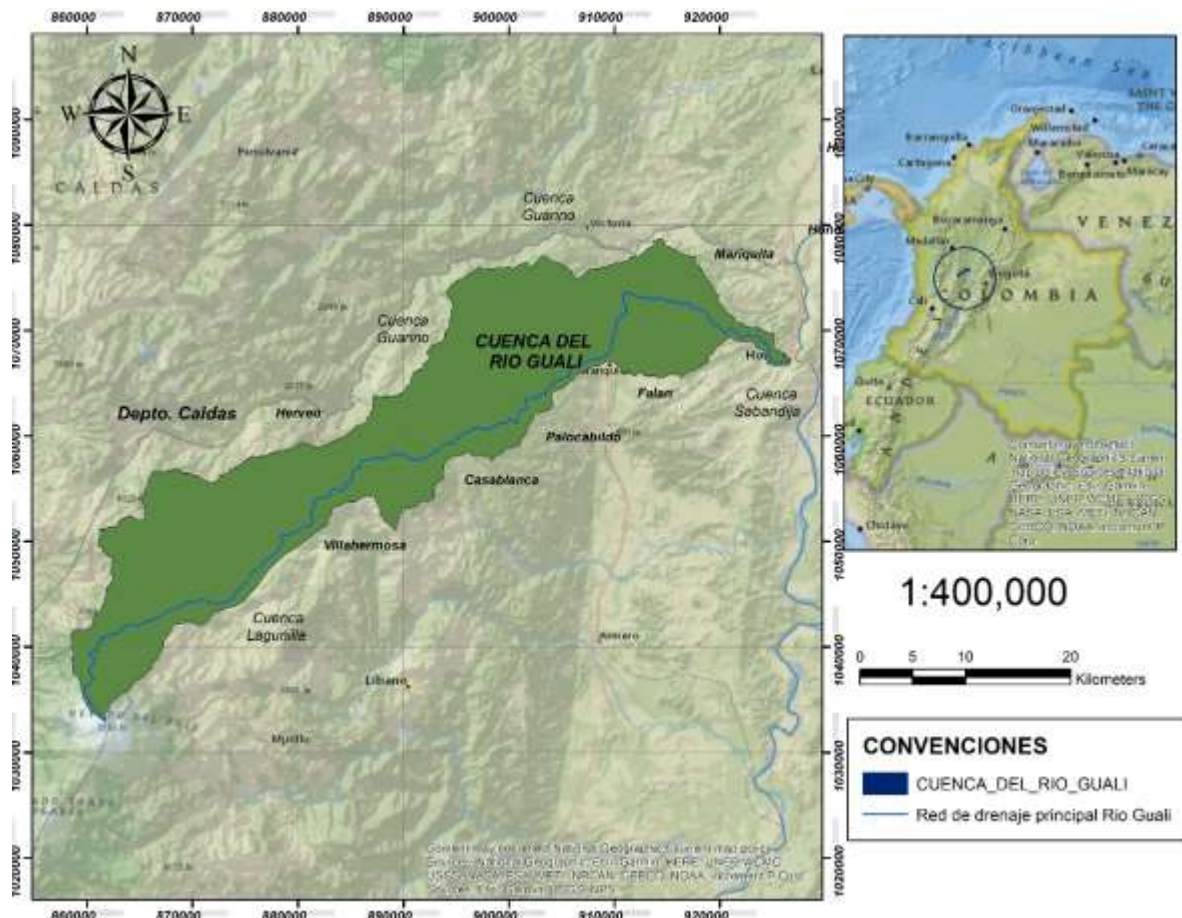


Figura 1 Ubicación área de estudio

Fuente: Elaboración propia.

La planificación y gestión de los recursos hídricos requieren conjuntos de datos completos de una serie de variables hidrológicas, como picos de inundación y volúmenes. Sin embargo, los hidrólogos se enfrentan a menudo con el problema de la falta de datos en las bases de datos hidrológicos [5]. El régimen de caudales es un dato básico e indispensable, para todos los diseños hidráulicos y para muchas obras civiles como las carreteras, puentes, acueductos, presas, entre otras. Así como la instalación de varias "estaciones de aforo" que permitan observar, en una serie de años tan larga como sea posible, los caudales escurridos en puntos característicos del río principal y, si fuere oportuno de sus diversos afluentes. Esto es el preámbulo de todo estudio hidráulico de una cuenca. Sin embargo, en países como el nuestro las estaciones de aforo de caudales son inexistentes en muchas partes del país, lo que ha obligado a recurrir a métodos aproximados para la estimación de los caudales [6].

Donde los modelos lluvia escurrentía agregados son valiosos para predecir y simular los caudales con base en una conceptualización que represente en forma simplificada los procesos físicos en la cuenca como infiltración, evaporación y flujo subsuperficial [7]. Modelos que han sido poco utilizados en Colombia y que podrían ser herramientas vitales para zonas donde no se cuenta con información en sus estaciones de monitoreo, determinando finalmente si este tipo de modelos son ajustables y útiles en Colombia, solucionando así no solo el problema principal que presenta esta cuenca, sino que también aportando al desarrollo de la investigación y utilización de software de última generación a nivel nacional.

Finalmente, esta modelación permitirá obtener con pocos parámetros como precipitación y temperatura una simulación eficaz de tal forma que la incertidumbre asociada al proceso de calibración no dependa fuertemente del número de parámetros del modelo [7]. Sin dejar de lado que el principal interés de este proyecto es mejorar el conocimiento del régimen hidrológico de los ríos Medina, Sucio, Aguacatal y Cajones principales afluentes de la cuenca.

La metodología aplicada fue desarrollada en una serie de etapas en las cuales se realizó un análisis hidroclimatológico programado en el software PYTHON con el fin de determinar la calidad de los datos climatológicos disponibles y su vez realizar una depuración y reclasificación de las estaciones climatológicas, de tal forma que se obtuviera una base de datos completa que hiciera más eficiente los modelos. Posterior a esto se calibraron ambos modelos teniendo en cuenta la precipitación y evapotranspiración potencial, dicha evapotranspiración fue calculada por el método de thornthwaite, este método fue seleccionado ya que los únicos datos de entrada que se necesitaban de las estaciones de monitoreo era la temperatura media método que se ajustaba a la poca disponibilidad de datos en la región.

Seguido a esto se ejecutaron los dos modelos con los datos correctamente calibrados, para esto se utilizó un lenguaje de programación PYTHON que ayudo a que los modelos fueran aún más eficientes, en cuanto al tiempo de ejecución y finalmente se calculó la oferta hídrica total con el fin de darle una aplicación a los dos modelos en la cuenca del Rio Guali.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicabilidad de los modelos lluvia – escorrentía GR4J Y GR2M en la cuenca del Rio Guali, como alternativa para la gestión de los recursos hídricos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis hidroclimatológico en el área de estudio para definir las entradas a los modelos.
- Aplicación de los modelos lluvia- escorrentía GR2M y GR4J en la estimación de la oferta neta total para la cuenca del Rio Guali, con el fin de determinar si estas herramientas son ajustables y útiles en Colombia.
- Determinar la eficiencia de los modelos mediante la comparación de los registros de caudales de estaciones limnimétricas y los caudales simulados.

3. MARCO TEORICO

3.1 Hidrología

La hidrología es el estudio del agua. Donde se examinan los procesos físicos involucrados en el ciclo global del agua, que abarca la mayoría de las disciplinas de la Tierra y las ciencias ambientales [8]. Es una ciencia básica en Ingeniería del Agua, necesaria para su uso por profesionales dedicados a proyectos de recursos hídricos, y que, además, posee un amplio abanico de problemas científicos actualmente bajo una intensa investigación. La hidrología de una región depende, en primer lugar, de su clima, de lo que se deriva la necesidad de conocer los procesos meteorológicos que lo determinan [9].

3.2 Modelos Hidrológicos

Un modelo de sistema hidrológico o también llamado modelo hidrológico es una aproximación al sistema real, donde sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables o medibles y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y salidas. Donde su principal objetivo es estudiar la operación del sistema y predecir su salida [10].

En términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la unidad hidrológica bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas [11].

Según el protocolo de modelación matemática postulado por Efrain Dominguez la manera correcta de desarrollar un modelo consiste en una serie de etapas donde la primera es la definición del modelo que contiene la parte conceptual de este, el objetivo del modelo y el tipo de modelo a utilizar. En la siguiente etapa se realiza la formulación numérica, la codificación del programa y la verificación del código. Y la tercera y última etapa consiste en obtener el mayor número de respuestas con los datos obtenidos por el modelo y verificar la coherencia de los resultados. Una vez analizado esto, se procede a consolidar el documento soporte del proceso de toma de decisiones [12].

Durante el último siglo, muchos modelos han sido propuestos para representar la transformación de la precipitación en el caudal a la salida de una cuenca. Al transcurrir el tiempo, estos modelos se denominaron modelos de balance de agua [13]. Por ejemplo, el modelo MOSAZ fue desarrollado a principios de la década de

1980 por Sukvanachaikul, es un modelo mensual de equilibrio de agua de 6 parámetros para cuencas semiáridas, fue probablemente el primer intento de representar la transformación del flujo de lluvia mensual con solo dos parámetros libres [14]. En el año 1995, se implementó la metodología de Predicción extendida de caudales en la cual se utiliza los periodos históricos de precipitación con igual fecha calendario al periodo que se quiere predecir, dando como resultado, con un modelo lluvia-escorrentía, un conjunto de trazas de caudales [15].

En la actualidad ya se han realizado diversas investigaciones y se han aplicado varios modelos de estimación de caudales como el modelo SWAT, donde se demostró que el montaje de toda la información de entrada necesaria para ejecutar el modelo SWAT en una cuenca con datos disponibles limitados, como en esta cuenca, es una tarea difícil [16]. Así mismo se encontraron modelos que si se ajustan a lugares con poca disponibilidad de datos como lo es TopNet un modelo hidrológico semi-distribuido, el estudio se realizó en la cuenca de Waipara ubicada en la Isla Sur de Nueva Zelanda, se determinó que la cantidad total de escorrentía simulada del modelo es razonable con las observaciones en términos de variación temporal. Sin embargo, hay una discrepancia en el volumen total [17].

El modelo GR2M ha sido utilizado en Latinoamérica como por ejemplo en la cuenca del río Jequetepeque, cuenca perteneciente a la vertiente del Pacífico, ubicado en la costa norte del Perú, presentando una alta eficiencia, tanto en el periodo de calibración (83%) como en el periodo de validación del modelo (81.3%) [18]. En el presente proyecto se aplicaron los modelos GR2M y GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier, siglas en francés). Así mismo se evaluó el impacto de las estimaciones mejoradas de la evapotranspiración potencial (PE) en los resultados de los dos modelos de lluvia-escorrentía [19].

3.3 Modelos GR

Los modelos GR son un grupo de modelos precipitación-escorrentía desarrollados en Francia por la unidad de investigación en hidrología del Cemagref d'Antony. Estos modelos se caracterizan por utilizar como datos de ingreso la precipitación y la temperatura. Desde 1983, año en que se propuso este modelo de forma global para reconstruir los caudales diarios, el modelo GR ha evolucionado presentando diferentes versiones como el GR1A, para caudales anuales; GR2M, para caudales mensuales; GR3J y GR4J, para caudales diarios [20].

3.3.1 Modelo GR2M

El GR2M es un modelo hidrológico mensual agregado, desarrollado por el CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia), y fue propuesto para reconstruir caudales a partir de precipitación y evapotranspiración, mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia. Esto con él con objetivo de aplicarlo en el campo de los recursos hídricos y los bajos niveles de agua [21,22].

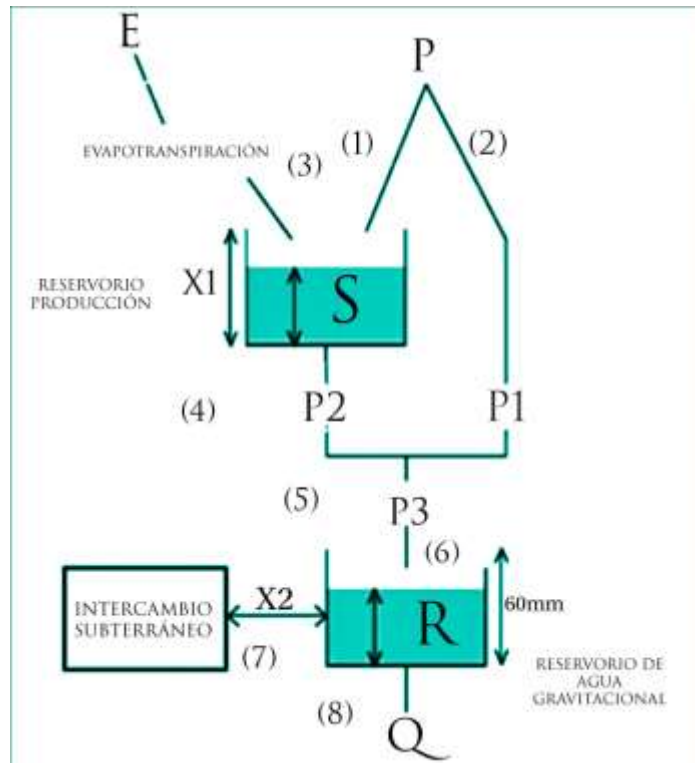


Figura 2 Esquema del modelo GR2M

Fuente: [20]

El modelo GR2M consiste en un tanque o reservorio de producción que rige la función de producción y que se caracteriza por su capacidad máxima y un depósito de "agua de gravedad" que rige la función de transferencia. Este modelo mensual de balance de agua se rige por dos parámetros que deben detenerse ($X1$ y $X2$). El primer parámetro ($X1$) representa la capacidad máxima del tanque o reservorio de producción "tierra". El segundo parámetro ($X2$) representa el parámetro de intercambio subterráneo en el tanque o reservorio de "agua de gravedad" [23].

La Figura 2 muestra la complejidad del modelo GR2M con sus principales procesos hidrológicos que producen escorrentía y que son tomados en cuenta por el modelo.

De acuerdo a este esquema, P es la precipitación media de la cuenca, P1 es la escorrentía superficial, E es la evapotranspiración actual, P2 la percolación profunda, S el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, R el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y Q el caudal a la salida de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo es X1 y la del reservorio gravitacional es asumida como 60mm.

3.3.1.1 Descripción matemática del modelo GR2M

3.3.1.1.1 Función de Producción

De acuerdo a la Figura 2, parte de la precipitación es absorbida por el reservorio de producción y otra (P1) se dirige al reservorio o tanque de agua gravitacional. El nuevo volumen de agua en el reservorio suelo (S1) se calcula de la siguiente manera [24] [25]:

$$S_1 = \frac{S + X_1 \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)}$$

Ecuación 1 Volumen de agua en el reservorio suelo

Fuente: [24] [25]:

dónde:

- X1 es la capacidad del reservorio suelo.
- S1 es el nuevo volumen de agua en el reservorio suelo.

Asumiendo que no hay pérdidas, el volumen de agua antes de la infiltración debe ser el mismo después de ésta; es decir [24] [25]:

$$P_1 = P + S + S_1$$

Ecuación 2 Volumen de agua antes de la infiltración

Fuente: [24] [25].

El reservorio suelo será afectado por la evapotranspiración, reduciendo su volumen a S2. El nuevo volumen se calcula de la siguiente manera [24] [25]:

$$S_2 = \frac{S_1 + (1 - \tanh(\frac{E}{X_1}))}{1 + (1 - \frac{S_1}{X_1})\tanh(\frac{E}{X_1})}$$

Ecuación 3 Volumen reservorio

Fuente: [24] [25].

De esta forma, la evaporación real estimada por el modelo puede calcularse como [24] [25]:

$$E_S = S_1 + S_2$$

Ecuación 4 Evaporación real

Fuente: [24] [25].

$$E_S = \frac{S_1 \left(2 - \frac{S_1}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

Ecuación 5 Despeje evaporación real

Fuente: [24] [25].

Posteriormente, una cantidad de agua P2 es liberada del tanque de producción como percolación. De esta manera S2, toma un nuevo valor S, el cual representa el almacenamiento inicial en el siguiente mes [24] [25]:

$$S = \frac{S_2}{[1 + (\frac{S_2^3}{X_1})]^{1/3}}$$

Ecuación 6 Almacenamiento inicial

Fuente: [24] [25].

luego, el volumen de agua que percolación P2 se estimará como la diferencia entre S2 y S [24] [25]:

$$P_2 = S_2 - S$$

Ecuación 7 Volumen de agua por percolación

Fuente: [24] [25].

3.3.1.1.2 Función de Transferencia

Conocido el volumen de agua que percolación, la precipitación efectiva que ingresa al reservorio de agua gravitacional (P3), será [24] [25]:

$$P_3 = P_1 - P_2$$

Ecuación 8 Precipitación efectiva

Fuente: [24] [25].

El nivel inicial en tanque de tránsito, R, se actualiza como [23] [24]:

$$R_1 = R - P_3$$

Ecuación 9 Nivel inicial del tanque de tránsito

Fuente: [24] [25].

Sin embargo, debido a que existe un intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial, el volumen del reservorio se corrige por el factor X2 [24] [25]:

$$R_2 = X_2 - R_1$$

Ecuación 10 Corrección del volumen del reservorio

Fuente: [24] [25].

Finalmente, el reservorio de agua gravitacional se vacía siguiendo una función cuadrática, dándonos como resultado el caudal de salida [24] [25].

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

Ecuación 11 Caudal de salida

Fuente: [24] [25].

Como se puede observar, la máxima capacidad del tanque de tránsito tiene un valor de 60 mm, que dependen de dos variables a optimizar X1 y X2. Finalmente, el nivel en el tanque de tránsito al inicio del siguiente mes se calcula como [24] [25].

$$R = R_2 - Q$$

Ecuación 12 Nivel del tanque de tránsito

Fuente: [24] [25].

3.3.2 Modelo GR4J

El modelo hidrológico GR4J es un modelo conceptual de precipitación pluvial concentrado con solo cuatro parámetros, que fue mejorado por Perrin en el 2003, basado en el modelo GR3J de Edijatno en 1999, que solo incluía tres parámetros libres [27,28]. El modelo GR4J es uno de los modelos más simples y se ha demostrado que tiene la capacidad de simular el proceso de precipitación-escorrentía en el paso del tiempo diario [27]. Este modelo ha sido ampliamente utilizado como en la simulación secuencial de la humedad del suelo y los datos del flujo en modelos conceptuales de precipitación-escorrentía obteniendo resultados muy satisfactorios [29]. Es por esto que el modelo GR4J es utilizado en el desarrollo de este proyecto.

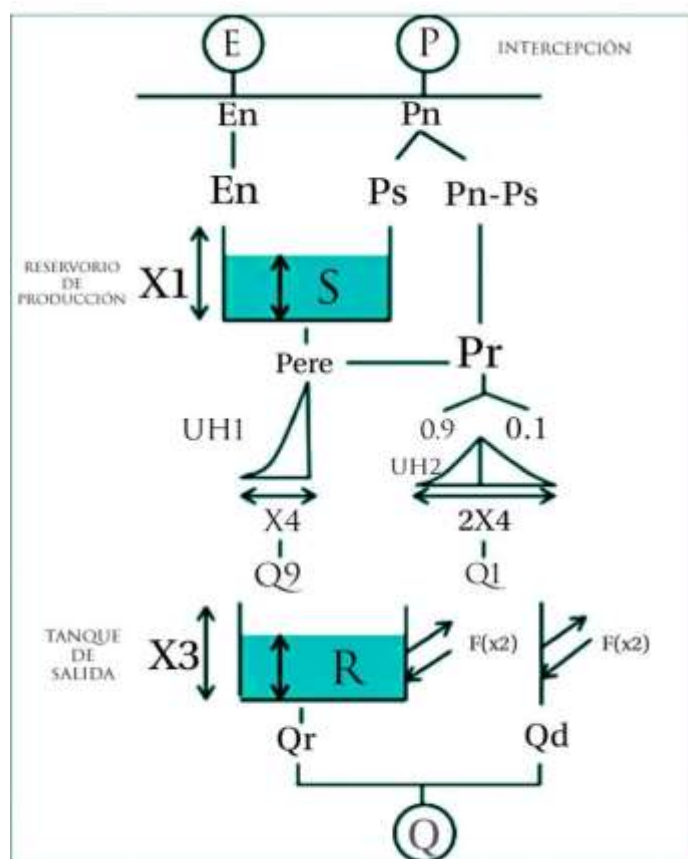


Figura 3 Descripción del modelo lluvia-escorrentía,

Fuente: [27]

3.3.2.1 Parámetros y variables del modelo GR4J

Una breve descripción del modelo se da en la Fig.3 El modelo GR4J toma la precipitación diaria del área y la evapotranspiración como entrada y la escurrimiento diario como salida. Así mismo utiliza el coeficiente de Nash-Sutcliffe como la función objetivo en la fase de calibración. En el modelo la precipitación y la evapotranspiración potencial se denotan como P y E respectivamente. P es calculada según los registros de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial para cada subcuenca. E puede ser un valor promedio diario de largo plazo. Cabe resaltar que todas las cantidades, bien sean entradas, salidas o variables internas están expresadas en mm, por tal motivo, los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cuando sea necesario [27].

Los parámetros del modelo están representados en la tabla 1:

Tabla 1. Parámetros del modelo GR4J.

X₁ (mm)	Capacidad máxima del tanque de producción.
X₂ (mm)	Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas.
X₃ (mm)	Capacidad máxima para el tránsito en canales.
X₄ (días)	Tiempo base del hidrograma unitario UH1.

Fuente: [27]

3.3.2.2 Descripción matemática del modelo GR4J

3.3.2.2.1 Determinación de la precipitación y evapotranspiración potencial neta.

Las componentes principales del modelo incluyen: en primer lugar, el restar la evapotranspiración E de la precipitación P, se determina una precipitación neta P_n o una capacidad neta de evapotranspiración E_n [27].

$$\text{Si } P \geq E \text{ entonces } P_n = P - E \text{ y } E_n = 0$$

Ecuación 13 Precipitación neta

Fuente: [27]

Si $P < E$ entonces $P_n = 0$ y $E_n = E - P$

Ecuación 14 Despeje precipitación neta

Fuente: [27]

3.3.2.2.2 Almacenamiento de producción.

En el caso en que P_n no sea cero, una parte P_s de P_n , entra al tanque de producción:

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}$$

Ecuación 15 Almacenamiento de producción

Fuente: [27]

P_s es determinada como una función del nivel S en el tanque, donde x_1 (mm) es la máxima capacidad del tanque de producción. Cuando E_n no es cero, una tasa real de evaporación es determinada como una función del nivel en el almacenamiento de producción con el fin de calcular la cantidad E_s de agua que se evaporará del tanque.

$$E_s = \frac{S \left(2 - \left(\frac{S}{x_1} \right) \right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}$$

Ecuación 16 Tasa real de evaporación

Fuente: [27]

De esta forma, el contenido de agua en el tanque de producción se actualiza como:

$$S = S - E_s + P_s$$

Ecuación 17 Cantidad de agua corregida

Fuente: [27]

Es importante resaltar que S nunca puede exceder a x_1 . Una cantidad $Perc$ se escapa como percolación del almacenamiento de producción. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$Perc = S \left\{ \left[1 + \left(\frac{A S}{9 x_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Ecuación 18 Percolación en el tanque de producción

Fuente: [27]

De la expresión anterior se concluye que la percolación no contribuye mucho al caudal, por esta razón es importante principalmente para la simulación de eventos mínimos. El valor de Percolación es siempre menor que S . El nuevo nivel en el tanque queda definido como:

$$S = S - E_s + P_s$$

Ecuación 19 Valor de Percolación

Fuente: [27]

3.3.2.2.3 Distribución lineal con hidrógramas unitarios.

La cantidad total de agua P_r que alcanza las funciones de distribución está dada por:

$$P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

Ecuación 20 Cantidad total de agua

Fuente: [27]

El valor de P_r se divide en dos componentes de flujo: el 90% de P_r se distribuye por medio de una hidrógrafa unitaria UH1 y luego por un tanque de distribución no lineal. El 10% restante de P_r es distribuido por medio de una hidrógrafa unitaria UH2. Con UH1 y UH2, se puede simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. Las ordenadas de ambas hidrógrafas son usadas en el modelo para distribuir la lluvia efectiva sobre varios intervalos de tiempo sucesivos. UH1 y UH2 dependen del mismo parámetro x_4 expresado en días, sin embargo, UH1 tiene un tiempo base de x_4 días, mientras que UH2 tiene un tiempo base de $2x_4$ días. El parámetro x_4 puede tomar valores reales y debe ser mayor de 0.5 días.

En su forma discreta, las hidrógrafas unitarias UH1 y UH2 tienen n y m ordenadas respectivamente, donde n y m son los enteros más pequeños que exceden x_4 y $2x_4$ respectivamente. Las ordenadas de ambas hidrógrafas se derivan de las curvas-S

correspondientes (proporción acumulada de la entrada con el tiempo) denotadas por SH1 y SH2 respectivamente. SH1 está definida a lo largo del intervalo de tiempo t de la siguiente forma:

$$\text{Para } t \leq, SH1(t) = 0$$

Ecuación 21 Proporción acumulada de la entrada Vs tiempo

Fuente: [27]

$$\text{Para } 0 < t < x_4, SH1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 22 Calculo SH1 vs tiempo

Fuente: [27]

$$\text{Para } t \geq x_4, SH1(t) = 1$$

Ecuación 23

Fuente: [27]

SH2 es definida de una manera similar:

$$\text{Para } t \leq, SH2(t) = 0$$

Ecuación 24 Calculo SH2 vs tiempo

Fuente: [27]

$$\text{Para } 0 < t < x_4, SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 25

Fuente: [27]

$$\text{Para } x_4 < t < 2x_4, SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 26

Fuente: [27]

$$\text{Para } t \geq 2x_4, SH2(t) = 1$$

Ecuación 27

Fuente: [27]

Finalmente, las ordenadas de UH1 y UH2 se calculan como:

Donde j es un entero.

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$$

Ecuación 28

Fuente: [27]

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1)$$

Ecuación 29

Fuente: [27]

3.3.2.2.4 Intercambio de agua en la cuenca.

Posteriormente se calcula un término F que actúa en ambas componentes de flujo, el cual indica el intercambio de agua subterránea:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{\frac{7}{2}}$$

Ecuación 30 Intercambio de agua en la cuenca

Fuente: [27]

R es el nivel en el tanque de distribución, x3 es la capacidad de referencia y x2 es el coeficiente de intercambio. El parámetro x2 puede ser positivo en el caso en que se importa agua, negativo en el caso en que hay pérdidas, o cero cuando no hay intercambio de agua. Entre más alto el nivel en el tanque de distribución mayor es el intercambio. En valor absoluto, F no puede ser mayor que x2, puesto que el coeficiente de intercambio representa la máxima cantidad de agua que puede ser adicionada (o liberada) a (de) cada componente de flujo, cuando el nivel en el tanque de distribución es igual a x3 [27].

3.3.2.2.5 Almacenamiento de distribución no lineal.

El valor de R se actualiza adicionando el término F y la salida Q9 proveniente de UH1:

$$R = \max(0; R + Q9 + F)$$

Ecuación 31 Almacenamiento de distribución no lineal

Fuente: [27]

El caudal de salida del tanque, Q_r , se calcula entonces como:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$$

Ecuación 32 Caudal de salida del tanque

Fuente: [27]

Q_r siempre es menor que R. El nuevo nivel en el almacenamiento es:

$$R = R - Q_r$$

Ecuación 33 Nivel de almacenamiento del tanque

Fuente: [27]

Aunque al comienzo de un intervalo de tiempo el tanque puede recibir una cantidad de agua mayor que el déficit de saturación $x_3 - R$, el nivel en el tanque nunca puede exceder la capacidad x_3 al final del intervalo de tiempo. Por esta razón, la capacidad x_3 es llamada la capacidad máxima diaria. Este tanque de distribución está en la capacidad de simular recesiones cuando sea necesario [27].

3.3.2.2.6 Cálculo del caudal total.

La salida Q1 proveniente de UH2, también está sujeta al intercambio de agua F, de esta forma la componente Qd queda definida de la siguiente forma [27]:

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F)$$

Ecuación 34 Caudal total

Fuente: [27]

Finalmente, el caudal total se calcula como:

$$Q = Q_r + Q_d$$

Ecuación 35

Fuente: [27]

3.3.3 Calibración y validación de los modelos hidrológicos

La calibración de un modelo consiste en ajustar los parámetros del modelo durante un período de entrenamiento, ya sea manual o automáticamente [28]. El ajuste de los parámetros se basa típicamente en una función objetivo única, que representa la similitud entre los resultados del modelo o simulaciones y las observaciones. Una función objetivo es una ecuación matemática que debe minimizarse para asegurar la máxima similitud entre los resultados del modelo y las observaciones [29].

En la modelación hidrológica, la función objetivo más comúnmente utilizada es la métrica de Eficiencia de Nash-Sutcliffe que minimiza el error cuadrático medio entre los flujos de flujo modelados y observados [30], métrica usada por los modelos en estudio GR2M y GR4J. La validación tiene un sentido mucho más estricto que se le atribuye al proceso de demostrar la capacidad del modelo para desempeñarse fuera de su período de capacitación [31,32].

3.3.4 Oferta hídrica

La oferta hídrica superficial según el Estudio Nacional del agua 2014 elaborado por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), representa el volumen de agua continental que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial. Esta variable se analiza para unidades temporales anuales y mensuales en condiciones hidrológicas promedio, húmedas y año típico seco [34]. La metodología propuesta por el ENA, se muestra en la Figura 4:

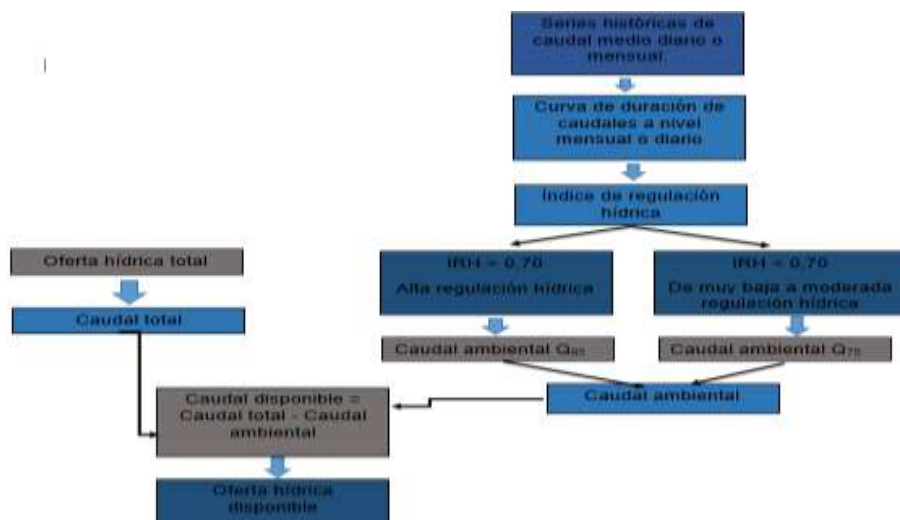


Figura 4. Metodología estimación oferta hídrica ENA 2014.

Fuente: Elaboración propia

4 METODOLOGIA

Este proyecto fue dividido en tres fases, las cuales contienen las diferentes actividades que dan cumplimiento a los objetivos planteados inicialmente. En la primera fase se realizó la recolección de la información geográfica, hidrológica y climática, se calculó la evapotranspiración a escala mensual y diaria por el método de Thornthwaite así mismo se realiza un análisis hidroclimatológico con el fin de darle un tratamiento a los datos y aumentar la eficiencia de los modelos. En la segunda etapa se realizó la calibración y validación de los modelos GR2M y GR4J obteniendo los caudales medios mensuales y caudales medios diarios y así calcular la oferta hídrica para dicha cuenca. En la etapa final se calculó la eficiencia de los modelos por el método de Nash y se analizan los resultados.

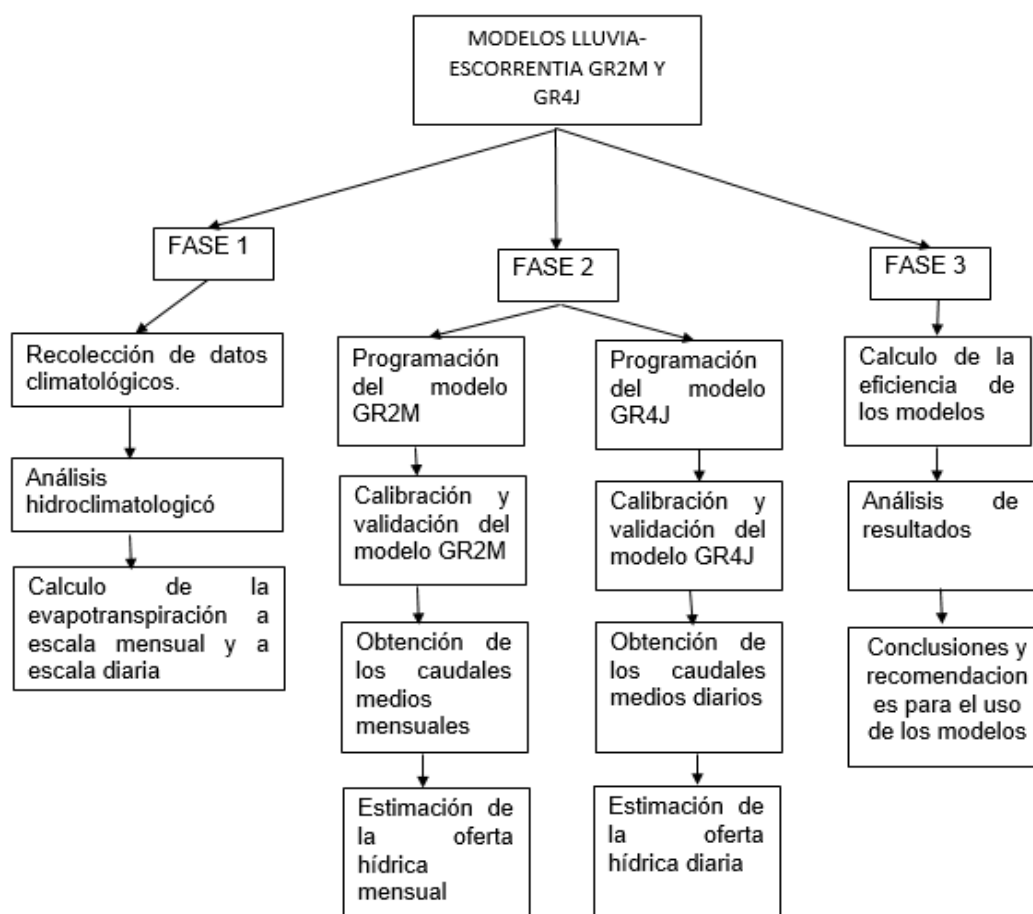


Figura 5 Esquema metodológico.

Fuente: Elaboración propia

4.1 Fase 1.

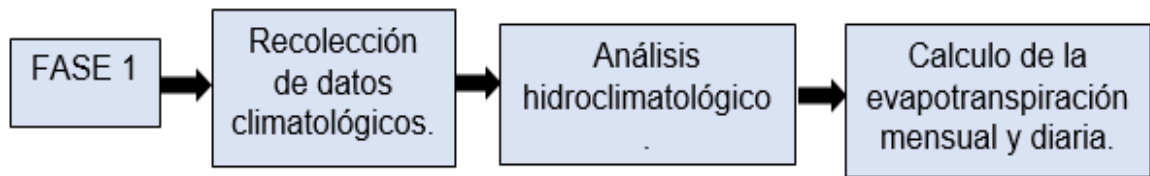


Figura 6 Esquema metodológico fase 1.

Fuente: Elaboración propia

En esta fase se recolectaron los datos climatológicos registrados por las estaciones de monitoreo seleccionadas, las 98 estaciones se muestran en la figura 7, en el **(ANEXO 1. ESTACIONES ANALISIS CLIMATOLOGICO)** se encuentra especificado el nombre de cada estación de monitoreo, el tipo de estación y sus correspondientes coordenadas. Para los dos modelos se necesitaron las variables de precipitación media, temperatura (máxima, media y mínima) y caudales medios en un rango mínimo de 10 años, esto con el fin de tener la cantidad suficiente de datos para que la simulación aumentara su precisión.

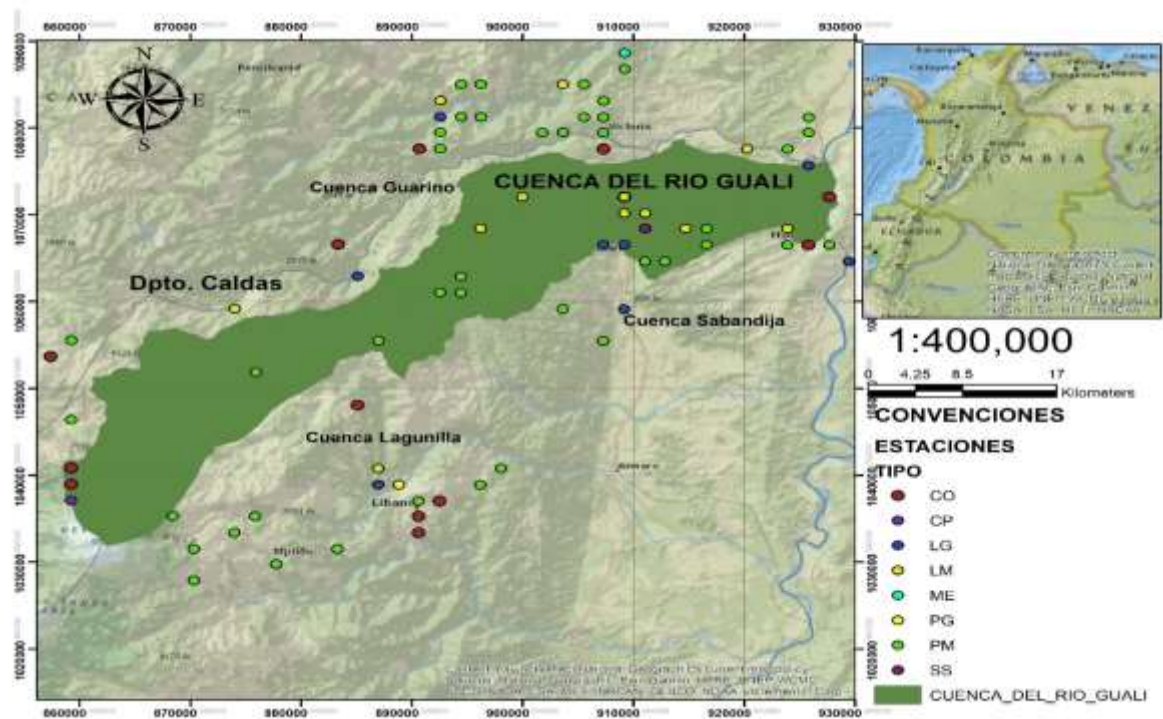


Figura 7 Mapa estaciones hidroclimatologicas a analizar.

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron estaciones dentro y fuera de la cuenca para el análisis hidroclimatológico ya que este permitiría escoger las estaciones con mejor calidad en sus registros. Así mismo en esta fase se calcula la evapotranspiración a escala mensual y a escala diaria. El análisis hidroclimatológico se realizó por medio de una serie de códigos programados en PYTHON, que arrojaron los datos correctamente llenados y estandarizados por el método de proporciones. El interpretador que se utilizó fue ANACONDA y las librerías utilizadas fueron Py lab, Pandas, numpy, os geo, gdal y pyplot, librerías contenidas en este interpretador. El número de códigos que se corrieron fueron 10, los cuales son explicados a continuación:

4.1.1 Series a grupos

Este código permitió separar cada una de las estaciones en una hoja de cálculo de Excel, obteniendo en cada hoja de Excel los registros de cada año por cada estación.

4.1.2 Análisis de consistencia

El análisis de consistencia consta de tres partes que fueron programadas en PYTHON:

4.1.2.1 Retiro de anómalos

Este código realiza el retiro de anómalos por la prueba de Grubbs, prueba escogida debido a que se estaba manejando una gran cantidad de datos y la prueba de Dixon manejaba una eficiencia menor ya que estaba directamente relacionada a la cantidad de valores en el grupo de datos a analizar. **Series a grupos**

Este código permitió separar cada una de las estaciones en una hoja de cálculo de Excel, obteniendo en cada hoja de Excel los registros de cada año por cada estación.

4.1.3 Análisis de consistencia

El análisis de consistencia consta de tres partes que fueron programadas en PYTHON:

4.1.3.1 Retiro de anómalos

Este código realiza el retiro de anómalos por la prueba de Grubbs, prueba escogida debido a que se estaba manejando una gran cantidad de datos y la prueba de Dixon manejaba una eficiencia menor ya que estaba directamente relacionada a la cantidad de valores en el grupo de datos a analizar.

$$|\Delta_i| \geq t_\alpha \sigma_i$$

Ecuación 36 Ecuación de Grubbs

Fuente: [34]

Donde $\Delta_i = x_i - \bar{x}$; t_α – un cuantil de la distribución de student para el nivel de significación $\alpha = \{0.01, 0.05, 0.1\}$ y σ , es la desviación estándar del conjunto estadístico X.X debe ser una variable aleatoria independiente, es decir sin auto correlación [35].

El código revisa la consistencia espacial en las estaciones de monitoreo cercanas y revisa si los registros de las fechas también clasifican como anómalos. Si se observa que en las estaciones cercanas el valor de X también es anómalo, entonces se concluye que el dato es un valor extremo y se acepta con el registro observado, de lo contrario se establece que es un dato sospechoso y se retira del análisis [35].

4.1.3.2 Grupos a series y recorte

Como pasos atrás se había transformado de series a grupos, en este código se vuelve a transformar de grupos a series con el fin de obtener solo una hoja de cálculo.

4.1.3.3 Análisis de completitud

En este código se supone que L_{esp} (longitud esperada de la serie,) L_{obs} (longitud observada) F_{ini} (fecha de inicio), F_{fin} (fecha final o actual), P_{fal} (porcentaje de faltantes) y L_{esp} es el equivalente al número de meses entre F_{ini} y F_{fin} si la resolución es mensual o al número de días o años si la resolución es diaria o anual, y el código aplica la siguiente ecuación:

$$L_{esp} = F_{fin} - F_{ini}$$

Ecuación 37 Análisis de completitud

Fuente: [33]

4.1.4 Filtrar de datos por completitud y catalogo

En este código se filtran los datos del resultado del paso anterior y se comprueban con los datos del catálogo de las estaciones otorgado por el IDEAM, cabe aclarar que el catalogo tiene coordenadas 3116 MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone.

4.1.5 Series a grupos y rellenado por aleatoriedad

En este código se rellenan los datos faltantes de manera aleatoria, este código es programa en PYTHON debido a la cantidad de estaciones y a la serie de tiempo que se está manejando. Haciendo más eficiente el desarrollo de esta actividad. A su vez este código convierte los grupos obtenidos en el paso anterior a series.

4.1.6 Interpolación IDW

La interpolación IDW (distancia inversa ponderada) se realiza por la metodología de validación de Jack Knife, dando como resultado una serie de valores teniendo en cuenta la distancia, los puntos más cercanos y el ajuste de estos.

4.1.7 Prueba de aleatoriedad

Este código determina si existe una estructura en el conjunto de datos analizados, entendiendo que por estructura quiere decir una tendencia, ciclicidad o recurrencia, en los patrones de comportamiento de los datos hidroclimatológicos.

4.1.8 Archivos datos sin rellenar y tendencias sin rellenar

Finalmente, este código rellena los datos faltantes de cada una de las estaciones sin exceptuar ningún año. Cabe aclarar que este código se aplica para las variables a utilizar que son precipitación, temperatura y caudal a escala media, mínima y máxima.

Posteriormente se calculará la evapotranspiración a escala mensual y diaria, teniendo en cuenta los datos climatológicos previamente tratados según las métricas de desempeño.

4.1.9 Calculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite

Para el cálculo de la ETP primero se calcula el índice de calor mensual (i) a partir de la temperatura media mensual (t), con la aplicación de la siguiente ecuación [36]:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

Ecuación 38 Índice de calor mensual

Fuente: [36]

Luego de esto se calcula el “índice de calor anual (*I*) sumando los valores de *i* [36]:

$$I = \sum i$$

Ecuación 39 Índice de calor anual

Fuente: [36]

Seguido a esto se calcula la ETP mensual “sin corregir” mediante la siguiente ecuación [35]:

$$ETP_{\sin \text{ corr}} = 16 \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^a$$

Ecuación 40 ETP mensual sin corregir

Fuente: [36]

Donde:

- $ETP_{\sin \text{ corr}}$ ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas).
- t = temperatura media mensual en C°.
- I = índice de calor anual, obtenido en la primera parte.

$$a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 * + 1792 * 10^{-5} * I + 0,49239$$

Ecuación 41

Fuente: [36]

Luego se realiza la corrección para el numero de dial del mes y el número de horas de sol [35]:

$$ETP = ETP_{\sin \text{ corr}} \frac{N}{12} \frac{d}{30}$$

Ecuación 42 Ecuacion de Thornthwaite

Fuente: [36]

Donde:

- N: número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud según la tabla.
- d: número de días del mes.

Cabe aclarar que este cálculo se realizó en Excel para escala mensual y se programó en PYTHON para escala diaria, debido a la cantidad de datos que se tenían.

4.2 Fase 2.

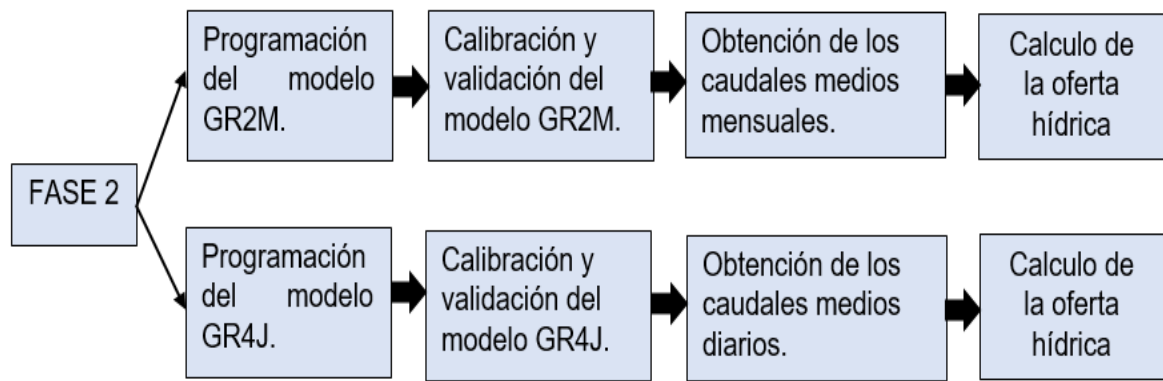


Figura 8 Esquema metodológico fase 2.

Fuente: Elaboración propia

Al finalizar este cálculo se calibraron y validaron ambos modelos, la manera en la que se calibro el modelo GR2M fue realizar la simulación con un registro de 10 años (1990-2001), teniendo una variable de precipitación mensual, una variable ETP (evapotranspiración) y los datos de caudal registrados por la estación PTE LOPEZ ubicada en el Tolima a la salida de la cuenca y drenaje principal, identificada con el código 2301703.

Para la validación del modelo GR2M se simulo con un periodo diferente (2001-2010). El modelo GR4J fue calibrado y validado de la misma manera, con una serie de tiempo de 10 años. Para el periodo de calibración se utilizaron los años (1991-1992) y para el periodo de validación se realizaron 5 modelaciones con los siguientes periodos de tiempo (1992-1993), (1994-1995), (1996-1997), (1998-1999) y (2000-2001). Así mismo se realizó una interpolación y se establecieron las subcuencas para la cuenca del Rio Guali, dando como resultado 14 subcuencas acotadas como se denota en la figura 5.

El siguiente paso fue realizar la corrida y lectura de los datos, en este caso fueron los caudales medios diarios y medios mensuales para cada modelo respectivamente y para cada subcuenca.

Seguido a esto se calculó la oferta hídrica con el fin de darle una aplicación específica a la cuenca del Rio Guali. Este cálculo se realizó mediante la metodología propuesta por el ENA 2014 (Estudio Nacional del Agua 2014) elaborada por el IDEAM, teniendo en cuenta que la oferta natural del país se determina a partir de la escorrentía superficial y está directamente asociada con los aportes de las áreas de las cuencas representados en caudal específico o isolíneas de rendimientos hídricos y escorrentía [34].

El primer paso fue realizar la curva de duración de caudales, en este caso se realizó para escala mensual y diaria, con los valores obtenidos tras la modelación. Seguido a esto se calculó el caudal ambiental según IRH (índice de regulación hídrica). Teniendo los valores de caudales simulados se calcularon los caudales anuales multianuales y a estos se les resto el caudal ambiental previamente calculado, obteniendo así la oferta hídrica a nivel mensual y diaria para la Cuenca del Rio Guali.

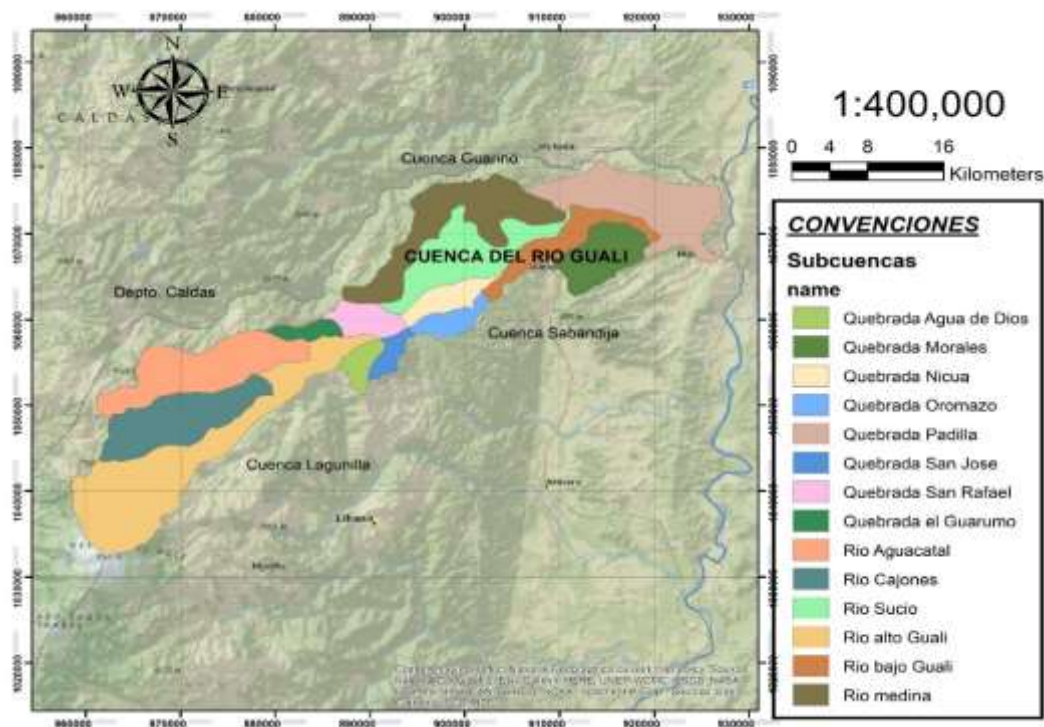


Figura 9 Mapa subcuencas Río Guali.

Fuente: Elaboración propia

4.3 Fase 3.

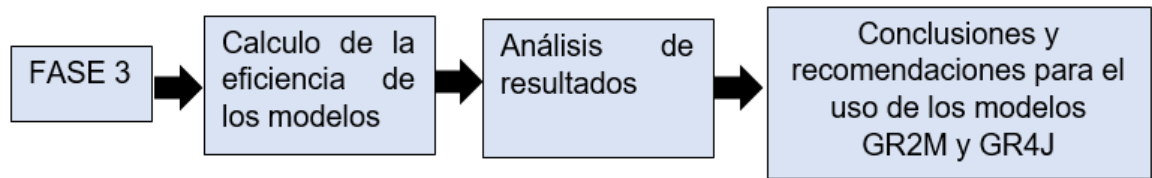


Figura 10 Esquema metodológico fase 3.

Fuente: Elaboración propia

Se calculó la eficiencia de cada modelo respecto a los caudales registrados por las estaciones. Por el método de Nash, explicado anteriormente. Por último, se analizaron los resultados y se plantearon las conclusiones y recomendaciones para el uso de los modelos GR2M y GR4J, con el fin de que estos modelos fuera útiles para la aplicación en otras cuencas en Colombia u otras investigaciones a futuro teniendo en cuenta el ajuste de los datos a los modelos.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados GR2M

5.1.1 Fase 1.

En esta fase se recolectaron los datos climatológicos registrados por las estaciones de monitoreo. Para los dos modelos se necesitaron las variables de precipitación media, temperatura (máxima, media y mínima) y caudales medios en un rango mínimo de 10 años, como se evidencia en el **(ANEXO 2. VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO GR2M)**. Se realizó el análisis hidroclimatológico utilizado los 10 códigos de PYTHON, anteriormente explicados, que arroja que el periodo con el que se calibraría y validaría el modelo fue de 1990-2001 y 2001-2010.

Seguido a esto se calculó la evapotranspiración por el método de Thornwaite utilizando el lenguaje de programación PYTHON que arrojaba los resultados en una hoja de Excel, como se evidencia en él. **(ANEXO 3. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION A ESCALA MENSUAL)**.

5.1.2 Fase 2.

Teniendo en cuenta la evapotranspiración potencial estimada por el método de Thornwaite **(ANEXO 3. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION A ESCALA MENSUAL)**, y los datos de precipitación disponibles, se simularon los caudales para el período 1990 – 2001 para la calibración y 2001-2010 para la etapa de validación, periodos elegidos ya que contenían la mejor calidad y cantidad de datos según el análisis hidroclimatológico.

La tabla 2 muestra los valores y parámetros iniciales que se utilizaron para la calibración del modelo:

Tabla 2. Parámetros y valores iniciales del modelo GR2M etapa de calibración.

Nombre de la cuenca	CUENCA DEL RIO GUALI	
Superficie de la cuenca(km ²)	876 km2	
Parámetros del modelo	Transferencia	valor
x1: Capacidad del reservorio de producción (mm)	7.99	2949.07
x2: parámetro de intercambio (mm)	0.51	0.51
Valores iniciales		
Nivel de llenado inicial S0 (max.: x1 mm)		1474.53
Nivel máximo del reservorio R0 (max.: 60 mm)		30
Periodo		
Duración del período de puesta en marcha (mes)		11
Duración del periodo de prueba. (mes)		132
Fecha de inicio		12/1990
Fecha de finalización		12/2001

Fuente: Elaboración propia.

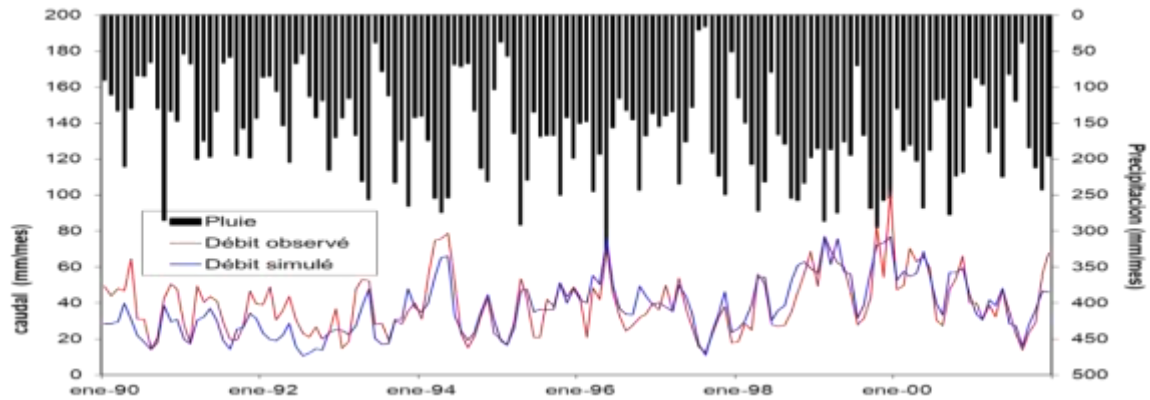
5.1.2.1 Calibración del modelo GR2M

El proceso de calibración se realizó utilizando la herramienta SOLVER de EXCEL. Que arrojó los resultados, X1= 7.99 y X2= 0.51. Teniendo en cuenta que el nivel máximo del reservorio fue de 30 mm al realizar la iteración con dicha herramienta.

Los resultados obtenidos tras la modelación, son evidenciados en el **(ANEXO 4. CALIBRACION MODELO GR2M)**. En la gráfica 1 se muestra el hidrógrama que representa los caudales simulados y los caudales observados respecto a la precipitación media en la cuenca expresada en milímetros (mm). Con esta grafica se puede observar que los caudales simulados, respecto a los observados, guardan una buena correlación, sin embargo, se observa algunos resultados no muy satisfactorios en cuatro periodos, marzo-1994 (Qsim = 54.7 m³/s y Qobs = 74.7 m³/s), junio-1994 (Qsim = 32.9 m³/s y Qobs = 51.3 m³/s), febrero-1996 (Qsim = 40.1

m³/s y Qobs = 21.1 m³/s), y marzo-2000 (Qsim = 54.8 m³/s y Qobs = 70.3 m³/s). En el resto de los periodos, se explica la transformación de precipitación en caudales.

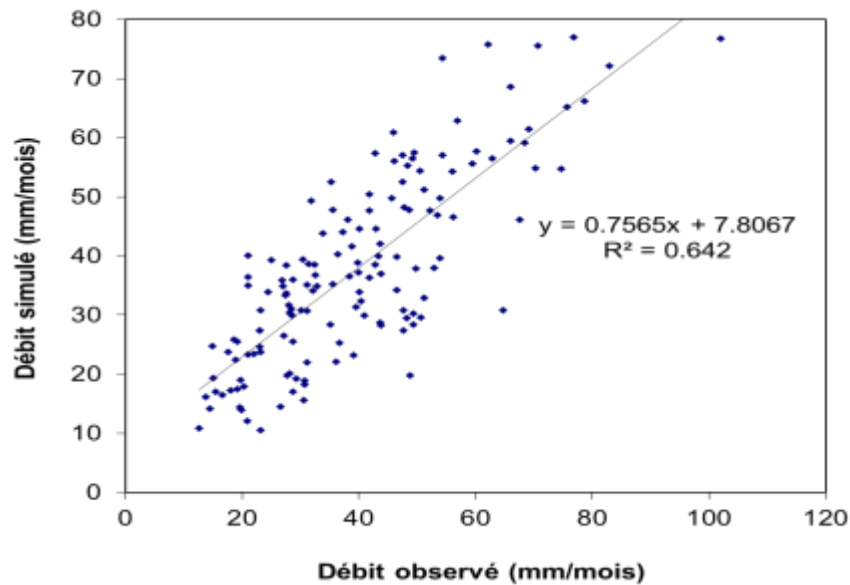
Grafica 1 Hidrograma precipitación mensual Vs caudal mensual etapa de calibración modelo GR2M.



Fuente: Elaboración propia/ modelo GR2M.

El modelo a su vez realiza un gráfico de dispersión como se evidencia en el *grafico 2*. Y calcula el R² que refleja la bondad del ajuste del modelo a la variable evaluada, en este caso el caudal simulado. El R² toma un valor aceptable de 0.642, lo que explica que se cumple la relación de $Q_{sim} = a + b \cdot Q_{obs}$, como línea de tendencia.

Grafica 2 Gráfico de dispersión caudales simulados / caudales observados, etapa de calibración.



Fuente: Elaboración propia/ modelo GR2M.

5.1.2.2 Validación del modelo GR2M

La tabla 3 muestra los valores y parámetros iniciales que se utilizaron para la validación del modelo:

Tabla 3. Parámetros y valores iniciales del modelo GR2M etapa de validación.

Nombre de la cuenca	CUENCA DEL RIO GUALI-COLOMBIA	
Superficie de la cuenca(km ²)	876 km2	
Parámetros del modelo	Transf.	Réels
x1: Capacidad del reservorio de producción (mm)	9.52	13670.17
x2: parámetro de intercambio (mm)	0.50	0.50
Valores iniciales		
Nivel de llenado inicial S0 (max.: x1 mm)		6835.09
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 60 mm)		30
Periodo		
Duración del período de puesta en marcha (mes)		12
Duración del periodo de prueba. (mes)		120
Fecha de inicio		01/2001
fecha de finalización		12/2010

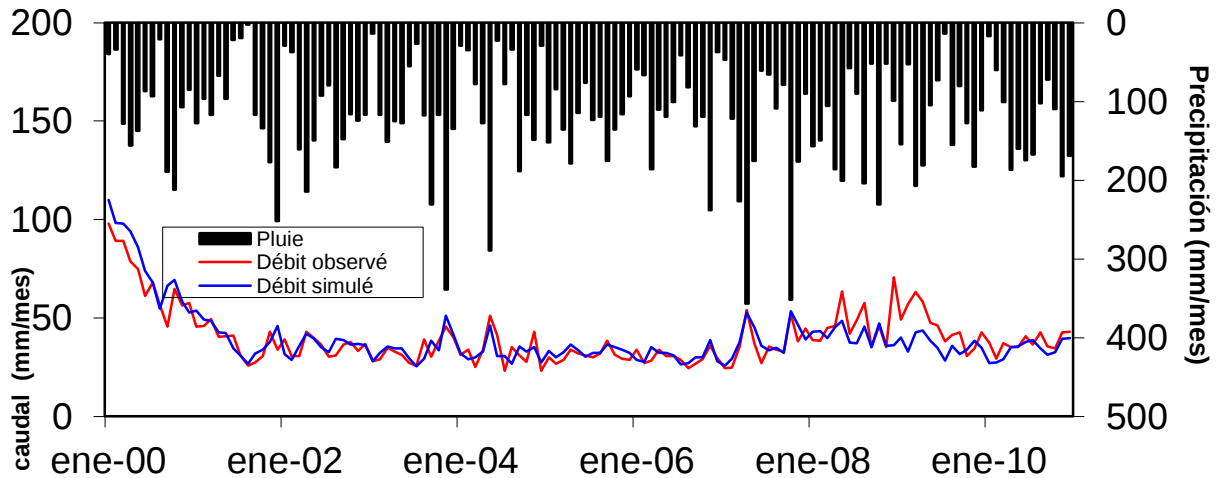
Fuente: Elaboración propia

El proceso de validación se realizó utilizando la herramienta SOLVER de EXCEL. Los parámetros obtenidos fueron: X1= 9.52 y X2= 0.50. Teniendo en cuenta que el máximo del reservorio fue de 30 mm, según las iteraciones realizadas con esta herramienta.

Los resultados obtenidos tras la modelación, son evidenciados en el **(ANEXO 5. VALIDACION MODELO GR2M)**. En la gráfica 3 se muestra el hidrógrama que representa los caudales simulados y los caudales observados respecto a la precipitación media en la cuenca expresada en milímetros (mm). Con esta grafica se puede observar que los caudales simulados, respecto a los observados, guardan una buena correlación respecto a la precipitación, lo que indica una buena validación de los resultados. Como se evidencia se comportan de manera muy

similar, incluso donde en los picos más altos, que evidencia una correcta validación del modelo GR2M.

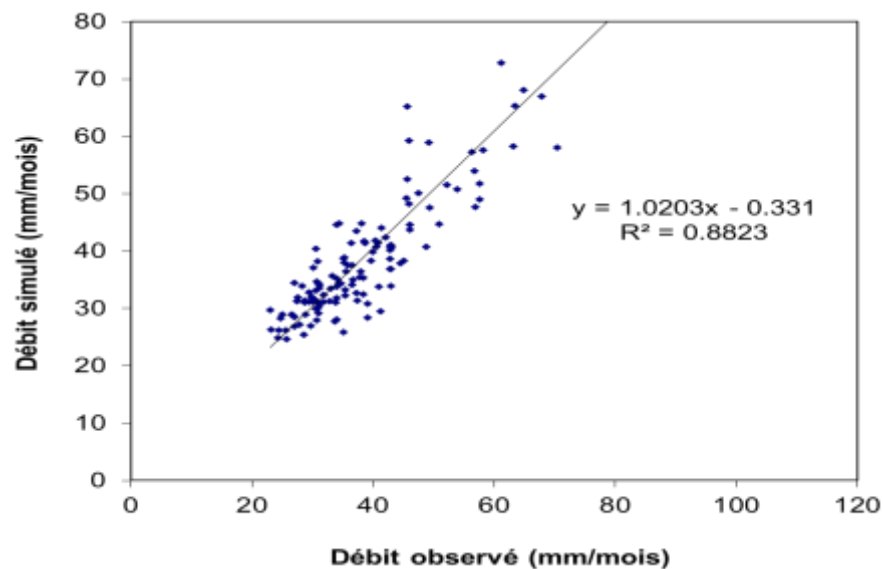
Grafica 3 Hidrograma precipitación mensual Vs caudal mensual etapa de calibración. .



Fuente: Elaboración propia/ modelo GR2M.

El gráfico 4 en la etapa de validación toma un R^2 de 0.8823, lo que explica que se cumple la relación $Q_{sim} = a + b \cdot Q_{obs}$, como línea de tendencia.

Grafica 4. Gráfico de dispersión caudales simulados / caudales observados, etapa de validación.



Fuente: Elaboración propia/ modelo GR2M.

Aplicación del modelo en las 14 subcuencas de la cuenca del Rio Guali:

Tabla 4. División subcuencas- Cuenca del Rio Guali.

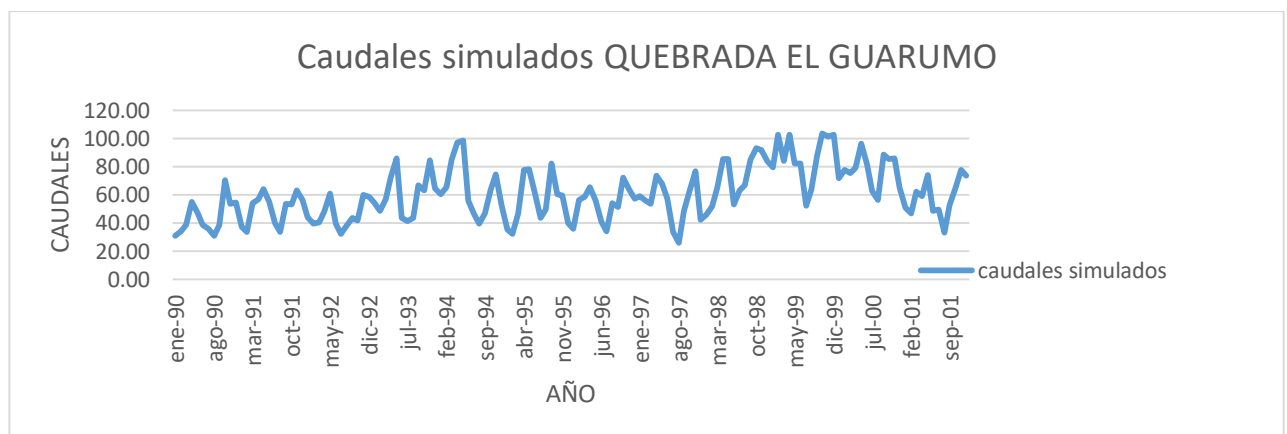
NOMBRE SUBCUENCA	AREA (Km ²)
Rio Padilla	107
Quebrada Morales	50
Rio bajo Guali	43
Rio Sucio	81
Quebrada Oromazo	19
Quebrada Nicua	25
Rio Medina	104
Quebrada San Rafael	25
Quebrada San Jose	13
Quebrada Agua de Dios	16
Quebrada el Guarumo	13
Rio Aguacatal	100
Rio Cajones	85
Rio Alto Guali	208

Fuente: Elaboración propia.

Los datos utilizados se sacaron realizando una estadística zonal con la herramienta ARGIS con el fin de obtener los datos de entrada del modelo, como se evidencia en el **(ANEXO 6: DATOS SUBCUENCAS DEL MODELO GR2M POR EL METODO DE LA ESTADISTICA ZONAL)**.

Los resultados son obtenidos por subcuencas, como se evidencia en el **(ANEXO 7: SIMULACIONES POR SUBCUENCAS DEL MODELO GR2M)**, en la gráfica 5 se muestran los caudales simulados para la subcuenca Quebrada el Guarumo:

Grafica 5 Resultados simulación para la subcuenca Quebrada el Guarumo.



Fuente: Elaboración propia/ modelo GR2M.

5.1.3 Fase 3. Calculo de la eficiencia del modelo GR2M

Para evaluar la eficiencia del modelo se utilizó el criterio de Nash (N).

Para la fase de calibración se encontró una eficiencia del 67%, como se evidencia en la tabla 6.

Tabla 5. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de calibración modelo GR2M.

CRITERIOS DE EFICIENCIA (%)	
Nash(Q)	67.0
Nash(VQ)	63.4
Nash(ln(Q))	57.7
Bilan	98.2

Fuente: Elaboración propia

Para la fase de validación se encontró una eficiencia del 79.1%, como se evidencia en la tabla 6.

Tabla 6. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de validación modelo GR2M.

CRITERIOS DE EFICIENCIA (%)	
Nash(Q)	79.1
Nash(VQ)	76.2
Nash(ln(Q))	73.6
Bilan	99.7

Fuente: Elaboración propia

5.2 RESULTADOS GR4J

5.2.1 fase 1

Como se mencionó anteriormente para este modelo se necesitaron datos de precipitación media diaria, temperatura media diaria y caudales medios diarios cómo se evidencia en el **(ANEXO 8. VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO GR4J)** para cada subcuenca se calculó una serie de datos, en el caso de la temperatura se utilizó el método de las isotermas y para la precipitación se realizó una serie de interpolaciones con el fin de obtener para cada subcuenca sus respectivos valores. Este modelo se simuló con una serie de tiempo de 10 años, pero debido a la cantidad de datos que se obtenían, en este documento se presentan los resultados de 2 años para calibración y 2 años para validación. Seguido a este paso, se calculó la evapotranspiración por el modelo desarrollado por el Sr. Ludovic Oudin, utilizando el lenguaje de programación PYTHON, que usa la temperatura como los únicos datos de entrada. Utilizando la radiación extraterrestre y la latitud de la cuenca a evaluar, este modelo arrojó los resultados en una hoja de Excel, como se evidencia en el **(ANEXO 9. CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION A ESCALA DIARIA)** cabe aclarar que se calculó una evapotranspiración por cada subcuenca, obteniendo un archivo para cada una y un archivo para la evapotranspiración en toda la cuenca, para un total de 15 archivos generados por el código programado en PYTHON.

5.2.2 fase 2

Teniendo en cuenta la evapotranspiración potencial diaria estimada y los datos de precipitación disponibles, se simuló los caudales para 10 años, los resultados plasmados en este documento son de las fechas 1991-1992 para la calibración y 2000-2001 para la etapa de validación, periodos elegidos ya que contenían la mejor calidad y cantidad de datos según el análisis hidroclimatológico, las demás validaciones están anexadas a esta investigación.

La tabla 7 muestra los valores y parámetros iniciales que se utilizaron para la calibración del modelo:

Tabla 7. Parámetros y valores iniciales del modelo GR4J etapa de calibración.

NOMBRE DE LA CUENCA	CUENCA DEL RIO GUALI-COLOMBIA	
SUPERFICIE DE LA CUENCA(KM²)	876 km2	
PARAMETROS DEL MODELO		
	Transf.	Réels
x1: capacidad res. producción (mm	6.08	439.01
x2: parámetro de intercambio (mm)	1.08	1.30
x3: capacidad de resolución enrutamiento (mm)	2.91	18.43
x4: Tiempo (días)	-0.32	1.22
VALORES INICIALES		
Tasa de llenado inicial S0 / x1		0.60
Tasa de llenado inicial R0 / x		0.70
PERIODO		
Duración del período de puesta en marcha (DIAS)		365
Duración del periodo de prueba. (DIAS)		365
Fecha de inicio		1/01/1992

Fuente: Elaboración propia /modelo GR4J.

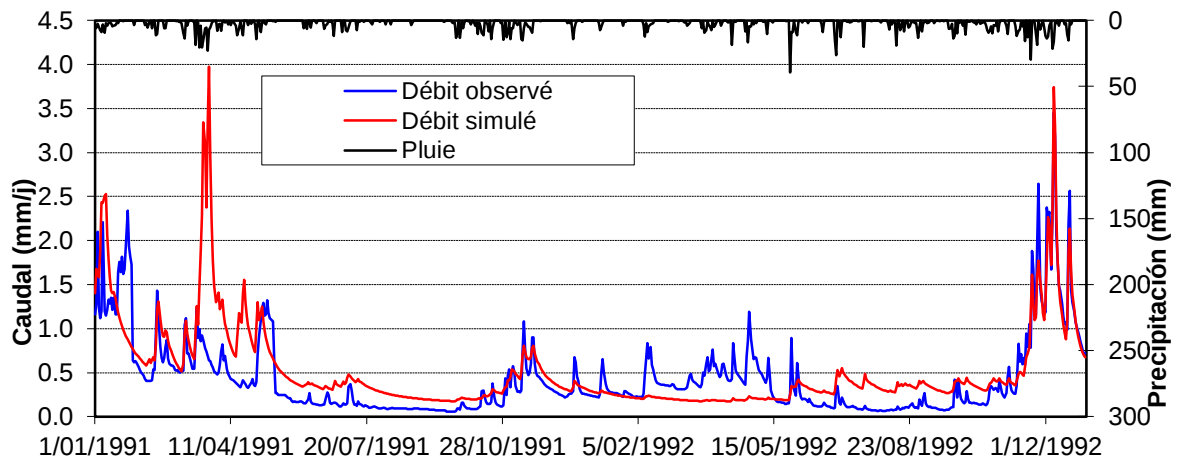
5.2.2.1 Calibración del modelo GR4J.

El proceso de calibración se realizó utilizando la herramienta SOLVER de EXCEL. Los parámetros obtenidos fueron: X1= 6.08 mm, X2= 1.08 mm, X3= 2.91 mm y X4= -0.32 mm.

Los resultados obtenidos tras la modelación, son evidenciados en el **(ANEXO 10. CALIBRACION MODELO GR4J 1991-1992)**. En la gráfica 6 se muestra el hidrógrama que representa los caudales simulados y los caudales observados respecto a la precipitación media diaria en la cuenca expresada en milímetros (mm/día). Con esta grafica se puede observar que los caudales simulados, respecto a los observados, guardan una buena correlación, sin embargo, se observa algunos resultados no muy satisfactorios específicamente en 2 periodos del 1/04/1991 con

un ($Q_{sim} = 4 \text{ mm/j}$ y $Q_{obs} = 0,5 \text{ mm/j}$), en 2/06/1991 con un ($Q_{sim} = 1,5 \text{ mm/j}$ y $Q_{obs} = 0,3 \text{ mm/j}$) y algunas fechas como 12/12/1992 con un ($Q_{sim} = 3,7 \text{ mm/j}$ y $Q_{obs} = 2,9 \text{ mm/j}$). Como se evidencia se comportan de manera muy similar, incluso en los picos más altos. Que evidencia una buena calibración del modelo.

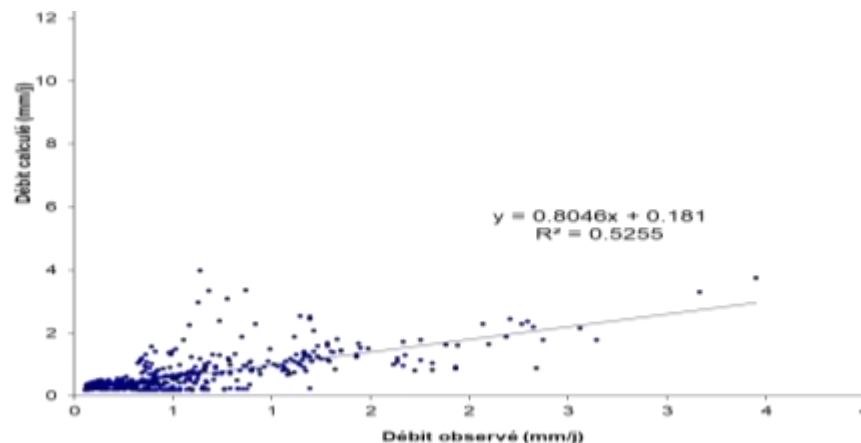
Grafica 6. Hidrograma precipitación diaria Vs caudal diario etapa de calibración modelo GR4J.



Fuente: Elaboración propia /modelo GR4J.

El modelo a su vez realiza un gráfico de dispersión como se evidencia en el *grafico 7*. Y calcula el R^2 que refleja la bondad del ajuste del modelo a la variable evaluada, en este caso el caudal simulado. El R^2 toma un valor aceptable de 0.5255, lo que explica que se cumple la relación en la ecuación de $Q_{sim} = a + b \cdot Q_{obs}$, como línea de tendencia.

Grafica 7. Gráfico de dispersión modelo GR4J.



Fuente: Elaboración propia /modelo GR4J.

5.2.2.2 Validación del modelo GR4J.

La tabla 8 muestra los valores y parámetros iniciales que se utilizaron para la validación del modelo:

Tabla 8. Parámetros y valores iniciales del modelo GR4J etapa de validación.

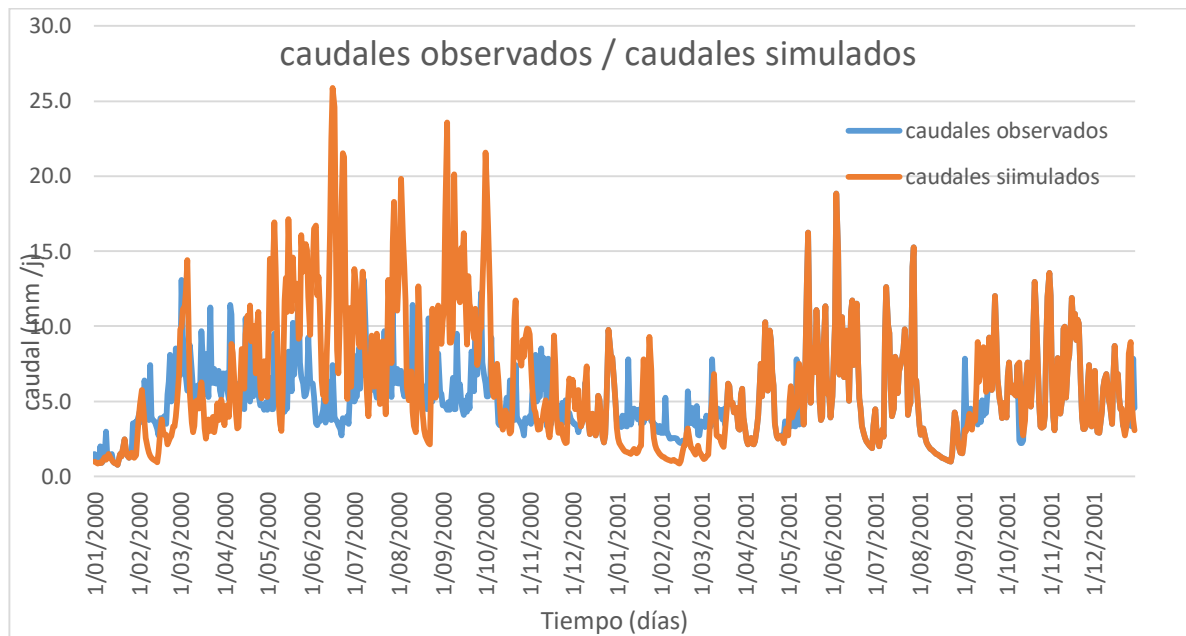
NOMBRE DE LA CUENCA	CUENCA DEL RIO GUALI-COLOMBIA	
SUPERFICIE DE LA CUENCA (Km²)	876 km2	
PARAMETROS DEL MODELO		
	Transf.	Réels
x1: capacidad res. producción (mm)	5.93	377.25
x2: parámetro de intercambio (mm)	0.86	0.97
x3: capacidad de resolución enrutamiento (mm)	2.80	16.51
x4: Tiempo (días)	-0.25	1.28
VALORES INICIALES		
Tasa de llenado inicial S0 / x1		0.60
Tasa de llenado inicial R0 / x		0.70
PERIODO		
Duración del período de puesta en marcha (DIAS)		365
Duración del periodo de prueba. (DIAS)		365
Fecha de inicio		31/12/2000
fecha de finalización		31/12/2001

Fuente: Elaboración propia /modelo GR4J.

El proceso de validación se realizó utilizando la herramienta SOLVER de EXCEL. Los parámetros obtenidos fueron: X1= 5.93, X2= 0.86, X3= 2.80 y X4= -0.25. Teniendo en cuenta que la tasa de llenado s0/x1 fue de 0.60mm y la tasa de llenado R0/X fue de 0.70mm.

Los resultados obtenidos tras las modelaciones, son evidenciados en el **(ANEXO 11. VALIDACIONES MODELO GR4J 1993-2001)**. Gráficamente los caudales simulados y caudales observados para los periodos 2000-2001 se muestran en la gráfica 8. El color azul corresponde a las series de caudales simulados por el modelo GR4J y el color naranja a los registros tomados por las estaciones de monitoreo, como se evidencia se comportan de manera muy similar, incluso en los picos más altos, que evidencia una excelente validación del modelo GR4J.

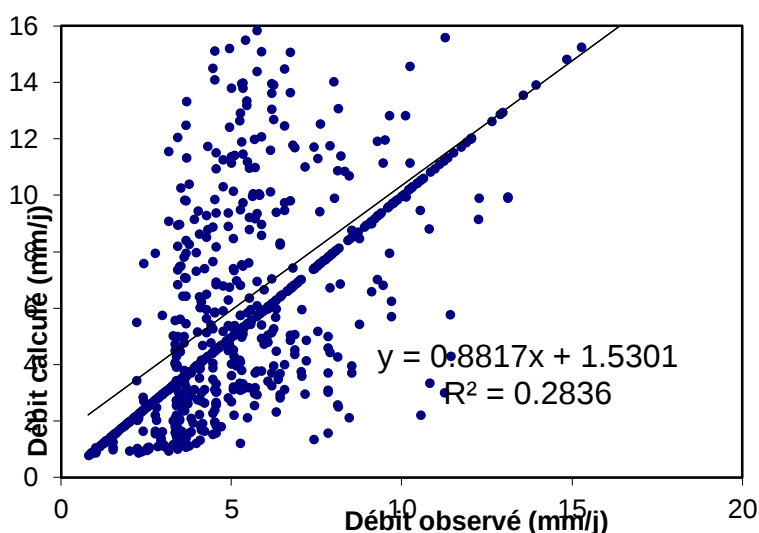
Grafica 8. Resultados validación del modelo GR4J.



Fuente: Elaboración propia /modelo GR4J.

El gráfico 9 en la etapa de validación toma un R^2 de 0.2836, lo que explica que unos pocos caudales observados se alejan de los caudales simulados, se podría hablar de valores atípicos, pero en general los caudales se ajustan a los observados.

Grafica 9. Gráfico de dispersión caudales simulados / caudales observados, etapa de validación modelo GR4J.

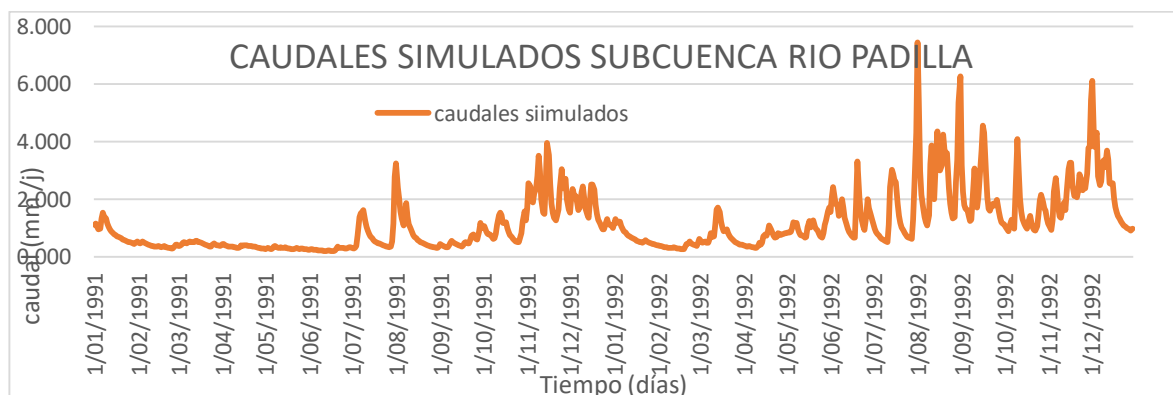


Fuente: Elaboración propia /modelo GR4J.

Para la aplicación del modelo GR4J en las 14 subcuencas de la cuenca del Rio Guali se sacaron los datos de entrada, realizando una estadística zonal con las herramientas ArGIS y PYTHON, como se evidencia en el **(ANEXO 12: DATOS SUBCUENCAS DEL MODELO GR4J POR EL METODO DE LA ESTADISTICA ZONAL)**.

Los resultados son obtenidos por subcuencas, como se evidencia en el **(ANEXO 13: SIMULACIONES POR SUBCUENCAS DEL MODELO GR4J)**, en la gráfica 10 se muestran los caudales simulados para la subcuenca Quebrada el Guarumo:

Grafica 10. Simulación subcuenca Rio Padilla modelo GR4J.



Fuente: Elaboración propia/ modelo GR4J.

5.2.3 Fase 3. calculo de la eficiencia del modelo GR4J.

Para evaluar la eficiencia del modelo se utilizó el criterio de Nash (N) y de Bilan. Para la fase de calibración se encontró una eficiencia del 76.5%, como se evidencia en la tabla 9 para el criterio de Nash, y para el criterio de Bilan de 98.5%.

Tabla 9. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de calibración modelo GR4J.

CRITERIOS DE EFICIENCIA (%)	
Nash (Q)	76.5
Nash (VQ)	49.0
Nash (ln(Q))	13.6
Bilan	98.5

Fuente: Elaboración propia/ modelo GR4J.

Para la fase de validación se encontró una eficiencia del 80% para el criterio de Nash y para el criterio de Bilan del 96.7%, como se evidencia en la tabla 10.

Tabla 10. Criterios de eficiencia- método de Nash, etapa de validación modelo GR4J.

CRITERIOS DE EFICIENCIA (%)	
Nash (Q)	80.0
Nash (VQ)	68.9
Nash (ln(Q))	52.6
Bilan	96.7

Fuente: Elaboración propia/ modelo GR4J.

5.3 Calculo oferta hídrica para la Cuenca del Rio Guali.

5.3.1 Calculo oferta hídrica mensual para la cuenca del Rio Guali.

Para el cálculo de la oferta hídrica el primer paso fue realizar la curva de duración de caudales teniendo en cuenta el ENA 2014 (Estudio Nacional del Agua 2014) y así estimar según el IRH (índice de regulación hídrica) el caudal ambiental. Se tuvo en cuenta para calcular el IRH la tabla 11 que determina los rangos según su clarificación obteniendo como resultado un IRH alto para año medio y moderado para año seco que significa moderada retención y regulación de humedad con un

valor superior a 0,75 a 0,85, según el ENA 2014 realizado por el IDEAM, resultados en el **(ANEXO 14. CALCULO DE LA OFERTA HIDRICA ESCALA MENSUAL)**:

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Ecuación 43. Índice de regulación hídrica

Fuente: [33].

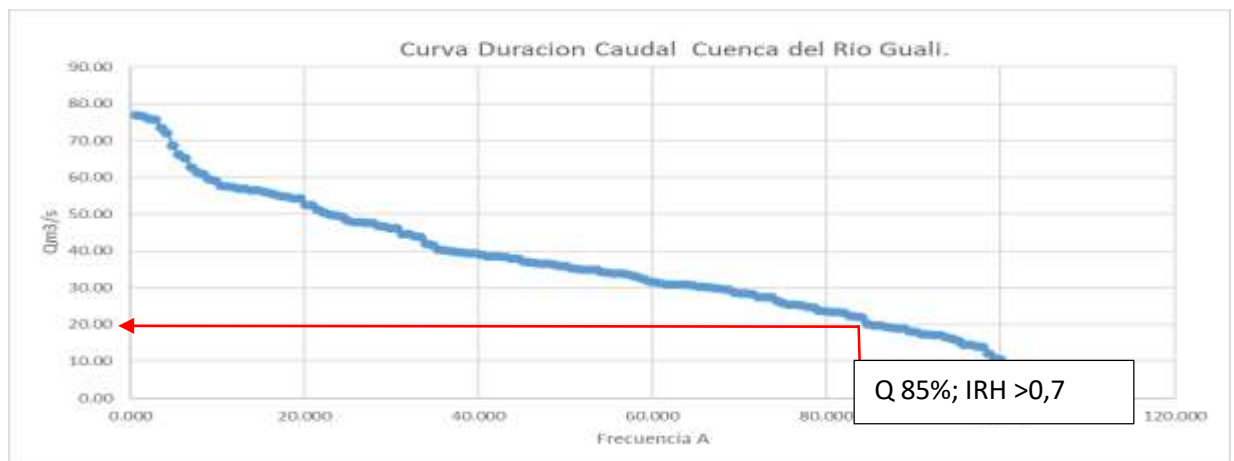
Tabla 11. Clasificación de los rangos de valores par el índice de retención y regulación hídrica (IRH).

Rango IRH	Calificación	Descripción
> 0.85	Muy alta	Muy alta retención y regulación de humedad
0.75 - 0.85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0.65 - 0.75	Moderada	Media retención y regulación de humedad
0.50 - 0.65	Baja	Baja retención y regulación de humedad
< 0.50	Muy baja	Muy baja retención y regulación de humedad

Fuente: [33]

La curva de duración de caudales se evidencia en el grafico 11, en el cual se calculó que el caudal ambiental es de 18,7 m³/seg:

Grafica 11 Curva de duración de caudales mensuales Cuenca del Rio Guali.



Fuente: Elaboración propia

Seguido a esto se realizó el cálculo de los caudales anuales multianuales teniendo en cuenta los caudales medios mensuales simulados por el modelo GR2M, y se calculó la oferta hídrica, restando el caudal ambiental previamente calculado, de los

caudales anuales multianuales, como se evidencia en la tabla 12. La evidencia de este cálculo se encuentra en el **ANEXO 14**.

Tabla 12. Cálculo oferta hídrica / modelo GR2M.

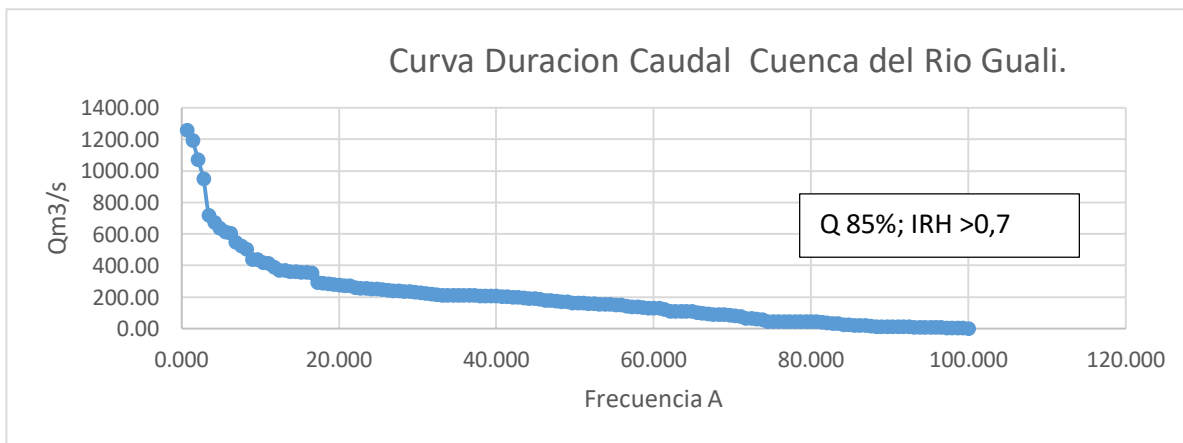
MESES	CAUDAL MENSUAL MULTIANUAL	OFERTA HIDRICA
ENERO	27.355	8.655
FEBRERO	26.513	7.813
MARZO	19.041	0.341
ABRIL	30.146	11.446
MAYO	39.296	20.596
JUNIO	36.567	17.867
JULIO	45.806	27.106
AGOSTO	33.125	14.425
SEPTIEMBRE	45.322	26.622
OCTUBRE	61.224	42.524
NOVIEMBRE	53.046	34.346
DICIEMBRE	35.103	16.403
ANUAL MULTIANUAL	37.712	19.012

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Cálculo oferta hídrica diaria para la Cuenca del Río Guali.

Para el cálculo de la oferta hídrica diaria se realizaron los mismos pasos anteriormente mencionados: La curva de duración de caudales se evidencia en el gráfico 12:

Grafica 12. Curva de duración de caudales diarios Cuenca del Río Guali.



Fuente: Elaboración propia

Seguido a esto se realizó el cálculo de los caudales anuales multianuales teniendo en cuenta los caudales medios mensuales simulados por el modelo GR4J, y se calculó la oferta hídrica, restando el caudal ambiental previamente calculado, de los caudales anuales multianuales, como se evidencia en la tabla 13. La evidencia de este cálculo se encuentra en el **ANEXO 15**.

Tabla 13. Calculo oferta hídrica / modelo GR4J.

MESES	CAUDAL MENSUAL MULTIANUAL	OFERTA HIDRICA
ENERO	74.639	16.639
FEBRERO	58.639	0.639
MARZO	205.061	147.061
ABRIL	302.369	244.369
MAYO	765.112	707.112
JUNIO	152.534	94.534
JULIO	109.917	51.917
AGOSTO	148.336	90.336
SEPTIEMBRE	171.378	113.378
OCTUBRE	152.563	94.563
NOVIEMBRE	186.500	128.500
DICIEMBRE	150.339	92.339
MULTIANUAL	206.449	148.449

Fuente: Elaboración propia

6 ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis de resultados modelo GR2M

6.1.1 Fase 1

En esta fase se recolectaron los datos climatológicos registrados por las estaciones de monitoreo, y se realizó un análisis hidroclimatológico con el software PYTHON, el cual permitió realizar un tratamiento de los datos que constaba de llenar los datos faltantes, eliminar discrepancias, eliminar estaciones con registros menores de 70 años y así finalmente establecer la serie de tiempo con las que se simulaban ambos modelos la cual dio como resultado la serie de tiempo 1990-2001, años en los cuales se encontraron mejor calidad y cantidad de registros de las variables de precipitación, temperatura y caudales medios mensuales. A su vez en esta fase se realizó el cálculo de la evapotranspiración a escala mensual por el método de Thornwaite, donde los resultados fueron satisfactorios teniendo en cuenta que este método tenía como únicas variables de entrada las series de temperatura y las isotermas para cada subcuenca.

En esta fase se utilizó la herramienta ARGIS donde se realizó la estadística zonal obteniendo como resultados los datos de precipitación mensual para cada una de las subcuencas. Así mismo esta herramienta permitió realizar las isotermas para cada subcuenca determinando un valor de temperatura mensual para cada una, y así se logró calcular la evapotranspiración por el método de Thornwaite para escala mensual. Cabe aclarar que esta herramienta fue ligada al software PYTHON con el fin de hacer más eficiente la corrida de los datos ya que se estaban manejando series de tiempo mensuales por 10 años, dando como resultado una correcta corrida donde los resultados que se obtuvieron fueron válidos y fueron obtenidos en un menor tiempo de corrida.

6.1.2 Fase 2

6.1.2.1 Calibración del modelo GR2M

Los datos esenciales para la calibración fueron de un periodo de llenado de tanque de 11 meses y un periodo de calibración de 132 meses, que corresponde al año 1990 y 2001. En una primera instancia, con los valores sugeridos para los parámetros X1 y X2, el coeficiente de Nash toma un valor de 67% que indica de

buen a muy buena calibración y con el criterio de Bilan del 98.5%. Dicho coeficiente se relaciona directamente a los resultados obtenidos donde se evidencia una correlación alta entre los caudales simulados y los caudales observados.

6.1.2.2 Validación del modelo GR2M

Los resultados son favorables, dado que los caudales simulados se ajustan de manera correcta a los caudales observados en todo el periodo de simulación (2001-2010). Se deduce que los caudales simulados están relacionados directamente a los periodos de lluvia presentes en esta cuenca, por lo cual se determina que el modelo es válido y aplicable en la cuenca del Rio Guali con una eficiencia del 79.1% que califica en la escala alta a muy alta eficiencia, según el criterio de Nash.

6.1.3 Fase 3

Se observa valores de eficiencia de Nash del 67% en la etapa de calibración, de 79% en la etapa de validación y una eficiencia del 99.7% con el criterio de Bilan. Se puede afirmar que se tiene una muy buena calibración y validación. Teniendo en cuenta que se está modelando con registros diarios que aumenta la dispersión de los datos y hace más difícil la calibración.

La aplicación del modelo, dada su alta eficiencia para la cuenca del Rio Guali y para sus respectivas subcuencas, se ajustan a la generación de caudales mensuales a partir de la información de precipitación mensual y evapotranspiración.

6.2 Análisis de resultados modelo GR4J

6.2.1 Fase 1

El modelo GR4J fue aplicado en la cuenca del Rio Guali con una extensión de 876 km², y en las 14 subcuencas de dicha cuenca. Se utilizaron series de precipitación diaria, temperaturas diarias y caudales diarios en los periodos de 1990-2001, estos con el fin de realizar la comparación entre caudales simulados por el modelo GR4J y caudales observados o registrados por las estaciones de monitoreo, evaluando así la eficiencia del modelo.

En esta fase se recolectaron los datos climatológicos registrados por las estaciones de monitoreo, y se realizó un análisis hidroclimatológico con el software PYTHON, el cual permitió realizar un tratamiento de los datos que constaba de llenar los datos faltantes, eliminar discrepancias, eliminar estaciones con registros menores de 70 años y así finalmente establecer la serie de tiempo con las que se simularon ambos

modelos la cual fue de 1990-2001, años en los cuales se encontraron mejor calidad y cantidad de registros de las variables de precipitación, temperatura y caudales medios diarios. A su vez en esta fase se realizó el cálculo de la evapotranspiración a escala diaria por el modelo desarrollado por el Sr. Ludovic Oudin, utilizando las series de temperatura diaria, radiación extraterrestre y latitud de la cuenca. Este cálculo se realizó para la cuenca del Rio Guali y para sus 13 subcuenca.

En esta fase se utilizó la herramienta ARGIS que resultó ser de gran importancia ya que al realizar la estadística zonal se obtuvieron los datos de precipitación para cada una de las subcuencas. A su vez esta herramienta permitió realizar las isotermas para cada subcuenca determinando un valor de temperatura para cada una, y así poder realizar el cálculo de la evapotranspiración por el método de Oudin para escala diaria.

6.2.2 Fase 2

6.2.2.1 Calibración del modelo GR4J

La calibración del modelo GR4J muestra un buen ajuste gráfico exceptuando los caudales máximos, los eventos extremos observados superan los caudales simulados. Este comportamiento se debe a que el modelo es agregado. Los valores simulados en los años 1994-1995 muestra una disminución de la eficiencia de un 10 %, y los años que presentan mayores eficiencias son 2000-2001, esto se debe a la cantidad de registros que se tenían de las variables de precipitación y temperatura.

El modelo subestima algunos datos extremos, que concuerdan con los registros de precipitación extremos. Se aprecia que los valores guardan una buena correlación, pero a medida que aumenta la magnitud, aumenta a su vez la dispersión de los datos, que indica la presencia de datos atípicos o eventos extremos, lo cual es explicado principalmente por las grandes variaciones de precipitación que presenta la cuenca del Rio Guali.

6.2.2.2 Validación del modelo GR4J

En los años en los que se observa una menor eficiencia son en los años 1994-1995, esto se debe a que en este tiempo se cuenta con datos faltantes de las variables de temperatura y precipitación. Los resultados obtenidos tienen gran concordancia debido a que esta cuenca presenta altas variaciones de precipitaciones. Se puede observar que el coeficiente de correlación es de 0,28 en la etapa de validación, lo

cual indica que es bajo. Esto se debe a que se presentan valores extremos que se salen del promedio y se convierten en datos atípicos, sin embargo, la eficiencia del modelo se mantiene en el 80 %.

Al validar el modelo en las 13 subcuencas se observa que se ajusta de manera correcta en cada de ellas, sin embargo en la subcuenca del Rio Medina, Rio Padilla Y Rio bajo Guali presentan grandes variaciones en los caudales, esto se debe a que están ubicadas a la salida de la cuenca lo que representa mayores niveles de caudal y a su vez presentan mayores precipitaciones.

En esta etapa se logra determinar que la herramienta PYTHON hizo que las simulaciones en ambos modelos fueran más eficientes respecto al tiempo de corrida.

6.2.3 Fase 3

La aplicación del modelo, presento una alta eficiencia para la cuenca del Rio Guali y para sus respectivas subcuencas, se ajustan a la generación de caudales diarios a partir de la información de precipitación diaria y evapotranspiración diaria. Para las 13 subcuencas se ha podido observar que el modelo GR4J representa de manera correcta los caudales, aunque con se siguen presentando deficiencias a la hora de representas caudales picos o extremos. Sin embargó el modelo se ajusta correctamente a los eventos mínimos, al compararlos con los caudales observados por las estaciones de monitoreo.

El cálculo de la oferta hídrica se realizó con el fin de dar una aplicación a los caudales que se simularon en ambos casos, se obtuvo que la oferta hídrica existente en la red de drenaje no afecto los caudales ecológicos, ya que no se presentaron valores negativos. Al comparar este resultado con la oferta hídrica dada por el POMCA de dicha cuenca resulta muy similares los valores y en todos los casos se presentan valores positivos.

En el ENA 2014 (Estudio Nacional del Agua 2014) se presenta una oferta total disponible de 761 Mm³ y en el análisis de variabilidad de la oferta hídrica da como resultado una oferta hídrica media que indica que esta cuenca tiene tendencia a la reducción del caudal por efecto de variaciones hidroclimáticas medias y extremas.

7 IMPACTO SOCIAL

Los resultados de esta investigación estuvieron encaminados en dar respuesta a uno de los problemas más recurrentes en las cuencas hidrográficas de Colombia, debido a la escasez de información y a los errores que se presentan al tomar los niveles o caudales de dichas cuencas por las estaciones de monitoreo. Utilizando así herramientas hidrológicas y software de última generación como ArcGis PYTHON, GR4J y GR2M, que aumentan la precisión en sus registros.

Estos resultados permiten tomar decisiones operativas y estratégicas acertadas debido a que se obtuvo una alta eficiencia cercana al 100% y se podría utilizar de manera confiable y directa en el planteamiento de POMCAS (Plan de ordenación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas), diseños de acueductos y alcantarillados, balances hídricos, balances agrícolas y cualquier proyecto hidráulico donde no se cuente con los registros completos.

Uno de los problemas principales que se presentan a nivel nacional es la poca disponibilidad de recursos económicos destinados al mantenimiento y puesta en marcha de estaciones de registro y monitoreo. Con esta investigación se soluciona en gran medida este problema debido a que los resultados son confiables y las herramientas utilizadas son económicas y algunas otras de manejo libre y gratuito.

Del mismo modo al realizar el análisis de los resultados de ambos modelos, se determinó la posibilidad de utilizar estas herramientas en otras cuencas hidrográficas de Colombia, que presenten los mismos problemas de disponibilidad de datos como en la cuenca del Río Guali, teniendo en cuenta que la eficiencia de los modelos supero en ambos casos el 75%, en la etapa de validación.

8 CONCLUSIONES

El modelo GR2M evaluado en la cuenca del Rio Guali con el método estadístico de Nash- Sutcliffe, presenta una eficiencia alta, tanto en la calibración como en la validación con un porcentaje del 67%, con el método de Bilan presenta un porcentaje del 98,5%. Así mismo el coeficiente de correlación presenta altas correlaciones con los caudales observados, tanto en calibración como en la validación con un $R^2=0.642$, logrando obtener de esta manera la mejor aproximación entre los caudales estimados y los observados. Concluyendo así que el modelo GR2M es ajustable y aplicable en Colombia.

Los parámetros de calibración adquieren valores de $X1= 7.99$ y $X2=0.51$. El análisis de sensibilidad nos muestra que el parámetro que tiene mayor influencia en los resultados del modelo GR2M es $X2$ que es el coeficiente de intercambio de aguas subterráneas, debido a que este presenta más variación frente a los cambios de los parámetros del modelo.

El modelo GR2M es un modelo que con tan solo 2 parámetros simula caudales mensuales con una alta confiabilidad en sus resultados, lo que permite concluir que este modelo puede ser utilizado como una herramienta para la gestión y planificación del recurso hídrico en cualquier cuenca a nivel nacional, que presente problemas de escases de información en sus estaciones.

El modelo GR4J representa de manera efectiva las series de caudales diarios en la cuenca del Rio Guali, especialmente los caudales medios y caudales mínimos. Los valores de los criterios de eficiencia de Nash se encuentran entre el 76 y 88%, y con el criterio de Bilan del 99.7% lo que indica una buena calibración y ajuste de los datos al modelo. Sin embargo, el modelo no representa de manera apropiada lo picos o eventos extremos.

El parámetro $X4$ en el modelo GR4J refleja el tiempo de respuesta de la cuenca en convertir la precipitación a caudal, donde se presentan valores similares de 0,22 a 1,28 días. Es importante observar que independientemente del área de la cuenca el parámetro tiene valores muy similares en la etapa de calibración como en la de validación, determinando así que este parámetro no está directamente determinado por el área.

El modelo GR4J es sencillo de aplicar en comparación con modelos más complejos de entender, debido a que con estos no se tiene control de todas las variables y parámetros. A su vez la cantidad de parámetros que tiene el modelo GR4J hace que este sea más sencillo de optimizar y aumenta significativamente su eficiencia.

Al realizar la comparación de ambos modelos se evidencia una eficiencia mayor en el modelo GR4J, evidentemente por que los registros de tiempo que se manejan

son diarios y hace más precisas las simulaciones. Lo que no indica que el modelo GR2M no se útil, debido a que, al tener registros mensuales, se pueden manejar una serie de tiempo más larga, que hará más preciso el modelo y el tiempo de corrida será menor que el del modelo GR4J.

El cálculo de la oferta hídrica permitió dar una aplicabilidad a los resultados de ambos modelos, obteniendo buenos resultados al compararlos con el POMCA de la cuenca en estudio, dando como resultado un IRH (índice de regulación hídrica) moderado en ambos casos.

Los resultados obtenidos en esta investigación, permiten concluir que estas herramientas son útiles y aplicables en las cuencas hidrográficas de Colombia. Debido a que estas poseen características climáticas y geomorfológicas similares a la cuenca del Rio Guali. Así mismo estas herramientas permitirán analizar escenarios climáticos a futuro, lo que ayudaría a predecir eventos extremos y se podrán reconstruir registros de caudales en lugares con escases de información. Solucionando así uno de los principales problemas que se presentan en la construcción de cualquier obra hidráulica.

9 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar la aplicación de estos modelos en las cuencas hidrográficas de Colombia con el fin de aumentar la confiabilidad de los modelos, sobretodo en cuencas que cuenten con escasez de información. A su vez se recomienda calibrar y validar los modelos GR2M y GR4J constantemente para obtener datos más precisos y confiables, ya que estos modelos se calibraron y validaron en la cuenca del Rio Guali que cuenta con características topográficas e hidrológicas especiales y cada cuenca cuenta con sus propias características que varían los resultados del modelo.

Se recomienda realizar un trabajo futuro, que desarrolle una solución al problema encontrado con la modelación de los eventos extremos o picos, y así poder modelar de una mejor manera la totalidad de los caudales.

Se recomienda calcular la evapotranspiración con diferentes métodos como el de Hargreaves, Jensen-Haise o Turc con el fin de aportar a la investigación, comprobar los resultados ya obtenidos, y determinar la eficiencia de estos métodos, aumentando aún más la eficiencia de los dos modelos.

Se recomienda utilizar las herramientas PYTHON y ARGIS en conjunto ya que estas trabajan de forma más eficiente y se reduce el tiempo de corrida, esto teniendo en cuenta la cantidad de datos que se están trabajando.

Para tener una mayor confiabilidad en la información brindada y aumentar la eficiencia de los modelos sería necesario aumentar el periodo de prueba de 10 años a una serie de tiempo mayor a 25 años, sin dejar de lado que se tendría que buscar una herramienta de programación que hiciera más efectiva y más rápido el tiempo de corrida de los modelos.

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith, "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations", Transactions of the ASABE, vol. 50, no. 3, pp. 885-900, 2007.
- [2] CORTOLIMA, "POMCA DE LA CUENCA DEL RIO GUALI", Tolima, 2014.
- [3] OFICINA DE INFORMACIÓN DIPLOMÁTICA, «COLOMBIA República De Colombia,» Ministerio de Asuntos Exteriores, 2017.
- [4] Asociacion Mundial Del Agua y CEPAL, «INFORME NACIONAL SOBRE LA GESTION DEL AGUA EN COLOMBIA,» Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento, Colombia, 2000.
- [5] M. Ben Aissia, F. Chebana and T. Ouarda, "Multivariate missing data in hydrology – Review and applications", Advances in Water Resources, vol. 110, pp. 299-309, 2017.
- [6] M. Canchi Taipe, ""Diseño y planificación de un laboratorio de hidrología para la Universidad Central del Ecuador"", título de ingeniero civil opción caminos, Universidad Uentral del Ecuador, 2013.
- [7] L. CARVAJAL and E. ROLDÁN, "CALIBRATION OF GR4J LUMPED RAINFALL-RUNOFF MODEL APPLICATION: RIO ABURRÁ CACHTMENT", Posgrado, Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [8] "Earth Systems and Environmental Sciences Reference Module", Choice Reviews Online, vol. 51, no. 07, pp. 51-3585-51-3585, 2014.
- [9] J. Estévez, F. Moreno-Pérez, J. Roldán-Cañas, A. Serrat-Capdevila, J. González, F. Francés, F. Olivera and J. Giráldez, "Hydrology and its role in water engineering", Ingeniería del agua, vol. 18, no. 1, p. 1, 2014.
- [10] S. Villela and A. Mattos, Hidrologia aplicada. São Paulo (SP): McGraw-Hill, 1978, pp. 7-8.

[11] J. Weber, C. Dasso and E. Jorquera, "DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO DE SIMULACIÓN MIXTA", *Mecánica Computacional Vol XXIX*. Buenos Aires, Argentina, pp. págs. 4013-4037, 2010.

[12] Dominguez, E., Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos. *Meteorol. Colomb.* 2:33-38. ISSN 0124 – 6984, pp. 33–38 Bogotá, D.C. – Colombia, 2000.

[13] S. Mouelhi, C. Michel, C. Perrin and V. Andréassian, "Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model", *Journal of Hydrology*, vol. 318, no. 1-4, pp. 200-214, 2006.

[14] "Catchment Water Balance Modelling in Australia 1960-2004", Griffith University, Brisbane, Australia, 2006.

[15] UNAL. ISA, "Metodología de pronóstico de caudales en los ríos con aprovechamiento actual o futuro del Sector Eléctrico Colombiano.", Posgrado, Medellín Universidad Nacional de Colombia, 2007.

[16] M. Romagnoli, M. Portapila, A. Rigalli, G. Maydana, M. Burgués and C. M. García, "Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina", *Science of The Total Environment*, vol. 596597, pp. Pages 437–450, 2017.

[17] S. KumarSingh, I. Richard, M. Srinivasa and U. Shankar, "Inter-comparison of experimental catchment data and hydrological modelling", *Journal of Hydrology*, vol. 550, pp. 1-11, 2017.

[18] A. Alcántara, N. Montalvo, A. Mejía and E. Ingol, "Validation of rain-runoff hydrological models for application to the head of river basin Jequetepeque", *Rev. del Instituto de Investigación(RIIGEO)*, FIGMMG-UNMSM, vol. 17, , no. 33, pp. pp. 7-17, 2014.

[19] V. Andréassian, C. Perrin and C. Michel, "Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models", *Journal of Hydrology*, vol. 286, no. 1-4, pp. 19-35, 2004.

[20] Cemagref, (2009). GR: Modèles Hydrologiques du Génie Rural. [Online]. <http://www.cemagref.fr/webgr/Historiquegb.htm>. [Accessed: 11- nov- 2018].

- [21] "Modèles Hydrologiques du Génie Rural.", Webgr.irstea.fr, 2008. [Online]. Available: <http://fresno.cemagref.fr/webgr/index.htm>. [Accessed: 04-Mar- 2018].
- [22]. M. Dounia, D. Sabri and D. Yassine, "Rainfall – Rain off Modeling Using Artificial Neural Network", APCBEE Procedia, vol. 10, pp. 251-256, 2014.
- [23] A. Kouassi, T. Bi, K. Kouamé, K. Kouamé, J. Okaingni and J. Biemi, "Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire)", Comptes Rendus Geoscience, vol. 344, no. 5, pp. 288-296, 2012.
- [24] J. Cabrera, "Modelos agregados: GR2M", Imefen.uni.edu.pe, 2018. [Online]. Available: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_6.pdf. [Accessed: 09- Nov- 2018].
- [25] Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, "RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LOS CAUDALES MENSUALES A LO LARGO DE LA RED DE DRENAJE DE COLOMBIA", Medellin, 2017.
- [26] Molnar, P. "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland, 2011.
- [27] C. Perrin, C. Michel and V. Andréassian, "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation", Journal of Hydrology, vol. 279, no. 1-4, pp. 275-289, 2003.
- [28] R. Arsenault, A. Poulin, P. Côté and F. Brissette, "Comparison of Stochastic Optimization Algorithms in Hydrological Model Calibration", Journal of Hydrologic Engineering, vol. 19, no. 7, pp. 1374-1384, 2014.
- [29] R. Arsenault, F. Brissette and J. Martel, "The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration", Journal of Hydrology, vol. 566, pp. 346-362, 2018.

- [30] J. Nash and J. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles", *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3, pp. 282-290, 1970
- [31] J. Refsgaard, H. Henriksen, W. Harrar, H. Scholten and A. Kassahun, "Quality assurance in model based water management – review of existing practice and outline of new approaches", *Environmental Modelling & Software*, vol. 20, no. 10, pp. 1201-1215, 2005.
- [32] EDIJATNO, N. DE OLIVEIRA NASCIMENTO, X. YANG, Z. MAKHLOUF and C. MICHEL, "GR3J: a daily watershed model with three free parameters", *Hydrological Sciences Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 263-277, 1999.
- [33] D. Aubert, C. Loumagne and L. Oudin, "Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall–runoff model", *Journal of Hydrology*, vol. 280, no. 1-4, pp. 145-161, 2003.
- [34] IDEAM, "Estudio Nacional del Agua 2014", Bogota, 2015.
- [35] E. Dominguez and M. Cañon Ramos, "Hidroclimatología - www.mathmodelling.org", Mathmodelling.org, 2017. [Online]. Available: <http://www.mathmodelling.org/hidroclimatologia>. [Accessed: 15- Nov- 2018].
- [36] J. Sanchez San Roman, "evapotranspiracion", [Fjferrer.webs.ull.es](http://fjferrer.webs.ull.es), 2001. [Online]. Available: <https://fjferrer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Evapotranspiracion.pdf>. [Accessed: 15- Nov- 2018].