AJUSTE Y VALIDACIÓN DEL MODELO PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA GR2M APLICADO A LA SUBCUENCA NEVADO

Luisa Camila Coy Murcia[a]

[a]Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás Bogotá, luisacoy@usantotomas.edu.co

Resumen— *El presente artículo presenta el ajuste y validación del modelo precipitación – escorrentía GR2M en la subcuenca Nevado. El cauce del río nace en el Nevado del Cocuy y desemboca en el río Chicamocha, recorre ocho municipios de los departamentos de Boyacá y Santander. Éste modelo estima los caudales, con pocos datos de entrada mensuales como la precipitación y la evapotranspiración, los datos se obtuvieron de cinco estaciones climatológicas ordinarias representativas en la subcuenca Nevado, garantizando que el modelo sea fiable en la representación de la cuenca hidrográfica, en este caso la estimación del caudal se realiza mediante la evaluación del desempeño modelo de forma cualitativa y cuantitativa, determinando valores óptimos de los parámetros a partir de una función objetivo por medio de la técnica de optimización Solver en Excel, posteriormente ajustar y evaluar los parámetros para comparar los valores observados de caudales, con los valores calculados por medio del modelo, a través de gráficas para analizar la variabilidad climática que se puede presentar en diferentes épocas del año de acuerdo a las variaciones hidrológicas, es decir los datos que se obtuvieron de la estación limnimétrica referenciada como punto de desagüe, se comparan con los datos obtenidos a través de la simulación en el software EvalHid. Tanto los datos de las estaciones climatológicas ordinarias cómo los de la estación limnimétrica fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).*

Palabras clave— *Caudal, escorrentía, evapotranspiración, limnimétrica, precipitación, variabilidad climática.*

Abstract— *This article presents the GR2M precipitation adjustment and validation - runoff model in the "Nevado" sub - basin. The river's canal borns in the "Nevado Del Cocuy" and ends in the "Chicamocha" river, it crosses eight municipalities of "Boyacá" and "Santander" departments. This model estimates flows with few monthly input data like precipitation and evapotranspiration. The data were obtained from five representative climatological stations in the "Nevado" sub-basin, ensuring that the model is reliable in the representation of the hydrological basin in this If the estimation of the flow is made through the qualitative and quantitative evaluation, it'll determining optimal values of an objective function by means of an optimization technique to compare the observed values of flows with the values calculated through the model among the graphs to analyze the hydrological risks that can happen in different times of the year according with the hydrological variations. The data obtained from the limnimetric station referenced as drainage point are compared with the data obtained with the simulation in the EvalHid software. Both, the data of the ordinary climatological stations and those of the limnimetric station were supplied by the "Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia" (IDEAM).*

Keywords*— Flow, climatological, runoff, evapotranspiration, limnimetric, precipitation.*

I. INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica permite transformar los datos de precipitación – escorrentía en caudales de río, de acuerdo al modelo que se vaya a desarrollar se requiere una serie de datos mínimos, bien sea diarios, mensuales o anuales; en este caso para el estudio de aplicación de la subcuenca Nevado del modelo GR2M, únicamente se requiere dos parámetros de entrada, la precipitación y la evapotranspiración, en intervalos de tiempo mensuales.

Simular el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica es un tema importante en la hidrología, que intenta responder a la modelación de lluvia-escorrentía. Esto es replicar el índice de respuesta de una cuenca en el uso un modelo matemático, explotar el conocimiento de las condiciones ambientales que rodean (por ejemplo. la precipitación sobre la cuenca, temperatura del aire(Equipe Hydrologie Irstea Antony, 2016).

Por medio de la herramienta EvalHid, se desarrolla un modelo de Precipitación – Escorrentía, para los datos de entrada del modelo, se obtuvo información de cinco estaciones climatológicas ordinarias aledañas a la corriente Nevado de precipitación media y temperatura máxima, mínima y media, y una estación limnimétrica como punto de desagüe con datos de caudales, cuyo objetivo de aplicarlo en la obtención de las series de aportaciones de un modelo de simulación de la corriente Nevado, es realizar la simulación óptima para la estimación de caudales utilizando pocos parámetros que requiere el modelo GR2M, optimizarlo mediante la función Solver de Excel, ajustarlo y validarlo por medio del criterio de Nash y coeficiente de correlación y finalmente comparar los datos simulados con los observados en los registros históricos disponibles de las estaciones limnimétricas.

Para realizar un análisis cuantitativo es importante determinar el valor óptimo de la función objetivo, para esto se utiliza el criterio de Nash como técnica de ajuste, la cual consiste en concordar el balance hídrico

dentro de la cuenca, se compara el resultado de los valores calculados con los valores de las estación limnimétrica; el modelo también se evalúa cualitativamente mediante gráficas que contrastan los valores calculados con los valores observados.

II. DESCRIPCIÓN DE LA SUBCUENCA NEVADO

La cuenca del río Nevado nace al suroccidente del Parque Nacional Natural El Cocuy; recorre ocho municipios, entre los cuales Guican, Panqueva, Guacamayas, El Espino, San Mateo y Boavita, pertenecen al departamento de Boyacá, y Macaravita y Capitanejo al departamento de Santander; el río Nevado tiene una distancia aproximada de 49,12 km desde su nacimiento hasta su desembocadura en la cuenca media del río Chicamocha. La subcuenca Nevado cuenta con un área 1079,82km^2.

Teniendo en cuenta la clasificación climática de Lang, la zona de estudio presenta un clima húmedo como se puede observar en la figura 1.

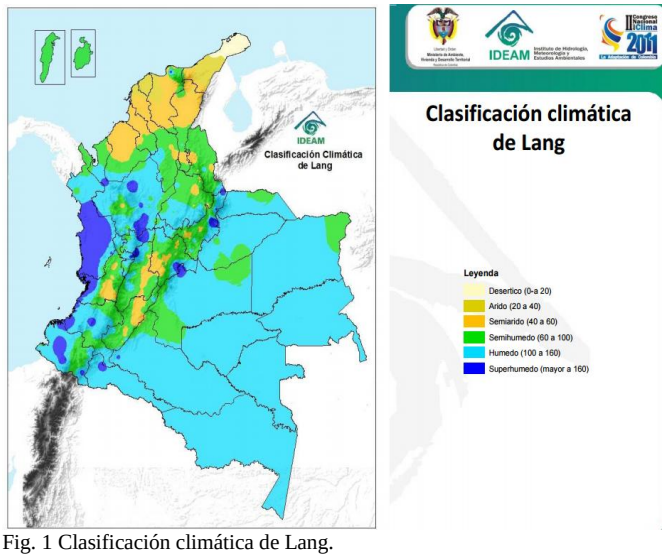

Fig. 1 Clasificación climática de Lang.
Fuente: (IDEAM, 2011)

Ésta clasificación la realizó Richard Lang en 1915 y es basada en el volumen de la precipitación anual acumulada expresada en milímetros y la temperatura promedio en grados Celsius. El cociente del primer parámetro entre el segundo es el denominado Índice de Lang (Precipitación acumulada /Temperatura promedio)(Oviedo, 2011).

Teniendo en cuenta el Índice de Lang se da la clasificación de la tabla1.

Tabla 1
Clasificación climática de Lang.

Coeficiente P/T	Clases de clima
0 a 20,0	Desértico
20,1 a 40	Árido
40,1 a 60	Semiárido
60,1 a 100	Semihúmedo
100,1 a 160,0	Húmedo
Mayor a 160	Superhúmedo

Fuente: (CORTOLIMA, 2003)

El régimen de la lluvia es bimodal, éste es característico del Nororiente de la Región Andina, se presenta en los Santanderes, Boyacá y El Altiplano Cundiboyacense, sobre las cuencas de los Ríos Lebrija, Chicamocha, Sogamoso y Bogotá. También tiene dos épocas secas y dos de mayores lluvias; a diferencia del anterior, la primera temporada seca es menos prolongada y más deficitaria que la de mitad de año y las épocas de mayores lluvias son similares, la del primer semestre tiene como meses lluviosos Abril y Mayo y en el segundo semestre el mes más lluvioso es Octubre seguido por Noviembre. (Guzmán, Ruíz , & Cadena , 2014)

En los meses más lluviosos entre Abril y Mayo – Junio la precipitación presenta un máximo de 136mm., y otro de menor magnitud en Octubre y Noviembre con 96.6 mm. En el resto del año, encontramos valores que oscilan entre 16 y 82mm, es decir que la precipitación media anual es de 93,9mm. (CDIM, 2014)

III. DESCRIPCIÓN DEL MODELO PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA GR2M

Es un modelo desarrollado por la unidad de investigación en hidrología de Cemagref d'Antony.[1]

Para reafirmar mejor sus misiones, Cemagref en noviembre de 2011 adopta un nuevo nombre: IRSTEA "Instituto Nacional de Investigación de la Ciencia y Tecnología para el Medio Ambiente y Agricultura"IRSTEA es un establecimiento público científico y tecnológico (EPST). Distribuido en Francia en 9 centros, las actividades de investigación y experiencia están orientados a la acción y el apoyo de políticas públicas.(IRSTEA, 2014).

[1] Cemagref d'Antony.
Tel: +33 (0) 1 40 96 61 21
e-mail: si.antony@orange.fr

Únicamente trabaja con dos parámetros, este modelo resulta útil cuando existe poca información de la cuenca.GR2M es un modelo agregado que simula caudales en intervalos mensuales. El modelo transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia (Equipe Hydrologie Irstea Antony, 2016).

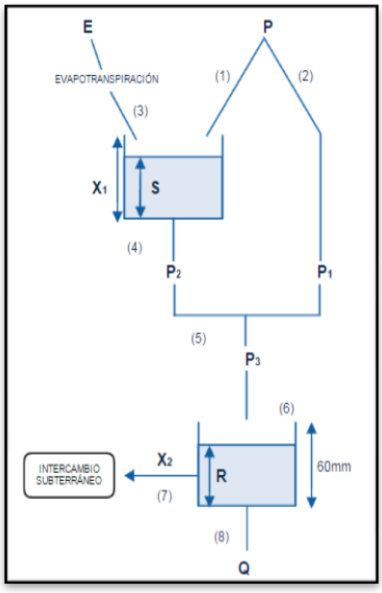

Fig. 2 Esquema del modelo GR2M
Fuente: (Equipe Hydrologie Irstea Antony, 2016)

A. *Funciónde producción*

El agua que se dirige hacía el reservorio suelo S, y allí es almacenada, por medio de la ecuación (1) se calcula ese nuevo volumen del reservorio sueloS_1 (Equipe Hydrologie Irstea Antony, 2016).

$$S_1 = \frac{S + X_1\varphi}{1 + \psi\frac{S}{X_1}} \qquad (1)$$

$$\text{con, } \psi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

Se asume X_1 como la capacidad de S, siendo S el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del análisis.

$$\psi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right).$$

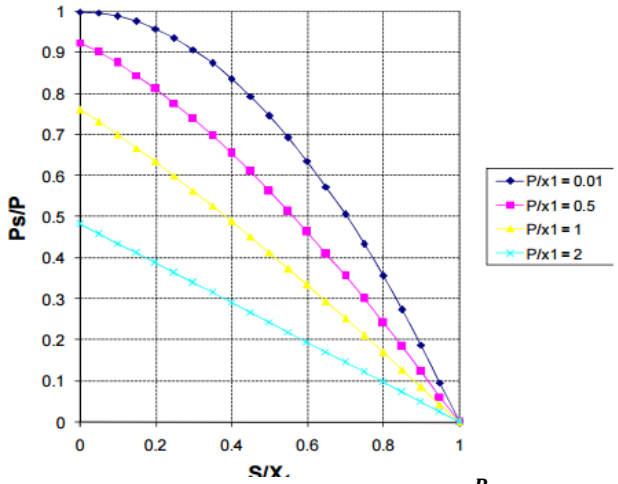

Fig. 3Gráfica del comportamiento de la tasa de infiltración P_s/P como una función de la tasa de almacenamiento S/X_1.
Fuente: (Roldán Taborda, 2009)

El agua que se dirige al reservorio de agua gravitacional P_1, asumiendo que el volumen de agua antes de la infiltración es el mismo después, es decir no hay pérdidas, entonces será calculada.

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

Se conoce también P_1 →Escorrentía superficial.
P → Precipitación media de la cuenca.

Debido a la evapotranspiración el volumen del reservorio suelo S se reduce, y el volumen que se reduce se conoce como S_2.

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

$$\text{Con, } \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

Cuando la superficie se seca, la evaporación potencial aparente tiende a aumentar, sin embargo, debido al uso de la función Tangente Hiperbólica sobre la evaporación potencial, en este caso no se produce un producto inestable entre una cantidad muy pequeña con una muy grande(Roldán & Mesa, 2009).

Lo que matemáticamente se representa mediante la ecuación $\psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$, en la figura 4 se observa el

comportamiento de la tasa de evaporación E_s/E, como una función de la tasa de almacenamiento S_1/X_1; la evaporación real es directamente proporcional a la disponibilidad de agua en el reservorio suelo.

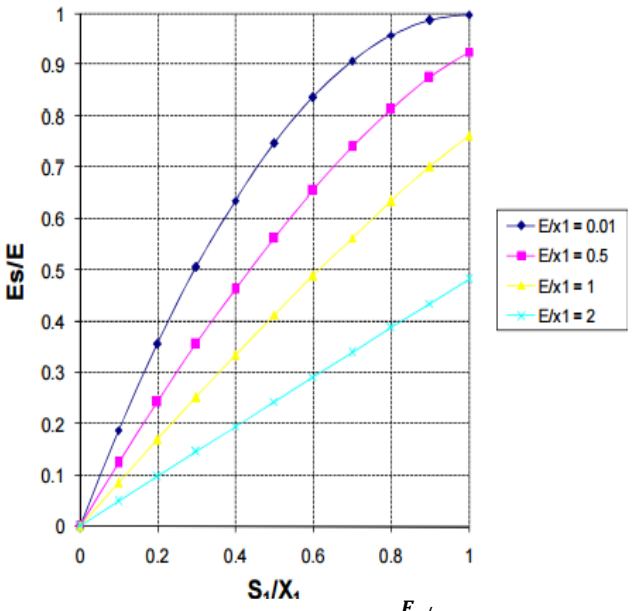

Fig. 4 Comportamiento de la tasa de evaporación E_s/E, como una función de la tasa de almacenamiento S_1/X_1.
Fuente: (Roldán Taborda, 2009)

En el esquema del modelo patrón GR2M de la figura 5desarrollado antes de ser modificado, planteaba unas variables que finalmente fueron resueltas empíricamente, tomaron como base para analizar, mediante prueba y error, la selección del subconjunto de estructura y parámetros más adecuado a partir de datos de 410 cuencas de contraste, con muy amplia variabilidad hidroclimática(Cabezas Calvo - Rubio , 2015).

Este modelo patrón planteaba $S = \frac{S_2}{\left[1+\left(\frac{S_2}{X_1}\right)^{X_2}\right]^{1/X_2}}$, que tras el análisis de las diferentes subestructuras y combinaciones paramétricas, x_4= 60mm, x_2= 3 y x_3=0; esto con el fin de proponer únicamente dos parámetros a calibrar.

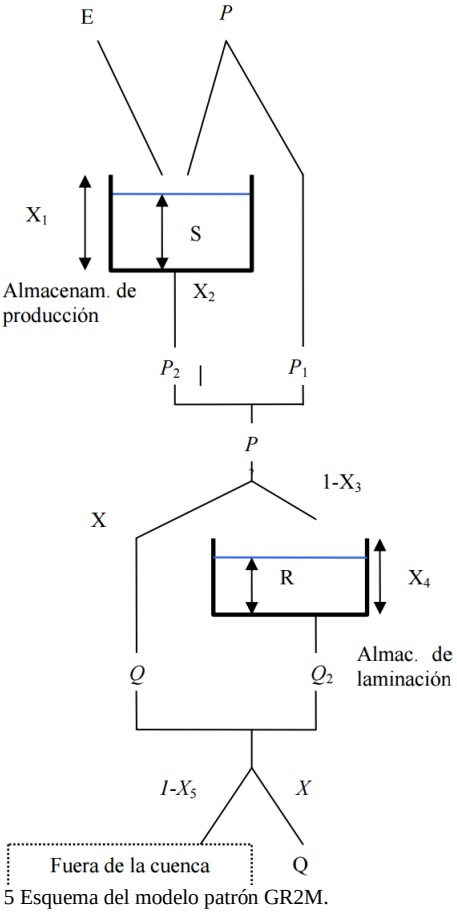

Fig. 5 Esquema del modelo patrón GR2M.
Fuente:(Cabezas Calvo - Rubio , 2015)

Una vez se haya realizado la evapotranspiración hay una parte de esta agua que es trasferido nuevamente al agua gravitacional, por esto es necesario volver a calcular el almacenamiento del reservorio suelo S, en el cual se tiene en cuenta el volumen calculado S_2.

$$S = \frac{S_2}{\left[1+\left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \qquad (4)$$

Mediante la diferencia de S_2 y S se calcula el volumen que se percola.

$$P_2 = S_2 - S \qquad (5)$$

De acuerdo al planteamiento del modelo, una cantidad de agua P2 es liberada del tanque de producción como percolación, de esta forma S2, toma un nuevo valor S, el cual representa el almacenamiento inicial en el siguiente mes.

$$P_2 = S_2 - \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad (4\text{-}5)$$

$$P_2 = S_2 \left\{1 - \left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{-\frac{1}{3}}\right\} \quad (4\text{-}5)$$

B. *Función de transferencia*

La precipitación que ingresa al reservorio de agua gravitacional del agua que se percoló, se calcula con las sumas del volumen del reservorio de agua gravitacional y el volumen del agua que se percoló.

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (6)$$

Se conoce R cómo el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del período del análisis debido a que el reservorio de agua gravitacional tendrá un nuevo volumen por el volumen de agua P_3 que ingresó, se recalcula el reservorio.

$$R_1 = R + P_3 \quad ;)$$

El volumen del reservorio se debe corregir con el coeficiente de intercambios subterráneo X_2, ya que existe un intercambio de volúmenes a nivel superficial.

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

Para estimar el caudal finalmente el reservorio de agua gravitacional se vacía siguiendo una función cuadrática.

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

Las variables a optimizar son la capacidad del depósito del suelo en milímetros (X_1) y el coeficiente de intercambios subterráneos adimensional (X_2), ya que todos los volúmenes estimados dependen de éstas dos variables.

IV. METODOLOGÍA

La subcuenca Nevado cuenta con cinco estaciones climatológicas ordinarias y tres limnimétricas, tal como se muestran en la figura 6. Se realiza un análisis de los datos de las estaciones climatológicas en el cual se escoge el periodo 1996 a 2010. En donde se implementa únicamente la estación limnimétrica PTE TOTUMO debido a que esta se encuentra al final de la cuenca y se utiliza como punto de desagüe en el modelo. Haciendo uso de este período de tiempo donde la estación registra datos como se observa en la tabla 2para una posterior validación y calibración del modelo.

Vale aclarar que no se implementó un procedimiento para completar datos ya que las estaciones no cuentan con datos faltantes para este período de tiempo.

Tabla 2
Período de datos según el nombre y código de estación.

Estación	Código	Período de datos
Guican	24035070	1992-2012
Chiscas	24035310	1976-2013
Sierra Nevada Cocuy	24035240	1975-2013
Cusagui	24035010	1987-2013
Chita	24035250	1973-2012
PTE Totumo	24037490	1996-2013

Fuente: Autor del artículo.

Fig. 6 Localización de la cuenca Nevado y estaciones hidroclimáticas.
Fuente: Autor del artículo.

A. Cálculo de la ETP

La evapotranspiración potencial se calcula por medio del método de Thornthwaite (1948), el cual consiste en cálculos basados en función de la temperatura media en relación con la duración del día y el número de días al mes.

Este método se consideró apropiado para la zona de estudio ya que según bibliografía consultada éste método resulta óptimo con resultados favorables para zonas húmedas.(Peréz Sarrión, 2014) Entre otras ventajas que ofrece el método de Thornthwaite es que es confiable para términos largos, y además se considera fácil de usar, y aunque según estudios en comparación a los otros métodos tiene la desventaja de subestimar la evapotranspiración durante el verano(Llanes Cárdenas , Norzagaray Campos, & Muñoz Sevilla , 2014), no se consideró pertinente tener en cuenta esta desventaja, ya que la región no presenta altas temperaturas.

$$ETPo = 16(10\frac{Tmed}{I})^{a} \qquad (9)$$

Donde el$I$ (Índice de calor) es calculado por medio de la sumatoria de los doce meses del años de i.

$$I = \sum_{12}^{j} i \;\; i = (\frac{\text{Tmedj}}{5})^{1.514} \qquad (10)$$

Posterior a esto se calcula el parámetro a el cual depende de índice de calor I

$$a = 0.000000675I^3 - 0.000771I^2 + 0.01792I + 0.49239 \qquad (11)$$

Los valores constantes que aplica la fórmula de Thornthwaite, éste valor es empírico, donde el valor "a", es el mismo para cada mes y viene dado en función del índice anual I(UNESCO, 1982).

Aunque hay que tener en cuenta que si la temperatura es menor a 26,5 °C, la ETP debe ser ajustada según el número de días del mes (d) y las horas de sol para cada día (N).

$$ETP = ETPo\;\frac{N}{12}\frac{d}{30} \qquad (12)$$

Posteriormente se calcula el valor único de las variables como la temperatura por medio del método de promedio. En cuanto a las variables de evapotranspiración potencial y precipitación se procede a utilizar el método de polígonos de Thiessen para hallar el valor medio de la variable, gracias a que este método es sumamente sencillo y práctico con el uso de herramientas SIG (ArcGis) como se observa en la figura 7, en donde se calcula el área de influencia de cada estación en la cuenca.

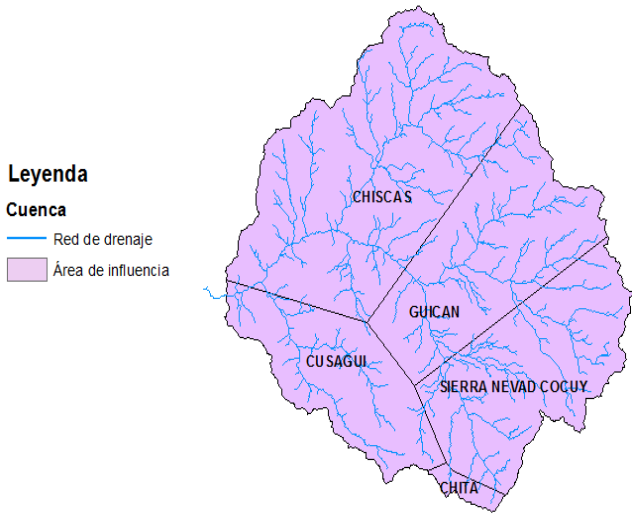

Fig. 7 Área de influencia de las estaciones climatológicas ordinarias.
Fuente: Autor del artículo.

En cuanto los parámetros de entrada X1 (capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo) se calculó por medio del siguiente mapa en donde la cuenca está en un rango de 300 a 1500 mm donde se obtuvo un promedio de 900 mm y So (Contenido inicial del tanque de producción) se calcula como ½ de X1. Vale la pena aclarar que debido a la falta de datos disponibles y teniendo en cuenta la clasificación climática de Lang se considera clima húmedo la zona de estudio y el valor de X2 (capacidad de intercambio de agua) es tomado como 1, ya que este parámetro puede ser más importante para climas áridos o semiáridos.

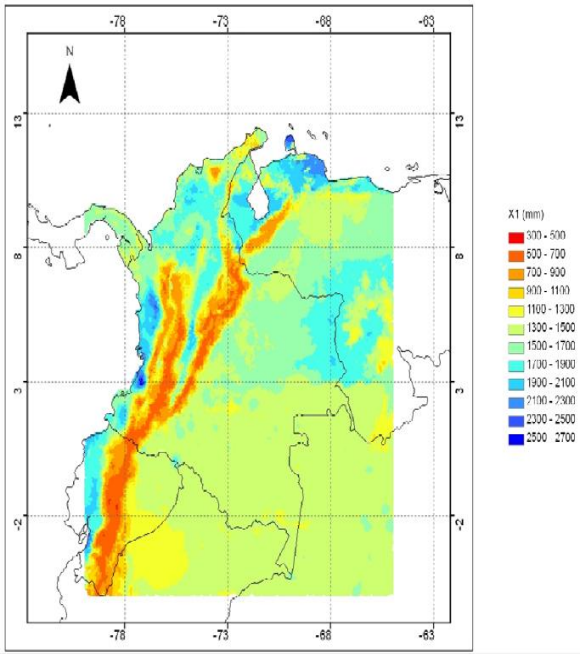

Fig. 8 Mapa estimado para el parámetro X1
Fuente:(Roldán & Mesa, 2009)

V. AJUSTE Y VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo GR2M hace uso de datos hidroclimáticos del período de 1996 a 2010 y fue validado con datos en el mismo período de tiempo de caudales medios mensuales de la estación PTE TOTUMO ubicada a la salida de la cuenca. El ajuste del modelo consistió en la optimización de los parámetros de entrada X1 y So con la finalidad de maximizar el coeficiente de ajuste por medio de la métrica de desempeño Nash.

La eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE es utilizado como criterio para evaluar el poder reproductivo del modelo hidrológico, que consiste en la comparación de la magnitud relativa de la varianza residual ("caudal simulado") con la variación de los datos de medición ("caudal observado"), el cual se calcula mediante esta ecuación(Ocampo López, 2012).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i^{Observado} - Q_i^{Simulado}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i^{Observado} - Q^{Promedio}\right)^2}\right] \quad (13)$$

El criterio de Nash-Sutcliffe es importante ya que es uno de los más usados en modelos hidrológicos porque expresa un criterio de ajuste de acuerdo al valor referencial obtenido y así mismo de acuerdo a su variabilidad se puede igualmente ir calibrando es decir modificando parámetros significativos en el modelo para que los resultados arrojados se parezcan a los observados y así optimizar el modelo.

Nash-Sutcliffe tiene un rango desde menos infinito a uno, que de acuerdo a la escala de valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe, presente un valor cualitativo de ajuste, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3
Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.

E	Ajuste
< 20%	Insuficiente
20% – 40%	Satisfactorio
40% – 60%	Bueno
60% – 80%	Muy bueno
>80%	Excelente

Fuente: (Juan, 2012)

VI. RESULTADOS

A. Simulación

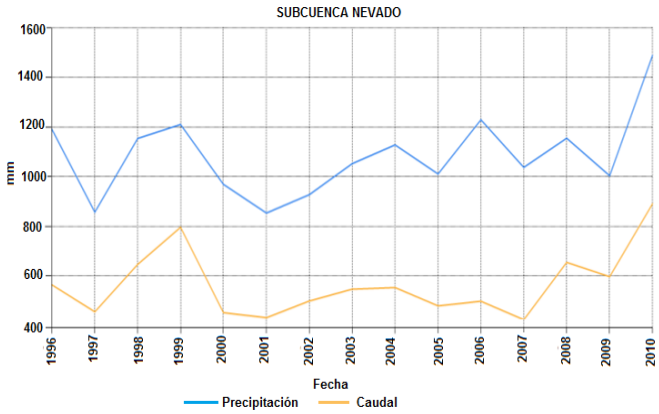

Fig. 9 Gráfica simulación precipitación y caudal de la subcuenca Nevado en EvalHid.
Fuente: Autor del artículo

En cuanto al resultado que se observa en la gráfica de la figura 9 se verifica la relación estrecha entre la precipitación y el caudal simulado con una correlación Pearson de 0.82 aproximadamente, se comprueba que a mayor precipitación, mayor capacidad del tanque de producción y por lo tanto se obtiene un mayor caudal, como se evidencia en los períodos de 1998 hasta mediados de 1999 y también desde el período del 2009 hasta el 2010.

Cabe mencionar que en este último período se evidenció períodos extremos, en donde el 2009 terminó bajo el efecto moderado de El Niño hasta el mes de mayo, seguido por un 2010 con condiciones frías de La Niña teniendo como consecuencia un aumento de lluvias, en donde se obtuvieron los meses más lluviosos de los últimos 40 años, comparados con otros años La

Niña como 1988, 1995, 1998, 2000 y 2007 (León Aristizábal, 2012).

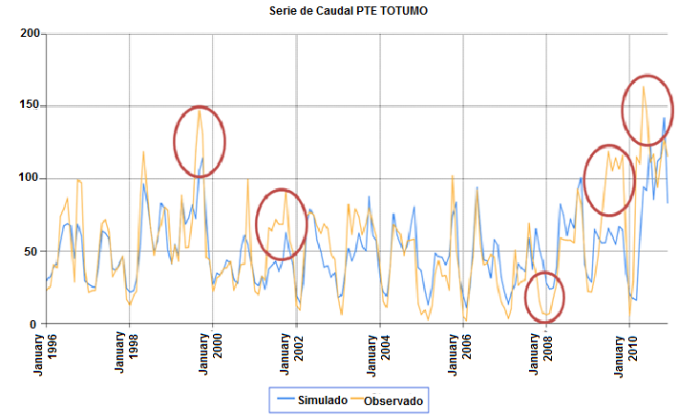

Fig. 10 Gráfica del caudal simulado y caudal observado en EvalHid.
Fuente: Autor del artículo.

Según la gráfica de la figura 10 se evidencia que los valores medios poseen un buen ajuste grafico del caudal simulado con relación a los datos observados. Pero en contraste a ello se presentan valores extremos del caudal simulado en los años 1999, 2001, 2007, 2008, 2009 y 2010 (círculos rojos). Donde para estos periodos se observa una sobre estimación del modelo frente a los datos de la estación del PTE Totumo, excepto con el período de 2007 a 2008 en el cual se observa una sub estimación.

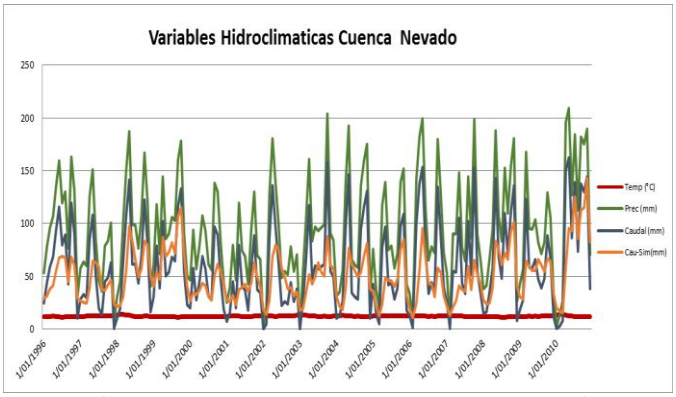

Fig. 11 Gráfica del caudal simulado EvalHid y variables hidroclimáticas
Fuente: Autor del artículo.

Estos valores atípicos en la modelación de los caudales pueden estar relacionados con el aumento o disminución de la precipitación ya que de acuerdo con lo dicho anteriormente, la alta correlación existente entre los períodos donde se presentan los mayores lluvias aumentan los caudales o por el contrario sí la precipitación disminuye los caudales también.

En cuanto a la variable de temperatura media de la cuenca se puede evidenciar su poca variabilidad para todos los períodos de tiempo y por lo tanto posee poca incidencia en los valores extremos de los caudales.

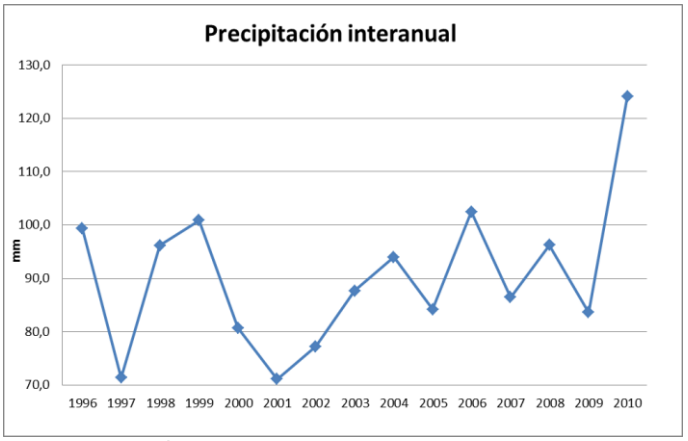

Fig. 12 Precipitación interanual.
Fuente: Autor del artículo.

Debido a la variabilidad climática que ocurre en temporadas de exceso o déficit de pluviosidad por lo eventos de El Niño y La Niña, se analizaron de acuerdo a los mapas de alteraciones más probables de la precipitación en Colombia, durante la ocurrencia del fenómeno débil, moderado y fuerte de El Niño y La Niña del IDEAM, comparando con los datos de precipitación de la entrada del modelo, la información se organizó en la siguiente tabla 4.

La información de los eventos El Niño y La Niña fue extraída del Centro del servicio nacional meteorológico(NOAA) para la predicción meteorológica y climática, los cuales en la tabla 4 se muestran de rojo los meses con el fenómeno de El Niño, y de la azul La Niña.

Tabla 4
Comparación de la precipitación de la cuenca con el fenómeno El Niño y La Niña.

Año	Fenómeno												Precipitación media	Criterio de alteración de la precipitación
	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D		
1996													99,3	Normal
1997													71	Déficit ligero
1998													96,2	Normal
1999													100,9	Exceso ligero
2000													80,7	Déficit ligero
2001													71	Déficit
2002													77,3	Déficit
2003													87,7	Déficit ligero
2004													94,0	Normal
2005													84	Déficit ligero
2006													102,5	Exceso ligero
2007													86,4	Déficit ligero
2008													96,3	Normal
2009													84	Déficit ligero
2010													124,1	Exceso

Fuente: Autor del artículo.

B. Ajuste y validación.

Primero se optimizó los parámetros más sensibles en Excel por medio de la función Solver, teniendo en cuenta los parámetros más sensibles. En Excel a través de la herramienta Solver se fija la celda objetivola cual se debe maximizar y también se fija las celdas de los valores que se cambian para optimizar Nash (X1 y So), la cual sirve para acercar más la serie simulada a la serie observada, es decir que sirve para maximizar la eficiencia de Nash para optimizar el modelo.

Los datos que se deben tener en cuenta es el área de la subcuenca, el período de meses que corresponde del año 1996 al año 2010, el valor de Nash obtenido en este proceso tiene una eficiencia de 78,81% como se puede observar en la Tabla 4, se considera muy bueno de acuerdo a los valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.

Tabla 5.
Valores de los parámetros optimizados.

Station name	Subcuenca Nevado	
Catchment area(km²)		1080
Model parameters	**Transformed**	**Real**
x1: Capacity of the production store (mm)	6.55	700.01
x2: Water exchange coefficient (mm)	1.04	1.04
Initial values		
Initial level S0 in prod. store (max.: x1 mm)		350.01
Initial level R0 in routing store (max.: 60 mm)		30
Period		
Length of the warm-up period (months)		12
Length of the test period (months)		180
Start date		01/1996
End date		12/2010
Efficiency criteria (%)		
Nash(Q)		78.814
Nash(VQ)		80.597
Nash(ln(Q))		77.828
Bias		100.664

Fuente: Autor del artículo.

La modelación del caudal para la cuenca Nevado ha tenido un valor máximo de eficiencia de 78,81%, en donde se ha calculado inicialmente con un valor de X1 de 700 mm, el cual es un valor que se encuentra dentro del rango observado inicialmente en la figura 8 del mapa que estima X1, y So de 350 en el cual se obtuvo una eficiencia de Nash 78,81% optimizando las variables hasta obtener el mejor ajuste para el modelo, lo cual indica según la tabla 3 de los valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe que se halla en un ajuste “muy bueno” demostrando que la varianza residual (“caudal simulado”) con la variación de los datos de medición (“caudal observado”) tienen una gran semejanza.

De acuerdo con la gráfica de la Figura 13 de dispersión de los datos, el modelo tiene un buen ajuste con la línea de tendenciaen relación a la dispersión de datos, siendo el coeficiente de correlación de 60.7%, sin embargo se encuentran datos atípicos que son los causantes de que baje la eficiencia del modelo, éstos datos atípicos son causados por los eventos extremos de la precipitación debido a la variabilidad climática durante el fenómeno de El Niño y La Niña.

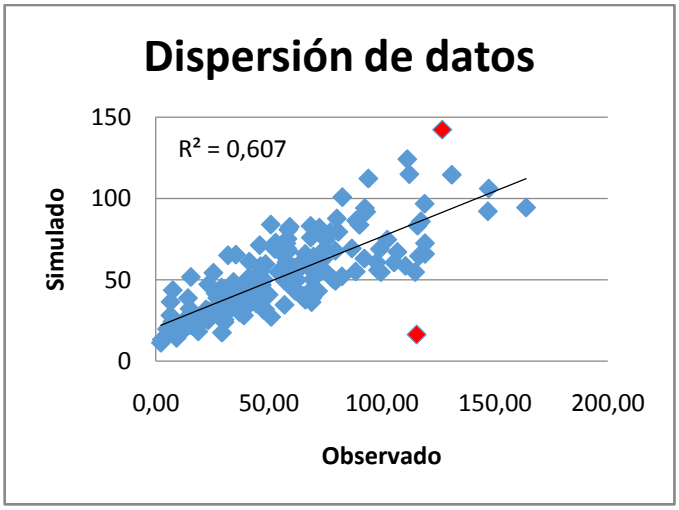

Fig. 13 Gráfica de dispersión de datos.
Fuente: Autor del artículo.

VII. CONLUSIONES

La optimización del modelo hidrológico GR2M es muy favorable, ya que el resultado de éste es de 78,81% de eficiencia del valor de Nash, lo cual indica según los valores referenciales en la escala del criterio de Nash en un rango de 60% - 80% el ajuste se considera muy bueno, y su eficiencia es favorable por lo que se

recomienda su aplicación en cuencas de alta montaña como lo es la sub cuenca nevado.

Las estaciones climatológicas ordinarias se tuvieron en cuenta cinco estaciones disponibles dentro de la cuenca, y la estación limnimétrica más cercana al punto de desagüe, para el rango de años escogidos para la modelación, se consideró de acuerdo a la disponibilidad de datos que tenían todas las estaciones, que los períodos en las cuatros estaciones estuvieran activas en los mismos períodos, los cuales fueron solicitados en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), inconvenientes como encontrar un número de estaciones representativas en la cuenca, que estén activas y que cuenten con los datos requeridos, por esto el modelo GR2M, es muy útil debido a que requiere de pocas variables de entrada.

Se debe tener en cuenta que no todo fenómeno de El Niño presenta el mismo impacto en la precipitación, como se presentó que en algunos años presentaban déficit en la lluvia y en otros excesos ligeros en la precipitación, lo mismo ocurre con el fenómeno de La Niña que presenta variaciones distintas durante diferentes épocas.

Es importante tener en cuenta que se analizó la variabilidad climática en un período de dieciséis años, lo cual nos permitió identificar las alteraciones de la precipitación con los fenómenos El Niño y La Niña, ya que la precipitación es la variable que está más relacionada con el aumento o disminución del caudal, el cual es el valor de salida del modelo.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Cabezas Calvo - Rubio , F. (2015). *DIGITUM Biblioteca Universitaria.* Recuperado el Enero de 2017, de Universidad De Murcia

CDIM. (2014). *Sistema de documentación e información municipal.* Recuperado el Febrero de 2017.

CORTOLIMA. (2003). *CORTOLIMA.* Recuperado el Enero de 2017.

Equipe Hydrologie Irstea Antony. (2016). *Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA).* Recuperado el Octubre de 2016, de Equipe Hydrologie des bassins versants: https://webgr.irstea.fr/modeles/mensuel-gr2m/

Equipe Hydrologie Irstea Antony. (2016). *Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA).* (WordPress) Recuperado el Octubre de 2016, de equipe hydrologie des bassins versants: https://webgr.irstea.fr/

Equipe Hydrologie Irstea Antony. (2016). *IRSTEA.* Obtenido de https://webgr.irstea.fr/modeles/mensuel-gr2m/fonctionnement-gr2m/

Guzmán, D., Ruíz , J. f., & Cadena , M. (2014). *IDEAM.* Recuperado el Febrero de 2017.

IDEAM. (2011). *IDEAM.* Recuperado el Enero de 2017, de Clásificaciones climáticas de Colombia

IRSTEA. (2014). *IRSTEA.* Recuperado el Enero de 2017, de http://www.irstea.fr/

Juan, C. (Julio de 2012). *INSTITUTO PARA LA MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL FENÓMENO EL NIÑO.* Recuperado el Octubre de 2016.

León Aristizábal, G. (2012). *IDEAM.* Recuperado el Enero de 2017.

Llanes Cárdenas , O., Norzagaray Campos, M., & Muñoz Sevilla , N. P. (2014). Determinación de la evapotranspiración potencial ETP y de referencia ETO como indicador del balance hídrico del corazón agrícola de México. *Juyyaania - Revista sobre el Manejo, Uso y Aprovechamiento de los Recursos Naturales, 2*(1), 119 - 129. Recuperado el Enero de 2017.

Ocampo López, O. L. (2012). *bdigital.* Recuperado el Enero de 2017, de REPOSITORIO INSTITUCIONAL, UN.

Oviedo, T. B. (Junio de 2011). *UNAD.* Obtenido de Universidad Abierta y a Distancia

Peréz Sarrión, R. (Diciembre de 2014). *RiuNet, Repositorio Institucional.* Recuperado el Enero de 2017, de Universitat Politècnica de València

Roldán , E., & Mesa, O. (2009). *Bdigital* . Recuperado el Noviembre de 2016, de Repositorio Institucional, Universidad Nacional de Colombia.

Roldán Taborda, E. (Agosto de 2009). *bdigital.* Recuperado el Enero de 2017, de Repositorio institucional

UNESCO. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur.* Montevideo (Uruguay): ROSTLAC. Recuperado el Enero de 2017