

MODELOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA EXPERIMENTAL DE RÍO SUCIO, MUNICIPIO DE TONA, SANTANDER

JORGE GUZMÁN JAIMES

*Profesor Escuela de Ingeniería Civil
Grupo de Investigación, GPH
Universidad Industrial de Santander
jguzman@uis.edu.co*

SULLY GÓMEZ ISIDRO

*Profesora Escuela de Ingeniería Civil
Grupo de Investigación, GPH
Universidad Industrial de Santander
sgomez@uis.edu.co*

EDUARD NIÑO

*Ingeniero Civil
Universidad Industrial de Santander*

ÁNGEL ANTONIO ANAYA ARCHILA

*Ingeniero Civil
Universidad Industrial de Santander*

Fecha de Recibido: 28/02/2008

Fecha de Aprobación: 09/05/2008

RESUMEN

Se realizó la caracterización de propiedades físicas de la cuenca del Río Sucio, afluente del Río Tona, la principal fuente de agua que abastece la ciudad de Bucaramanga. Mediante campañas de campo, se caracterizaron, la geología, la geomorfología, tipo y usos de suelos y cobertura vegetal, se realizó el inventario completo de las corrientes superficiales de agua, así como de afloramientos de aguas subterráneas. Se aplicaron herramientas de espacialización de las diversas variables. Se utilizaron dos modelos hidrológicos, el modelo agregado semidistribuido NAM y el modelo conceptual distribuido (SHIA). Ambos modelos representan los principales fenómenos físicos de transporte y almacenamiento de agua en la cuenca, pero difieren en el tipo de algoritmo que utilizan y la escala de aplicación. Los modelos se calibraron con datos de caudales aforados diariamente durante seis meses continuos durante el año 1987 y los resultados se compararon con datos de la estación Carrizal localizada aguas abajo sobre el Río Tona. Los resultados obtenidos permiten observar un buen ajuste entre eventos de lluvia y picos en el hidrograma, así como de la recesión de los hidrogramas. Se observa flujo desde el Altiplano de Berlín, así como un flujo base que controla los caudales mínimos en la cuenca. Ambos modelos muestran un buen comportamiento en los caudales promedios y pueden ser utilizados como una primera herramienta de simulación de la cuenca de Río Sucio.

PALABRAS CLAVE: Modelos lluvia-escorrentía, Modelo físico conceptual, Movimiento del agua.

ABSTRACT

In this work was done the characterization of physical properties of the Rio Sucio basin, one Tona River tributary, this is an important water source used to supply the Bucaramanga City. Geology, geomorphology, type and uses of soil and vegetative cover were characterized by field work campaigns. A complete inventory of surface water flows as well as groundwater points was made. We applied surface mapping tools for the various variables. Two hydrological models, the model added semi distributed NAM and the conceptual model distributed (SHIA) were implemented. Both models represent the phenomena of physical transport and water storage in the basin, but they differ in the type of algorithm used and the scale of application. The models were calibrated with flow data, obtained by daily measures during six months (1987) and the results were compared with data from the Carrizal gauge station, located downstream on the Tona River. The results allow us to get a good fit between rain events and hydrograph peaks as the hydrographs recession. Flow from Berlin Altiplan is observed and the base flow controls discharge minimum in the basin. Both models show a good fit with the flow averages and they can be used as a first tool for simulation of this basin.

KEYWORDS: Precipitation discharge models, Conceptual physical models, Water movements.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo hace parte de las investigaciones realizadas en la Cuenca Experimental de Río Sucio (CERS) en conjunto con la Empresa del Acueducto de Bucaramanga (AMB), UIS y Colciencias. La importancia de esta cuenca radica en que ella constituye uno de los afluentes significativos en calidad y cantidad de agua de la captación más importante para la ciudad de Bucaramanga. Debido a que esta cuenca no contaba con información de sus características físicas, ni se tenía conocimiento de su respuesta a eventos de lluvia, la empresa del acueducto presentó su interés en disponer de herramientas de simulación y manejo del agua superficial, así como de crear allí una cuenca experimental.

La pregunta que originalmente se planteó durante el trabajo conjunto entre la empresa y la Universidad Industrial de Santander, fue como modelar los eventos lluvia-escorrentía en la Cuenca de Río Sucio?, Que tipo de información obtener en el corto y largo plazo para el desarrollo de modelos de predicción y manejo?. En este trabajo se hizo énfasis en la influencia que tienen las características físicas de la cuenca como son la geología, la geomorfología, el tipo de suelos, usos y la cobertura vegetal en el flujo de agua y la búsqueda de esta información. La descripción detallada de estas características se obtuvo mediante la realización de campañas de campo durante los años 2004 y 2005, las cuales permitieron hacer el levantamiento de la base cartográfica en escala 1:10.000, la cartografía geológica en escala 1:2000, inventario de nacimientos de agua y de la red hídrica y la realización de muestreos hidroquímicos. Se desarrollaron modelos digitales del terreno en tamaño de celda de 30x30m, como base para el modelado hidrológico.

La aplicación de los modelos permitió incluir un conjunto de investigaciones y conocimientos que describen la componente superficial del flujo, componente subsuperficial (zona no saturada) y componente subterránea (zona saturada). En este trabajo se insiste en que el modelado hidrológico debe estar fundamentado en la concepción del modelo conceptual como un todo y no solamente en la relación lluvia-escorrentía. Se aplicó el modelo hidrológico semidistribuido, NAM [5] y el modelo hidrológico distribuido, SHIA [10] los cuales fueron calibrados y validados con la información disponible.

En este trabajo se hace una descripción física de las principales características de la cuenca que definen el modelo conceptual como son, la topografía, suelos, vegetación y procesos de transporte (numeral 2), posteriormente se hace una descripción lo mas detallada posible de la estructura de cada uno de los modelos (numeral 3 y 4), y se describe la información utilizada, la calibración de los modelos y el análisis de los resultados obtenidos.

2. DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA CUENCA

La cuenca de Río Sucio deriva su nombre de la quebrada Río Sucio, afluente del Río Tona. La CERS es una microcuenca de cerca de 10 km², de alta montaña con características geológicas estructurales, geomorfológicas y de suelos, complejas que condicionan la ocurrencia, almacenamiento y movimiento del agua [4]. La quebrada Río Sucio es tributaria de la cabecera superior del Río Tona, (ver **Figura 1**), con elevaciones que van desde los 1990 a 3450 msnm, lo cual favorece la

presencia de varias zonas de vida con diferentes climas (Piso montano bajo, montano y subalpino) y sus límites inferior y superior se localizan 500 m aproximadamente aguas arriba del casco urbano del municipio de Tona y

los límites del Páramo de Berlín respectivamente. Aguas abajo del área urbana de Tona se encuentran localizadas las bocatomas que abastecen actualmente al acueducto de la ciudad de Bucaramanga.

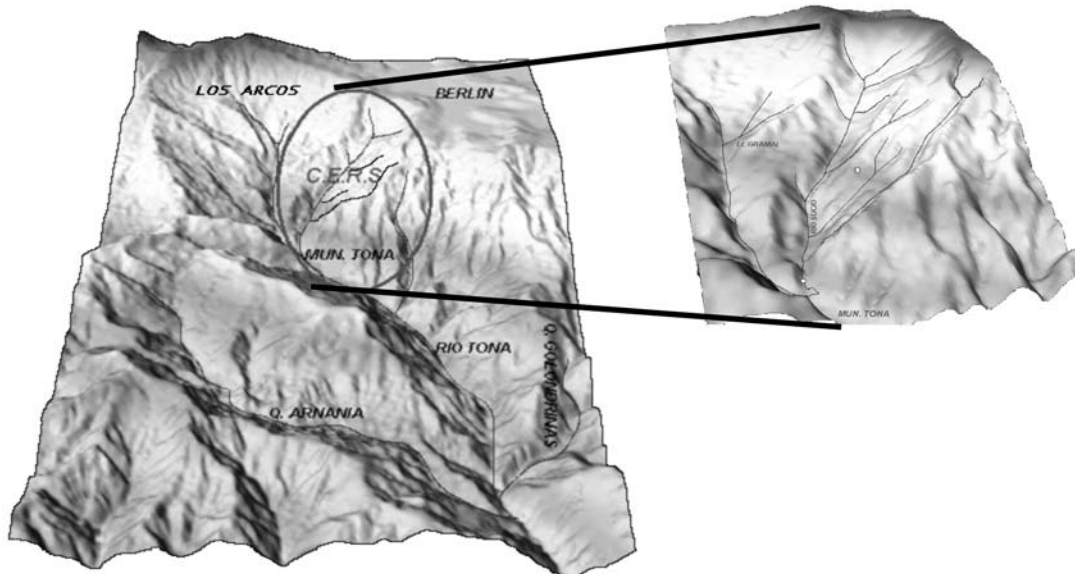


Figura 1. Ubicación de la Cuenca de Río Sucio

El cauce principal se encuentra orientado en dirección SE-NW, y tiene su nacimiento aproximadamente sobre 3400 msnm en el Alto El Vivito, aproximadamente 20 metros abajo de un depósito fluvio-glaciar, sin embargo en la zona baja de la cuenca sobre los 2000 msnm y a medida que se aproxima a su desembocadura sobre la quebrada Los Arcos, ésta cambia en dirección NE-SW. La longitud del cauce principal es de aproximadamente 6 km.

Entre los principales afluentes al cauce principal se tienen la quebrada La López, La Colmena, Pitones o Chorrerón, El Vivito y Relumbrante. En la cuenca se presentan cauces intermitentes, efímeros y perennes, observados durante el trabajo de campo realizado. El fondo de los canales de la red hidrográfica de la CERS está controlado por la geología regional, siendo la formación Tambor, Paja y metamórficas como el Neis, los principales controles geológicos, en donde es fácil encontrar cauces rocosos y estables. En otros sectores el fondo de los cauces se localiza sobre materiales de tipo orgánico fácilmente erosionable (quebrada La Colmena y La López). A la red hidrográfica hay que adicionar la presencia de cuerpos lagunares (laguna el Alto, sobre los 3400 msnm). El uso del suelo está destinado en gran parte a la ganadería pasiva, sin embargo en la parte alta y en algunas zonas de la parte baja y media es posible encontrar diversos cultivos de subsistencia.

2.1 SUELOS

La descripción de los suelos se basa en las características del material parental, la acción climática y la morfología del terreno. El tipo de suelo define el proceso de infiltración y almacenamiento. La siguiente es la clasificación que fue reconocida en campo y permitió realizar el respectivo mapa de suelos de la cuenca.

Suelos Tipo 1: Se presentan en zonas con bajas temperaturas, altas pendientes, baja profundidad y baja fertilidad natural. En la cuenca se encuentran entre los 2750 y 3400 msnm, son suelos poco profundos, localizados en la parte alta de la cuenca. Se evidencian depósitos morrenicos y fluvio-glaciares. La textura es franco arenosa para los suelos provenientes de las areniscas de la Formación Tambor y franco arcilloso para suelos del Ortoneis.

Suelos Tipo 2: Suelos susceptibles a la erosión, bajas profundidades, altas pendientes y baja fertilidad natural. Se encuentran desde los 2900 hasta el cierre de la cuenca aproximadamente a los 2000 msnm. Textura franco arenosa, para los suelos provenientes de la formación Tambor, Tablazo y algunos niveles del Girón, textura franco arcillosa para suelos del Ortoneis y Paja y niveles arcillosos de las formaciones Tablazo, Tambor y Girón, y una mezcla de texturas entre arenosas y arcillosas dependiendo de la cantidad de feldespato potásico de la cuarzomonzonita de Santa Bárbara.

Suelos Tipo 3: Suelos susceptibles a la erosión, alta profundidad de desarrollo, altas pendientes. Se encuentran sobre los 2800 m y los 2000 msnm. A este tipo corresponde la mayoría de depósitos y zonas de encharcamiento. Según observaciones en campo las formaciones sedimentarias Tambor y Tablazo tienden a ser más impermeables en las zonas cercanas de contacto (predominan las estratificaciones arcillosas) y a tener más niveles arenosos lejos de estos.

Suelos Tipo 5: Caracterizados por suelos con alta pedregosidad tanto en superficie como en el perfil. Se localizan en la zona baja de la cuenca, se caracterizan por su pedregosidad tanto superficial como en profundidad y corresponde a una zona de depósitos aluviales.

2.2 COBERTURA VEGETAL

La vegetación de la zona está condicionada por las condiciones climáticas existentes y define procesos de infiltración y almacenamiento en la cuenca. El tipo de vegetación encontrado es rastrojo (10%), bosque plantado (12%), bosque secundario (8%), cultivos permanentes (3%), pajonales (7%), paramuno (12%) y pastos (48%).

2.3 INVENTARIO DE LA RED HÍDRICA.

El inventario y caracterización de la red hídrica de la CERS se realizó con el fin de entender los procesos

hidrogeológicos que ocurren en la cuenca y plantear el modelado hidrológico cuyos resultados se presentan en este trabajo. Inventario y aforos fueron realizados durante un trabajo de campo entre agosto y septiembre de 2004, lo cual coincide con la segunda época seca del año, por lo tanto los caudales aforados corresponden aproximadamente al flujo base.

Para llevar a cabo el inventario, fue necesario realizar un recorrido minucioso de la zona, éste se realizó por las corrientes tributarias principales, Chorrerón, Colmena, López, Figueros, Relumbrante, Casa Balcón, Barronegro, y finalmente el Chorro, El Vivito, conocido como Río Sucio a partir del sector de la llamada “casita”, y tomado en adelante para este trabajo como Río Sucio. En la **Figura 2** se puede observar las distintas corrientes que confluyen a Río Sucio y sus aportes principales ocurren en la parte alta con un valor cercano a los 4.20 lto/s, el mayor valor medido. El caudal base, el cual corresponde al aporte hecho por la escorrentía subterránea al caudal total, se cuantificó en la CERS, como de aproximadamente 10 l/s, es decir cerca del 40% del flujo base se manifiesta en la parte alta de la cuenca, **Figura 2**. Los afluentes principales se encuentran alineados con los sistemas de fallas geológicas, el flujo base parece estar fuertemente relacionado con el sistema estructural y geológico de la cuenca.

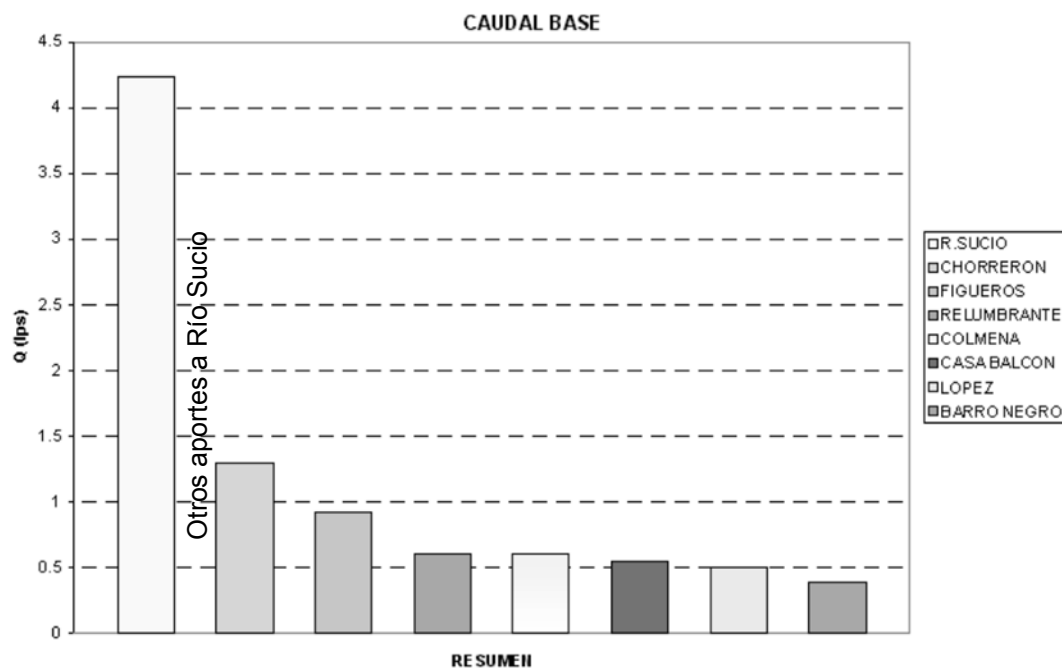


Figura 2. Medida del caudal base en la CERS

2.4 PROCESOS DE TRANSPORTE

Los procesos de transporte en la cuenca en sus componentes superficiales y subsuperficiales están ampliamente definidos por las características climáticas y geológicas de la región. La interacción clima-geología de la cuenca ha desarrollado procesos de meteorización asociados al alto fracturamiento presente y al conjunto de fallas que se evidencian en la región, los cuales influyen en el almacenamiento y fenómenos de flujo del agua. La cuenca presenta altas pendientes en la mayor parte de su área y los cauces están alineados por las principales fallas regionales.

La información obtenida en la CERS de caudales

aforados en manantiales, parámetros hidroquímicos, fotogeología y geología estructural, muestran evidencia de interconexión entre la parte alta de la cuenca (Sur-Este) con la mesa de Berlín. Los caudales aforados en la parte alta (Sur-Este) no pueden ser explicados únicamente como una función de la relación Precipitación-Almacenamiento-Escorrentía sino que debe existir movimiento de agua desde cuencas vecinas, en este caso el altiplano de Berlín.

En la **Figura 3** se observa un esquema general del modelo hidrológico conceptual de flujo en la cuenca [4], el cual es considerado insumo fundamental de los modelos hidrológicos que se aplican en este trabajo.

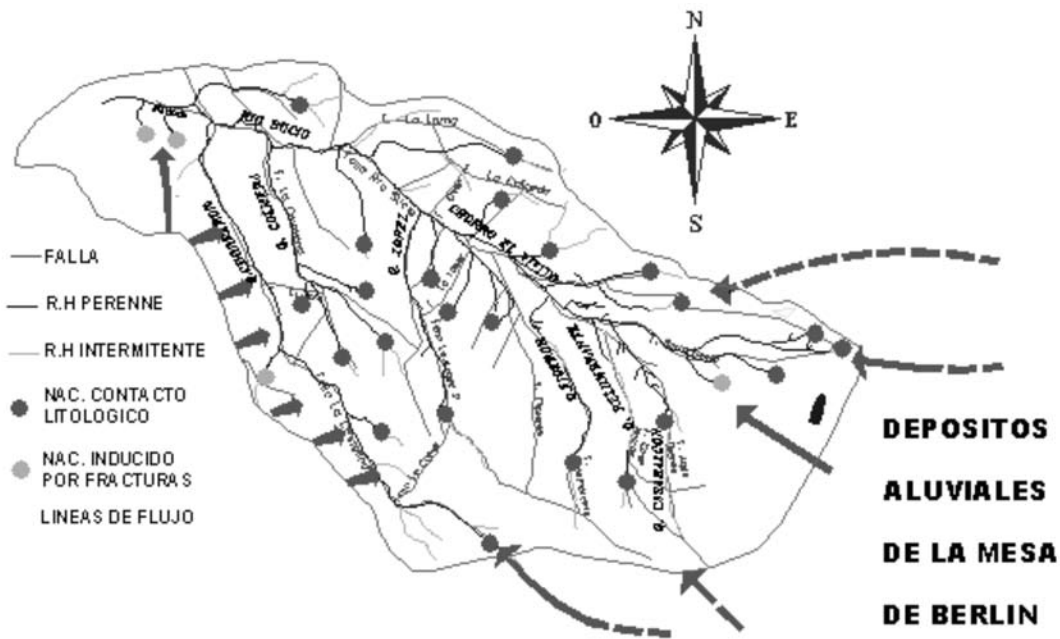


Figura 3. Modelo conceptual de flujo en la CERS

3. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL SEMIDISTRIBUIDO

El modelo conceptual semidistribuido utilizado en este caso fue el modelo NAM, el cual es una abreviación de “Nedbor Afstromnings Model” que significa modelo de precipitación escorrentía [5]. Este modelo fue desarrollado por la sección de hidrología del Instituto de Hidrodinámica e Ingeniería Hidráulica y la Universidad Técnica de Dinamarca. El módulo hidrológico del NAM modela los procesos de precipitación escorrentía en escala de la cuenca, mediante un conjunto de funciones matemáticas se describe en forma cuantitativa procesos del ciclo hidrológico. El modelo NAM en su forma original puede considerarse como determinístico,

agregado, conceptual, con una entrada moderada de datos. Simula los procesos de precipitación escorrentía considerando el contenido de agua en cuatro almacenamientos diferentes (de nieve, superficial, zona de raíces y subterráneo) interrelacionados entre si, los cuales representan las distintas componentes físicas de la cuenca.

3.1 ESTRUCTURA DEL MODELO.

El modelo NAM al ser considerado originalmente como un modelo agregado trata la cuenca como una unidad, es decir que los parámetros y las variables empleadas en su funcionamiento representan valores promedios para la totalidad de la cuenca. Se basa en ecuaciones físicas y ecuaciones semi-empíricas. Algunos parámetros del

modelo pueden ser inicialmente evaluados desde las condiciones físicas de la cuenca, pero ellos deben ser mejorados en la etapa de calibración. La estructura del modelo y la forma como el agua es repartida en los cuatro almacenamientos mencionados puede ser observada en [5]. Además de las variables temperatura (temp), precipitación (P) y evapotranspiración potencial (spot), el modelo utiliza otros parámetros que se describen a continuación en forma muy breve.

Almacenamiento de nieve S_s

La precipitación es retenida en el tanque de nieve solo si la temperatura, $Temp$, es inferior a cero, mientras que para temperaturas mayores a cero, su paso por el tanque se realiza directamente hacia el tanque superficial.

Almacenamiento superficial U

La humedad interceptada por la vegetación y el agua retenida en las depresiones y en la parte cultivada superior del suelo es representada por el tanque superficial, donde U_{max} es considerado el límite superior para la cantidad de agua en el almacenamiento superficial.

Almacenamiento inferior o zona de raíces L

La zona de raíces corresponde a la capa de suelo bajo la superficie, de la cual la vegetación puede extraer agua por transpiración. Esta zona es considerada como la zona de almacenamiento inferior; L_{max} corresponde al límite superior para la cantidad de agua en este tanque. La humedad en el tanque inferior, L , esta expuesta a pérdidas por transpiración y también controla la cantidad de agua que entra al almacenamiento subterráneo como recarga. Es un valor muy sensible en la optimización del modelo ya que controla varios de los procesos que se dan al interior de la estructura de NAM.

Contribución del almacenamiento de nieve al sistema P_s

Toma el valor mínimo entre S_s y $C_{melt} \times Temp$, si la $Temp < 0$, siendo C_{melt} , el coeficiente de nieve = 2 mm / día/K

Evapotranspiración potencial calculada E_p

Toma el valor mínimo entre la suma de $U + P_s + P$, y Evapotranspiración potencial.

Aporte de flujo subsuperficial QIF

La contribución del flujo subsuperficial, QIF es proporcional a U (almacenamiento superficial) y varía linealmente con la humedad contenida en la zona de almacenamiento inferior. Toma el valor mínimo entre, $U + P_s - E_p + P$, y el valor límite de la zona de raíces para el flujo subsuperficial, $CLIF$, de acuerdo al valor

que toma L/L_{max} . El parámetro $CLIF$ se encuentra en función de un coeficiente para el flujo subsuperficial, $CQIF$, el cual varía entre cero y uno.

Exceso de agua, P_n

Este exceso se presenta cuando se excede el almacenamiento superficial y toma el valor máximo entre cero y las siguientes expresiones,

$$\begin{aligned} \text{Si } Temp > 0 &\Rightarrow U + P + P_s - E_p - QIF - U_{max} \\ \text{Si } Temp < 0 &\Rightarrow U - E_p - QIF - U_{max} \end{aligned} \quad (1)$$

Flujo superficial QOF

Cuando el almacenamiento superficial es excedido, el exceso de agua, P_n aporta al flujo superficial como también a la infiltración. QOF representa la parte de P_n que contribuye al flujo superficial. Es asumida como proporcional a P_n y varía linealmente con el contenido de humedad en el suelo, L , en la zona de almacenamiento inferior. Toma el valor mínimo entre: P_n y $CLOF$, que es el valor límite para que se produzca flujo superficial y esta en función del parámetro L/L_{max} .

La parte de precipitación neta que no escurre como flujo superficial se infiltra hacia la zona de almacenamiento inferior que representa la zona de raíces. Una parte, DL , de la cantidad de infiltración, $(P_n - QOF)$ incrementa el contenido de humedad, L en la zona de almacenamiento inferior. La cantidad restante de la humedad infiltrada, G , percola en profundidad y recarga el almacenamiento subterráneo.

Evapotranspiración actual E_a

Las demandas de evapotranspiración son asumidas inicialmente por la tasa potencial del almacenamiento. Si el contenido de humedad U , en el almacenamiento superficial es inferior al requerido, se asume que la parte restante es drenada por la actividad de las raíces desde al tanque inferior y a una tasa actual E_a , donde E_a es proporcional a la evapotranspiración potencial, E_p . El algoritmo usa el valor mínimo entre:

$$E_a = E_p \frac{L}{L_{max}} \quad \text{y} \quad E_{pot} - E_p$$

Aporte al almacenamiento subterráneo G

El algoritmo utiliza la siguiente condición

$$\begin{aligned} \text{Si } L/L_{max} > CLG &\Rightarrow \frac{(P_n - QOF) \times (L/L_{max} - CLG)}{1 - CLG} \\ \text{Si } L/L_{max} < CLG &\Rightarrow 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Infiltración en la zona de raíces DL

La cantidad de infiltración que aporta humedad a la zona de raíces es calculada de la siguiente forma. El algoritmo toma el valor máximo entre: $P_n - QOF - G$ y 0

Salida resultante de la unión del flujo superficial y subsuperficial QR1

Para el cálculo de las salidas se utiliza una simplificación de tránsito por tanque lineal de la siguiente forma:

Flujo total QR2

Es la salida final del modelo, en donde se integran los distintos aportes hechos por los almacenamientos.

$$QR2_i = QR2_{i-1} \times \left(e^{-\frac{1}{CK2}} \right) + \left((QR1 \times BFUI + BFL1) \times \left(1 - e^{-\frac{1}{CK2}} \right) \right) \quad (3)$$

3.2 TRÁNSITO EN EL CAUCE

Una vez obtenida una solución para cada área homogénea en las que se divide la cuenca, el resultado es transitado hasta el cierre de la cuenca, el movimiento de los distintos aportes, es realizado con el tránsito por onda cinemática. Este tipo de tránsito hace uso de la solución de las ecuaciones de conservación de energía y cantidad de movimiento para flujo no permanente unidimensional. La solución numérica de la ecuación de onda cinemática se obtiene mediante un esquema explícito de diferencias finitas, se calcula el valor para

el Q en el tiempo $j + 1$ y en el espacio $i + 1$ hasta cubrir la longitud total del tramo, [3].

3.3 CALIBRACIÓN

Para la calibración del modelo se debe disponer de datos de caudal con la misma resolución de los datos de entrada. La calibración se realiza, cambiando los parámetros del modelo en distintas iteraciones, dejando como resultado final, los parámetros que se obtuvieron para la iteración con el valor más alto del coeficiente de ajuste. El coeficiente de ajuste utilizado comúnmente es el de Nash–Sutcliffe, el cual se utilizará en este trabajo.

3.4 APLICACIÓN DEL MODELO

Se establecieron zonas de comportamiento similar con el fin de obtener una respuesta hidrológica de cada una de las zonas. En la **Figura 4** se observa sobre el mapa geológico [9] la subdivisión en áreas de comportamiento similar, definidas a partir de la caracterización física de la cuenca (topografía, suelos, uso y vegetación), del inventario hídrico y del modelo físico conceptual. Posteriormente sobre cada una de las áreas se aplicó el modelo NAM. La respuesta agregada de cada zona se transitó a efecto de conocer la respuesta en el cierre de la cuenca.

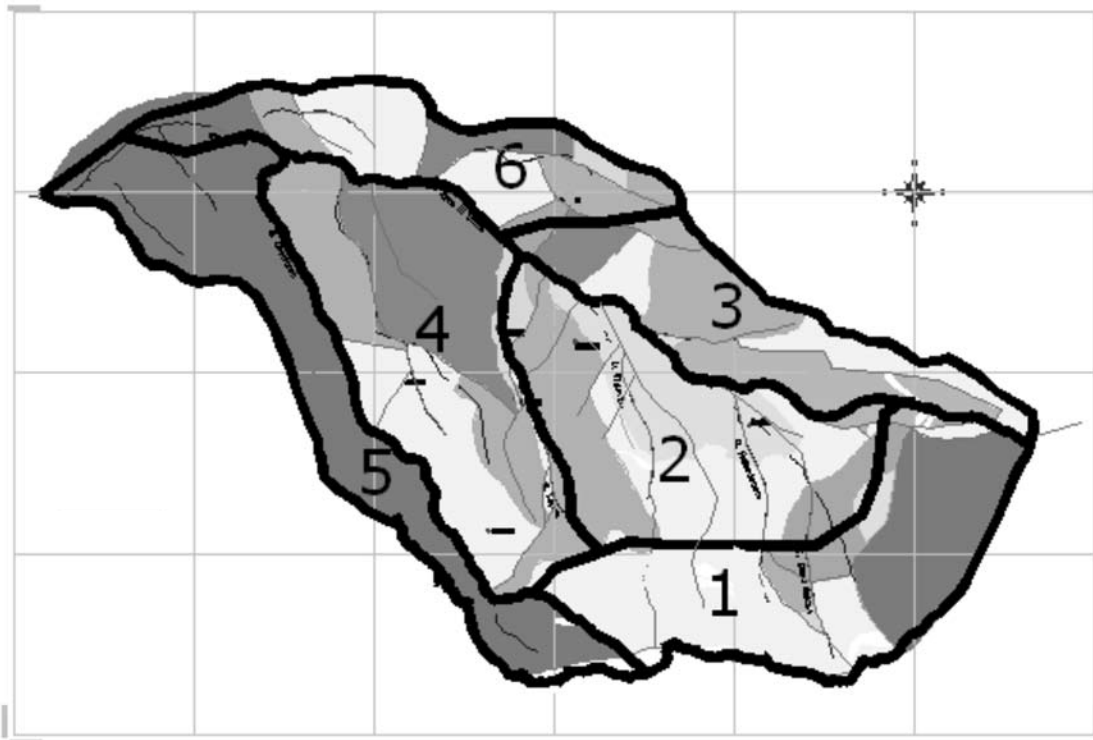


Figura 4. Áreas de comportamiento similar definidas para el modelado de la CERS

El Área 5 es la zona que presenta mayores pendientes (70%) y junto con la formación geológica (Ortoneis) y la vegetación escasa, le confieren unas propiedades de respuesta rápida durante los eventos de precipitación. En la parte alta de la cuenca se encuentran afloramientos de agua que forman la quebrada El Chorrerón, los cuales sugieren una conexión de tipo geológico estructural, entre la zona de depósitos de la mesa de Berlín y el Ortoneis. Se observan además depósitos muy localizados a lo largo del cauce, que funcionan como almacenadores y retardadores de los picos de caudal.

El Área 1 en comparación con la anterior presenta una pendiente menor (46%) y esta ubicada en la parte alta del lado oriental de la cuenca. Predominan en esta zona la vegetación de bosque natural y los rastrojos, además de la vegetación de páramo, que por sus características sirve como retenedor de humedad. Se identificaron afloramientos de agua en la formación Tambor (Areniscas) que en esta zona de la cuenca presentan alta porosidad primaria. Se puede inferir una conexión entre la formación Tambor y la zona de depósitos de Berlín, debido a presencia de fallas geológicas [4] y al nacimiento de las quebradas, Casa Balcón y Relumbrante.

En el Área 3 predomina la cuarzomonzonita de Santa Bárbara, esta roca de tipo cristalino por sus características naturales no posee una buena porosidad primaria, pero se observa diaclasamiento en la zona que puede otorgarle una buena porosidad secundaria. La formación Tambor presenta buena porosidad primaria, se considera que esta formación aporta el agua de los nacimientos que afloran en el contacto con la cuarzomonzonita, la conexión entre estas formaciones puede originarse a través de las diaclasas presentes. Sobre la otra formación Rosablanca, existen nacimientos asociados a porosidad secundaria y zonas de disolución, ambas favorecen la infiltración local. La vegetación de esta zona, es principalmente bosque.

El Área 2 corresponde a la zona de depósitos que se considera tiene las mejores propiedades para el almacenamiento; allí se presentan la mayor cantidad de nacimientos de agua. La vegetación de esta zona (pastos y cultivos) podría otorgarle una respuesta rápida en las zonas con mayor pendiente. Esta área funciona como

un regulador de la cuenca, debido a que allí convergen muchas de las corrientes de agua, algunas llegan a infiltrarse y pueden generar el flujo base que alimentan las quebradas en épocas secas.

En el Área 4 se presentan nacimientos de agua en la formación Tambor dando origen a las quebradas La Colmena y López en el contacto con la Formación Rosablanca, en la zona de afloramiento de la Q.López se puede observar que la precipitación por condensación permanente genera el agua de los nacimientos. También existen depósitos localizados originados por el aporte de material de la formación Tambor. La vegetación, principalmente pastos y cultivos, acompañados de altas pendientes generan respuestas rápidas en eventos de precipitación. El Área 6, presenta afloramientos de agua en la formación Tablazo, asociadas a la infiltración y disolución de las calizas. En la formación Tambor puede existir alta infiltración debido a la porosidad primaria, las areniscas que la componen son menos compactas. La vegetación es principalmente de pastos naturales y rastrojos.

La información de precipitación se obtuvo de las estaciones El Gramal, localizada en el borde norte de la cuenca, Martín Gil, La Plazuela, Berlín y Charta, localizadas alrededor de la cuenca. Se escogieron los eventos más representativos con los cuales se realizaron distribuciones espaciales y se determinó la influencia de cada una de las estaciones para estimar la precipitación en cada área, así como los valores de entrada al modelo. Los valores de evapotranspiración y temperatura fueron calculados en escala mensual a partir de distribuciones espaciales. Se asumieron valores iguales para todos los días correspondientes a un mes dado, los valores mensuales de evapotranspiración se estimaron con los datos de las estaciones Berlín, Charta, Vivero Surata, Tona, Picacho, La Galvicia. Las series de precipitación y evapotranspiración potencial asignadas a las áreas seleccionadas 3 a 6 se muestran en la **Figura 5**.

Se observa que la precipitación más alta corresponde al Área 5, la cual incluye la subcuenca de la quebrada Chorrerón, los valores de precipitación más bajos se encuentran en el Área 3, en la parte nororiental de la cuenca.

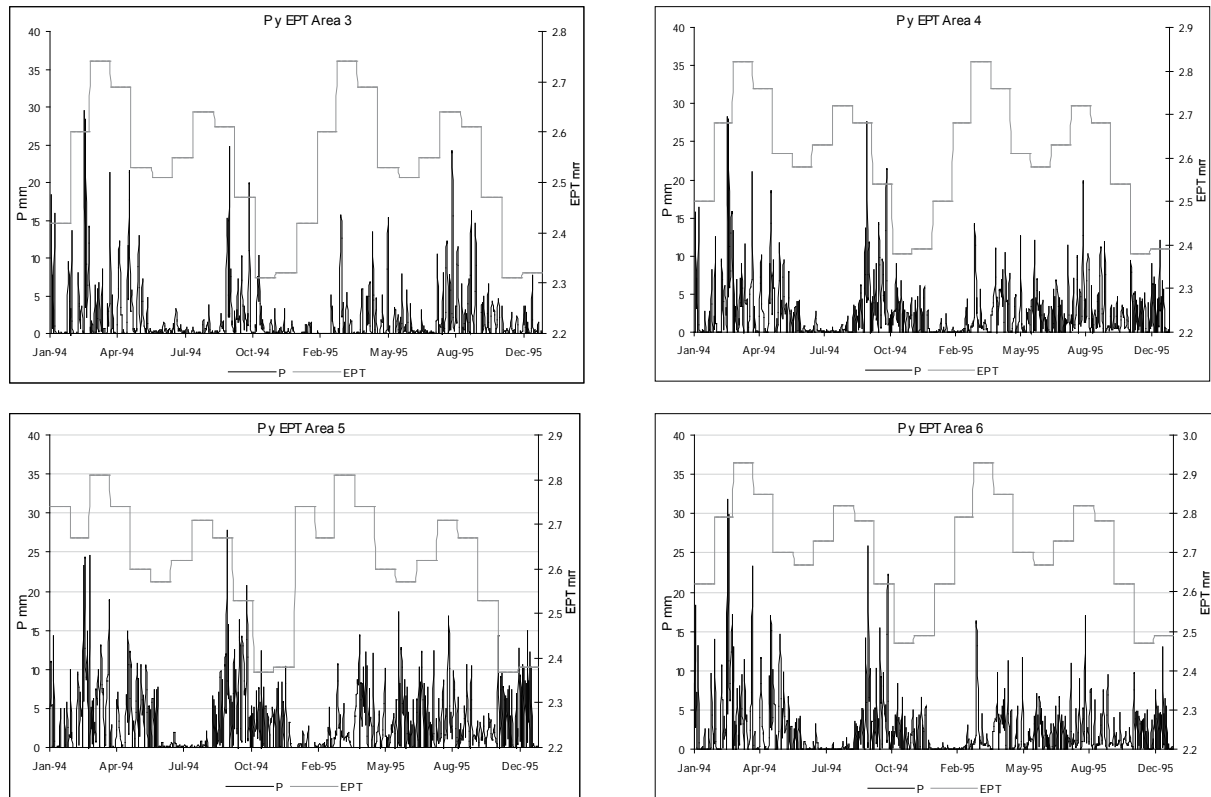


Figura 5. Series de precipitación y evapotranspiración por áreas

3.4.1 Resultados del modelado hidrológico por áreas.

En este numeral se comentan los principales resultados obtenidos a partir de la aplicación del Modelo NAM y las condiciones físicas de la CERS. En la **Tabla 1** se observan los valores de caudales superficiales aportados por cada una de las áreas en las que se dividió la cuenca. Los resultados obtenidos permiten ver el comportamiento de cada componente en las áreas homogéneas de la cuenca y la relación con sus características físicas.

El área 2 es considerada como el área que tiene mayor regulación del flujo base, así que los mayores valores de L_{max} (capacidad de almacenamiento inferior) y U_{max} (zona de almacenamiento superior) fueron asignados teniendo en cuenta que es la zona de

depósitos, lo que le confiere una mayor capacidad de infiltración, retención y regulación de agua. Se observó una respuesta muy suave en respuesta a eventos de precipitación, confirmando el comportamiento de la componente superficial que no es muy significativo y la buena capacidad del almacenamiento superficial y subsuperficial. La respuesta en periodos con menos precipitación se encontró que está más relacionada con el aporte de aguas subterráneas o flujo subsuperficial, manifestándose en una pendiente más suave en la curva de recesión. Esta área actúa como reguladora de los aportes hacia el cauce principal.

Tabla 1. Caudales en las distintas áreas homogéneas

Q, LPS	AREA					
	1	2	3	4	5	6
Promedio	6.87	5.62	4.06	12.38	18.56	5.17
Mínimo	0.143	0.623	0.0033	0.00002	0.115	0.017
Máximo	71.23	40.69	74.16	195.16	208.55	90.83

El área 5 presenta una respuesta de su componente superficial muy marcada, la cual se observa en los caudales más altos y respuestas rápidas a los eventos de precipitación. Se puede apreciar respuestas más rápidas y acentuadas, dejando ver una gran variabilidad en el trazo del hidrograma. En esta zona se consideró que existe una cierta regulación del aporte subterráneo debido a que en la parte alta de la cuenca, sector sur oriental, se planteó la existencia de una conexión entre el Neis y los depósitos de la mesa de Berlín, esto puede apreciarse en una pendiente de recesión más suave. En términos de aporte de agua, esta área ocupa el primer lugar con un valor promedio de 18.56 l/s e igualmente presenta el valor de caudal más alto con 208.55 l/s.

El área 4 es la que presenta los caudales mínimos más bajos; por observación en campo se pudo establecer que varias de las corrientes que la recorren son de tipo efímero, es decir están muy condicionadas a la ocurrencia de precipitaciones. Aun así, esta zona tiene un valor de caudal promedio alto 12.38 l/s y una precipitación promedio alta. Las áreas 4 y 5, son zonas contiguas. Por sus características geológicas y topográficas presenta una respuesta rápida en eventos de precipitación y un descenso acelerado en los caudales, cuando no hay lluvias, no existe una configuración que permita el almacenamiento y regulación de los caudales de estiaje o mínimos.

El área uno fue condicionada a tener una respuesta superficial moderada. El hidrograma muestra una pendiente suave en la recesión, representando el comportamiento analizado en esta zona, en la cual

también se espera una conexión con los depósitos que se encuentran por fuera de la cuenca. La vegetación de páramo de los depósitos anteriores, actúa como un regulador y amortiguador en los caudales. Según el modelo, es el área con el tercer caudal promedio más alto y el caudal mínimo más alto.

Sobre el área 3, la precipitación es la más baja de todas las áreas analizadas y es menor a los valores de evapotranspiración, la respuesta en el hidrograma es alta y rápida. En periodos secos el aporte de flujo base se condicionó teniendo en cuenta los distintos afloramientos ubicados en la zona. El caudal promedio aportado por esta zona, es el más bajo, pero sus caudales base son más altos, comparados por ejemplo con los del área 4, en donde las precipitaciones son mayores.

En el área 6 predomina el comportamiento superficial; pero de acuerdo con los parámetros usados en el modelo se le ajustó un aporte de tipo subterráneo ya que en esta zona también se identificaron afloramientos. La precipitación promedio para el período de análisis es inferior a la evapotranspiración.

Una primera comparación se realizó para observar la forma del hidrograma generado por el modelo, se utilizaron los caudales medidos en la Estación Carrizal, localizada aguas abajo en el Río Tona. Se trata de mostrar que para un impulso dado, en este caso la precipitación, se reflejan picos en los hidrogramas (Ver **Figura 6**) obtenidos en el modelo, así como también se observa coincidencia de los tramos descendentes.

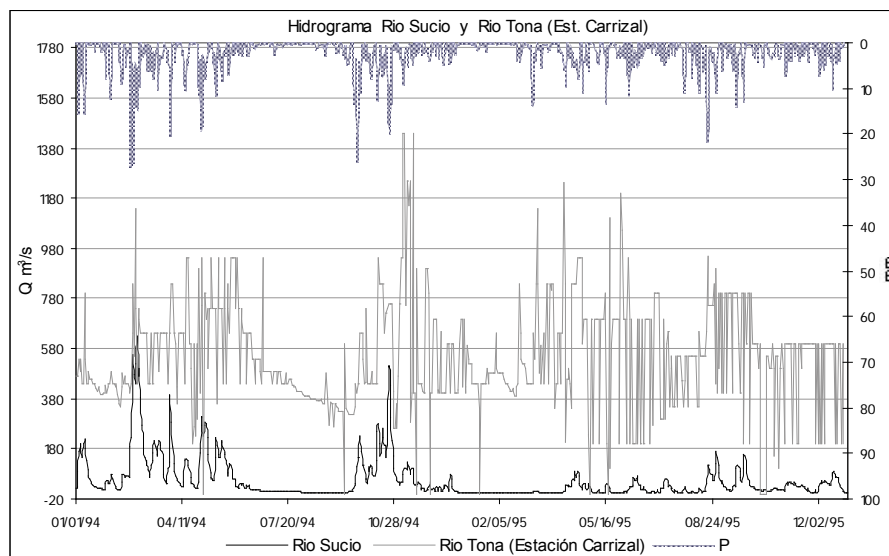


Figura 6. Respuesta agregada en el punto de cierre y caudales en la Est. Carrizal

3.4.2 Aplicación del modelo en forma agregada

La aplicación del modelo en forma agregada se realizó considerando la cuenca como una sola área. Los datos de precipitación son obtenidos de la estación El Gramal, la más cercana a la cuenca. Los datos de evapotranspiración son los promedios mensuales multianuales. El modelo se aplicó en el periodo de febrero a junio (1987) con resolución diaria, para este mismo período existen valores de caudales medidos en

el cierre de la cuenca (Buitrago, Cote, 1987), con lo cual se realizó la calibración del modelo.

Se aprecian los hidrogramas de los caudales simulados y medidos (Figura 7), se observa que el modelo representa en buena forma el comportamiento promedio de los caudales, sin embargo durante la ocurrencia del evento extremo se subestima algo el valor del caudal máximo.

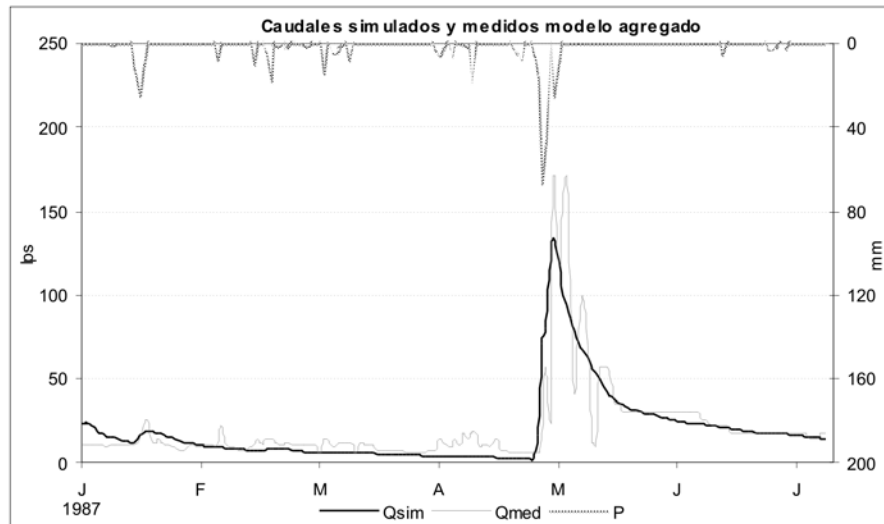


Figura 7. Respuesta del modelo agregado

4. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO

Los procesos hidrológicos de la cuenca y la interacción del agua en las distintas capas de suelo y subsuelo, se representaron por medio de un modelo precipitación-escorrentía distribuido. Este tipo de modelos utilizan la relación causal existente entre los eventos de lluvia y la producción de escorrentía, por medio de planteamientos matemáticos para obtener valores de caudal en un cauce. En este caso se usó el Modelo SHIA (Simulación Hidrológica Abierta) desarrollado por [10], el cual se apoya en la física de los procesos teniendo en cuenta las características morfológicas de la cuenca.

Los procesos determinantes de la producción y transferencia de escorrentía se expresan mediante la ecuación de continuidad y unas expresiones conceptuales o empíricas para cada uno de los tanques del modelo. Se divide la cuenca en celdas cuadradas donde cada una de las celdas representa una Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). Los procesos determinantes en la producción y transferencia de escorrentía en una columna de suelo (interceptación, detención, infiltración,

evapotranspiración, recarga del acuífero, escorrentía superficial y subsuperficial, retorno del flujo base y flujo en los cauces de la red de drenaje) se pueden representar por un sistema de cinco tanques de almacenamiento conectados entre sí y con los de otras celdas. El modelo utiliza un conducto distribuidor al cual entra el agua de precipitación y se conduce por el conducto distribuidor que va saliendo hacia los tanques a través de los nodos de derivación. Los nodos de derivación se ubican en la entrada de cada tanque y es allí donde se realiza el balance de agua, una parte de esta continúa por el conducto distribuidor y sigue descendiendo, la otra ingresa al tanque y quedará allí almacenada. Para cada intervalo de tiempo el modelo va actualizando los niveles de almacenamiento en cada tanque y estimando la contribución a la escorrentía. Dependiendo del nivel en el que se encuentre la celda, el aporte de escorrentía lo puede hacer a otra celda aguas abajo o directamente a la red de drenaje. De esta forma actualiza la información de cada celda hasta llegar al punto de salida de la cuenca para luego iniciar el siguiente intervalo. A continuación se describen los fenómenos físicos y parámetros involucrados en cada uno de los tanques, las ecuaciones aplicadas se pueden encontrar en [10].

4.1 ALMACENAMIENTO CAPILAR O CAPACIDAD DE CAMPO, INTERCEPTACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL Y EVAPOTRANSPIRACIÓN.

El tanque 1, T1 en la figura, representa el agua que se almacena en la capa superior del suelo por capacidad de campo y la que se almacena en la cobertura vegetal por efecto de interceptación, tiene influencia hasta la zona de raíces. De este elemento sólo es posible la salida del agua mediante la evapotranspiración.

La cantidad de agua $X1$, depende de la precipitación medida en las estaciones localizadas en la región, en el tiempo correspondiente al intervalo Δt para cada celda. La cantidad de agua DI que en un intervalo de tiempo dado, pasa del primer nodo de derivación al almacenamiento capilar o $T1$, depende de las condiciones de almacenamiento del tanque (nivel de almacenamiento $H1$ y capacidad máxima $Hu1$), las cuales representan los niveles de humedad del suelo y sus características. Esta no puede ser mayor que de la cantidad de agua disponible en el nodo de derivación. La capacidad máxima $Hu1$ representa la suma de dos factores que regulan la cantidad de agua que en un momento dado se puede infiltrar en el suelo, como es la capacidad de almacenamiento capilar del suelo o contenido de humedad que este puede almacenar para pasar desde su punto de marchites a la capacidad de campo. El segundo factor se refiere a la capacidad que tiene la cobertura vegetal para almacenar agua, por interceptación y por succión radicular.

La cantidad de agua que se deriva DI y entra al almacenamiento estático, corresponde al mínimo entre el agua existente en el conducto distribuidor, el que se requiere para llenar el tanque de almacenamiento capilar, y el máximo que puede ingresar al suelo durante un intervalo de tiempo. La cantidad de agua $Y1$ representa la evapotranspiración real (ETR) y se toma en función del agua disponible en el tanque $H1$, de la capacidad máxima de almacenamiento $Hu1$ y de la evapotranspiración potencial (ETP). Así, cuando hay déficit de agua en el suelo la evapotranspiración real (ETR) es menor que la evapotranspiración potencial (ETP). En el modelo se tiene en cuenta que el valor de la evapotranspiración real no puede ser mayor que el agua disponible para evaporación en este almacenamiento. El agua que no ingresa al almacenamiento $T1$, sigue su camino por la zona capilar del suelo hacia abajo.

4.2 ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL, ZONA DE ENCHARCAMIENTO Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.

El Tanque 2 representa el agua que no se infiltra y se aloja en la superficie mientras fluye sobre la ladera como escorrentía superficial a través de los surcos de la superficie hasta su ingreso a un cauce en la red de drenaje con el punto de control como destino final. De aquí se deriva la componente de la escorrentía superficial directa. La capacidad para dejar pasar agua gravitacional se puede asociar a la conductividad hidráulica en la capa superior del suelo en condiciones de saturación. En este caso nos referimos a una conductividad en la que se tiene en cuenta tanto la macroporosidad como la microporosidad. Se supone que la capa superior del suelo en la escala de la celda tiene una conductividad hidráulica Ks (mm/día) representativa y que se asocia al tipo de suelo y a su estructura, está relacionado con la posición de la celda en la ladera, la cobertura vegetal y el uso y manejo del suelo. La cantidad de agua que entra al almacenamiento $T2$, está relacionada con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior Ks , en el intervalo de tiempo y con el flujo excedente del almacenamiento capilar $X2$, según una función de minimización.

Para el flujo superficial en la cuenca, suponiendo velocidad constante y aplicando la ecuación de continuidad, la escorrentía directa se puede representar mediante un embalse lineal, en donde el coeficiente de descarga α es función del tiempo de residencia del agua en el interior del suelo.

$$Y2t = \alpha * H2t \quad \alpha = \frac{1}{\text{tiempo de residencia}} \quad (4)$$

4.3 ALMACENAMIENTO SUBSUPERFICIAL Y ESCORRENTÍA SUBSUPERFICIAL. (TANQUE 3).

El tanque 3 representa el agua gravitacional infiltrada que se almacena en la zona saturada de la capa superior del suelo mientras fluye como flujo subsuperficial. Se considera que el almacenamiento gravitacional en el suelo se puede dividir en dos partes: una capa superior donde por lo general se tiene una mayor permeabilidad y una capa inferior donde se tienen permeabilidades más bajas y la respuesta es más lenta. En la capa superior representada por este tanque, se observa la respuesta rápida y se produce la escorrentía subsuperficial.

Durante el intervalo de tiempo Δt , se tiene una cantidad de agua gravitacional X_3 que se mueve verticalmente hacia el interior del suelo. De esta cantidad, una parte X_4 podrá percolar hacia la zona inferior del suelo, mientras que el resto del agua se deriva hacia el almacenamiento superior del suelo donde se convertirá en flujo subsuperficial. Tanto la capa inferior y superior del suelo tienen una capacidad de percolación kp (mm/día) que se asocia con el tipo de subsuelo y su estructura, los cuales están estrechamente relacionados con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. Al igual que lo supuesto para la capa superior, esta capacidad de percolación incluye tanto la porosidad primaria como la secundaria. Para estimar la producción de escorrentía subsuperficial en la ladera, se hace una formulación análoga a la presentada en el almacenamiento T2.

4.4 ALMACENAMIENTO Y ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA.

El tanque 4 representa el agua gravitacional almacenada en la parte inferior del suelo que produce el flujo base. Éste almacenamiento representa el agua gravitacional mientras fluye por la capa inferior del suelo ó por el acuífero, hasta alcanzar la red de drenaje y convertirse en flujo base. La cantidad de agua que se deriva del conducto distribuidor para el flujo subterráneo depende de la cantidad de agua que ha percolado y de la cantidad que pasa a ser pérdidas, $D_4t = X_4t - X_5t$. Se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada, igual que en el tanque anterior. El flujo subterráneo debe reproducir adecuadamente las recesiones del flujo en los cauces y ser coherente con el volumen de agua que ha ingresado al almacenamiento subterráneo. El caudal en la celda para cada intervalo de tiempo (Q_{ct}) es la suma del flujo producido en cada tanque $Q_{ct} = (Y_2t + Y_3t + Y_4t)$.

El caudal total a la salida de la cuenca para cada intervalo de tiempo (Q_{Tt}) es la suma del caudal producido en cada una de las celdas (n), en cada intervalo de tiempo. En la mayoría de las cuencas, las pérdidas por percolación profunda (X_5) son una parte muy pequeña del agua que circula a través de la cuenca y, por lo tanto, se pueden asumir como nulas. Algunas veces, se tienen condiciones geológicas y/o antrópicas en la cuenca, en las que la magnitud de estos volúmenes de flujo es importante y, por lo tanto esos casos se deben tener en cuenta en la modelación, mediante el tanque 5.

4.5 APLICACIÓN DEL MODELO (SHIA) EN LA CERS

El modelo SHIA es alimentado con parámetros físicos obtenidos durante la caracterización de la cuenca y con datos hidrológicos disponibles. Se utilizan datos de evapotranspiración y precipitación tomados en las estaciones climatológicas cercanas a la CERS. A partir de la información geológica, estudio de suelos, tipo de vegetación, se estimaron coeficientes relacionados con el almacenamiento capilar y la conductividad hidráulica en la capa superior e inferior del suelo. En este caso cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU) esta representada por una celda o píxel, de dimensiones treinta metros de lado, donde se idealizan los diferentes procesos hidrológicos por medio del sistema de tanques del modelo SHIA, lo cual obliga a trabajar cada una de las variables con modelos digitales. A continuación se describe brevemente como se procesó la información con que se alimentó al modelo.

4.5.1 Modelo digital de elevación de la CERS

El modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca fue realizado por (Buenahora, Osorio, 2004), el cual permitió trabajar en una escala 1: 10000, y tamaño de celda de 30 x 30 metros. Con esta información se generó la topología de la cuenca, direcciones de flujo, número de celdas tributarias para cada una de las celdas que se van recorriendo en cada una de las direcciones hasta llegar al punto de salida de la cuenca. El punto de control localizado en el cierre de la microcuenca, se localiza en el sitio llamado La Batea, sobre la quebrada Río Sucio, poco antes de su desembocadura en el Río Tona.

4.5.2 Parámetros de calibración.

Se procede a hacer un análisis detallado de cada una de las capas de suelo que se tendrán en cuenta para el modelado y de las proporciones de las propiedades hidráulicas que las componen. Las características como la conductividad hidráulica en cada una de las capas de suelo se toman como parámetros de calibración del modelo y estos se relacionan con las condiciones reales de la zona de estudio, como son el uso del suelo, la geomorfología, la geología y tipo de Suelo.

4.5.3 Modelos digitales de los diferentes parámetros hidráulicos

Un modelo distribuido como es el caso del SHIA, necesita información en cada uno de los puntos de su dominio espacial, las variables a determinar y

representar en un MDT son el almacenamiento capilar y de cobertura superficial del suelo, la conductividad hidráulica saturada de la capa superior del suelo (k_s) y La Conductividad Hidráulica de la capa inferior del suelo (K_p).

Se realizaron mapas en formato digital con las tres conductividades hidráulicas anteriores a partir de la información geológica, suelos, cobertura vegetal y controles estructurales. Estos mapas fueron procesados utilizando calculadora de mapas a fin de generar zonas cuyo almacenamiento capilar y conductividad saturada fueran similares.

4.5.4 Almacenamiento capilar y cobertura superficial del Suelo, K_h

Se identificaron la textura, la cobertura vegetal y la geología como los parámetros que influyen en el almacenamiento capilar. A cada uno de los parámetros anteriores se les dio un peso en función de la capacidad de almacenamiento según las texturas del suelo, los valores varían entre 1 y 7, los valores bajos indican coberturas con poca capacidad para interceptar la lluvia, texturas con baja capacidad para el almacenamiento capilar, así como litologías con baja porosidad y baja permeabilidad primaria.

El MDT de esta variable se calculó asignando diferentes pesos de tipo cualitativo a las variables descritas anteriormente, la variable K_h se expresó de la siguiente forma:

$$K_h = \frac{4*Mapa_Suelos + 3*Mapa_CoberturaV + 1*Mapa_Geologia}{8} \quad (5)$$

4.5.5 Conductividad hidráulica en la capa superior de suelo. K_{hs} .

La conductividad hidráulica es una propiedad intrínseca del suelo, que define la cantidad de agua que puede pasar de la parte superior de suelo hacia la zona inferior y por consiguiente la cantidad de escorrentía superficial producida, teniendo en cuenta la disponibilidad de agua. Esta propiedad está directamente relacionada con el tipo de suelo encontrado en la zona no saturada.

Para la elaboración del modelo digital de terreno de esta variable, se tuvieron en cuenta los mapas de, suelos, cobertura vegetal y geología. La asignación de pesos se realizó en función de la facilidad de transporte dada por la conductividad hidráulica y la facilidad para infiltración según la cobertura vegetal. Los pesos de las características de porosidad primaria y secundaria

se asignaron en función de las condiciones geológicas de la zona con valores entre 1 y 7. A las coberturas vegetales, tipo cultivos permanentes, se les asignó el mayor peso. Estas coberturas en la zona se caracterizan por estar permanentemente irrigadas, además la capa superficial de los suelos, que generalmente se encuentra compactada se ha removido, lo cual facilita la infiltración. La variable K_{hs} se expresó de la siguiente forma:

$$K_{hs} = \frac{4*Mapa_Suelos + 1*Mapa_CoberturaV + 1*Mapa_Geologia}{6} \quad (6)$$

En la CERS se diferenciaron 8 zonas homogéneas de esta variable.

4.5.6 Conductividad hidráulica en la capa inferior de suelo K_p .

La conductividad hidráulica en la parte inferior del suelo determina el paso del agua de la zona no saturada a la zona saturada. Este fenómeno es también conocido como percolación, el agua después de percolar se convierte en flujo subterráneo y puede llegar a convertirse en aporte al flujo base. Este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con la geología de la zona y con la cantidad de humedad en la capa inmediatamente superior.

Para la construcción del modelo digital de esta variable, se utilizaron los mapas de geología, así como el mapa de K_{hs} creado anteriormente. El mapa de esta variable se obtuvo asignando diferentes pesos de tipo cualitativo a las variables descritas anteriormente. La variable K_{hs} se expresó de la siguiente forma:

$$K_p = \frac{4*Mapa_Geologia + 1*K_{hs}}{5} \quad (7)$$

En la CERS se diferenciaron 7 zonas homogéneas de esta variable, en las cuales se observa claramente la influencia de la geología estructural.

4.5.7 Información hidrológica y climatológica

La información hidrológica usada en la simulación, proviene de las estaciones cercanas a la CERS que tienen una resolución temporal diaria. Dentro de la información que alimenta el modelo SHIA, la precipitación es uno de los elementos más importantes. La escorrentía superficial se produce en respuesta a la precipitación, esto implica hacer una buena selección de los datos en el tiempo de dicho fenómeno. Para la selección de los

datos, se debe verificar esencialmente que estos estén completos y que los eventos de lluvias correspondan en un tiempo Δt a una fluctuación en el hidrograma de caudales. Teniendo en cuenta lo anterior, la estación usada para la precipitación fue El Gramal, localizada sobre los 2400 msnm. La evapotranspiración utilizada en el modelo corresponde a la ETP, el valor introducido fue de 2.22 mm, valor que corresponde al valor diario multianual estimado por la metodología de Penman.

4.5.8 Simulación y resultados del modelo SHIA

Ante la ausencia de una serie continua y validada de caudales observados en la salida de la CERS, que

permitan comparar los resultados de la simulación, se decidió utilizar una serie de aforos puntuales, de caudales diarios de Río Sucio [2]. Esta serie comprende mediciones de 183 días, desde el día 30 de enero hasta el 31 de agosto de 1987. La **Figura 8** muestra los hidrogramas calculados y observados, así como las diferentes componentes del flujo obtenidas durante el modelado. Una de las ventajas de este modelo, es que permite diferenciar el aporte de cada tanque a la escorrentía total, tanto temporal como espacialmente. Se observa que en este caso, el caudal base controla la escorrentía total, con valores promedios de 10.7 lps para el periodo simulado. El coeficiente de Nash para esta simulación fue de 0.792.

SIMULACION EVENTO 1987

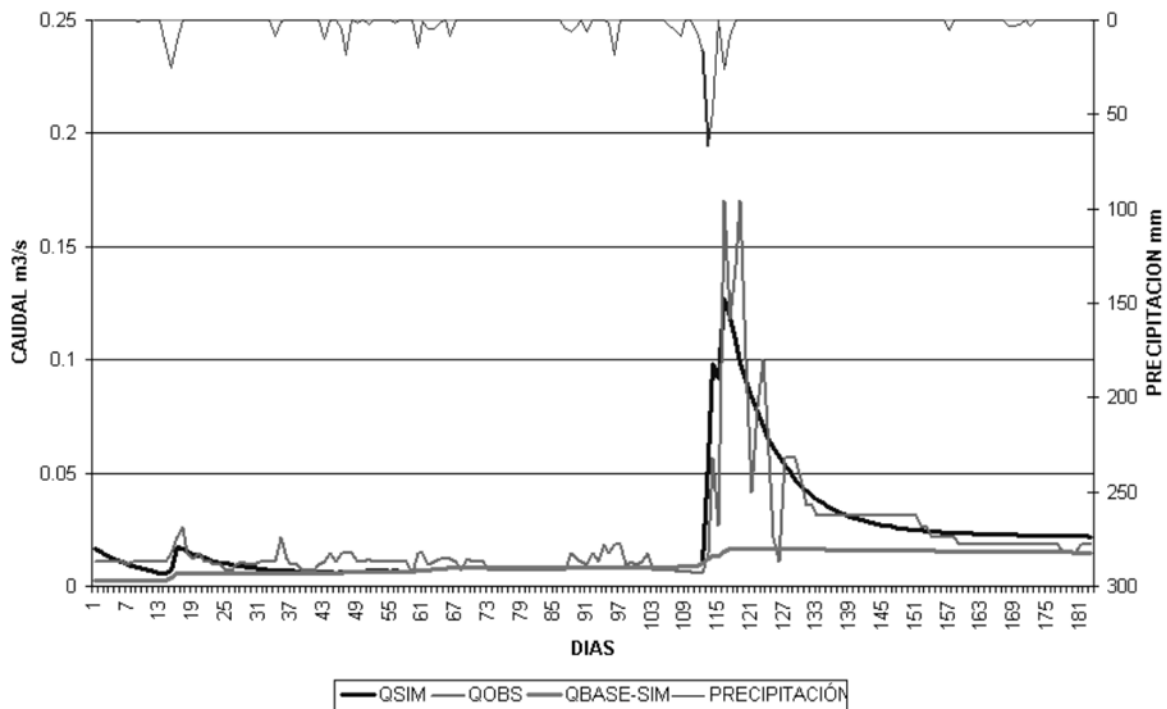


Figura 8. Primeros resultados de la calibración del modelo SHIA

Con los parámetros de la calibración anterior, se simuló la respuesta de la CERS ante los impulsos de lluvias del año 1994 y se comparó la respuesta de su caudal con los caudales medios diarios aforados en la estación Carrizal, operada por la Empresa de Acueducto de Bucaramanga, aguas abajo del casco urbano del municipio de Tona.

El hidrograma de caudales de la CERS calculado mediante este modelo (ver **Figura 9**) representa muy bien las tendencias de las recesiones y los picos observados en el hidrograma de la estación Carrizal. De igual forma los caudales mínimos en las épocas de estiaje están controlados principalmente por el caudal base, que en promedio es de 14 lps para el periodo simulado.

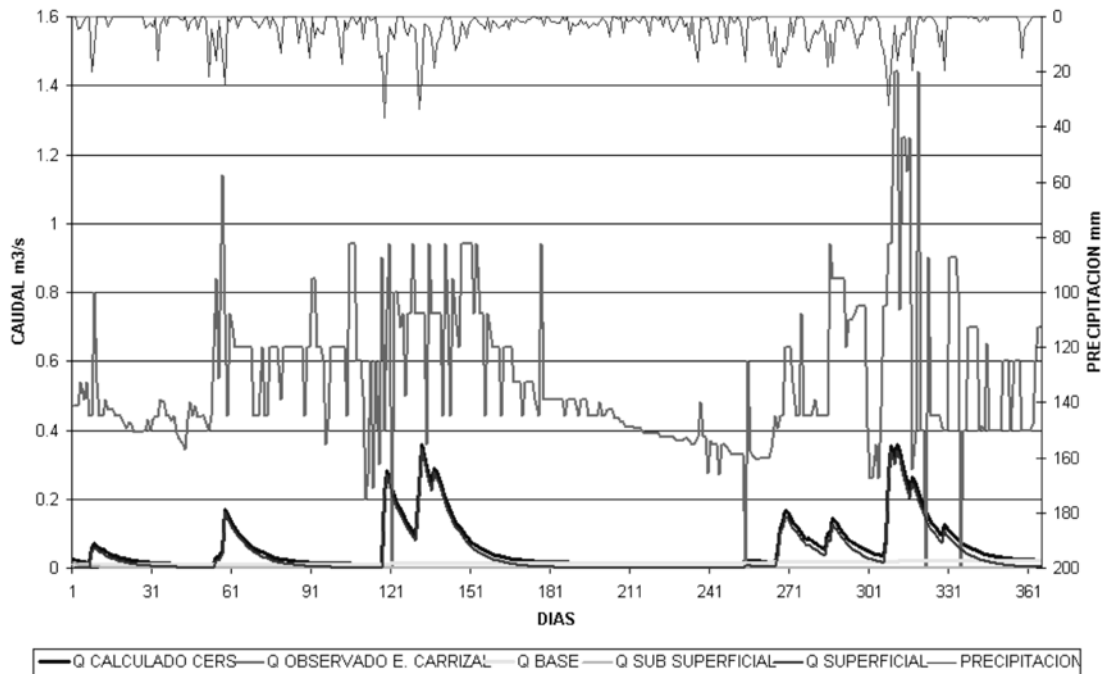


Figura 9. Hidrograma simulado en Río Sucio con el Modelo Shia, año 1994

5. CONCLUSIONES

A partir de la caracterización física realizada en la Cuenca de Río Sucio, mediante levantamiento de campo, cartografía geológica, observaciones, mediciones y aplicación de diferentes herramientas se pudo concluir, que la cuenca subterránea no coincide con la cuenca superficial. La cuenca subterránea se evidencia de mayor área, las fallas geológicas y el alto diaclasamiento están generando los procesos de interconexión entre el Altiplano de Berlín y la CERS, son comunes los afloramientos de agua muy cerca de la divisoria. El alto fracturamiento de las formaciones geológicas existentes y el complejo sistema de fallas pueden facilitar la interconexión con otras zonas o acuíferos más profundos, sin embargo aun no existen evidencia de estos procesos.

Se aplicaron dos tipos de modelos hidrológicos, un modelo agregado y un modelo distribuido. La aplicación del modelo hidrológico semidistribuido NAM, permitió obtener resultados de caudales en cada una de las áreas de comportamiento similar en las que se dividió la cuenca. El área 2 es la que presenta mayor regulación del flujo base, por lo tanto se constituye en una zona de reserva de agua subterránea. El área 5 muestra una respuesta rápida de su componente superficial a los eventos de precipitación, generando valores altos de caudal. La

comparación del hidrograma obtenido con ese modelo y el hidrograma medido en la estación Carrizal, (1994-1995) aguas abajo de la cuenca, permite observar un buen ajuste entre eventos de lluvia y picos en el hidrograma, igual en la recesión de ellos. La aplicación del modelo en forma agregada muestra un buen comportamiento en los caudales promedios, aunque subestima un poco el caudal máximo.

La aplicación del modelo hidrológico distribuido SHIA, utiliza variables de la capa superior e inferior del suelo en forma distribuida, cuyos mapas se obtuvieron a partir del reconocimiento en campo de dichas variables y se construyeron modelos digitales de terreno de celda 30x30m, para cada una de las variables. Se obtuvo la respuesta en el punto de salida de la cuenca del Río Sucio realizando la calibración con datos puntuales de 183 días de mediciones. La simulación realizada con impulsos de precipitación de 1994 permite comparar la respuesta obtenida con datos de la estación Carrizal, encontrándose que el modelo representa bien las tendencias de las recesiones y picos observados. Igualmente se encontró que en épocas de verano los caudales mínimos están controlados por el caudal base que en promedio es de 14 lps durante el periodo simulado.

Las respuestas de ambos modelos son muy similares y ellos bien pueden ser utilizados para simular otros escenarios hidrológicos en la CERS en las escalas

temporales utilizadas. Sin embargo la mayor limitación para el modelado hidrológico es la carencia de mediciones continuas de lluvias y de caudales en la Cuenca del Río Tona (existen mediciones diarias), por lo tanto no es relevante mayor discretización del tiempo. Es fundamental continuar con el proceso de instrumentación de la cuenca, utilizando la estructura para medición de caudales construida cerca del punto de cierre. Además instalar por lo menos una estación climatológica de medición continua.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo recibido del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, Colciencias y Universidad Industrial de Santander.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Buenahora, C, Osorio, H. 2004. Desarrollo del modelo digital de elevaciones de la cuenca de Río Sucio, Municipio de Tona. Proy de Grado. Universidad Industrial de Santander.

[2] Buitrago, C. Cote, G., 1987; Control de Sedimentos en la cuenca alta del Río Tona. Proyecto de Grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

[3] Chow, V.T., Maidment, Mays, L. W., 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hil, 584p.

[4] Colegial, J.D, Gómez, S, Rojas, N. 2006. Cartografía Geológica y caracterización estructural de la subcuenca de la Quebrada Río Sucio, Municipio de Tona, Santander, orientados a definir un modelo hidrogeológico conceptual. Boletín de Geología. Vol.28 No.2. p 49-61.

[5] Danish Hydraulic Institute (DHI) 2000. Mike-She Water Movement: A User Manual, DHI Water and Environment.

[6] Gómez, S. Anaya, A. 2004. Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. Avances en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. No.11. P37-50.

[7] Julivert, M, 1963; Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. Boletín de Geología UIS. N° 13 – 14. p1 –104. Bucaramanga.

[8] Ramírez R. J., 1981; Estudio de Desarrollo Integral de la Cuenca Superior del Río Lebrija. Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB.

[9] Rojas, N, Ulloa A. 2005. Cartografía Geológica y Caracterización Estructural de la subcuenca de la Quebrada Río Sucio, Municipio de Tona, Santander. Proyecto de Grado. Universidad Industrial de Santander

[10] Vélez, J.I. 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. Ph.D. Dissertation. Universidad Politécnica de Valencia. 266p.

