

Modelización hidrológica distribuida en cuencas rurales basada en esquemas de onda cinemática

Carlos Andrés Caro Camargo

Ingeniero civil. Decano Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Tunja. carlosandrescaro@gmail.com deccivil@ustatunja.edu.co

Milton Ballesteros

Ingeniero civil. terias1@gmail.com

Recibido: 14 de noviembre de 2013 Aprobado: 10 de diciembre de 2013

Artículo de investigación, como producto final de los autores elaborado en el grupo de ACBI.

Resumen

Se evalúa un análisis comparativo entre dos tipos de simulaciones hidrológicas, una clásica a través de metodología agregada, y otra basada en esquemas bidimensionales de onda cinemática, con el fin de determinar las bondades de cada caso en diferentes escenarios hidrológicos. Se determina que los esquemas bidimensionales son ideales en zonas de aportación con necesidad de alta resolución en espacios de red de drenaje.

Palabras Claves: Modelación Hidrológica, Espumas de onda cinemática, Hidrología superficial.

Abstract

A comparative analysis of two types of hydrological simulations, a classic through aggregate methodology, and other schemes based on two-dimensional kinematic wave, in order to determine the merits of each case in different hydrological scenarios were evaluated. It is determined that the two-dimensional schemes are ideal contribution in areas of drainage network in need of high resolution.

Key words: Hydrologic Modeling, Foams, kinematic wave, surface hydrology

I. INTRODUCCIÓN

El constante cambio climático por el cual está pasando el planeta en los últimos tiempos y el continuo incremento de la población a nivel mundial el cual incrementa la demanda de agua, hacen que las condiciones físicas del medio ambiente hayan variado notablemente, el agua es vital para la existencia del hombre, para suplir necesidades básicas; en la ingeniería civil todas las obras están diseñadas para aspectos que van desde suministro de agua potable hasta el diseño de grandes obras de ingeniería como presas o embalses. Es necesario en la hidrología actual contar con métodos para la modelación de cuencas que se aproximen a la realidad hidro-ambiental de una zona de aportación sin incurrir en un alto costo computacional (Goodrich, D C, et al, 1994).

El proyecto busca mediante la modelación de la cuenca Alta del Río Chicamocha y de la Sub-cuenca Quebrada Surba, por medio del modelo semidistribuido Hec-Hms; el cual usa la ecuación de onda cinemática como base en el proceso de transformación lluvia-escorrentía; establecer las ventajas que presenta, y comparar los resultados modelando la misma cuenca mediante el modelo agregado continuo abcd de Thomas. Se caracterizará la cuenca y sub-cuenca de estudio y se procederá a modelar en Hec-Hms y con el modelo de Thomas, los resultados obtenidos se analizarán con el fin de establecer y aportar conclusiones claras para el adecuado uso de estos diferentes modelos en proyectos ingenieriles, tratando de generar un campo donde sean claras las bondades y el uso específico de modelos agregados y distribuidos, teniendo en cuenta este caso estudio.

II. MATERIALES Y MÉTODO

A. Ecuación Onda Cinemática.

Para un esquema de onda cinemática, los términos de aceleración y de presión en la ecuación de Momentum son despreciables, luego el movimiento de la onda se describe principalmente por la ecuación de continuidad. El nombre cinemática, es entonces aplicable, ya que cinemática se refiere al movimiento sin tener en cuenta la influencia de la masa y la fuerza. (Chaudhry, M.H, 2008).

El modelo de onda cinemática se define por medio de las siguientes ecuaciones:

- **Continuidad**

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

- **Momentum**

$$S_o = S_f$$

C_k es la celeridad de onda cinemática.

$$C_k = \frac{dQ}{dA} = \frac{dx}{dt}$$

B. Hec-Hms.

El modelo Hec-Hms ("Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System") fue diseñado para simular procesos de lluvia-escurrimiento en sistemas dendríticos de cuencas. Se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.

Hec-Hms se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. (Gómez, M, et al, 2006). Incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Puede hacer

corridos de precipitación o de la proporción de flujo, tiene la capacidad de salvar toda la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo, y la habilidad de comenzar una nueva corrida de simulación, basada en la información de estado previamente guardada.

Se generan tablas sumarias globales y de elemento, que incluyen la información sobre el flujo máximo y el volumen total. También están disponibles, una tabla de serie de tiempo, el gráfico por elementos, los resultados de múltiples elementos y corridas de simulación. Finalmente, el programa Hec-Hms tiene la capacidad de imprimir todos los gráficos y tablas.

El modelo contiene: descripción física de la cuenca, descripción meteorológica, simulación hidrológica, estimación de parámetros, análisis de simulaciones y conexión con SIG.

El lapso de tiempo de una simulación es controlado por las especificaciones de control que incluyen: la fecha y hora de inicio, de terminación y un intervalo de tiempo.

Las fases de trabajo del programa son:

Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escurrimiento directo.

Cálculo del escurrimiento directo producido por esa lluvia neta.

Suma del escurrimiento directo y el base, si existía previamente. Cálculo de la evolución del escurrimiento base a lo largo del tiempo. Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce.

El Hec-Hms permite establecer varias sub-cuencas, en las cuales realiza los cálculos de las 3 primeras fases mencionadas. Luego, suma todos los caudales generados y transiados a lo largo del recorrido, y proporciona el hidrograma de salida de la cuenca.

C. Modelo a,b,c,d Thomas.

El modelo de Thomas fue desarrollado como su nombre lo indica por Thomas en 1981, el cual se le conoce también como modelo abcd. Este modelo de balance hídrico de carácter agregado establece mediante la determinación de cuatro parámetros el caudal afluente en una cuenca.

Para la explicación del modelo de Thomas se debe tener claro que el suelo está dividido en tres zonas. Una primera parte que es donde se presenta todo lo relacionado al almacenamiento superficial y es representado como Sc. Para la segunda zona que es la no saturada Sw, se puede asimilar la recarga que experimenta el acuífero R& a la infiltración I debido a que el caudal sub-superficial Qs es despreciado por el modelo por ser en comparación con la precipitación muy pequeño. La última zona que es la zona saturada presenta un almacenamiento (Caro C.A, et al, 2003).

Para el desarrollo del modelo de Thomas, inicialmente es aplicada la ecuación de continuidad a un volumen de control el cual cuenta con un almacenamiento Sw + Sc. Cuando se aplica la ecuación de continuidad se obtiene que,

$$P_i - ET_i - I_i - R_{oi} = \Delta S_w = S_{wi} - S_{wi-1} \quad (1.21)$$

O,

$$P_i - ET_i - R_{gi} - R_{oi} = \Delta S_w / \Delta t = w_i - S_{wi-1} \quad (1.22)$$

Donde,

- P_i = Lluvia al final del período i-ésimo.
- ET_i = Infiltración al final del período i-ésimo
- R_{oi} = Escorrentía directa al final del período i-ésimo
- R_{gi} = Recarga del acuífero al final del período i-ésimo
- ΔS_w = Variación del almacenamiento del suelo
- S_{wi} = Humedad del suelo al final del período i-ésimo
- S_{wi-1} = Humedad del suelo al final del período i-ésimo

$$(P_i + S_{wi-1}) - (ET_i + S_{wi}) = R_{oi} + I_i \quad (1.23)$$

Al igualar y juntar términos,

$$W_i = P_i + S_{wi-1} \quad (1.24)$$

$$Y_i = ET_i + S_{wi} \quad (1.25)$$

Luego,

$$W_i - Y_i = R_{oi} + I_i \quad (1.26)$$

Asumiendo como humedad inicial al comienzo de cada intervalo Y_i y por métodos empíricos,

$$S_{wi} = Y_i * e^{(-ET_i P_i) / b} \quad (1.27)$$

Lo que muestra un decaimiento exponencial en cada intervalo de tiempo.

Se define la variable Y_i como una función no lineal donde aparecen los parámetros a y b en el modelo,

$$Y_i = \frac{(W_i + b)}{2a} - \left\{ \left[\frac{(W_i + b)}{2a} \right]^2 - \frac{W_i b}{a} \right\}^{0,5} \quad (1.28)$$

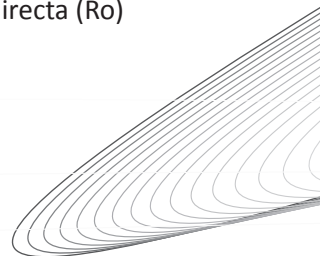
Al sustituir (1.4) y (1.5) en (1.3),

$$(W_i - Y_i) = R_{oi} + I_i \quad (1.29)$$

Asumiendo un coeficiente de reparto c al momento de diferenciar la escorrentía directa (R_o) de la recarga

$$(R_g = I), R_{oi} = (1-c)(W_i - Y_i) \quad (1.30)$$

$$R_{gi} = c(W_i - Y_i) \quad (1.31)$$



El modelo de Thomas relaciona la fracción del caudal observado el cual se origina en el almacenamiento subterráneo,

$$Q_{gi} = d * S_{gi} \quad (1.32)$$

d, representa el parámetro de almacenamiento en el acuífero.

Así como se aplicó la ecuación de continuidad al volumen de control con almacenamiento $S_w + S_c$, se realiza lo mismo para la zona saturada,

$$R_{gi} - Q_{gi} = \Delta S_{gi} = S_{gi} - S_{gi-1} \quad (1.33)$$

Sustituyendo (1.32) en (1.33) se obtiene:

$$S_{gi} = \frac{R_{gi} + S_{gi-1}}{d + 1} \quad (1.34)$$

Finalmente el caudal total simulado al final del período i,

$$Q_{si} = R_{oi} + Q_{gi} \quad (1.35)$$

Con relación a los parámetros abcd que aparecen en las ecuaciones descritas anteriormente, a que varía entre un rango de $0 \leq 1$ expresa la tendencia ante la presencia de un suelo que se encuentre completamente saturado que la escorrentía ocurra; b representa el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y a la humedad; c hace referencia a esa fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo que se incluye en la escorrentía, aunque no siempre se relaciona a esta fracción debido que no siempre toda la recarga se convierte en escorrentía superficial durante el intervalo de tiempo que se considere; d es el recíproco del tiempo de resistencia del agua subterránea, pero teniendo en cuenta que ese tiempo puede relacionarse con todo el acuífero, con la porción de esto más cerca al río, o simplemente con recorridos superficiales más rápidos. Los valores que se asignen a estas variables dependerán de la zona en donde se esté realizando el estudio.

D. Área de estudio

1) Río Chicamocha.

Nace por la confluencia del río Tuta y del río Jordán, pasando por Cómbita y Oicatá. La cuenca del Río Chicamocha se localiza en la Cordillera Oriental, en los departamentos

de Boyacá y Santander, con una superficie aproximada de 9.600 Km², en ella se ubican 72 cabeceras municipales. La cuenca del río Chicamocha se divide en tres grandes cuencas; la cuenca Alta, Media y Baja.

2) Cuenca Alta.

Durante su recorrido recibe otros afluentes importantes como:

- a) Río Sotaquirá
- b) Río Surba
- c) Río Chiticuy
- d) Río Chiquito.
- e) Río Pesca
- f) Río Tota.
- g) Río Tuta
- h) Río Pesca

La cuenca alta del río Chicamocha drena aproximadamente la tercera parte del departamento de Boyacá, tiene un área aproximada de 1536 km², de los cuales 367 km² son de la sub-cuenca del río Jordán y 441 km² de la sub-cuenca del río Tuta, presenta una elevación media de 2950 msnm y una pendiente media de 1,10%. La regulación de sus caudales que se hace mediante el embalse de La Copa localizado en la cuenca del río Tuta, el embalse la Playa sobre el río Jordán y la laguna de Sochagota en Paipa.

3) Sub-Cuenca Quebrada Surba.

Está localizada en el municipio de Duitama, Boyacá, el área de estudio es 8663.2 ha; presenta una pendiente de 4,1 %. La temperatura media anual oscila entre 10 a 15 °C, la humedad relativa con un promedio anual de 5%, una evaporación de 2% mm, a una altura sobre el nivel del mar (msnm) promedio de 2750, cuenta con una población cercana a las 150.000 habitantes entre sus zonas rurales y urbanas.

III. RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos para la modelación de la cuenca Alta del Río Chicamocha y la sub-cuenca de la Quebrada Surba por medio de los modelos Hec-Hms y Thomas.

A. Delimitación área de estudio.

Para la delimitación de la cuenca alta, se tomó solo una parte de la misma, teniendo en cuenta que la calibración de la cuenca y

la sub-cuenca se hace con la estación de caudales San Rafael ubicada cerca de la ciudad de Duitama, tomando así solo esta área ya que es la que recibe aguas antes de pasar por el punto de aforo.

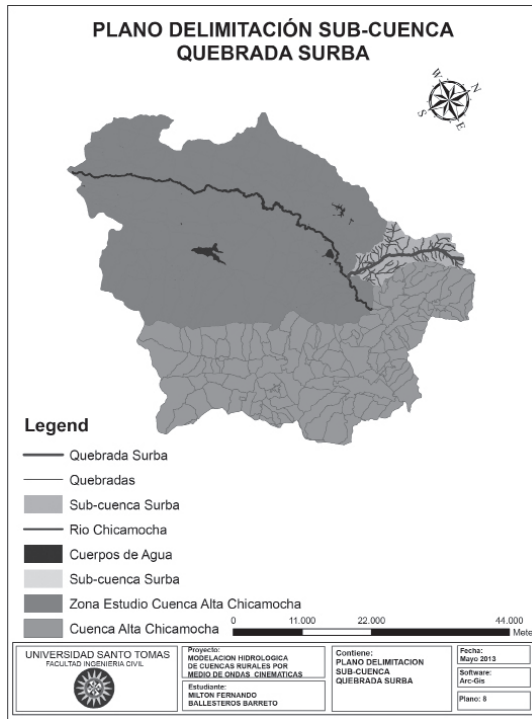


FIGURA 1. UBICACIÓN DE LA SUB-CUENCA SURBA DENTRO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA Y LA ZONA DE ESTUDIO.
Fuente: Arc-Gis, El Autor.

B. Análisis morfométrico de la zona de estudio Cuenca Alta

Para el análisis morfométrico de la zona de estudio se utilizó el programa Arc-Gis, delimitando primero el área de trabajo, luego se procedió a acotar el perímetro y determinar el área; esta información se utilizará para el análisis morfológico de la cuenca, aplicándola a fórmulas establecidas para determinar los parámetros que se presentan en la tabla 1.

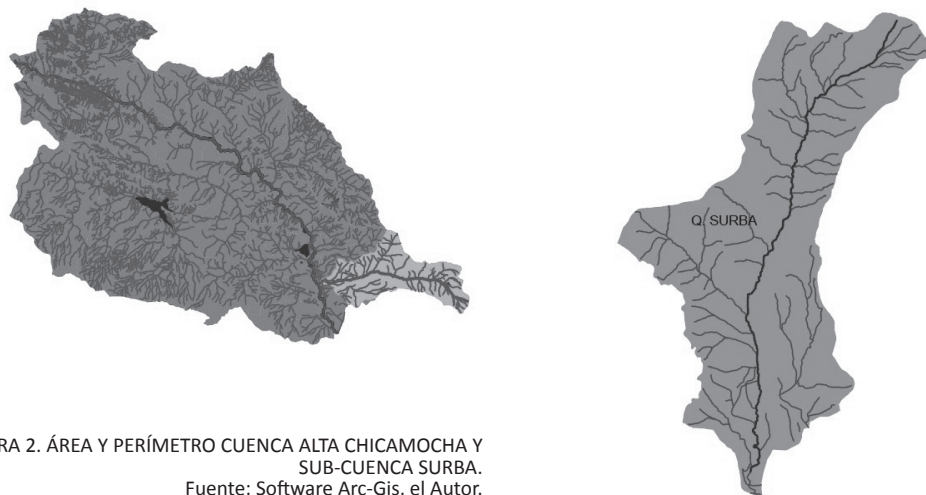


FIGURA 2. ÁREA Y PERÍMETRO CUENCA ALTA CHICAMOCHA Y SUB-CUENCA SURBA.
Fuente: Software Arc-Gis, el Autor.

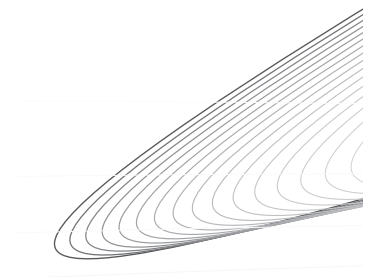


TABLA I
PARÁMETROS MORFOLÓGICOS DE LA ZONA EN ESTUDIO.

MORFOLOGIA		
Parámetro	Cuenca Alta Chicamocha	Sub-cuenca Quebrada Surba
Perímetro (km)	204.19	60.86
Área (km ²)	1337.93	86.56
Longitud corriente (km)	79.9	21.4
Cota promedio (msnm)	2700	3212
Factor forma	0.2095	0.1889
Índice compacidad	1.56	1.83
Índice alargamiento	1.86	2.55
Tiempo concentración (min)	912.12	124.12

Fuente: El Autor.

C. Cálculo Evapotranspiración.

Se obtuvo por medio del método de Thornwaite, obteniéndose los siguientes resultados

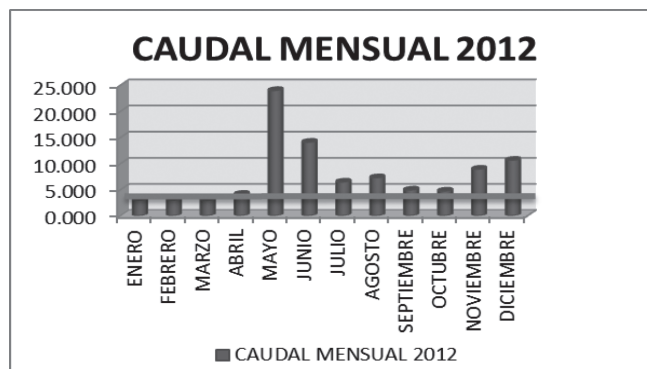
TABLA II
CÁLCULO EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL
CUENCA DE ESTUDIO.

MES	Ij	I	A	Eto
Enero	9,79	111,73	2,47	9,09
Febrero	8,54	111,73	2,47	7,27
Marzo	10,02	111,73	2,47	9,43
Abril	9,64	111,73	2,47	8,86
Mayo	9,2	111,73	2,47	8,21
Junio	8,87	111,73	2,47	7,74
Julio	8,77	111,73	2,47	7,59
Agosto	8,94	111,73	2,47	7,84
Septiembre	9,55	111,73	2,47	8,73
Octubre	9,14	111,73	2,47	8,12
Noviembre	9,79	111,73	2,47	9,09
Diciembre	9,46	111,73	2,47	8,59

Fuente: El Autor.

D. Cálculo caudal base.

El caudal base se calculó tomando la información histórica de los mínimos mensuales de la carta de caudales diarios. El valor es uno de los parámetros de entrada al modelo Hec-Hms, indica el flujo base para el cauce principal de la cuenca, se determinó un flujo de 2,956 m³/seg.



GRÁFICA 1. CÁLCULO DE CAUDAL BASE GRÁFICAMENTE.
Fuente: El autor

E. Cálculo Coeficiente de Manning Mediante Granulometría.

Se determinó el coeficiente de Manning para el canal principal y los colectores que servirán de parámetros para el modelo Hec-Hms, este valor se obtuvo mediante la realización de la granulometría a muestras de material obtenidas de los cauces descritos, se llevó al laboratorio donde se realizó un cuarteo. Este material fue pesado y llevado al horno, donde se dejó alrededor de 24 horas tiempo suficiente para que se seque completamente y así obtener la humedad, después se lavó y seco y con el material obtenido se realizó la granulometría por los tamices que se presentan en las tablas de cálculo.

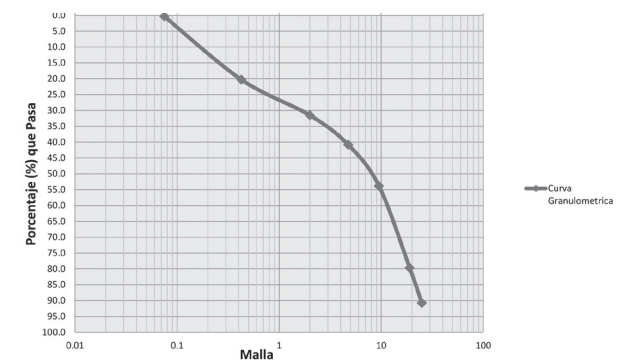
1) Coeficiente Manning Río Jordán.

ECUACIÓN	D	D	"n"
Ec. de Meyer-Peter-Muller	D90	24	0,152
Ecuación de Bray	D50	8	0,069
Ecuación de Garde & Raju	D50	8	0,063
H. A. Einstein	D65	13	0,090
A.J.A: Maza	Dm	12,15	0,093
Promedio			0,093

Fuente. El Autor

TABLA III
CÁLCULO MANNING RÍO JORDÁN.

GRÁFICA 2. CURVA GRANULOMÉTRICA RÍO JORDÁN.
Fuente: El autor



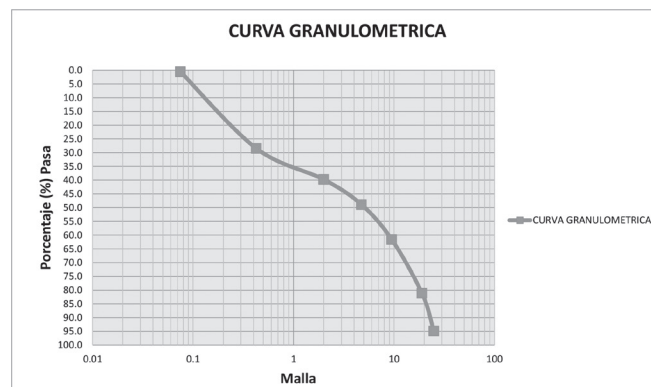
2) Coeficiente Manning Quebrada Surba

ECUACIÓN	D	D	"n"
Ec. de Meyer-Peter-Müller	D90	13,0	0,082
Ecuación de Bray	D50	13,8	0,075
Ecuación de Garde & Raju	D50	13,8	0,108
H. A. Einstein	D65	10,3	0,072
A.J.A: Maza	Dm	12,6	0,097
Promedio			0,087

Fuente: El Autor.

TABLA IV
CÁLCULO MANNING RÍO JORDÁN.

GRÁFICA 3. CURVA GRANULOMÉTRICA QUEBRADA SURBA.
Fuente: El autor



3) Coeficiente Manning Río Tuta.

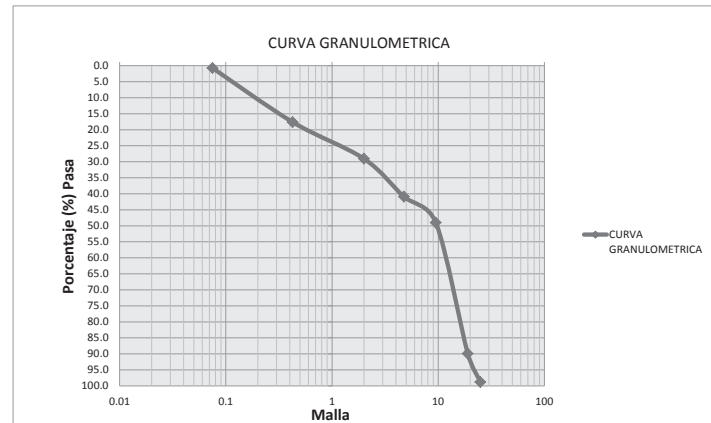
ECUACIÓN	D	D	"n"
Ec. de Meyer-Peter-Muller	D90	18,0	0,114
Ecuación de Bray	D50	9,5	0,071
Ecuación de Garde & Raju	D50	9,5	0,074
H. A. Einstein	D65	14,0	0,097
A.J.A: Maza	Dm	12,6	0,097
Promedio			0,091

Fuente: El Autor.

TABLA V
LAVADO Y CÁLCULO
MANNING RÍO TUTA.

GRÁFICA 4. CURVA GRANULOMÉTRICA QUEBRADA TUTA.

Fuente: El autor



Los valores que se obtuvieron fueron comparados con las tablas encontradas en la hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow, (Chow, 2004) las cuales nos presenta valores para los tipos de canales de estudio, se relacionó los canales con los tipos de canal y descripción encontrados en el numeral 3, tabla V-VI. Para los valores del coeficiente de rugosidad "n", la relación se determinó por las características presentes en la zona de estudio siendo la más similar las planicies de inundación con presencia de pastizales y matorrales, si bien los valores de esta tabla arroja datos para el coeficiente de Manning entre los 0,035 y 0,050, cabe destacar que difieren de los determinados en gran parte por la gran cantidad de desechos que presentan los canales, principalmente el del cauce del Río Chicamocha, ya que se encuentra la presencia de troncos y material de sedimento en toda la zona.

F. Cálculo precipitación áreal.

La precipitación áreal de la cuenca se calculó mediante Isoyetas en el programa Arc-Gis, se determinó para cada uno de los primeros 14 días con lluvia del mes de marzo.



FIGURA 3. ISOYETAS PRECIPITACIÓN ÁREAL DÍA 02 MARZO DE 2012.

Fuente: Arc-Gis, El Autor.

G. Cálculo precipitación Polígonos de Thiessen.

Se calculó la precipitación por medio de polígonos de Thiessen en el software Arc-Gis, ubicando las tres estaciones de estudio (Uptc, Surbata-Bonza y la Copa), se ejecutó el procedimiento de triangulación y obtención de las áreas de alcance para cada estación, se realizó este procedimiento para los primeros 14 días del mes de marzo, tiempo de estudio; a continuación se presenta una imagen de cómo se efectuó el procedimiento en Arc-Gis y en la tabla 20 se presentan los valores obtenidos para cada uno de los días.

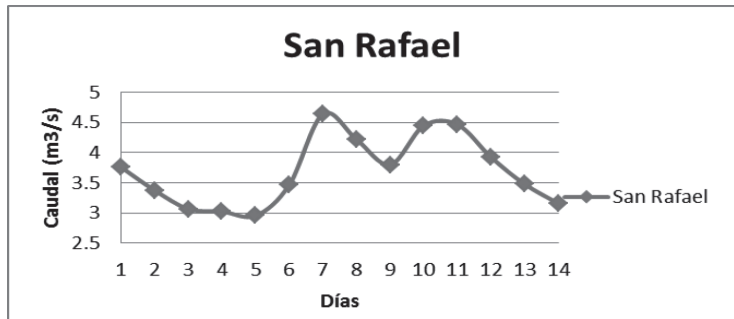
FIGURA 4. POLÍGONOS DE THIESSEN PRECIPITACIÓN DÍA 12 MARZO DE 2012.
Fuente: Arc-Gis, El Autor.



H. Hidrograma para la zona de estudio Cuenca Alta Río Chicamocha.

El hidrograma que se muestra en la figura corresponde a los valores encontrados para los primeros 14 días del mes de marzo.

GRÁFICA 5. HIDROGRAMA DE CAUDALES OBSERVADOS PARA LA ESTACIÓN SAN RAFAEL.
Fuente: Excel, El Autor.

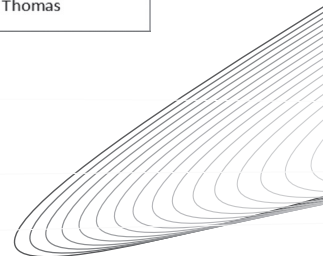
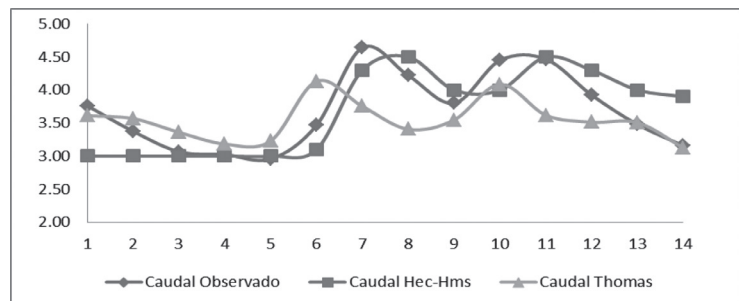


IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

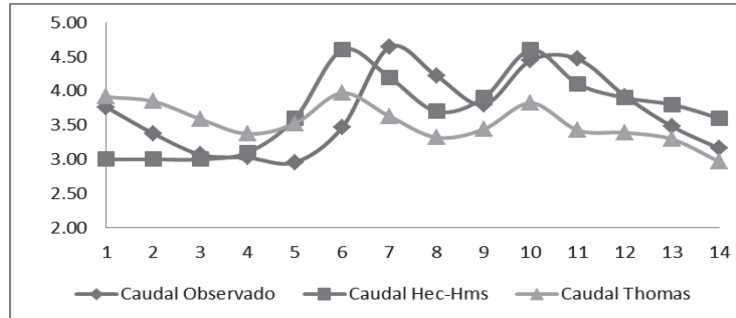
A. Hidrograma Hec-Hms y Thomas vs. caudal observado.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las modelaciones para los diferentes casos.

GRÁFICA 6. CAUDALES SIMULADOS EN HEC-HMS Y THOMAS PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA, PRECIPITACIÓN PROMEDIO, ZONA DE ESTUDIO VS. EL CAUDAL OBSERVADO EN LA ESTACIÓN SAN RAFAEL.
Fuente: Excel, El Autor.

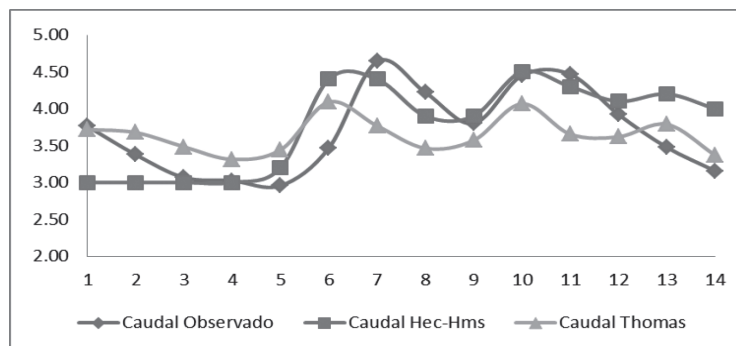


En la gráfica 6, se ve el comportamiento que presentan los modelos para la primera calibración por medio de la precipitación promedio; se puede ver el comportamiento del modelo Hec-Hms es más cercano en los caudales máximos que se presentan al observado en la estación San Rafael, aunque el modelo Thomas presenta una curva parecida, la intensidad de la misma es mucho menor en la mayoría de los días de la modelación.



GRÁFICA 7. CAUDALES SIMULADOS EN HEC-HMS Y THOMAS PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA, PRECIPITACIÓN ÁREAL, ZONA DE ESTUDIO VS EL CAUDAL OBSERVADO EN LA ESTACIÓN SAN RAFAEL.
Fuente: Excel, El Autor.

Para la segunda calibración se tomaron los valores de precipitación áreal para la zona de estudio, en la gráfica 7, se presentan los resultados, al compararse con el caudal observado en la estación San Rafael se ve una aproximación bastante cercana a la generada por el modelo Hec-Hms, presentando variaciones al inicio del tiempo de estudio; debido a que el modelo parte del flujo base que tiene como dato inicial y no posee un almacenamiento previo de caudales que generen mejores condiciones en el hidrograma durante los primeros días; para Thomas se ve que el caudal generado en los primeros días es mayor al observado, esto se debe a que el área de la cuenca de estudio es muy grande (1337,93 km²) y no es homogénea, para obtener mejores resultados con el modelo Thomas se debe calibrar para cuencas pequeñas.



GRÁFICA 8. CAUDALES SIMULADOS EN HEC-HMS Y THOMAS PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA, PRECIPITACIÓN THIESSEN, ZONA DE ESTUDIO VS. EL CAUDAL OBSERVADO EN LA ESTACIÓN SAN RAFAEL.
Fuente: Excel, El Autor.

Para la calibración final, se tomaron los datos de precipitación obtenidos por medio de los polígonos de Thiessen, arrojando el hidrograma visto en la figura 8, en el cual se observa el comportamiento del modelo de Thomas y el modelo Hec-Hms; se observa cómo es la variación de cada uno respecto al caudal observado en la estación San Rafael.

Para el modelo de Thomas los caudales son mayores al inicio de los días de estudio, debido a la extensa área de la cuenca y que ésta no es homogénea; para el modelo de Hec-Hms los caudales generados son similares presentando una variación al inicio porque el modelo parte del flujo base y no presenta un almacenamiento previo, y una pequeña variación en los tres últimos días, está relacionada con la calibración para este período; pero en la mayoría de días

el caudal generado por Hec-Hms es muy similar al observado, cumpliendo así con el objetivo de poder observar el comportamiento de la onda cinemática en la modelación de cuencas rurales.

V. CONCLUSIONES

El proceso de tránsito a través de onda cinemática genera resultados próximos a los reales medidos hidrométricamente.

Hec-Hms en su proceso de transformación de precipitación en escorrentía por medio de ondas cinemáticas, no tiene en cuenta la reincorporación de parte de caudales subterráneos en la red principal de drenaje aguas abajo, siendo este un modelo más útil para cuencas de áreas pequeñas, ya que este caudal será muy pequeño y no interferirá en el hidrograma final.

La calibración para el modelo de onda cinemática se hace independientemente para cada una de las áreas de trabajo, siendo más útil ya que los parámetros de calibración como la impermeabilidad y el número de curva no son homogéneas en las dos áreas adyacentes al canal, lográndose así caracterizar mejor las condiciones presentes en la zona de estudio, mientras que el modelo agregado se calibra con parámetros similares para toda el área de estudio.

La variación máxima presentada en los resultados del modelo Hec-Hms se produce al inicio del hidrograma, cambiando significativamente debido a que el programa parte de caudal base que inicialmente no se autocalibra.

Aun cuando los resultados obtenidos de las simulaciones de caudal punta para la Cuenca Alta del Chicamocha en Hec-Hms no son de la mejor calidad en las variables de bondad de ajuste evaluados, éstos representan una aproximación válida a este valor y permiten delinear los pasos a seguir para obtener valores de caudal en la Sub-cuenca Surba.

Los resultados obtenidos por el modelo de Thomas no son precisos debido a que este modelo es más eficiente en cuencas pequeñas y donde se presenten áreas homogéneas; bajo estas condiciones se obtienen mejores resultados.

Para obtener mejores datos con Thomas en la calibración es necesario sub-dividir la

cuenca Alta del Río Chicamocha y calibrar el modelo para las nuevas Sub-cuencas.

El modelo Thomas, sólo requiere datos de precipitación y evapotranspiración, no tiene en cuenta datos precisos para la simulación como el flujo base, rugosidad, pendiente y geometría del canal; los cuales son de uso vital en la modelación con ondas cinemáticas, aproximando más a la realidad la situación que se presenta en la cuenca de trabajo.

De los hidrogramas obtenidos se pudo observar cómo la conducta en cada una de las simulaciones se comportó en un gran porcentaje de acuerdo al valor real, lográndose obtener caudales muy similares en cuanto a los picos altos y los días en que se presentaron los mismos.

Es importante la utilización de modelos distribuidos con esquemas de onda cinemática, siempre y cuando las zonas de aportación no necesiten de una caracterización de alta definición en los canales centrales de drenaje. En este caso, los resultados entre un modelo agregado y uno distribuido basado en onda cinemática no varían mucho. Sin embargo en situaciones donde se requiere alta caracterización de flujo o exactitud temporal de caudales, los modelos agregados no presentan gran confiabilidad.

REFERENCIAS

- Caro, C.; Fragala, F., y Obregón, N. (2003). "Aproximación a la estimación de la recarga en los acuíferos mediante la optimización matemática multidimensional de un modelo de balance hídrico". Seminario Internacional La hidroinformática en la gestión integrada de los recursos hídricos. Biblioteca virtual de la Organización mundial de la salud (<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/agua2003/flecha.pdf>)
- Chaudhry, M. (2008). Open Channel Flow, Ed. Springer, ISBN 978-0-387-30174-7
- Gómez, M. y Nanía, L. (2006). Ingeniería Hidrológica, Grupo editorial Universitario, ISBN: 84-8491-636-7.
- Goodrich, D. y Smith, R. (1994). Comment on "Physically based hydrologic modeling, is the concept realistic?" by Grayson", Water Resources Research, vol. 30, 851-854.

