

Implementación de un Modelo Lluvia – Escorrentía en el Programa “Alcantarillados”

Mario Enrique Moreno Castiblanco

Ingeniero Civil, MSc. Recursos Hídricos
Profesor Instructor Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes
Investigador – CIACUA, Universidad de los Andes, mario-mo@uniandes.edu.co

Gustavo Adolfo Hernández Cortés

Ingeniero Civil, MSc. Recursos Hídricos
Profesor Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Magdalena
Investigador – CIACUA, Universidad de los Andes, gust-her@uniandes.edu.co

Oscar Cortés Rivero

Ingeniero Civil, MSc. Sistemas
Investigador – CIACUA, Universidad de los Andes, oj.cortes43@egresados.uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen: En este artículo se presentan los tres métodos de infiltración más comunes que al ser combinados con un modelo de lluvia – escorrentía, permiten determinar el caudal de escorrentía que aporta una cuenca al nodo más cercano de la red de alcantarillado. En el programa “ALCANTARILLADOS” se implementó este modelo de lluvia – escorrentía para tener una mejor aproximación del comportamiento hidráulico de las redes de alcantarillado, ya que además de tener un modelo hidrológico en donde se convierte la precipitación que cae en una cuenca determinada en caudal de escorrentía, también se puede hacer la modelación hidráulica de los conductos que componen la red de alcantarillado. Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo lluvia - escorrentía del programa “ALCANTARILLADOS” mostraron ser muy parecidos a los obtenidos en el programa de libre acceso EPASWWM.

Palabras clave. Modelo Lluvia-Escorrentía, Hidráulica de Alcantarillados, Programa ALCANTARILLADOS

1. Introducción

Durante mucho tiempo el ejercicio del diseño y modelación de sistemas de alcantarillados urbanos, se realizó bajo el supuesto que éstos operaban con condiciones de flujo permanente. Sin embargo los adelantos computacionales experimentados en las últimas décadas han permitido la solución eficiente de modelos matemáticos que permiten simular el comportamiento de las redes de alcantarillado operando bajo condiciones de flujo no permanente. Lo anterior aunado a la naturaleza no uniforme de la precipitación, en cuanto a espacio y tiempo se refiere, permitió que algunos programas para la modelación hidráulica de redes de drenaje urbano lograran incluir dentro de sus rutinas de cálculo modelos lluvia-escorrentía que permitieran simular el comportamiento hidráulico de las redes durante eventos extremos de lluvia.

Por otra parte, en el ámbito nacional no se han desarrollado herramientas informáticas que cuenten con estas características. Sin embargo al interior de la Universidad de los Andes se ha venido desarrollando con éxito un proyecto de investigación que tiene como objetivo principal el desarrollo del programa, "ALCANTARILLADOS", capaz de simular el comportamiento de redes operando bajo condiciones de flujo no permanente. Teniendo en cuenta todo lo anterior en este artículo se muestra la manera como se logró incluir un modelo lluvia-escorrentía, idóneo para la realidad de recursos hidrométricos con que se cuenta en el entorno Colombiano y Latinoamericano, al interior del programa "ALCANTARILLADOS" permitiendo así que esta institución se encuentre a la vanguardia de la modelación de redes de drenaje urbano.

2. Aspectos Generales

Los volúmenes de agua aportados por eventos de precipitación sobre cualquier cuenca son naturalmente transitados por la misma a través de su red de drenaje. La intervención del hombre en las cuencas naturales ha traído consigo cambios importantes en las características geomorfológicas de las mismas produciendo a su vez un claro desequilibrio hidrológico, lo cual generalmente se traduce en el aumento de la escorrentía superficial al interior de la misma. Lo anterior hizo necesario que el ser humano propendiera por el entendimiento físico de todos los fenómenos involucrados en el proceso lluvia - escorrentía, con el objetivo de poder tomar decisiones y emprender acciones basadas en lo posible en la predicción de la respuesta de las cuencas bajo eventos de precipitación y evitar así en lo posible las acciones correctivas.

Para el entendimiento físico del proceso lluvia-escorrentía es necesario inicialmente comprender de manera aislada todos los fenómenos intrínsecos del proceso: la precipitación, la infiltración, la percolación, la evapotranspiración, etc. Para cada uno de estos fenómenos el ser humano ha desarrollado diferentes modelos matemáticos que son capaces de describirlos con un alto grado de exactitud, y que agrupándolos de manera adecuada se logra obtener un modelo general de lluvia - escorrentía.

3. Modelos de Infiltración

Existen diferentes metodologías para la estimación de los caudales de escorrentía producto de un evento de precipitación. Sin embargo la experiencia muestra que lo más apropiados son aquellos que se encuentran relacionados de manera directa con modelos de infiltración.

3.1. Modelo de Horton

Este modelo indica que todo suelo presenta una capacidad de infiltración inicial y otra final, y que este tiende a alcanzar la condición final a una cierta tasa constante de decaimiento. Esta teoría se expresa de manera numérica como:

$$f(t) = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{-kt} \quad [1]$$

donde f = tasa de infiltración; t = tiempo; f_0 = tasa de infiltración inicial del suelo; f_{∞} = tasa de infiltración final del suelo; k = coeficiente de decaimiento.

3.2. Modelo de Green - Ampt

La ecuación de Green-Ampt es una ecuación de infiltración aproximada basada en la ley de Darcy. Se supone que el agua infiltrada se mueve hacia abajo entre el suelo con un frente húmedo que separa la zona mojada y no mojada. En cualquier instante la tasa potencial de infiltración, f , está dada por la ecuación:

$$f(t) = K \left[1 + \frac{\Psi_f(\phi - \theta_i)}{F} \right] \quad [2]$$

donde K = conductividad hidráulica; Ψ_f = cabeza de succión capilar; ϕ = porosidad del suelo; θ_i = contenido de humedad inicial del suelo; y F = infiltración acumulada. El encharcamiento empieza cuando la tasa potencial de infiltración iguala la tasa de precipitación. La infiltración acumulada en cualquier tiempo durante el encharcamiento está dada por la ecuación:

$$F - F_p - \Psi_f(xH - \theta_i) \ln \left[\frac{F + \Psi_f(\phi - \theta_i)}{F_p + \Psi_f(\phi - \theta_i)} \right] = K(t - t_p) \quad [3]$$

donde t_p = tiempo al inicio del encharcamiento; F_p = infiltración acumulada en el tiempo t_p ; y F = infiltración acumulada en el tiempo t .

3.3. Modelo del SCS

El Soil Conservation Service de los Estados Unidos en 1972 desarrolló un método para determinar el exceso de precipitación producto de una tormenta. Este método asigna un número de curva característica a cada tipo de suelo dependiendo de sus características de permeabilidad. Si la profundidad acumulada de precipitación es menor al 20% del déficit de almacenamiento de humedad, el exceso de precipitación es cero; de lo contrario se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad [4]$$

donde, R = Profundidad de exceso de precipitación (mm); S = Déficit de almacenamiento de humedad (mm); y P = Profundidad de precipitación acumulada (mm). El déficit de almacenamiento de humedad se puede calcular como:

$$S = \frac{25400 - 254 CN}{CN} \quad [5]$$

donde, CN es el número de curva. Esta variable depende de tres aspectos: el tipo de suelo, el estado de humedad antecedente del suelo y del uso de suelo.

4. Modelo de Lluvia - Escorrentía

De los diferentes modelos hidrológicos que existen en la literatura se escogió un modelo de onda cinemática para tener en cuenta el tránsito de la precipitación en la cuenca antes de llegar al nodo de descarga.

4.1. Modelo Conceptual

Para describir el fenómeno de lluvia – escorrentía que ocurre en una cuenca se puede utilizar el modelo conceptual mostrado en la Figura 1. Este modelo concibe la cuenca como un canal rectangular sobre el cual la precipitación cae de manera normal distribuida y el fenómeno de infiltración se lleva a cabo de la misma manera. Al final de este hipotético canal se encuentra una especie de vertedero que permite simular la capacidad de encharcamiento de la cuenca.

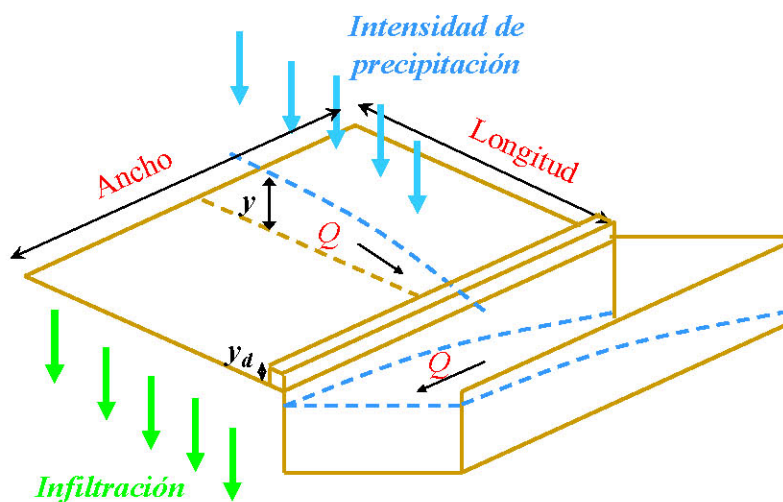


Figura 1.- Modelo conceptual de lluvia – escorrentía en una cuenca.

4.2. Modelo Matemático

Con la cuenca idealizada se puede determinar el hidrograma de escorrentía directa, producto de un evento de precipitación, combinando un modelo de infiltración con un modelo de resistencia fluida derivado de la ecuación de Manning. Las siguientes dos ecuaciones corresponden a la ecuación de continuidad y a la ecuación dinámica que rigen al modelo matemático respectivamente:

$$iL = \left(fL + \frac{Q}{B} \right) + L \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad [7]$$

$$Q = \frac{B}{n} \sqrt{S} (y - y_d)^{5/3} \quad [8]$$

donde L = Longitud de flujo de la cuenca (m); B = Ancho de la cuenca (m); n = Coeficiente de rugosidad de Manning; y_d = Profundidad de almacenamiento de la cuenca (m); y = Profundidad de agua en la cuenca (m); i = Intensidad de la lluvia (m/s); f = Tasa de infiltración de la cuenca (m/s); Q = Caudal de escorrentía directa (m^3/s); t = tiempo; S = Pendiente longitudinal de la cuenca.

Combinando la ecuación de continuidad [7] y la ecuación dinámica [8], y despejando Δy se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta y = \left(i - f - \frac{\sqrt{S}(y - y_d)^{5/3}}{nL} \right) \Delta t \quad [9]$$

Para resolver la ecuación [9] se debe utilizar un procedimiento iterativo que permita encontrar la profundidad de agua en la cuenca al final del intervalo de tiempo. El delta de profundidades se puede reemplazar en la ecuación [9] por la siguiente expresión: $\Delta y = y_2 - y_1$, donde y_1 corresponde a la profundidad de agua al inicio del intervalo de tiempo y y_2 la profundidad de agua al final del intervalo. Una vez determinado el valor de y_2 se calcula el término de $(y - y_d)^{5/3}$ como:

$$(y - y_d)^{5/3} = (y_1 + 0.5(y_2 - y_1) - y_d)^{5/3} \quad [10]$$

Finalmente se calcula el caudal de escorrentía mediante la ecuación [8].

4.3. Cuencas semi-urbanas

En aquellos casos en los cuales las cuencas estén compuestas por zonas permeables e impermeables, se puede seguir utilizando el modelo conceptual y matemático antes descrito para la estimación de los caudales de escorrentía efectiva. Sin embargo será necesario dividir el área total de la cuenca en dos porciones representativas de la zona permeable y de la no permeable. De esta manera el modelo se aplica paralelamente a cada área y los caudales individuales para cada intervalo de tiempo; posteriormente se suman los dos hidrogramas de caudales (de la zona permeable y de la zona impermeable).

5. Descripción General del Programa "ALCANTARILLADOS"

El programa "ALCANTARILLADOS" es una herramienta informática que permite la simulación hidráulica de sistemas de drenaje urbano bajo dos condiciones de flujo; la primera para flujo gradualmente variado (período estático) cuando se realiza un análisis de redes de alcantarillado residual, en donde se modela el caudal máximo horario que llega a cada uno de los nodos de la red; y la segunda para flujo no permanente

en donde se analiza la variación de los caudales y niveles en la red con respecto a un evento de precipitación que cae en algunas cuencas o la variación de los caudales de agua residual a lo largo del día. El programa "ALCANTARILLADOS" modela una red de alcantarillado como un conjunto de nodos exteriores (puntos de introducción de las condiciones de frontera), nodos internos (nodos de unión de conductos) y los conductos que van entre los nodos con diferentes materiales y secciones. En el programa se pueden asignar condiciones de frontera en cada nodo como: Hidrogramas, Limnigramas, Curvas de Calibración y Caídas Libres.

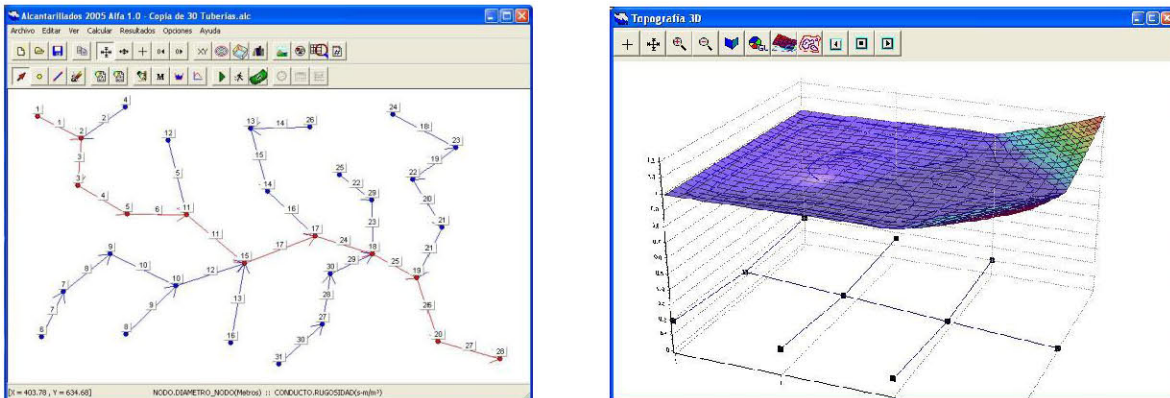


Figura 2.- Ventana principal de "ALCANTARILLADOS" (izquierda) y ventana de visualización en 3D (derecha).

La interfaz gráfica del programa ofrece numerosas opciones para visualizar las variables de los nodos, los conductos y las cuencas. Las propiedades de los nodos se pueden ver en 3D, así como la topografía de la red. Tiene una gama de colores que permite apreciar gráficamente las diferencias en los valores de las variables en los nodos, los conductos y las cuencas. El programa "ALCANTARILLADOS" también cuenta con un sistema de unidades robusto y flexible, lo que permite ingresar los valores de las variables en la unidad en la cual están disponibles.

Por medio de la ventana de edición de las cuencas se pueden incorporar las características geométricas, geomorfológicas de las mismas y los parámetros del modelo de infiltración a utilizar. Adicionalmente, en el programa se pueden incorporar eventos de lluvia por medio de intensidades o precipitaciones.

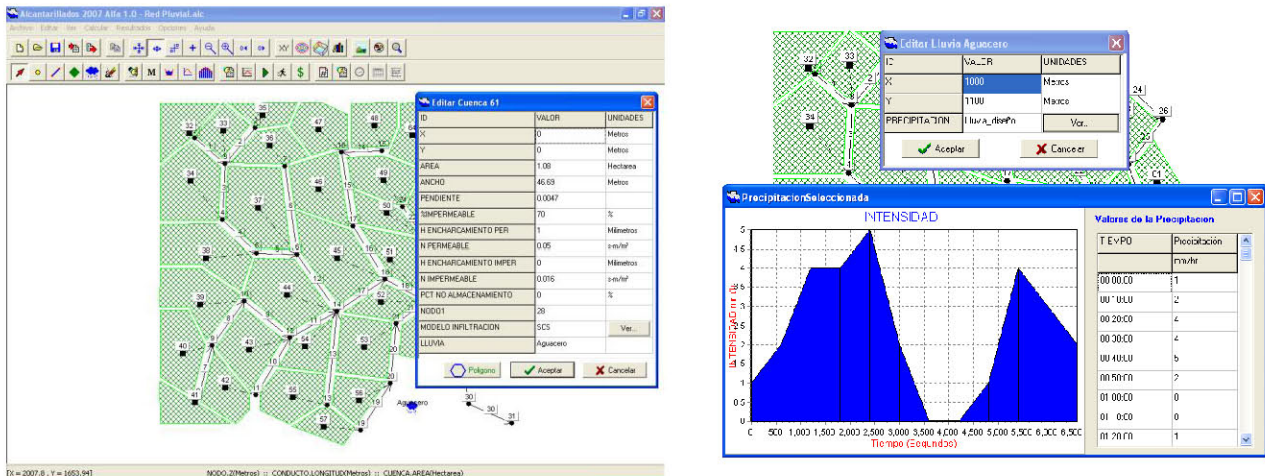


Figura 3.- Ventana de edición de las características de la cuenca y ventana de edición de las lluvias.

En el módulo de cálculo hidráulico se incluyó un modelo de lluvia – escorrentía que permite transformar un evento de precipitación sobre una cuenca en hidrogramas de entrada a los diferentes nodos de la red de alcantarillado que se encuentre al interior de la misma. Una vez se ejecuta el módulo hidráulico se pueden obtener niveles y caudales en los nodos y conductos (en diferentes puntos internos), además permite visualizar los perfiles de flujo para rutas que el usuario escoja. Por otro lado el programa también permite realizar comparación de hidrogramas y limnigramas de los nodos que componen la red de alcantarillado en donde se puede visualizar la variación espacial y temporal de los niveles y caudales en los mismos.

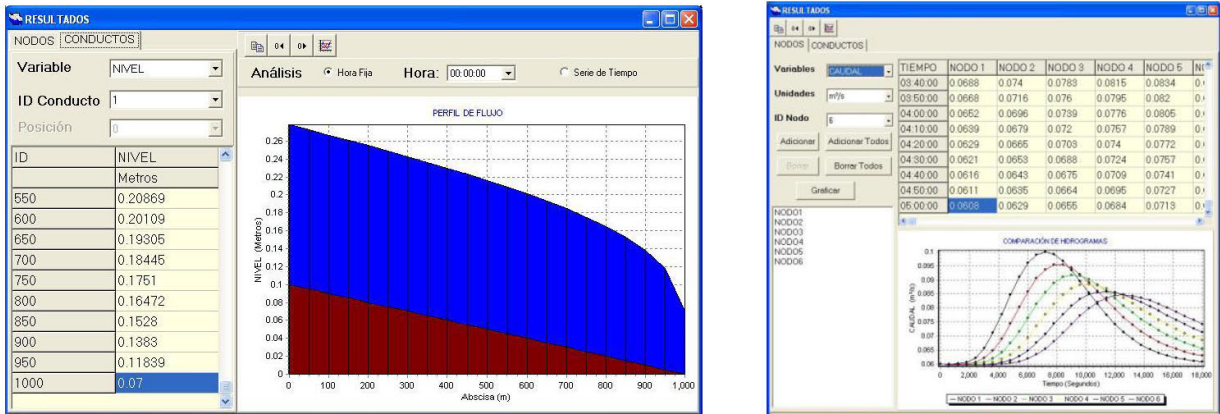


Figura 4.- Ventana de presentación de resultados y ventana de gráficas de comparación.

6. Comparación de Resultados con el Programa EPASWMM

Cada vez que se desarrolle una nueva herramienta informática, se debe realizar una verificación de los resultados obtenidos en la herramienta con programas similares que ya hayan sido probados. Por tal razón en esta investigación se incluyó un análisis comparativo de los resultados obtenidos en el modelo de lluvia – escorrentía implementado en el programa “ALCANTARILLADOS” con los resultados del programa de libre acceso EPASWMM.

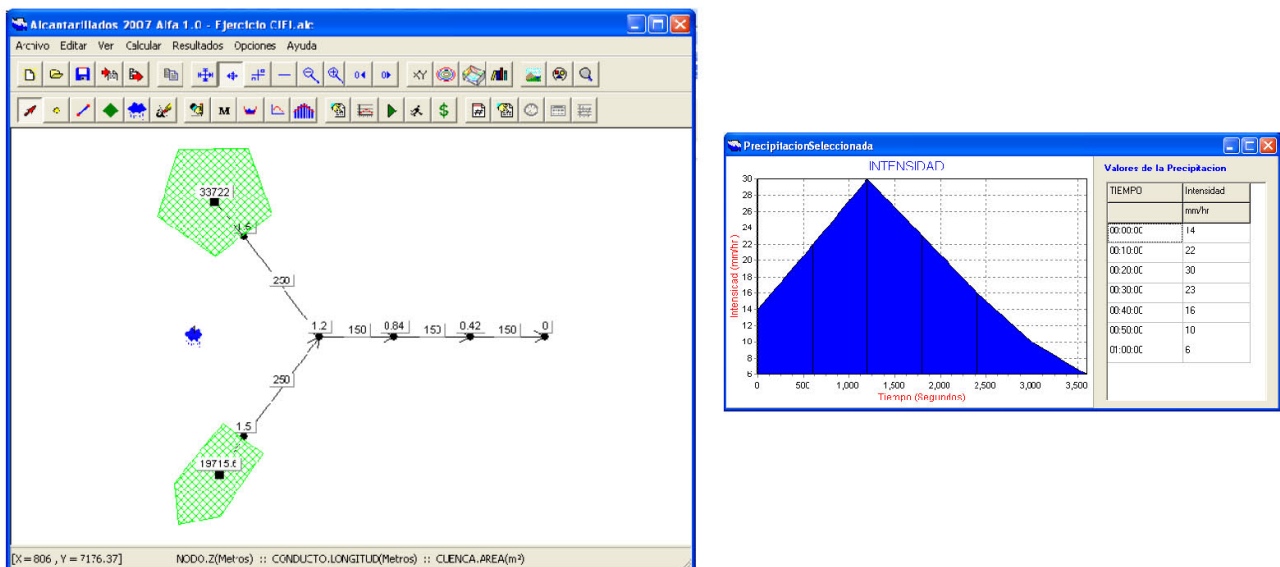


Figura 5.- Esquema general de la red (izquierda), y evento de precipitación (derecha).

Para comparar los resultados de los dos programas, se modeló una red de alcantarillado (Figura 5) compuesta por una cuenca rural (100% permeable), una cuenca urbana (100% impermeable), 2 nodos externos, 3 nodos internos o uniones, 1 descarga y 5 conductos de sección circular. A los nodos 1 y 2 se le introdujo un hidrograma de caudal constante (6 lt/s), además de recibir el caudal de escorrentía de las dos cuencas asociadas; mientras que la condición de frontera en la descarga (Nodo 6) se incorporó un limnigrama que se relaciona con una caída libre. El evento de precipitación que cae sobre las dos cuencas, es el que se muestra en la Figura 5 (parte derecha). Para la cuenca rural se probaron el modelo de infiltración para los tres métodos de infiltración descritos en el numeral 3. A continuación se describen las características de las dos cuencas, y los parámetros de cada uno de los métodos de infiltración.

Tabla 1. Características físicas de las cuencas y Parámetros de los modelos de infiltración

Característica	Cuenca rural	Cuenca urbana	Parámetro	Cuenca rural
Área (m ²)	33722 m ²	19716 m ²	Tasa de infiltración inicial (mm/hr)	40 mm/hr
Ancho (m)	135 m	91.5 m	Tasa de infiltración final (mm/hr)	5 mm/hr
Pendiente	0.009	0.001	Coefficiente de decaimiento (1/hr)	3 hr ⁻¹
% de área impermeable	0 %	100 %		
N de Manning (zona permeable)	0.035	-	Permeabilidad (mm/hr)	1.5 mm/hr
Altura de almacenamiento (zona permeable) (m)	0.001 m	-	Cabeza de succión (m)	0.21 m
n de Manning (zona impermeable)	-	0.016	Variación de humedad	0.25
Altura de almacenamiento (zona impermeable) (m)	-	0.0 m		
Nodo de descarga	1	2	Número de curva	84

Una vez se introducen las características topológicas de la red, las características físicas de las cuencas, los parámetros de los modelos de infiltración, las condiciones de frontera y los tiempos de simulación, se ejecutan los programas "ALCANTARILLADOS" y EPASWMM, obteniéndose los hidrogramas de escorrentía en la cuenca urbana y la cuenca rural con los modelos de infiltración de Horton, de Green-Ampt y de la SCS.

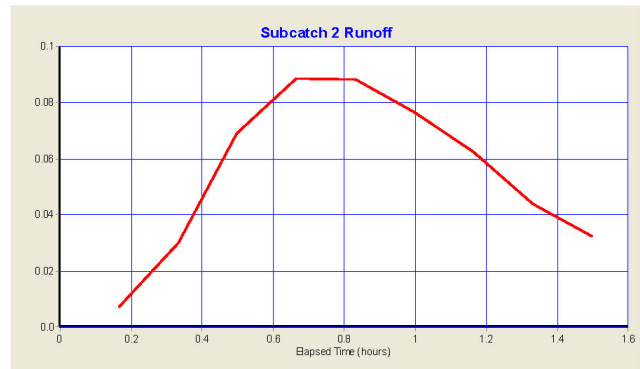
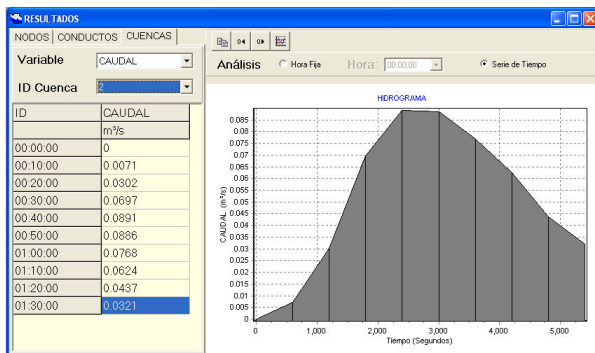


Figura 6.- Hidrograma de escorrentía de la cuenca urbana en el programa "ALCANTARILLADOS" (izquierda) y en el programa EPASWMM (derecha).

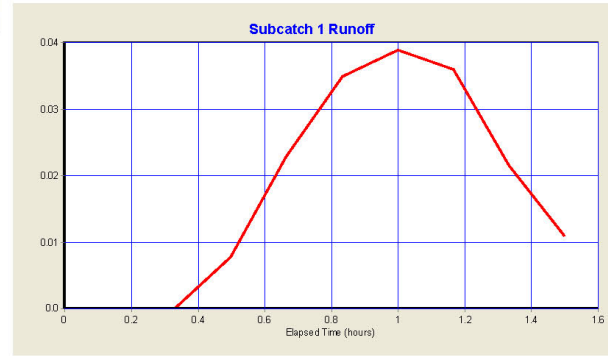
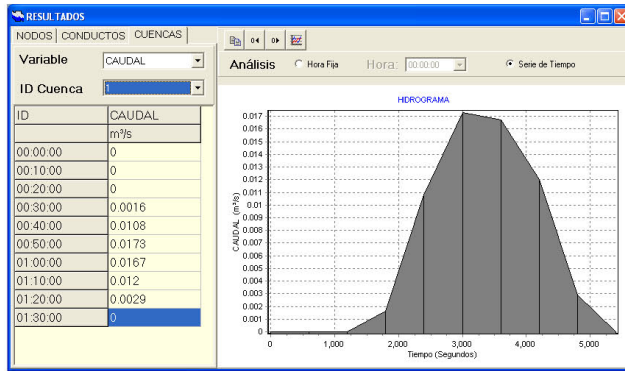


Figura 7.- Hidrograma de escorrentía de la cuenca rural (modelo de Horton) en el programa “ALCANTARILLADOS” (izquierda) y en el programa EPASWMM (derecha).

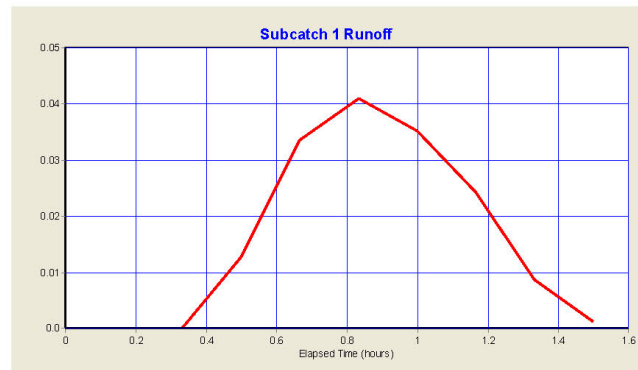
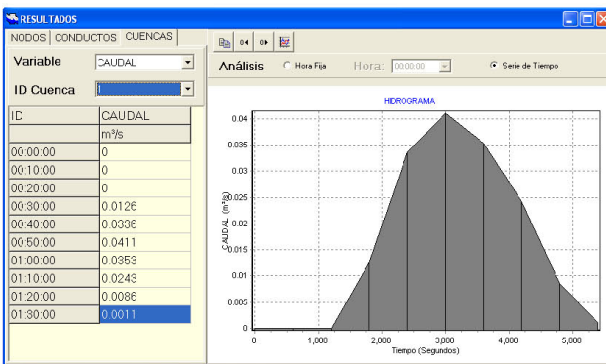


Figura 8.- Hidrograma de escorrentía de la cuenca rural (modelo de Green-Ampt) en el programa “ALCANTARILLADOS” (izquierda) y en el programa EPASWMM (derecha).

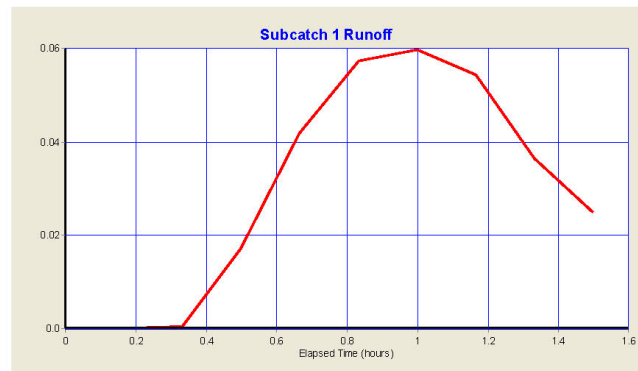
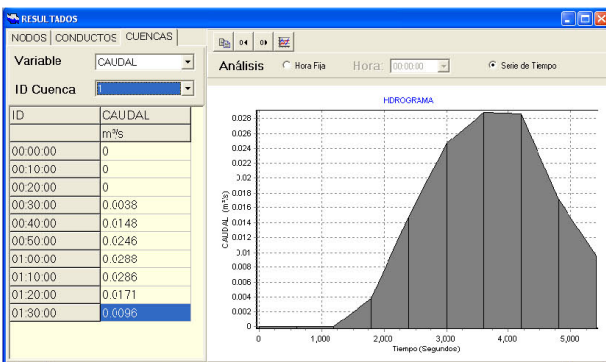


Figura 9.- Hidrograma de escorrentía de la cuenca rural (modelo de la SCS) en el programa “ALCANTARILLADOS” (izquierda) y en el programa EPASWMM (derecha).

En la parte izquierda de la Figura 10 se presenta la comparación de los hidrogramas de escorrentía para la cuenca urbana y la cuenca rural con el método de infiltración de Horton. Se observa que los resultados obtenidos en los dos programas son muy similares. Mientras que a la derecha de la Figura 10 se presenta la comparación de los hidrogramas de escorrentía de la cuenca rural con los métodos de infiltración de Green-Ampt y SCS. Observando los dos hidrogramas, se puede mencionar que los resultados son similares.

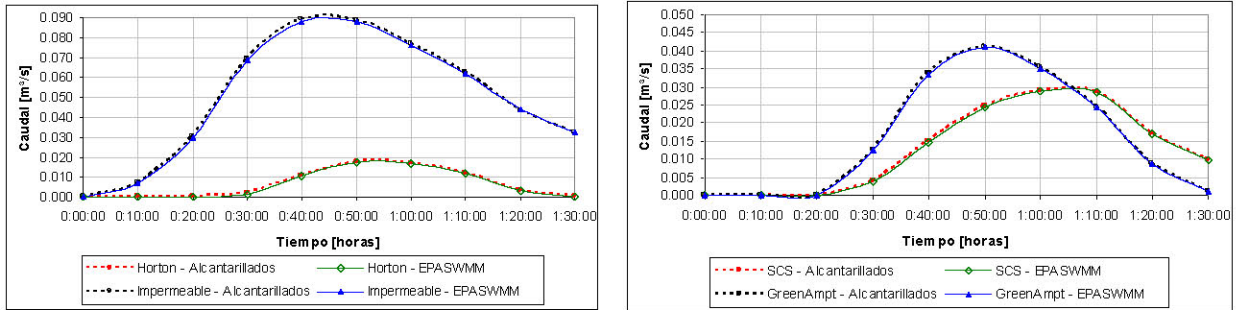


Figura 10.- Comparación de los hidrogramas de escorrentía de las 4 cuencas analizadas en los programas “ALCANTARILLADOS” y EPASWMM.

7. Conclusiones

1. “ALCANTARILLADOS” es una herramienta computacional que simula de manera integral el comportamiento hidráulico que se presenta en diferentes sistemas de alcantarillado por gravedad. Esto implica que el programa para simular el flujo no permanente incluye el proceso de convertir la lluvia en escorrentía directa.
2. El generar una herramienta informática que responda a las necesidades y alcances del mercado de ingeniería en América Latina, que esté desarrollada en su totalidad para ser operada en idioma español, y que esté a la altura de los mejores Software de su tipo a nivel mundial, habla de la capacidad de producción de software con calidad en las ciudades del tercer mundo.
3. Comparando los resultados obtenidos en “ALCANTARILLADOS” con los obtenidos con el programa de libre acceso EPASWMM, usando el ejemplo antes mencionado, está claro que los resultados son similares en los dos programas.

8. Agradecimientos

Los autores de esta investigación agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes por su apoyo económico, y al Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes – CIACUA por su colaboración.

9. Referencias

- Akan, A. O, Houghtale, R. J.** Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality. Editorial JOHN WILEY & SONS, INC. 2003.
- Chow, V. T, Maidement, D, Mays, L.** Applied Hydrology. Segunda Edición. Editorial Mc Graw Hill. 1956.
- Fread, D L.** “Chapter 10: Flow Routing”, in D. R. Maidment, ed., Handbook of Hydrology, McGraw Hill, New York, pp. 10.1 – 10.36, 1993.
- Hernández, G.** Programación e inclusión de un modelo lluvia-escorrentía en el programa “ALCANTARILLADOS”, Universidad de los Andes, Bogotá, 2006.
- Rosman, L.** 2004. Storm Water Management Model User’s Manual v 5.0. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati.