Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM

M.Sc. Ing. Jean Carlos Rincón Ortíz
Depto. de Ing. Hidráulica y Sanitaria, Decanato de Ing. Civil, UCLA, Venezuela.
e-mail: jcrincon@ucla.edu.ve

Ing. María Fabiana Muñoz
Decanato de Ing. Civil, UCLA, Venezuela
e-mail: ing.maria_fabiana_m@hotmail.com

RESUMEN
El diseño hidráulico de drenajes se ha realizado tradicionalmente de manera manual empleando el método racional y flujo uniforme. Dicho método no toma en cuenta la variabilidad temporal de la lluvia y está limitado para cuencas pequeñas. Ante estas desventajas se presenta una metodología para el diseño de sistemas de drenaje en urbanismos a través del software SWMM-5.0 donde es posible la modelación dual (drenaje superficial-alcantarillado), la inclusión del tiempo en el análisis y la no uniformidad del flujo. La metodología fue aplicada en la urbanización Copacoa, Estado Lara, Venezuela. Los resultados demostraron que el método es viable y factible de aplicar puesto que simula adecuadamente el flujo en calles y colectores, se obtienen diseños más económicos y permite el análisis de múltiples escenarios de una manera rápida.

Palabras clave: diseño, drenaje, modelo, sumidero, SWMM.

Hydraulic design of dual drainage systems using the SWMM model

ABSTRACT
The hydraulic design of drainage sewers has been performed traditionally using the rational method with uniform flow. This method does not take into account the temporal variability of rainfall and is limited to small watersheds. Therefore, a methodology has been developed for the design of drainage systems in urban areas using software SWMM-5.0, where dual modeling is possible (surface drainage, sewerage) as well as inclusion of time in the analysis and not uniform flow. The methodology was applied in the Copacoa East district, Lara State, Venezuela. The results showed that the method is viable and feasible to implement because it simulates the flow on roads and collectors properly, designs are less expensive and it can quickly analyze multiple scenarios.

Keywords: design, drainage, model, sink, SWMM.

recibido: Octubre 2012 | aprobado: Marzo 2013

INTRODUCCIÓN

Entre los principales impactos ocasionados por un inadecuado diseño de un sistema de drenaje están las inundaciones y daños a las propiedades y personas. Tradicionalmente, a nivel de urbanismo, suele diseñarse el sistema de drenaje empleando metodologías basadas en el uso del método racional para la estimación del caudal de diseño de cualquiera de los elementos que conforman el sistema. Sin embargo, como bien es sabido, este método no toma en cuenta la variabilidad temporal de la lluvia, sobreestima el caudal de diseño a medida que aumenta el área de la cuenca y por lo general se dificulta el análisis de escenarios y alternativas. Por otra parte, el diseño de los elementos se realiza suponiendo flujo uniforme, lo cual también se aleja de la realidad dado que el flujo es no permanente y variado (remansos, resaltos hidráulicos, etc.).

Hoy en día, con el avance de la tecnología, se han desarrollado modelos matemáticos numéricos, de acceso gratuito, que permiten predecir con mayor precisión la respuesta de un sistema de drenaje a diferentes eventos de lluvia y de una forma más expedita. Dentro de estos modelos se encuentra el Storm Water Management Model (SWMM) el cual fue empleado en este trabajo. Desde su creación en 1971 ha tenido mejoras importantes hasta la fecha actual y son variadas las investigaciones realizadas con el uso de este modelo. Concha y Gómez (2009) proponen en su trabajo una aproximación a la modelización del drenaje dual utilizando SWMM 5.0, considerando en el esquema de red las calles y colectores conectados entre sí a través del sistema de captación y los pozos de registro. Por su parte Murcia y Gómez (2011) aplican este tipo de modelación para caracterizar hidráulicamente una cuenca en el área metropolitana de Barcelona, España.

El objetivo de este trabajo es aplicar la modelación dual en el desarrollo de una metodología para el diseño de sistemas de drenaje. Esta metodología será usada para la evaluación del drenaje existente en la urbanización Copacoa del Este, Cabudare, Estado Lara y el posterior diseño de colectores y sumideros que mejoren las condiciones de funcionamiento actuales. A su vez se establecen unas comparaciones con el método racional a fin de verificar su factibilidad de aplicación y las ventajas de la herramienta propuesta.

METODOLOGIA

A continuación se describe la metodología propuesta para la evaluación y/o diseño de un sistema de drenaje, específicamente en urbanismos aunque sin perjuicio de que pueda aplicarse a áreas de mayor extensión.

Levantamiento de la información requerida

Para la correcta aplicación del modelo de simulación se requiere contar con la siguiente información: datos de lluvias máximas para diferentes duraciones de la estación más cercana al sitio de estudio, levantamiento topográfico del urbanismo a nivel superficial y a nivel de alcantarillado (en caso de existir), información de los elementos de captación del drenaje superficial (sumideros), información sobre los posibles puntos de descarga del sistema a diseñar o evaluar.

Obtención del hietograma de precipitación de diseño

Los modelos de simulación toman en cuenta la variabilidad temporal de la lluvia, para ello es necesario construir el hietograma de precipitación de diseño, el cual depende inicialmente de dos parámetros como lo son el período de retorno de diseño y la duración de la lluvia. Una de las ventajas que presenta el uso de los modelos de simulación es el análisis de diferentes escenarios y alternativas de una manera muy rápida por lo que se sugiere crear 2 escenarios: el primero

enfocado a cumplir con la función complementaria del sistema de drenaje (libre tránsito de vehículos) y el segundo para verificar el cumplimiento de la función básica (protección a las propiedades y personas) (Bolinaga 1999). Dentro de cada escenario plantear diferentes alternativas que consisten en la evaluación del sistema de drenaje para diferentes duraciones de la lluvia, ante las cuales el sistema debe dar una respuesta satisfactoria: cumplir con las funciones especificadas en el diseño. Existen varios propcedimientos para la construcción de los hietogramas de precipitación, uno de ellos es el método de los bloques alternos (Chow 1981), el cual a su vez requiere de la construcción de la curva de intensidad-duración para los períodos de retorno a analizar. Esta información debe ser procesada.

Representación del sistema de drenaje urbano en un modelo numérico

El modelo bajo el cual se desarrolla esta metodología es el Storm Water Management Model (SWMM) V.5.0, modelo unidimensional que representa el comportamiento de un sistema de drenaje mediante una serie de flujos de agua y materia entre los principales módulos que componen un análisis medioambiental. Estos módulos y sus correspondientes objetos en el SWMM son los siguientes: el módulo de escorrentía que funciona con una serie de subcuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía y el módulo de transporte el cual analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores (EPA 2005). Los componentes físicos del primer módulo se corresponden con el pluviómetro y las sub-cuencas. El pluviómetro representa la lluvia y en él se introducen los datos de la misma (hietogramas de precipitación), las subcuencas representan las parcelas, conjunto de parcelas, manzanas, etc., dependiendo del nivel de precisión deseado, en todo caso, para cada subcuenca deben introducirse datos como área, ancho, pendiente, % de impermeabilidad, método de infiltración, curva número de las subcuencas, etc. Los componentes físicos del segundo módulo quedan representados por los nodos de conexión, los conductos, las salidas y los nodos de vertido. Los nodos de conexión para el drenaje superficial representan los nodos hacia donde descargan las subcuencas mientras que para el drenaje subterráneo estos representan las bocas de visita de los colectores y la conexión entre el drenaje superficial y subterráneo, ambos requieren como principal dato la cota del mismo. Los conductos constituyen los elementos por donde circulará el agua, en el drenaje superficial serán las calzadas, brocal-cuneta, acera y en el drenaje subterráneo los colectores. Los datos requeridos son la sección transversal, dimensiones, longitud, coeficiente de rugosidad de Manning, etc. Las salidas constituyen los elementos de conexión entre el drenaje superficial y el subterráneo (sumideros de ventana y/o rejas) cuyo comportamiento hidráulico queda definido por medio de la curva de descarga. Los nodos de vertido representan la condición de borde aguas abajo del sistema de drenaje en estudio, en otras palabras, las condiciones hidráulicas en el extremo aguas abajo (profundidad normal, profundidad crítica, nivel de agua conocido).

La figura 1 muestra la representación esquemática del sistema de drenaje de una calle en el modelo numérico, empleando los elementos anteriormente descritos (Murcia y Gómez 2011).

Como se mencionó en el párrafo anterior, los sumideros de ventana o de rejas se representan hidráulicamente en el modelo a través de la curva de descarga que se define como la curva que relaciona el caudal interceptado por un sumidero en función de la altura de agua sobre él (Concha y Gómez 2009). Para los sumideros de ventana, la curva de descarga se puede realizar a partir de las curvas de interceptación de los sumideros de ventana tipo INOS o según la metodología propuesta por FHWA (2009). A continuación se describe el procedimiento a seguir para la obtención de un par (h, Qi) de la curva de descarga de un sumidero de ventana en

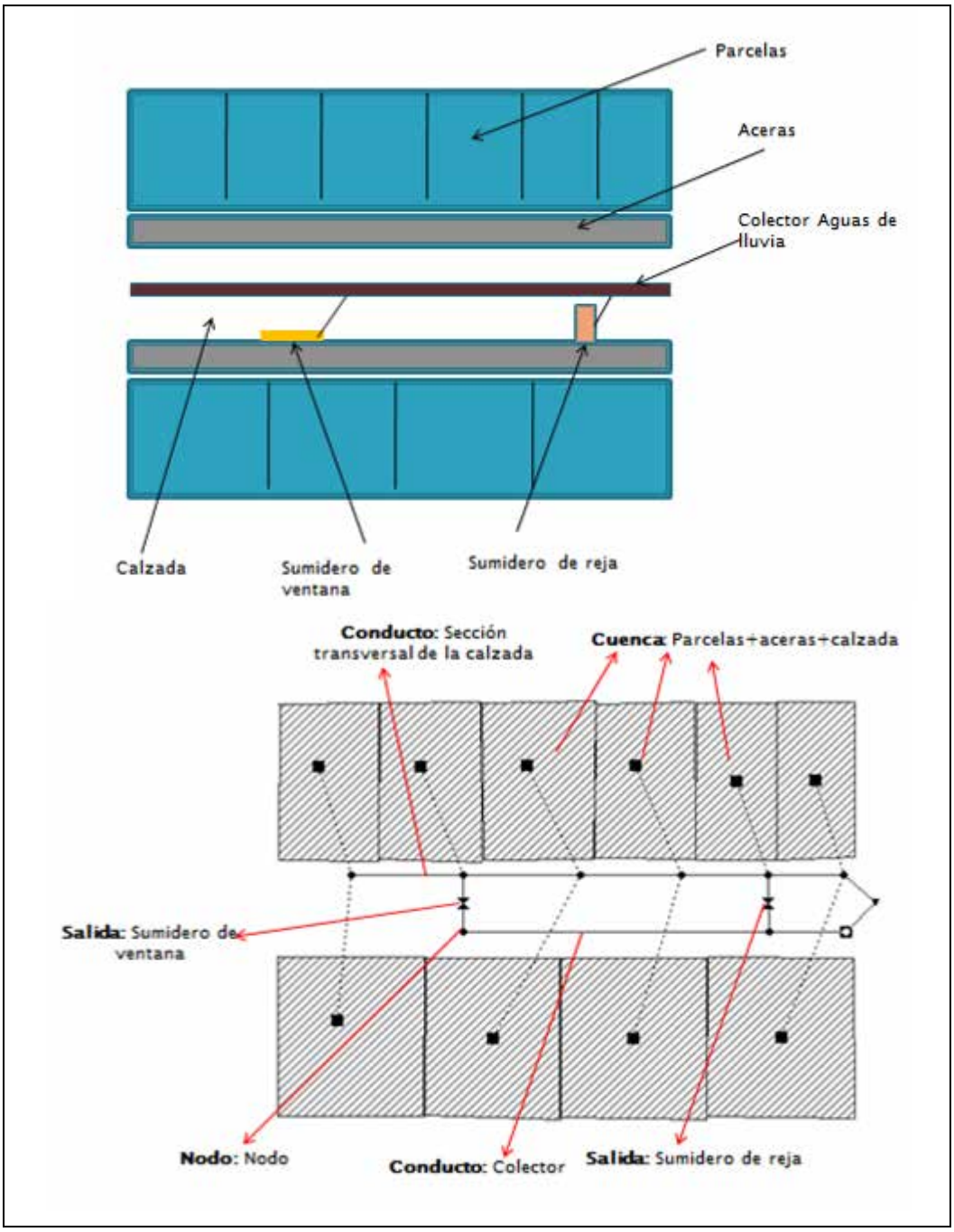

Figura 1. Esquema del sistema de drenaje representado en el modelo numérico SWMM

pendiente empleando el segundo caso, dicho procedimiento deberá repetirse tantas veces como se considere necesario.

-Suponer un caudal de circulación por la calzada (Q).

-Suponer el caudal que transita por fuera del brocal (Q_s).

-Calcular ecuaciones (1) y (2):

$$E_o = Q_w / Q \quad (1)$$

$$S_w = S_x + \frac{a}{W} \quad (2)$$

donde S_x es la pendiente transversal de la calzada, W es el ancho del brocal, $a = W/12$.

-Despejar la relación "T/W" de la siguiente expresión:

$$E_0 = \frac{1}{1 + \frac{S_w/S_x}{\left[1 + \frac{S_w/S_x}{T/W - 1}\right]^{2,67} - 1}} \quad (3)$$

-Calcular ecuaciones (4), (5) y (6):

$$T = W \cdot T/W \quad (4)$$

$$T_S = T - W \quad (5)$$

$$Q_S = K/n \cdot S_x^{1,67} \cdot S_L^{0,5} \cdot T_S^{2,67} \quad (6)$$

donde K=0,376 para el sistema internacional, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, S_L es la pendiente longitudinal de la calzada.

-Si el valor calculado de Q_S es igual al supuesto, Q_S es el valor correcto, de lo contrario repetir el procedimiento con el valor calculado.

-Calcular ecuaciones (7), (8), (9) y (10):

$$S_e = S_x + (a/W)E_o \quad (7)$$

$$L_T = K_T \cdot Q^{0,42} \cdot S_L^{0,3} \cdot (1/nS_e)^{0,6} \quad (8)$$

$$E = 1 - (1 - L/L_T)^{1,8} \quad (9)$$

$$Q_i = Q \cdot E \quad (10)$$

-La profundidad correspondiente al caudal interceptado se obtiene sustituyendo Q en la ecuación propuesta por Izzard (11) y despejando "Y".

$$Q = 0.00175 \cdot \frac{1}{S_x \cdot n} \cdot Y^{8/3} \cdot S_o^{1/2} \quad (11)$$

Si el sumidero de ventana o de reja se encuentra en un punto bajo se pueden emplear de igual manera los gráficos correspondientes, los cuales relacionan directamente la profundidad de agua en el sumidero versus el caudal interceptado por el mismo (Bolinaga 1979).

En cuanto a los sumideros de rejas, la curva de descarga del tipo INOS se puede determinar según las siguientes ecuaciones:

Tipo I en pendiente:

$$Q_i = 0{,}335 \cdot (S_o/n)^{1/2} \cdot (Y - 45S_x)^{3/2} \quad (12)$$

Tipo II en pendiente:

$$Q_i = 0{,}614 \cdot (S_o/n)^{1/2} \cdot (Y - 75S_x)^{3/2} \quad (13)$$

En punto bajo:

$$\text{Para } Y \text{ á} 15\text{cm}: \quad \frac{Q_i}{P} = 1{,}66 \acute{} \ Y^{3/2} \qquad (14)$$

$$\textit{Para } Y \text{ ñ} 45\text{cm}: \quad \frac{Q_i}{A} = 300 \acute{} \ Y^{3/2} \qquad (15)$$

donde Q está en L/s, Y (cm) es la profundidad del agua en el brocal. En la transición entre 15 y 45 cm se utiliza un tramo recto.

Análisis hidráulico del sistema de drenaje

La evaluación hidráulica se realiza una vez se tiene cargada la representación gráfica del sistema con la data requerida. Dicha evaluación puede realizarse bajo tres enfoques claramente explicados por la EPA (2005): modelo de flujo uniforme (más simplificado) el cual supone la ocurrencia en los conductos del flujo uniforme para cada incremento de tiempo, onda cinemática el cual es una simplificación de las llamadas ecuaciones de Saint Venant y onda dinámica (el más completo) que resuelve las ecuaciones completas de continuidad y cantidad de movimiento para flujo no permanente. Es importante mencionar que la explicación realizada para la modelación de los sumideros se ha hecho bajo el enfoque de onda dinámica que resulta ser el más preciso. En el caso de los otros dos enfoques, los sumideros no pueden ser modelados bajo esta metodología.

El análisis debe consistir, en una primera fase, en una calibración del modelo la cual solo es posible si se cuenta con una estación de medición de caudales a nivel de eventos y cuya calibración se basa en ajustar parámetros del modelo como por ejemplo el valor de curva número (Sánchez y Martínez 2012). En caso contrario, que es lo más común, los parámetros deben ser definidos en función de lo observado en imágenes satelitales, inspección en el sitio, planos, etc. La segunda fase comprende la evaluación hidráulica de la situación actual del sistema de drenaje en estudio, analizando la respuesta hidráulica del sistema ante diferentes tormentas de proyecto. Para el caso del diseño del drenaje de un nuevo urbanismo este análisis se basa en la modelación numérica del sistema de drenaje superficial y en el caso de la evaluación de un sistema de drenaje existente deberá realizarse según la información levantada en campo, la modelación dual del drenaje superficial y redes de alcantarillado.

Desarrollo de la propuesta

En el caso de que el estudio requiera el desarrollo de una propuesta, la misma debe realizarse en función de los resultados obtenidos durante el análisis de la situación actual y de los parámetros establecidos para el diseño de los sumideros y colectores, los cuales deben verificarse mediante la modelación de las diferentes alternativas planteadas para la solución del problema.

CASO DE ESTUDIO

La metodología propuesta fue aplicada en la evaluación del sistema de drenaje de un urbanismo existente. El caso de estudio corresponde con la urbanización Copacoa del Este, Municipio Palavecino del Estado Lara, Venezuela.

Dicho urbanismo ha presentado, en diferentes oportunidades, inundaciones que han ocasionado graves daños de bienes materiales. En la figura 2 se pueden observar los niveles de inundación alcanzados en la calle 3 del urbanismo durante un evento de lluvia ocurrido en el año 2008, y según información de los mismos habitantes de la zona, situaciones similares ocurren todos los años.

Descripción del urbanismo y su sistema de drenaje

La urbanización es un conjunto cerrado de área 7.4 Ha, conformado por 274 viviendas de 105 m^2 aproximadamente. Las parcelas presentan un 85% de construcción. El sistema de drenaje consiste en un sumidero de 4 rejas tipo INOS de 1.50mx0.90m ubicado en un punto bajo de la calle 3 del urbanismo, el cual direcciona el agua hacia el buco Mayalero a través de dos tuberías de 15 pulgadas de diámetro que se encuentra paralelo a la calle antes mencionada.

Figura 2. Inundaciones de la calle 3 de la urb. Copacoa de Este durante evento de lluvia

Aplicación de la metodología propuesta

· *Levantamiento de la información requerida*. Se realizó el proceso de selección de la estación pluviométrica, para lo cual se ubicaron las estaciones pluviométricas más cercanas al área de estudio resultando con un 100% de influencia la estación 1206 Barquisimeto-Oficina, dicha información fue suministrada por el Ministerio del Ambiente. Luego se realizó el levantamiento topográfico en la urbanización Copacoa del Este donde se obtuvieron las cotas de los puntos necesarios para la realización del estudio, mediante el uso de una estación total y se realizó la inspección del sitio para evaluar visualmente el sistema de drenaje actual y su sitio de descarga.

· *Obtención del hietograma de precipitación de diseño*. El procedimiento aplicado para la obtención de los hietogramas de precipitación de diseño fue el siguiente: se seleccionó como período de retorno Tr=2 años para la función complementaria y Tr=10 años para la función básica (Bolinaga 1999). Para la duración de la lluvia se calculó el tiempo de concentración de la ruta más larga empleando la ecuación de Kirpich resultando 28 minutos, se elaboraron hietogramas de precipitación de 20 minutos, 30 minutos y 60 minutos de duración para la evaluación del sistema de drenaje actual y propuesto. Con los datos de lluvia se realizó el ajuste probabilístico de los datos, resultando una distribución tipo Gumbel, para luego construir las curvas de intensidad-duración de los períodos de retorno antes mencionados, que fueron empleadas para la obtención de los hietogramas de precipitación mediante el método de los bloques alternos. Los resultados obtenidos para una duración de 60 minutos se muestran en la figura 3.

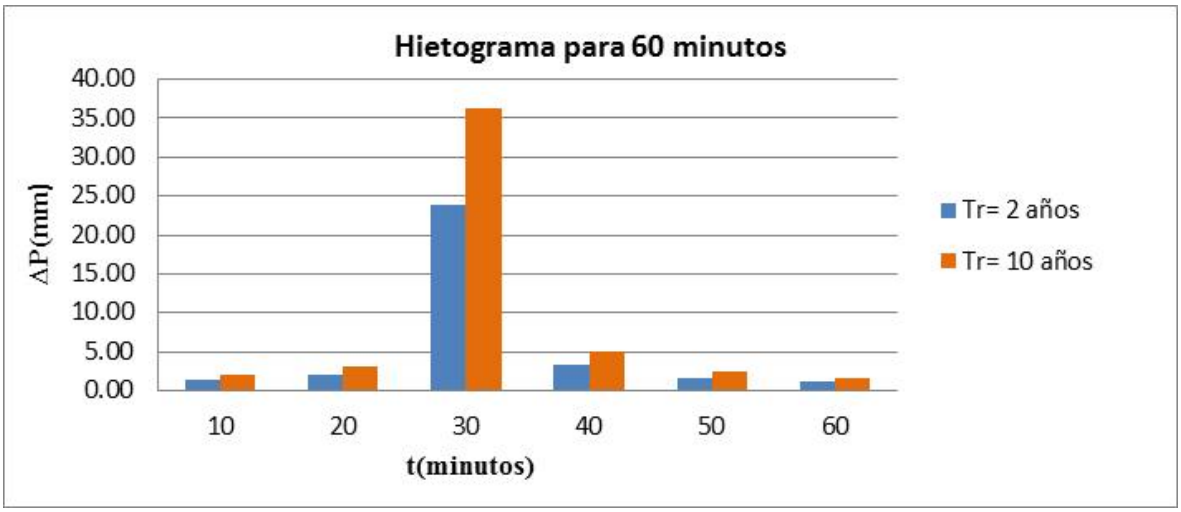

Figura 3. Hietogramas de precipitación de diseño para 2 y 10 años de período de retorno y 60 minutos de duración

· *Representación del sistema de drenaje urbano* en SWMM V5.0. El sistema de drenaje en estudio quedó conformado por un pluviómetro donde se cargaron: los diferentes hietogramas de precipitación para el análisis, las 161 sub-cuencas que esquematizan las parcelas, terrenos, etc., los datos geométricos de las cuencas (áreas, ancho de cuenca y % de área impermeable que fueron obtenidos de los planos del urbanismo y digitalizados en Autocad), los coeficientes de rugosidad de Manning (definidos en función del material), el método de infiltración empleado (que fue el de la curva número), los 167 nodos que representan los puntos en la calzada hacia donde drenan las cuencas, las cotas de los nodos extraídas del levantamiento topográfico, los 146 conductos que simulan el drenaje superficial a través de la calzada en el urbanismo cuya sección quedó definida del levantamiento topográfico, una salida para simular el sumidero de reja y un vertido que representa la condición de borde en el extremo aguas abajo (descarga a una quebrada). En la figura 4 se observa el sistema de drenaje esquematizado en el modelo SWMM. Para la curva de descarga del sumidero de reja se empleó la ecuación antes descrita.

· *Análisis hidráulico del sistema de drenaje*. Desarrollado el montaje del sistema de drenaje en el modelo numérico se procedió a realizar las corridas a fin de evaluar su situación actual. Para ello, se realizaron las corridas para la función básica y función complementaria, en concordancia con los hietogramas de precipitación antes descritos. Los parámetros de corrida empleados en el modelo fueron los siguientes: método de cálculo hidráulico: onda dinámica, tiempo de simulación: dos horas, intervalo de tiempo para el cálculo hidráulico: un seg, intervalo de tiempo para análisis de resultados: un minuto. Las corridas fueron aceptadas si los errores de continuidad tanto para la escorrentía superficial como para el cálculo hidráulico no superaban el 10% como en efecto ocurrió.

RESULTADOS

Para evaluar las condiciones hidráulicas actuales se fijó como parámetro de evaluación el nivel del agua en la calzada. Para la función complementaria la altura máxima de agua permitida se estableció en 8 cm y para la función básica en 16 cm (altura de la acera) para así evitar daños en las viviendas por inundación.

En la figura 5 se pueden observar los niveles máximos de agua obtenidos en los diferentes nodos distribuidos a lo largo del urbanismo, para los hietogramas de precipitación

correspondientes a la función complementaria (Tr=2años). Allí se puede evidenciar claramente que para duraciones de lluvia entre 20 y 30 minutos se obtienen los niveles máximos de agua, y a medida que aumenta la duración de la lluvia, los niveles en la calzada disminuyen.

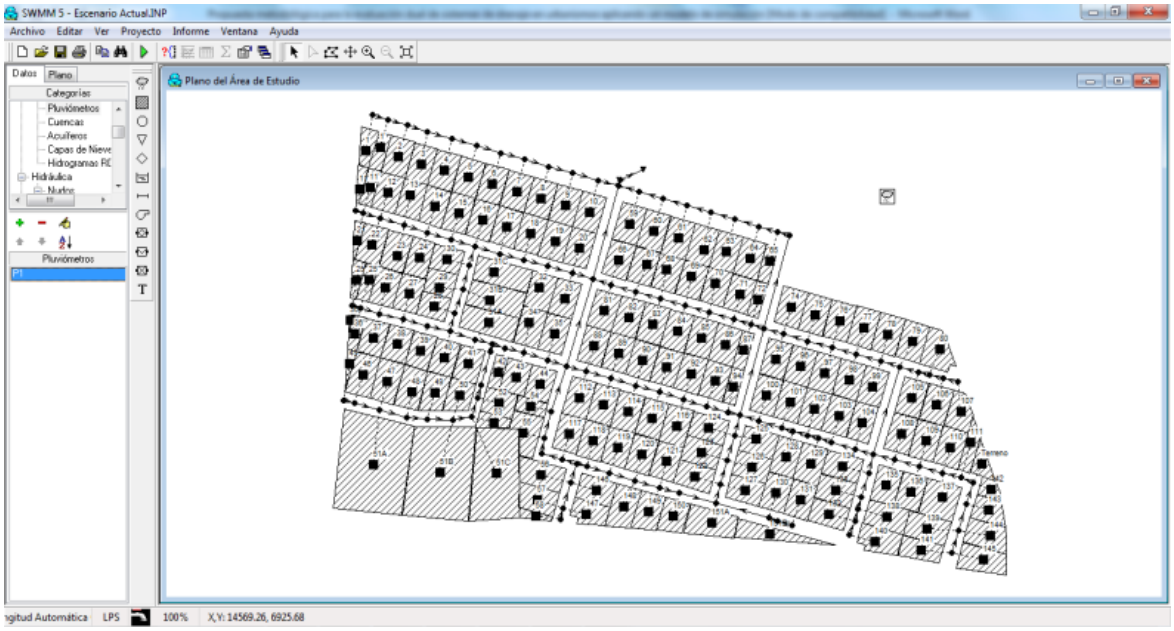

Figura 4. Representación del sistema de drenaje del urbanismo en SWMM

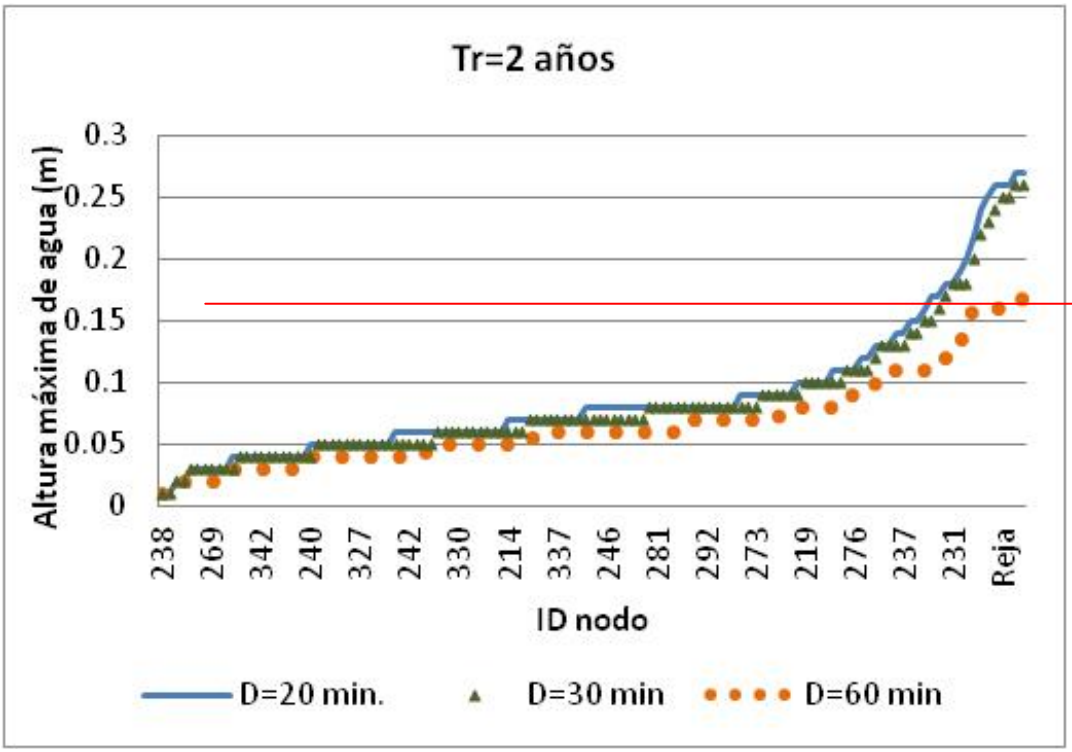

Figura 5. Resultados del modelo para situación actual (niveles máximos de agua en calzada) para un período de retorno de 2 años

La figura 6 muestra los resultados más desfavorables obtenidos para los eventos de 2 años y 10 años de período de retorno, los cuales se corresponden con una duración de lluvia de 30 minutos como se mencionó en el párrafo anterior. Es de hacer notar que ya para el chequeo del cumplimiento de la función complementaria se obtienen niveles por encima de los 16 cm que se corresponden con la altura de la acera, generando por consiguiente inundaciones y daños en las viviendas para periodos de retorno bastante bajos, dicha situación se corresponde con la realidad.

El modelo matemático indica que la calle 3 donde se ubica el sumidero de reja, es la más afectada ya que hacia ella converge todo el drenaje de la urbanización. Para un período de retorno de 2 años, el nivel máximo de agua esperado es de 28 cm mientras que para un período de retorno de 10 años han de esperarse 49 cm de profundidad del agua, y en este caso no solo la calle 3 resulta afectada sino también la calle 2, lo que acrecienta aún más los daños esperados.

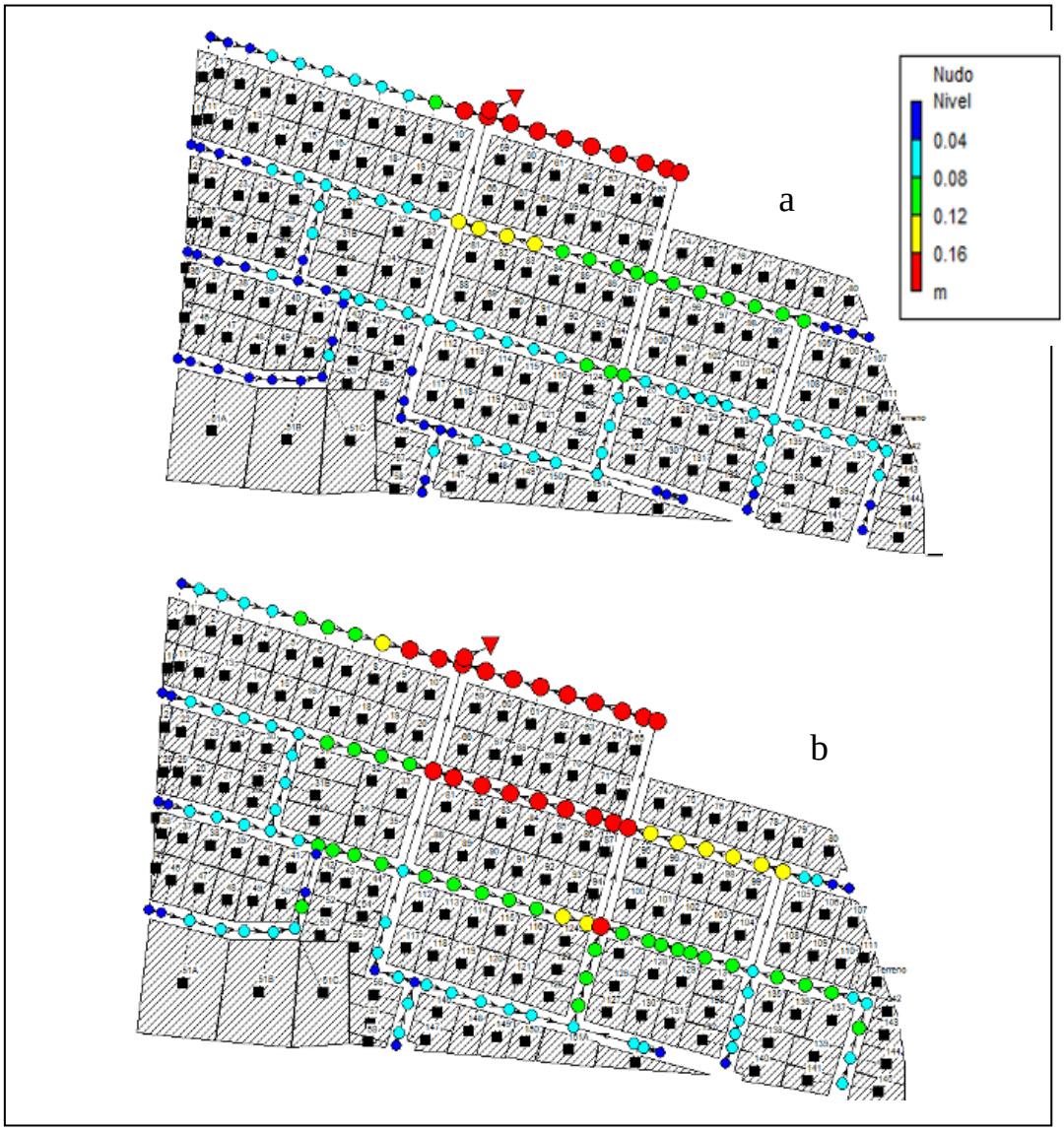

Figura 6. Resultados del modelo para situación actual (niveles máximos de agua en calzada) para a) Tr = 2 años, b) Tr = 10 años

En cuanto a la descarga, se pudo constatar en los resultados obtenidos que los dos colectores de 15” que transportan el agua desde el único sumidero de reja hasta el buco Mayalero trabajan a sección plena durante un lapso de tiempo para cualquiera de los escenarios analizados (diámetro del colector=38 cm), sin embargo, pudo verificarse a través del modelo que el problema existente se debe a la falta de capacidad de captación del único sumidero existente y no de conducción de los colectores.

Para el desarrollo de la propuesta se fijó como prioridad el cumplimiento del parámetro establecido para la función básica (16 cm como nivel máximo de agua permitido), ya que por las condiciones del urbanismo, como la de ser un conjunto cerrado y completamente residencial no presenta alto tránsito vehicular y la función complementaria no requiere ser verificada. En función de esto y después del chequeo de varias alternativas se formuló la propuesta que consistió en la colocación de 8 sumideros de rejas en calzada conformado por 4 rejas tipo INOS de 1.50 x 0.90 m cada uno (ver figura 7) y 3 puntos de descarga al buco. En cuanto al diseño de los colectores se fijaron como criterios de diseño lo establecido por la gaceta técnica Nº 5318 referente a las normas generales para el proyecto de alcantarillados resultando: 15,80 m de diámetro 0,83m (33”), 62,80 m de diámetro 0,91m (36”) y 129,40 m de diámetro 1,06m (42”).

En las figuras 8 y 9 se muestran los niveles en la calzada obtenidos con la propuesta para la función básica (Tr=10 años) y las diferentes duraciones de lluvia. Se puede observar que con la implementación de la propuesta todo el drenaje superficial del urbanismo produce niveles iguales o menores que 16 cm que fue la máxima profundidad permitida (altura de la acera) y establecida como criterio de diseño a fin de evitar inundaciones en las viviendas. Los nodos que se observan de color rojo corresponden a la red de alcantarillado.

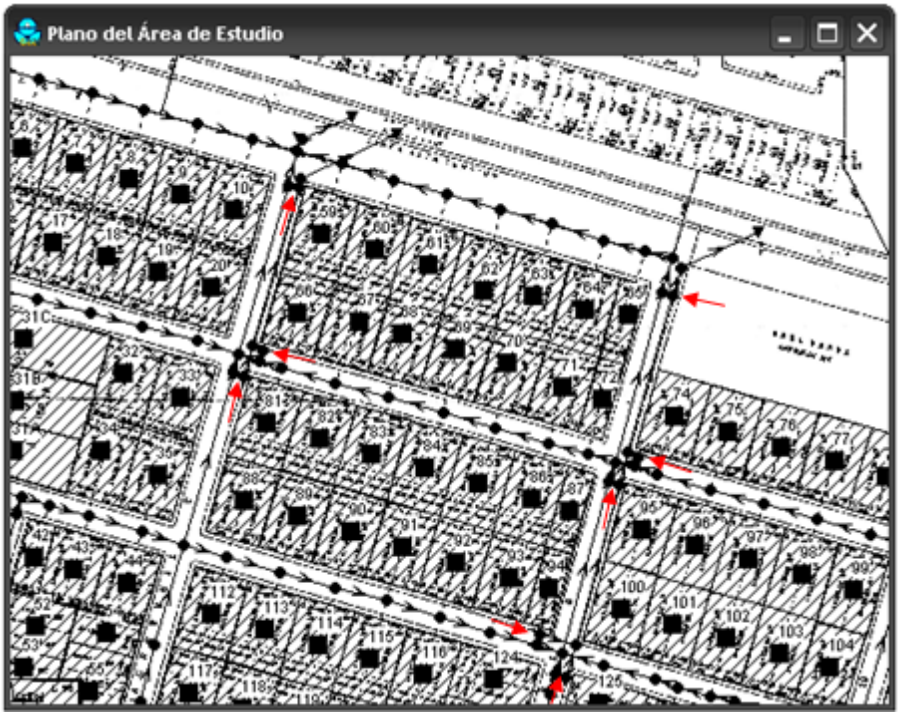

Figura 7. Ubicación en la propuesta de los sumideros de rejas.

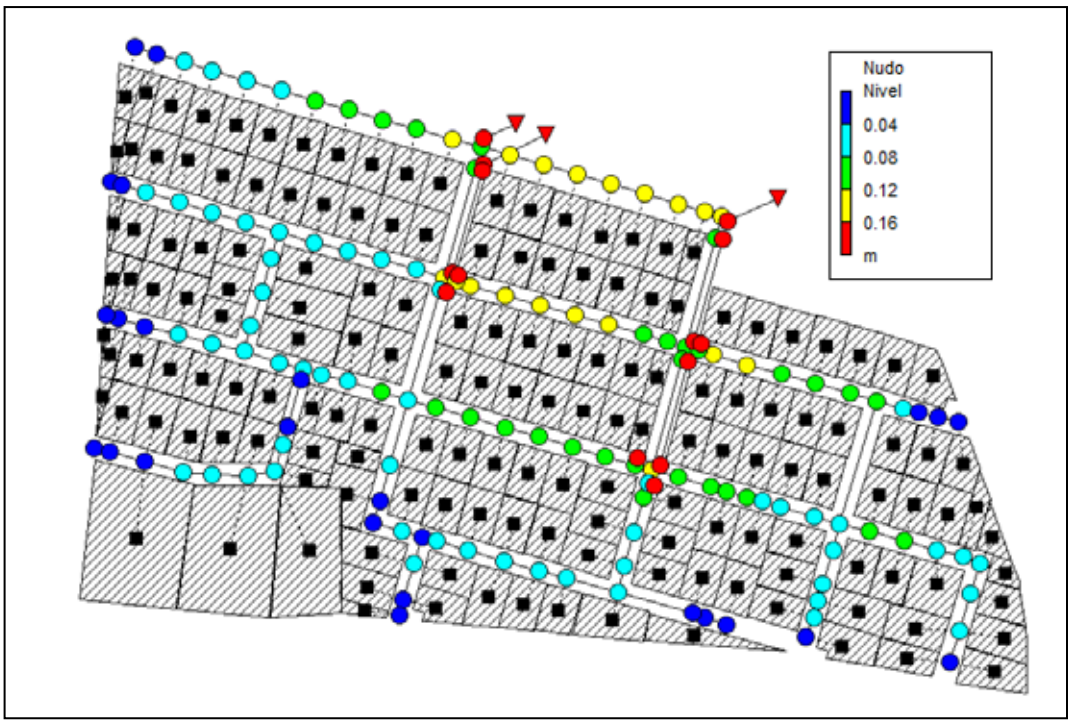

Figura 8. Resultados del modelo para la propuesta (niveles de agua en la calzada) para Tr = 10 años

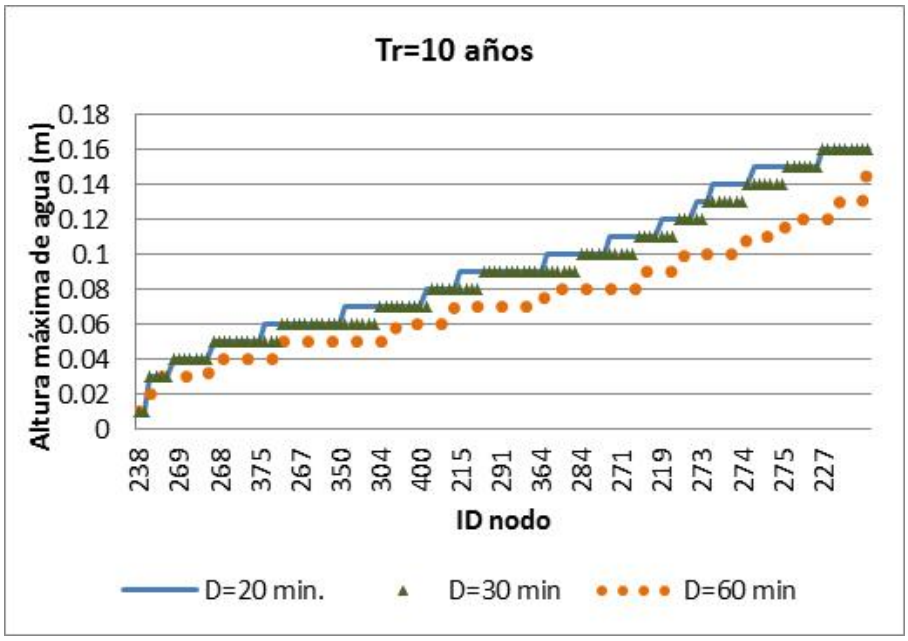

Figura 9. Resultados del modelo para la propuesta (niveles máximos de agua en calzada) para un período de retorno de 10 años

COMPARACIÓN CON EL MÉTODO TRADICIONAL

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos por el modelo con los obtenidos aplicando el método racional y flujo uniforme con la finalidad de mostrar las bondades de esta metodología. El método racional establece que el caudal máximo instantáneo puede ser calculado según la ecuación (16), donde *C* es el Coeficiente de escorrentía, *I* es la intensidad de la lluvia y *A* es el área de la cuenca. Para el flujo uniforme se empleó la ecuación de Manning (ecuación 17), donde *n* es el coeficiente de rugosidad de Manning, *A* es el área mojada de la sección transversal, *R* es el radio hidráulico y *So* es la pendiente de fondo del canal.

$$Q = C \cdot I \cdot A \qquad (16)$$

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot So^{1/2} \qquad (17)$$

Para ello se seleccionaron tres puntos del urbanismo: el primero ubicado en la intersección de la Calle 4A con transversal 9 hacia la cual drena la cuenca ubicada en la parte derecha del urbanismo, el segundo punto ubicado en la intersección de la Calle 4A con transversal 8 hacia la cual drena la cuenca ubicada en la parte izquierda del urbanismo y el último punto ubicado en la intersección de la Calle 3 con transversal 8 hacia donde drena toda la cuenca conformada por el urbanismo (ver figura 10). En Autocad se delimitaron las respectivas cuencas y se calcularon las áreas correspondientes.

El cálculo de la intensidad de la lluvia se realizó estimando el tiempo de concentración de cada una de las cuencas delimitadas y empleando la curva intensidad-duración para 10 años de período de retorno. El coeficiente de escorrentía se estimó como 0,85 conocidas las características de las cuencas.

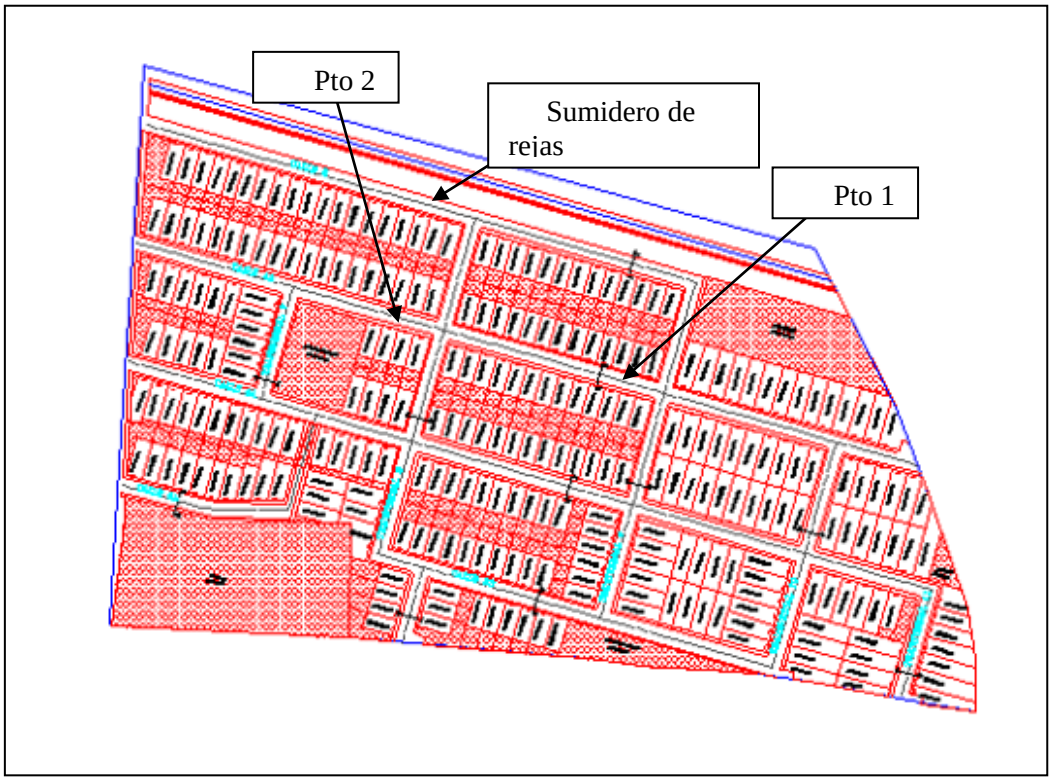

Figura 10. Ubicación de puntos para comparación con el método tradicional

El cálculo de la profundidad del agua se realizó bajo el enfoque de flujo uniforme y se emplearon los siguientes datos: el caudal obtenido del método racional, el coeficiente de rugosidad de Manning=0,015 (asfalto y concreto), la sección transversal y la pendiente de fondo se obtuvieron del levantamiento topográfico.

Los resultados obtenidos por el método tradicional fueron comparados con los niveles y caudales obtenidos en la corrida para 10 años de periodo de retorno y 30 minutos de duración de la lluvia. Estos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados obtenidos por el método tradicional y SWMM

		Caudal pico (L/s)			Niveles (m)	
Punto	Ubicación	Método Racional	SWMM	% dif	Flujo Uniforme	SWMM
1	Intersección Calle 4A con transversal 9	2745,86	2263,76	17,56	0,23	0,16
2	Intersección Calle 4A con transversal 8	2315,56	2049,38	11,50	0,21	0,19
3	Intersección Calle 3 con transversal 8	4732,10	3161,33	33,19	0,36	0,49

Como puede verificarse en la tabla 1, en todos los puntos analizados se obtuvo un mayor caudal por el método racional en comparación con el obtenido por el modelo. Es de hacer notar que para el punto 3, donde el área de la cuenca es superior, la diferencia en % de los caudales es la más alta, lo que permite afirmar que mientras mayor es el área de la cuenca mayor es la sobrestimación del caudal por el método racional. En cuanto a la profundidad del flujo, en los puntos 1 y 2 y suponiendo flujo uniforme se obtuvieron profundidades de agua mayores que las obtenidas en SWMM, lo que resulta lógico puesto que el caudal es más alto por el método racional, sin embargo, en el punto 3 no se cumple esta correspondencia ya que aunque el caudal obtenido por el método racional es mayor se obtuvo una profundidad menor. Esto se debe a que en la calle 3 hay un remanso producido por la falta de capacidad del sumidero allí ubicado. Esto evidencia la importancia de emplear este tipo de modelos puesto que muestra un comportamiento real del flujo tomando en cuenta los efectos de remanso e interacción con los sumideros existentes, cosa que un flujo uniforme no considera por ser la hipótesis de flujo más alejada de la realidad al suponer condiciones ideales como pendiente, caudal, sección y material constantes.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló una metodología para el diseño de sistemas de drenaje en urbanismos tomando como base la modelación dual en el modelo matemático SWMM v5.0, que consiste en el movimiento simultáneo del flujo en las calles como en las redes de alcantarillado y el intercambio de flujo entre los subsistemas y bajo el enfoque de onda dinámica la cual resuelve las ecuaciones completas de Saint Venant para el flujo no permanente en canales.

- El uso del modelo numérico, en ventaja respecto al método tradicional, permitió predecir con mayor precisión el comportamiento hidráulico del sistema de drenaje existente en la

urbanización Copacoa de Este, evaluar su situación actual y analizar desde el punto de vista hidráulico los problemas existentes, para formular las mejoras del mismo.

- La metodología aplicada en el caso de estudio permitió detectar mediante el análisis de la situación actual un problema de insuficiencia de elementos de captación, debido a que el único sumidero de reja existente no cuenta con la capacidad necesaria para drenar las aguas que llegan a él; en función de esto se generaron diferentes propuestas de mejoras las cuales fueron verificadas a través del modelo, resultando la más eficiente desde el punto de vista hidráulico y económico, la colocación de ocho sumideros de rejas en calzada localizados en diferentes calles del urbanismo y la conducción por medio de colectores que también fueron diseñados siguiendo los criterios establecidos por la norma como el chequeo de la velocidad y colectores trabajando a superficie libre. Es evidente la ventaja que ofrece el uso de estas herramientas en la toma de decisiones para mejoras o propuestas en un sistema de drenaje ya que permiten evaluar diferentes escenarios de una manera más expedita.

- La comparación realizada con el método tradicional permitió concluir que, en el método racional, al aumentar el área de la cuenca aportante al sitio de análisis, mayor es la sobrestimación del caudal, por consiguiente, mediante la metodología propuesta en este trabajo se obtienen diseños más económicos y ajustados a la realidad, ya que un menor caudal se traduce en menor diámetro de colectores y menor número de sumideros.

- Se recomienda aplicar la metodología propuesta en urbanismos donde se cuente con mediciones simultáneas de eventos de lluvia y de caudales, a fin de poder realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo y una calibración más adecuada.

REFERENCIAS

Bolinaga J. (1979). “Drenaje urbano”, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas, Venezuela

Bolinaga J. (1999). “Proyectos de Ingeniería Hidráulica”, Volumen 2, Fundación Polar. Caracas, Venezuela.

Chow V. T. (1981). “Hidrología aplicada”, McGraw Hill Interamericana.

Concha R. y Gómez M. (2009) “Una aproximación a la modelización del drenaje dual urbano mediante Epa SWMM 5.0.”, Jornadas de Ingenieria del Agua 2009, pp. 165-166. Madrid, España.

EPA (2005). “User’s Manual, SWMM 5.0”. Environmental Protection Agency, EPA, USA.

FHWA (2009). “Urban Drainage Design Manual”. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-NHI-10-009, 478 pp. USA.

Murcia A. y Gómez M. (2011). “Estudio de la cuenca de La Riereta en Sant Boi de Llobregat mediante un modelo de drenaje dual utilizando SWMM 5”. Tesis de Maestría. Universitat Politecnica de Catalunya. España.

Sánchez A. y Martínez Y. (2012). “Inundaciones pluviales en una cuenca urbana aplicando el método de ponderación mixta”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXIII, No. 2, May-Ago 2012, pp. 90-105.