

APLICACION DEL MODELO SWMM PARA EL DISEÑO DE DISPOSITIVOS CONTROL DE CAUDALES MÁXIMOS EN CUENCAS URBANAS PARA TORMENTAS DE DISEÑO DE ESPECTRO COMPLETO.

Francisco Javier Ramos Vernieri^a, Raul Pedraza^b, Juan B. Sciortino^a

^a *Facultad de Ingeniería, Cátedra Hidráulica Aplicada, Universidad Nacional de Salta (UNSa)
Avenida Bolivia, 5150, 4400 Salta, Argentina
e-mail: franciscojavierramos@yahoo.com.ar, <http://www.unsa.edu.ar>,*

^b *Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Cátedra Análisis Hidrológicos II: Agua Superficial,
Universidad Nacional del Litoral, Pellegrini 2750, 3000 Santa Fe, Argentina,
rpedraza@fich.unl.edu.ar, <http://www.unl.edu.ar/>*

Palabras Claves: Prácticas de Mejor Manejo, Técnicas Compensatorias de Infiltración-Retención, dispositivo de almacenamiento.

Resumen: En este trabajo se presentan los experimentos numéricos realizados con el modelo SWMM v.5.0 (Storm Water Management Model, U.S. Environmental Protection Agency, 2004) a partir de cual se estudió la eficiencia hidráulica de un dispositivo de detención tipo para tormentas de diseño de espectro completo, para distintos escenarios posibles de cuencas urbanas del NOA, considerando 18 escenarios de cuencas urbanas, que resultan de combinar: tres impermeabilidades (30 %, 50 % y 80 %), tres pendientes de cuenca y dos grupos hidrológicos de suelos (B y C) del método del Número de Curva (SCS, 1984), todos para un área de aportes de referencia de 100 ha. Los experimentos se realizaron considerando dos hipótesis para los parámetros físicos y de cobertura: a) sin variación espacial entre subcuencas y b) con variación espacial. Para cada escenario e hipótesis de variabilidad espacial de parámetros, se elaboró el diseño hidráulico del dispositivo de detención y se calculó su eficiencia hidráulica, expresada como cociente entre el porcentaje de atenuación del caudal pico y el volumen de almacenamiento requerido. En base a los resultados obtenidos, se ajustaron relaciones que expresan la eficiencia y los principales parámetros de diseño del dispositivo en función de parámetros físicos y de cobertura de cuenca. Se realizó un análisis de la incidencia de la variabilidad espacial de los parámetros físicos y de cobertura en las relaciones obtenidas. Se calibró el modelo sobre esta cuenca en base a eventos precipitación-escorrentía observados y se realizó un análisis de la incidencia de la variabilidad espacial de los parámetros físicos y de cobertura en los resultados de la simulación. Las relaciones obtenidas pueden ser extrapoladas a otras cuencas urbanas del NOA que carezcan de datos de escurrimiento, para determinar en forma preliminar la eficiencia y los principales parámetros de diseño de dispositivos en función de las características físicas y de cobertura de las cuencas de aplicación.

INTRODUCCION

Los sistemas de drenaje urbanos son necesarios en el desarrollo de áreas urbanas debido a la interacción entre las actividades humanas y el ciclo del agua. Desde un sistema urbano puede observarse que proviene dos tipos de agua, por un lado la generada por aguas residuales y la otra por el escurrimiento pluvial.

Se denomina red de alcantarillado al sistema de estructuras y tuberías usadas para la evacuación de aguas residuales. Esta agua pueden ser albañales (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvia (alcantarillado pluvial) desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se disponen o tratan (Macor J. 2008).

Hasta no hace mucho tiempo atrás, los sistemas de desagüe pluvial urbano se basaban principal y únicamente en el diseño de un sistema de alcantarillado que consiste en un conjunto de obras e instalaciones destinadas a dar flujo a las aguas provenientes de las precipitaciones pluviométricas o residuales, procurando eliminarla lo más rápidamente posible sin tener en cuenta calidad, cantidad o afectación del recurso hídrico y el medio receptor. Este tipo de sistema está constituido principalmente por:

- Canales y Tuberías: son conducciones generalmente diseñadas a gravedad, a cielo abierto o enterradas, que se utilizan para enviar el agua precipitada hacia cuerpos receptores y alejarla lo antes posibles del ámbito urbano. Estas conducciones según su grado de importancia pueden ser conducciones primarias o secundarias.
- Rejas o imbornales: son los elementos que permiten captar el agua escurrida y enviarlas hacia los canales o tuberías.
- Cajas de paso o de conexión: hechas con el objeto de permitir la unión de galerías con tubos de conexión o destinadas a insertar una rebaja en la pendiente de la galería.
- Pozos de inspección: que son dispositivos localizados en lugares convenientes del sistema colector con el fin de permitir la inspección y limpieza de tuberías, cambio de pendiente, de dirección y de diámetro de las mismas, así como unión de esta con los tubos de conexión.

Fruto de estas prácticas, los ríos han perdido su riqueza natural y su capacidad de respuesta ante las crecidas, mientras que los sistemas de alcantarillado se ven incapaces de absorber la cantidad de agua adicional procedente de las zonas de nuevo desarrollo urbano (Gómez et al., 2004). Esto trae aparejada consecuencias directas en las erosiones ribereñas, en la calidad del agua de los medios receptores, incremento de las inundaciones en las urbanizaciones entre otros.

Estos métodos tradicionales de drenaje urbano presentan problemas y carencias que pueden solucionarse mediante el uso de métodos de drenaje sostenible. Esto supone hacer un esfuerzo, no en concentrar las aguas pluviales lo antes posible, sino en hacer frente a la escorrentía en pequeñas cuencas que permitan el tratamiento completo desde su origen.

El drenaje urbano sostenible o mejores prácticas de gestión del agua, tiene como objetivo principal proteger y mejorar la calidad del agua, evitar las inundaciones, y permitir la recarga de los acuíferos y el desarrollo urbano de calidad en zonas donde el sistema de alcantarillado

existente está a punto de saturarse (EPA, 1999).

Todo esto se consigue haciendo frente a la escorrentía desde el momento que la lluvia toca el suelo. La gestión de las aguas pluviales se fundamenta en tres pilares: la laminación de la cantidad de agua, la mejora de su calidad mediante procesos naturales, y el servicio al ciudadano con la mejora del paisaje urbano y la recuperación de hábitat naturales dentro de las ciudades (Fernández et al., 2003).

El desarrollo urbano sostenible o desarrollo de bajo impacto (Low Impact Development) engloba un conjunto de técnicas específicas referidas al drenaje urbano conocidas como SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) en el Reino Unido, BMPs (Best Management Practices) en Estados Unidos o Mejores Prácticas de Control (MPC) en los países hispano parlantes (Jiménez, 1999).

La problemática de las inundaciones urbanas afecta directa o indirectamente la vida y las actividades de gran cantidad de personas en el mundo. Una parte considerable del presupuesto de obras de los organismos públicos se destina a la construcción, mantenimiento, operación y rehabilitación de sistemas de drenaje urbano. A estos costos deben adicionarse los daños anuales por inundación de viviendas e infraestructura, deterioro de la calidad de vida e incluso, en situaciones no extraordinarias, pérdida de vidas humanas.

Durante mucho tiempo, la solución de los anegamientos se encaró a través de la ejecución de obras de drenaje, para remover el agua pluvial del área urbana de la forma más eficiente posible. La experiencia indica que las soluciones más convenientes se alcanzan a partir de una compresión más integrada de los procesos. A partir de la década del '70, en los países desarrollados se fue extendiendo el concepto del *manejo del agua pluvial urbana*, conjunto planificado de medidas estructurales y no estructurales destinadas a administrar el agua pluvial de una manera integral, racional y sustentable.

Bajo este concepto, el drenaje es concebido como un subconjunto del manejo e interrelacionado con otros propósitos, tales como la regulación de crecidas, el mejoramiento de la calidad de agua pluvial, el control de erosión en cursos de agua receptores, la creación o conservación de espacios abiertos para recreación y otros.

Los *dispositivos de detención* permiten el almacenamiento temporario del agua, la que es liberada por una salida controlada. De este modo, es posible atenuar el hidrograma de entrada, disminuyendo y atrasando el pico. Los *dispositivos de retención* originan un almacenamiento de agua sin una salida o con una salida fuertemente regulada, tal que todo o una porción del hidrograma de entrada es almacenado por un período prolongado.

De acuerdo al *tamaño del área de aportes* al dispositivo, pueden distinguirse 2 tipos: a) *en la fuente* ("on site"), cuando el área de aportes es de pocas hectáreas, usualmente diseñados para controlar las tormentas intensas y de corta duración que generan caudales máximos y b) *regional* ("downstream storage"), cuando el área de aportes es de decenas a cientos de hectáreas. Estos dispositivos son los más comunes, principalmente superficiales.

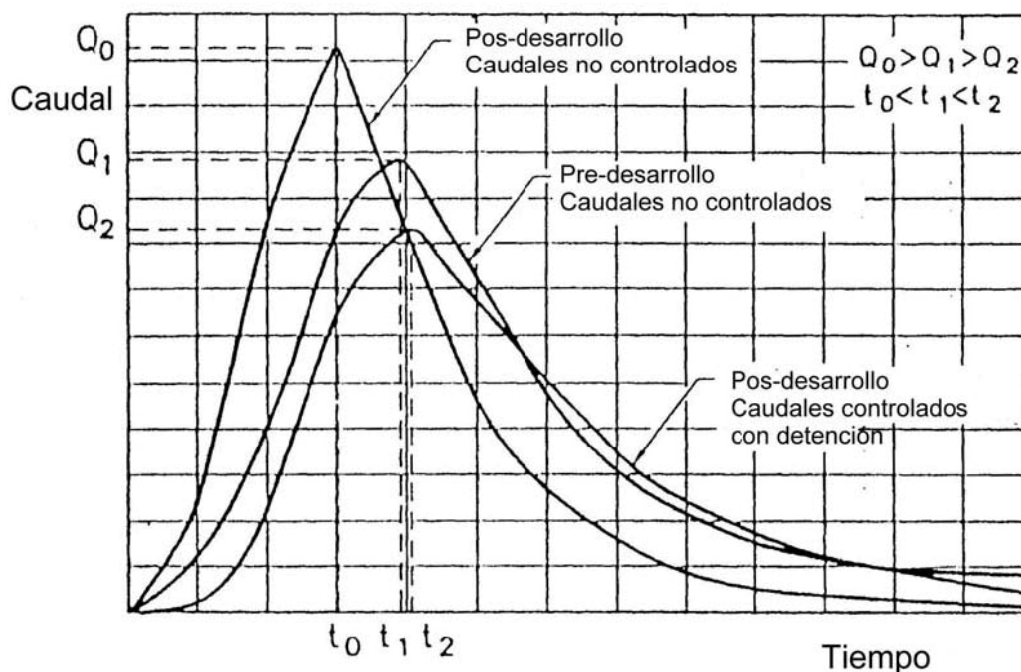
Los dispositivos de detención/retención, que no eran ampliamente usados antes, son ahora de uso más frecuente tanto en urbanizaciones pequeñas como grandes. Con la incorporación de estos dispositivos se busca generar una distribución espacio-temporal de la escorrentía que

evite que el agua pluvial entre en conflicto con las actividades del hombre y genere daños sobre bienes e infraestructura. Este nuevo concepto reemplaza al del drenaje tradicional, de sacar rápidamente el agua de la cuenca de la manera más rápida posible.

La regulación de caudales de crecida permite reducir la magnitud y frecuencia de los anegamientos, así como los costos de los sistemas de drenaje, por reducción de las dimensiones requeridas para las conducciones aguas abajo. Adicionalmente, los dispositivos que liberan el agua almacenada en un período mayor de 12-36 h pueden servir, además, para mejorar la calidad del agua pluvial.

Los criterios de diseño de estos dispositivos son establecidos por normativas locales. Un criterio bastante difundido en los planes directores de drenaje establece como requerimiento de control del agua pluvial urbana, que el caudal pico del pos-desarrollo sea igual o menor al correspondiente caudal pico del pre-desarrollo, para una tormenta de diseño de una duración y recurrencia dadas. La Figura N° 1 muestra los hidrogramas de pre y pos-desarrollo sin dispositivo y el hidrograma de pos-desarrollo controlado por un dispositivo de detención.

Figura N° 1: Hidrogramas del pre y pos-desarrollo y efecto regulador de un dispositivo de detención.



Algunas jurisdicciones, además, requieren que también el volumen de escurrimiento sea controlado a niveles similares al del pre-desarrollo. El control del volumen de escurrimiento es sólo factible en nuevas y pequeñas urbanizaciones, cuando las condiciones del sitio permiten la infiltración. Para compensar el aumento del volumen de escurrimiento, algunas normativas requieren que el caudal pico del pos-desarrollo sea reducido por debajo del pico del pre-desarrollo.

La mayoría de los dispositivos de detención/retención fueron diseñados para controlar la escorrentía de una tormenta de diseño de una recurrencia dada. Típicamente, las tormentas de 2, 10 o 100 años fueron seleccionadas como criterios de control.

Sin embargo, en los últimos años la experiencia está demostrando que el criterio de diseño de estos dispositivos con una única recurrencia es bastante ineficiente, ya que tal diseño suele proveer poco control para otras tormentas de distinta recurrencia. Por ejemplo, un diseño para el control de tormentas frecuentes (ej. 2 o 5 años de recurrencia) provee poca atenuación a eventos mayores y menos frecuentes (ej. 50 o 100 años de recurrencia). Inversamente, diseños para eventos grandes poco frecuentes, pueden proveer poca atenuación para los eventos menores más frecuentes.

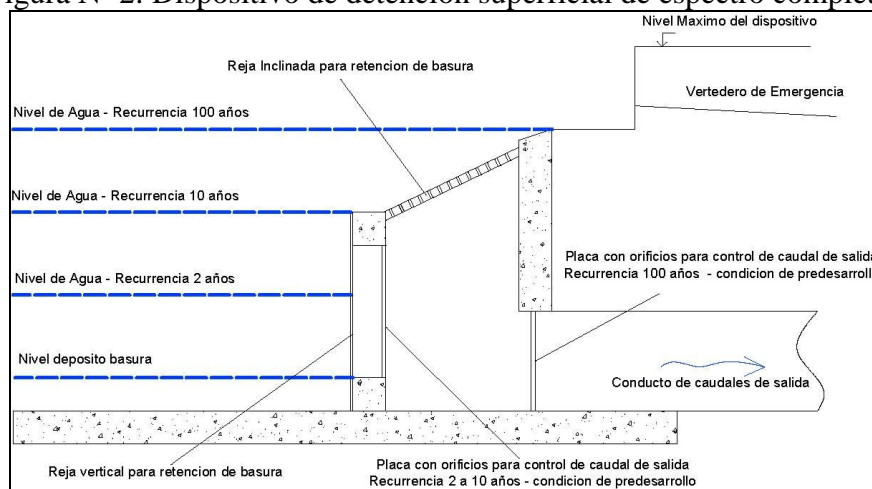
Teniendo en cuenta este aspecto, algunas ciudades de EUA están poniendo en vigencia criterios de regulación de tormentas múltiples (ej. 2, 10 y 100 años de recurrencia) con un único diseño.

Wulliman y Urbonas (2005) plantearon la necesidad de mejorar las prácticas de diseño de los dispositivos de detención. Los profundos cambios geomorfológicos (degradación y erosión de márgenes) observados en cursos receptores de EUA indican la necesidad de un mejor control de las crecidas más pequeñas y frecuentes. Es de esperar que la degradación sea menor y ocurra a una tasa más reducida si el volumen escurrido y el caudal pico se mantienen próximos a la condición del predesarrollo. Para ello, afirman los autores, es necesario un procedimiento de diseño mejorado.

A tal efecto, los autores presentaron el concepto de *detención de espectro completo*, para controlar caudales pico para un espectro completo de tormentas de diseño, correspondientes a recurrencias de 2, 10 y 100 años.

La Figura N° 2 muestra un corte esquemático de las estructuras de evacuación tipo de un dispositivo de detención superficial de espectro completo.

Figura N° 2: Dispositivo de detención superficial de espectro completo.



Por medio de dispositivos de salida múltiples, por ejemplo baterías de orificios ubicados a distintos niveles, se genera la atenuación buscada para cada una de las crecidas del posdesarrollo (2, 10 y 100 años).

La tasa de liberación de escorrentía para las crecidas más frecuentes (ej. 2 a 10 años) debe ser suficientemente lenta, para reducir los efectos de la energía del flujo sobre los cursos receptores (Wulliman y Urbonas, 2005). Para el área de Denver (Colorado, EUA), los autores proponen un tiempo de drenaje de 70 h para este volumen.

1 METODOLOGIA

1.1 Modelo hidrológico-hidráulico a aplicar

Los procesos hidrológicos y el funcionamiento del dispositivo de detención se simularon con el modelo SWMM v.5.0 (Storm Water Management Model, U.S. Environmental Protection Agency, 2004).

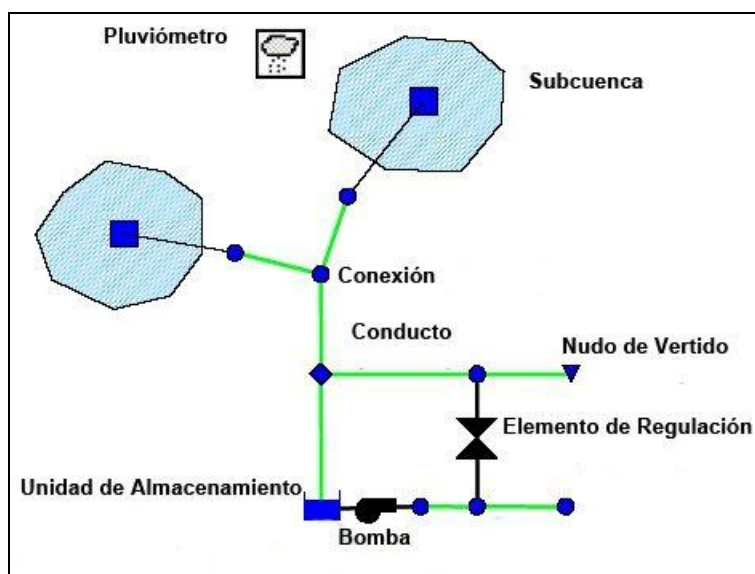
Se trata de un modelo para el análisis y diseño de sistemas de drenaje urbano, de referencia internacional y de dominio público. La versión a aplicar cuenta con una interfase visual que permite un manejo amigable para el usuario. Permite simular la propagación del flujo a través de un sistema de drenaje pluvial en ramas o en mallas, contemplando efectos de remanso, flujo a superficie libre, flujo a presión o sobrecarga, flujos inversos, flujo a través de vertederos, orificios y dispositivos de bombeo. Además puede simular canales o conductos con secciones de diferente tipo: circular, rectangular, ovoide, trapezoidal, parabólica y naturales. El análisis hidráulico puede hacerse por distintos métodos, como flujo uniforme, onda cinemática u onda dinámica.

El sistema de drenaje se esquematiza como un conjunto de tramos de conducto (denominados enlaces) interconectados por medio de nodos o uniones. El concepto enlace-nodo resulta muy útil para representar dispositivos de control del flujo. Los enlaces transmiten el flujo de nodo a nodo y sus propiedades asociadas son la rugosidad, la longitud, el área de la sección transversal, el radio hidráulico y el ancho superficial de los conductos; éstas tres últimas son funciones del tirante del flujo.

Los nodos son elementos de almacenamiento del sistema y se corresponden con las cámaras de inspección o uniones de conductos. Tanto las entradas al sistema (hidrogramas de entrada) como las salidas se ubican en los nodos del sistema idealizado.

La Figura N° 3 muestra componentes físicos típicos que se aplican para modelar un sistema de drenaje de aguas pluviales. Estos componentes u objetos pueden representarse dentro del mapa de SWMM. Conforme se van añadiendo los objetos visuales en SWMM, el usuario debe ingresar las propiedades (datos de lluvia, parámetros geométricos, hidrológicos e hidráulicos y otros).

Figura N° 3: Componentes físicos típicos empleados en el modelo de un sistema de drenaje urbano.



La cuenca urbana se desagrega en un conjunto de subcuencas de características hidrológicas homogéneas. Cada subcuenca, se idealiza compuesta por tres áreas: permeable, impermeable con almacenamiento en depresión e impermeable sin almacenamiento en depresión.

Para descontar las pérdidas por infiltración en las áreas permeables el modelo utiliza opcionalmente los métodos de Horton, Green-Ampt y el método del Número de Curva.

El modelo propaga el flujo en cada subcuenca idealizando a ésta como un reservorio no lineal de parámetros concentrados. El caudal de salida de una subcuenca hacia los canales o tuberías se calcula como el producto de la velocidad, obtenida de la ecuación de Manning, la profundidad y el ancho de escurrimiento (Huber y Dickinson, 1992). Esto significa despreciar los términos de inercia y presión de la ecuación dinámica:

$$Q = W \frac{(d - d_p)^{5/3}}{n} S^{1/2} \quad (1)$$

W: ancho hidráulico de la subcuenca, n: coeficiente de rugosidad de Manning, d: tirante de agua en el reservorio, d_p : profundidad del almacenamiento en depresión y S: pendiente de la subcuenca.

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = AI - Q \quad (2)$$

V: volumen de agua en la subcuenca, t: tiempo, A: área superficial de la subcuenca, I: lluvia en exceso y Q: caudal a la salida.

Combinando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene la ecuación diferencial del reservorio no lineal:

$$\frac{dd}{dt} = I - W \frac{(d - d_p)^{5/3}}{A n} S^{1/2} \quad (3)$$

La ecuación (3) se resuelve mediante un esquema de diferencias finitas simple:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = I - \frac{W S^{1/2}}{A n} \left(d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right)^{5/3} \quad (4)$$

Los subíndices 1 y 2 en la ecuación indican el inicio y el fin de un paso de tiempo, respectivamente y Δt es el intervalo de tiempo.

Las ecuaciones diferenciales básicas para el tratamiento del flujo son las ecuaciones de flujo impermanente, unidimensional y gradualmente variado para canales abiertos, conocidas como ecuaciones de Saint Venant.

Para la opción de onda dinámica, las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se combinan resultando:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A S_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g A \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Q: caudal a través del conducto, V: velocidad media en el conducto, A: área de la sección transversal del flujo, H: carga hidráulica (elevación del umbral del conducto más el tirante de agua), S_f : pendiente de fricción.

La ecuación que debe ser resuelta en cada enlace-nodo y en cada paso de tiempo. Si se despeja la pendiente de fricción de la ecuación de Manning, se la sustituye en (5) y se expresa la ecuación en diferencias finitas mediante un esquema adelantado, resulta:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{gn^2 \Delta t}{R_h^{4/3}} |V|} \left(Q_t + 2V(A_{t+\Delta t} - A_t) + V^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - gA \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \right) \quad (6)$$

Las incógnitas en (6) son $Q_{t+\Delta t}$, H_2 y H_1 . Las variables V, R_h y A se pueden relacionar con Q y H. No obstante, se requiere otra ecuación que relacione Q y H. Esta ecuación se puede obtener a partir de la ecuación de continuidad en un nodo:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t}{A_{S_t}} \quad (7)$$

A_{S_t} : área superficial del nodo que se considera.

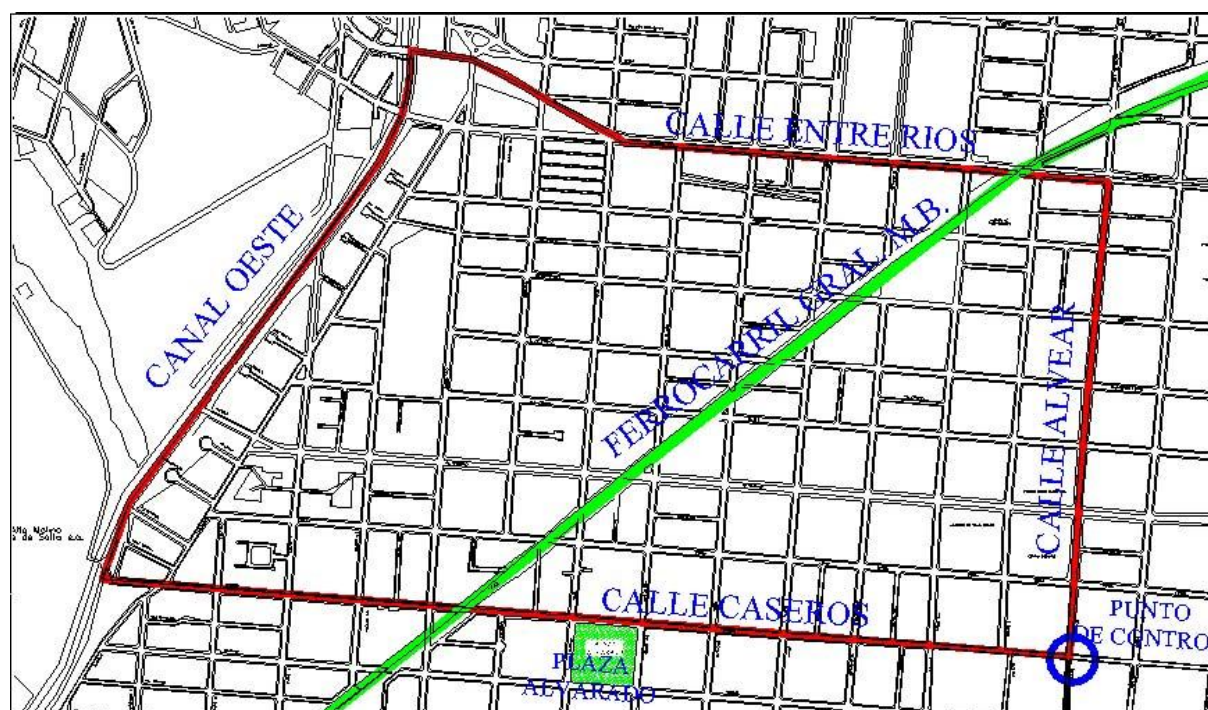
La ecuación (7) expresada en diferencias finitas con un esquema adelantado resulta:

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q_t \Delta t}{A_{S_t}} \quad (8)$$

1.2 Implementación y operación de una cuenca urbana experimental

Con el objeto de disponer de una base de datos planialtimétricos, pluviométricos e hidrométricos representativos del NOA para calibrar el modelo SWMM, se implementó la cuenca urbana experimental Caseros (ciudad de Salta, Prov. de Salta). Esta cuenca se ubica próxima al centro de la ciudad, tiene una superficie de 162 ha, una pendiente media de 1.5 % y una impermeabilidad alta, del orden del 80% (Figura N° 4).

Figura N° 4: Límites de la cuenca urbana experimental Caseros.



El drenaje pluvial de la cuenca es superficial, a través de cordones cuneta y badenes, con un sentido de escurrimiento general de Oeste a Este. La cuenca es dividida en dos sectores (este y oeste) por el terraplén del ferrocarril Gral. Manuel Belgrano. El sector Oeste tiene una superficie de 97 ha y una pendiente superficial del 2.5%. El sector Este tiene una superficie de 65 ha y una pendiente del 0.3%.

1.3 Implementación y calibración del modelo SWMM

Se segmentó la cuenca Caseros en subcuencas de características hidrológicas similares y se elaborará el esquema topológico de modelación.

En base a la información planialtimétrica recopilada y a relevar, se determinaron los parámetros geométricos de las subcuencas requeridos por el modelo (superficies, pendientes y longitudes de flujo). A partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales Ikonos actualizadas, se determinaron la impermeabilidad de cada subcuenca.

Se calibraron los parámetros del modelo en base a eventos precipitación-escorrentía observados. Con el objeto de auxiliar la calibración, para cada hidrograma simulado se calcularon el coeficiente de eficiencia, (Nash y Sutcliffe, 1971), el error estándar, y los errores relativos del caudal pico, tiempo al pico, y volumen escurrido, : $E_f E_e E_{rQp} E_{rTp} E_{rV}$

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - Q_t^c)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - \bar{Q}^o)^2} \quad (9)$$

$$E_e = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - Q_t^c)^2}{n}} \quad (10)$$

$$E_{rQp} = \frac{Q_p^c - Q_p^o}{Q_p^o} 100 \quad (11)$$

$$E_{rTp} = \frac{T_p^c - T_p^o}{T_p^o} 100 \quad (12)$$

$$E_{rV} = \frac{V^c - V^o}{V^o} \cdot 100 \quad (13)$$

Q_t^o y : caudales observado y calculado al tiempo t, $\overline{Q_t^c}$: caudal observado medio, n: número de intervalos de tiempo, y : caudales pico observado y calculado, y : tiempos al pico observado y calculado, y : volúmenes de escurrimiento observado y calculado.

Se considera que una calibración es satisfactoria cuando se aproxime a la unidad (≥ 0.7), sea suficientemente pequeño respecto al caudal medio observado y los errores relativos sean simultáneamente menores o iguales al $\pm 20\%$. $E_t E_t E_e$

Se calibró el modelo contemplando la variabilidad espacial de los parámetros físicos y de cobertura (Número de Curva, impermeabilidad y pendiente) entre subcuencas.

Se calcularon los valores medios areales de los parámetros físicos y de cobertura para la cuenca total.

Para cada evento precipitación – escorrentía se realizó una corrida adicional del modelo con los parámetros calibrados, pero aplicando los valores medios areales de los parámetros físicos y de cobertura.

1.4 Diseño de un dispositivo de detención de espectro completo para la cuenca Caseros

Una vez calibrado el modelo, se lo aplica para simular la incorporación de un dispositivo de detención de espectro completo en la plaza Alvarado, en el sector sur de la cuenca. El área de aportes al dispositivo será de 100 ha, aproximadamente, comprendiendo el sector oeste de la cuenca Caseros más una pequeña área local. Se simula la incorporación de un canal colector en el préstamo del ferrocarril, para captar y conducir el agua pluvial hacia el dispositivo.

Se considera un dispositivo de detención tipo, similar al que se muestra en la Figura N° 2. Para su diseño, se aplicó el procedimiento y métodos hidrológicos recomendados en el manual HEC-22 (FHWA, 2001).

1.5 Diseño de dispositivos de detención de espectro completo para distintos escenarios de cuenca

1.5.1 Hipótesis de parámetros físicos y de cobertura uniformes en la cuenca.

Se elaboró el diseño hidráulico de dispositivos de detención tipo para 18 escenarios de cuenca, que resultan de combinar: tres impermeabilidades (30 %, 50 % y 80 %), tres pendientes de la cuenca (0.5%, 2.5 % y 5.0 %) y dos grupos hidrológicos de suelos (B y C) del

método del Número de Curva (SCS, 1984). Se consideraron los parámetros físicos y de cobertura en forma concentrada en la cuenca; es decir, sin variación espacial entre subcuencas.

Las impermeabilidades, pendientes y grupos hidrológicos considerados cubren aproximadamente los rangos de aplicación de la mayoría de las urbanizaciones del NOA.

Para cada uno de los escenarios considerados, se aplicó la misma configuración topológica del modelo y los pasos descritos en el ítem anterior.

A partir de los resultados obtenidos para cada recurrencia y escenario considerado, se calculó la eficiencia hidráulica de los dispositivos de detención, expresada como cociente entre el porcentaje de atenuación del caudal pico y el volumen de almacenamiento requerido por el dispositivo.

2.5.2 Hipótesis de parámetros físicos y de cobertura no uniformes en la cuenca.

Se elaboró el diseño hidráulico de dispositivos de detención tipo para 18 escenarios de cuenca, que resultan de combinar: tres impermeabilidades medias (30 %, 50 % y 80 %), tres pendientes medias de la cuenca (0.5%, 2.5 % y 5.0 %) y dos grupos hidrológicos de suelos (B y C) del método del Número de Curva (SCS, 1984), considerando una hipótesis de variabilidad espacial de los parámetros físicos y de cobertura entre subcuencas. A tal efecto, se aplicó una distribución espacial de los parámetros proporcional a la de la cuenca experimental. Para cada subcuenca se conservó la relación entre el valor local del parámetro y el valor medio areal del parámetro para la cuenca completa.

Para la hipótesis de distribución espacial de los parámetros físicos y de cobertura y cada uno de los 18 escenarios considerados, se aplicó la misma configuración topológica del modelo y los pasos descritos en el ítem anterior.

1.6 Determinación de relaciones entre la eficiencia hidráulica y parámetros de diseño de los dispositivos con parámetros físicos y de cobertura de cuenca

1.6.1 Hipótesis de parámetros físicos y de cobertura uniformes en la cuenca.

En base a los resultados obtenidos, se ajustaron relaciones que expresen la eficiencia hidráulica y los parámetros de diseño de los dispositivos como funciones de parámetros físicos y de cobertura de cuenca (grupo hidrológico del suelo, impermeabilidad y pendiente), para las recurrencias consideradas y una superficie de aportes de referencia de 100 ha.

1.6.2 Hipótesis de parámetros físicos y de cobertura no uniformes en la cuenca.

A partir de los resultados obtenidos, se ajustaron relaciones que expresen la eficiencia hidráulica y los parámetros de diseño de los dispositivos como funciones de parámetros físicos y de cobertura de cuenca medios areales.

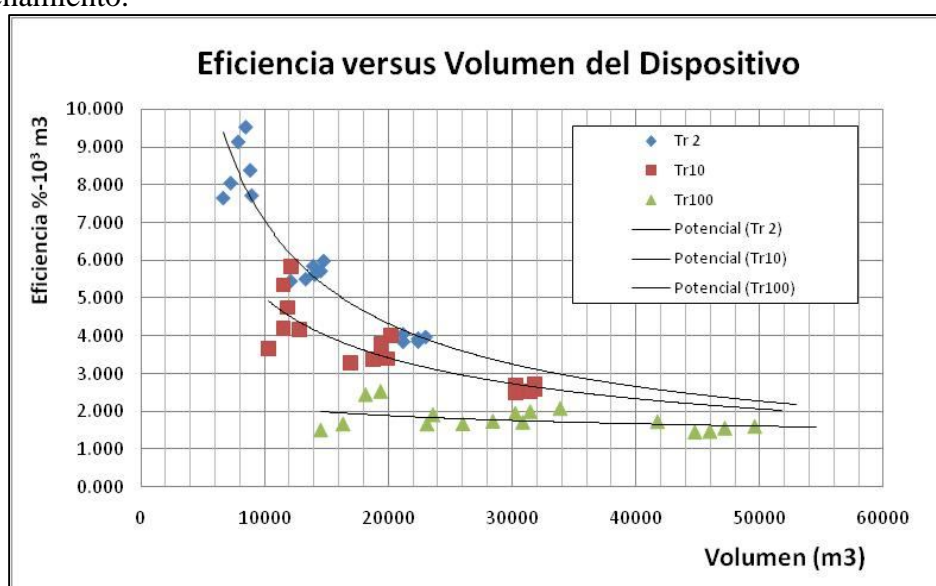
1.6.3 Incidencia de la variabilidad espacial de los parámetros físicos y de cobertura en las relaciones obtenidas

Se realizó un análisis de la incidencia de la variabilidad espacial de los parámetros físicos y de cobertura en las relaciones obtenidas.

4. RESULTADOS

En base a los resultados obtenidos de los modelos y de las corridas para cada escenario de cuenca, se ajustaron relaciones que expresan la eficiencia hidráulica y los parámetros de diseño de los dispositivos. Se ajusto principalmente las siguientes relaciones: volúmenes de almacenamiento del dispositivo y caudales pico posdesarrollo controlado requeridos para 2, 10 y 100 años como funciones de parámetros físicos y de cobertura de cuenca (grupo hidrológico del suelo, impermeabilidad y pendiente), para las recurrencias de 2, 10 y 100 años y una superficie de aportes de referencia de 100 ha.

Figura 5: Relación de Eficiencia del dispositivo con respecto al volumen del dispositivo de almacenamiento.



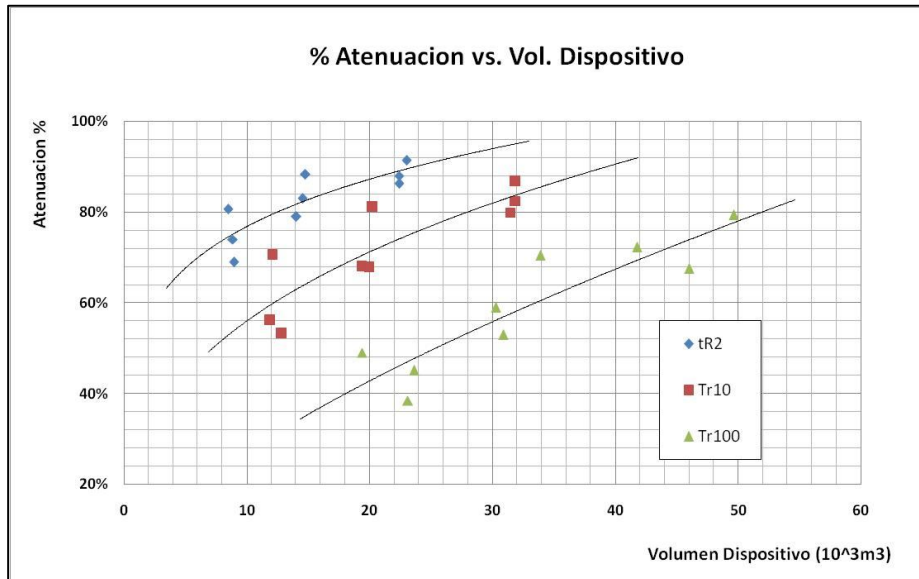
Dado que la eficiencia de los dispositivos calculados para los diferentes escenarios de cuencas no depende de una sola variable sino de varias se hace necesario encontrar una relación entre esta y todas las demás que intervienen en la misma. La eficiencia del dispositivo dependerá principalmente de las variables físicas (Pendiente, Impermeabilidad y grupo hidrológico del suelo) y del volumen de almacenamiento del dispositivo necesario para generar un amortiguamiento de crecida tal que:

$$\text{Caudal pico Posdesarrollo Controlado} = \text{Caudal Pico Predesarrollo}$$

La herramienta matemática que nos permite encontrar la relación existente entre una variable dependiente (ej. Eficiencia del Dispositivo) y una serie de variables independientes (Volumen dispositivo, Pendiente, Impermeabilidad y Grupo Hidrológico) es la Regresión

Múltiple. Entre las regresiones múltiples más utilizadas se encuentran las Regresiones Lineales y las Logarítmicas. Ambas se utilizaron y se analizara cuál de ellas ajusta mejor a las relaciones buscadas.

Figura 6: Porcentaje de atenuación del pico de crecida con respecto al volumen del dispositivo de almacenamiento.



Caudal Pico del Dispositivo, es decir, el caudal máximo de posdesarrollo controlado. La función depende de la impermeabilidad y la pendiente de la cuenca, pero en la Tabla de coeficientes adimensionales (Tabla 1) se observa que también depende de las condiciones de distribución uniforme o no de los parámetros físicos, de la recurrencia considerada y del grupo hidrológico de suelo contemplado.

Esta función nos permite definir en función de los parámetros físicos de la cuenca el caudal pico para cada recurrencia con el que se dimensionara el elemento regulador del dispositivo.

$$Q_p \text{ (m}^3\text{/seg)} = C_i \times I_m + C_p \times i + C \quad (14)$$

Donde:

- Q_p (m³/seg): es el Caudal Pico Posdesarrollo Controlado, es decir, el máximo Caudal erogado por el elemento regulador del dispositivo de almacenamiento superficial.
- C_i : coeficiente adimensional de impermeabilidad, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 1 columna 1 para la recurrencia y condición establecida.
- I_m : Impermeabilidad de la cuenca considerada de aporte al dispositivo de almacenamiento superficial, en unidades (% / 100).
- C_p : coeficiente adimensional de pendiente, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 1 columna 2 para la recurrencia y condición establecida.

- i : Pendiente media de la cuenca considerada de aporte al dispositivo de almacenamiento superficial, en unidades (m/m).
- C : coeficiente adimensional, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 1 columna 3 para la recurrencia y condición establecida.

Tabla 1: Coeficientes adimensionales de regresión lineal de aplicación para la determinación del Caudal pico de posdesarrollo controlado para diferentes recurrencias y condiciones de distribución de parámetros físicos de la cuenca.

CONDICIONES			1	2	3
Recurrencia	Grupo Suelo	CONDICION	C_i	C_p	C
Tr 2	GB	UNIFORME	0.0711	11.7705	0.4482
	GC	UNIFORME	0.0430	19.7596	0.7390
	GB	NO UNIFORME	-0.0272	13.2077	0.5167
	GC	NO UNIFORME	-0.0061	19.7322	0.8815
Tr 10	GB	UNIFORME	-0.1096	24.3989	1.2934
	GC	UNIFORME	0.1675	37.9454	1.5065
	GB	NO UNIFORME	-0.0307	26.7596	1.2517
	GC	NO UNIFORME	-0.0588	37.6831	1.8742
Tr 100	GB	UNIFORME	0.5167	57.9891	3.1803
	GC	UNIFORME	-0.1368	86.7869	4.4420
	GB	NO UNIFORME	-0.0956	72.4699	3.6462
	GC	NO UNIFORME	0.1044	89.2077	4.7499

La Ecuación 15 presenta la determinación del **volumen de almacenamiento del dispositivo** de espectro completo. Esta ecuación presenta una función dependiente de la Impermeabilidad y la pendiente de la Cuenca en forma directa, y de una serie de parámetros adimensionales que contemplan las variaciones del grupo hidrológico de suelo, la distribución uniforme o no de los parámetros físicos y la recurrencia o periodo de retorno considerado.

$$Vd (m^3) = (C_i \times Im + C_p \times i + C) \times 1000 \quad (15)$$

Donde:

- Vd : Volumen del dispositivo de almacenamiento en metros cúbicos (m^3).
- C_i : coeficiente adimensional de impermeabilidad, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 2 columna 1 para la recurrencia y condición establecida.
- Im : Impermeabilidad de la cuenca considerada de aporte al dispositivo de almacenamiento superficial, en unidades (% / 100).
- C_p : coeficiente adimensional de pendiente, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 2 columna 2 para la recurrencia y condición establecida.

- i : Pendiente media de la cuenca considerada de aporte al dispositivo de almacenamiento superficial, en unidades (m/m).
- C : coeficiente adimensional, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 2 columna 3 para la recurrencia y condición establecida.

La Ecuación 15 nos permite determinar el volumen mínimo con el que deberá contar el dispositivo para que se produzcan los amortiguamientos del pico deseado, en función de las características físicas de la cuenca y una determinada eficiencia del dispositivo de amortiguamiento de espectro completo.

Los volúmenes nos indican a su vez niveles máximos de agua dentro del dispositivo (en función de la forma del mismo), esto niveles a su vez nos permitirán determinar la ubicación del conjunto de elementos para la regulación; y en vinculación con ecuación 14 podremos diseñar las batería de orificios reguladores y el vertedero de seguridad del dispositivo.

Tabla 2: Coeficientes adimensionales de regresión lineal de aplicación para la determinación del Volumen de Almacenamiento del dispositivo para diferentes recurrencias y condiciones de distribución de parámetros físicos de la cuenca.

CONDICIONES		1	2	3	
Recurrencia	Grupo Suelo	CONDICION	Ci	Cp	C
Tr 2	GB	UNIFORME	27.6283	-6.2153	0.6901
	GC	UNIFORME	27.3311404	-27.1093	-0.0731
	GB	NO UNIFORME	30.7807	-21.4891	-0.3822
	GC	NO UNIFORME	28.2333333	-26.4481	-0.9081
Tr 10	GB	UNIFORME	38.9323	1.5208	0.4647
	GC	UNIFORME	36.7245614	-45.9536	1.2679
	GB	NO UNIFORME	39.9088	-21.1585	0.7234
	GC	NO UNIFORME	38.2105	-44.6311	-0.2321
Tr 100	GB	UNIFORME	47.4766	-18.2492	8.3198
	GC	UNIFORME	55.7768	-111.7432	3.0117
	GB	NO UNIFORME	57.3158	-27.770492	2.0355
	GC	NO UNIFORME	49.3553	-54.5492	2.9618

Finalmente se presenta la ecuación 16 la cual nos presenta la función que relaciona la **Eficiencia del dispositivo**, según se definió en capítulos anteriores, y los parámetros físicos de la cuenca.

$$Ef (\% / m3) = \frac{(Ci^{Im} \times Cp^i \times C)}{1000} \quad (16)$$

Donde:

- *Ef*: Eficiencia del Dispositivo de almacenamiento de espectro completo para cada recurrencia. Se mide en porcentaje de amortiguamiento del pico de posdesarrollo no controlado por cada metro cubico almacenado en el dispositivo ($\%/m^3$)
- *Ci*: coeficiente adimensional de impermeabilidad, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 3 columna 1 para la recurrencia y condición establecida.
- *Im*: Impermeabilidad de la cuenca considerada de aporte al dispositivo de almacenamiento superficial, en unidades ($\% / 100$).
- *Cp*: coeficiente adimensional de pendiente, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 3 columna 2 para la recurrencia y condición establecida.
- *i*: Pendiente media de la cuenca considerada de aporte al dispositivo de almacenamiento superficial, en unidades (m/m).
- *C*: coeficiente adimensional, se determino en función de las regresiones realizadas. Se extrae de la Tabla 3 columna 3 para la recurrencia y condición establecida.

Esta ecuación nos proveerá el indicio principal que nos permita seguir adelante con nuestros cálculos o descartar el sistema de Dispositivo de Almacenamiento Superficial para el manejo del agua urbana de nuestro caso de análisis; puesto que, si la eficiencia del dispositivo para las condiciones físicas de la cuenca en estudio es muy baja, entonces, debe descartarse esta solución de manejo de agua pluvial y utilizar otra. Ahora bien, si la eficiencia es considerable, entonces, podremos proseguir con el predimensionado del dispositivo y adoptar como valida esta solución para nuestra cuenca.

Tabla 3: Coeficientes adimensionales de regresión logarítmica de aplicación para la determinación de la Eficiencia del dispositivo de almacenamiento de espectro completo para diferentes recurrencias y condiciones de distribución de parámetros físicos de la cuenca.

CONDICIONES		1	2	3	
Recurrencia	Grupo Suelo	CONDICION	<i>Ci</i>	<i>Cp</i>	<i>C</i>
Tr 2	<i>GB</i>	<i>UNIFORME</i>	0.2168	0.1088	13.8456
	<i>GC</i>	<i>UNIFORME</i>	0.23013691	0.1127	13.1185
	<i>GB</i>	<i>NO UNIFORME</i>	0.1984	0.1227	14.1807
	<i>GC</i>	<i>NO UNIFORME</i>	0.2306653	0.0481	13.3272
Tr 10	<i>GB</i>	<i>UNIFORME</i>	0.2925	0.0150	7.7397
	<i>GC</i>	<i>UNIFORME</i>	0.352054	0.0156	6.6234
	<i>GB</i>	<i>NO UNIFORME</i>	0.3100	0.0127	7.3159
	<i>GC</i>	<i>NO UNIFORME</i>	0.4068	0.0040	6.1083
Tr 100	<i>GB</i>	<i>UNIFORME</i>	0.6262	0.0056	2.6969
	<i>GC</i>	<i>UNIFORME</i>	0.6409	0.0046	2.4809
	<i>GB</i>	<i>NO UNIFORME</i>	0.7674	0.000023	2.5983
	<i>GC</i>	<i>NO UNIFORME</i>	1.1503	0.0001	1.8313

5. CONCLUSIONES

Los dispositivos de almacenamiento superficial de espectro completo permiten ser utilizados en las cuencas típicas del Noroeste Argentino con elevado rendimiento y esto conlleva a una reducción de las obras de drenaje, las cuales son complejas de ejecutar en zonas de alta densidad y calles por lo general angostas; permite refuncionalizar drenajes primarios que se encontraban colapsados por las condiciones de posdesarrollo no controlado, el uso de los mismos mejora la calidad del agua disminuyendo la contaminación de los cursos receptores y reduce los procesos erosivos generados por el incremento de caudal en las condiciones de la cuenca desarrollada.

Las relaciones obtenidas en el presente trabajo permiten obtener un predimensionado de los dispositivos para aquellas cuencas urbanas típicas del noroeste argentino en las que el proyectista no cuenta con información hidrológica suficiente y con solo ingresar los valores de pendiente, impermeabilidad y tipo y uso de suelo podrá contar con las características del dispositivo necesario y conocer la eficiencia del mismo para la zona estudiada, de este modo podrá adoptarlo como solución al problema o descartarlo y buscar una solución más acorde a la necesidad de la zona estudiada.

Para las condiciones de posdesarrollo y escenarios de cuenca de estudio en los sectores de la misma ***en donde se hallaba la mayor pendiente e impermeabilidad y donde los hidrogramas resultantes eran más empuntados, se generaron amortiguaciones del pico superiores al 70 %.***

A medida que aumenta la impermeabilidad de la cuenca la eficiencia no posee grandes variaciones con respecto a la pendiente de la misma; puede verse claramente que los valores de eficiencia para 30% de impermeabilidad si se ven afectados en forma marcada por la pendiente, mientras que en 50% de impermeabilidad esta afectación se ve disminuida y finalmente para un 80% de impermeabilidad esta afectación es prácticamente nula, es decir ***la eficiencia no varía con la pendiente de la cuenca para valores de impermeabilidad elevados, superiores aproximadamente al 65%.***

Otra particularidad que pudo manifestarse es que para recurrencias elevadas (100 años) la eficiencia del dispositivo no se ve afectada para las condiciones de variabilidad de impermeabilidad o pendiente, es decir que se mantiene invariable para estas condiciones de la cuenca. A partir de esto podemos inferir ***que para recurrencias elevadas el dispositivo posee muy baja eficiencia y no varía en forma marcada con la pendiente o impermeabilidad de la cuenca.***

Se pudo observar que los suelos que poseen un potencial de escurrimiento alto (Tipo C) producen un decremento de la eficiencia con respecto a los suelos tipos B.

Se comprobó que ***la atenuación del pico crece aproximadamente en forma lineal para todas las recurrencias y cuando esta atenuación supera el valor del 90% el mismo tiende a ser asintótico,*** por lo cual para conseguir atenuaciones superiores a esta se deben contar con volúmenes muy grandes que generan dispositivos muy poco eficientes.

Cuando el volumen del dispositivo es muy grande el valor del amortiguamiento del pico para cada recurrencia tiende a ser el mismo; por lo cual ***no conviene generar grandes amortiguamientos para eventos de elevada recurrencia ya que esta acción actúa en decremento de la eficiencia del dispositivo para eventos de menor recurrencia y no genera beneficios significativos para los eventos de mayor recurrencia.***

Para poder evaluar correctamente cómo se comporta el dispositivo conviene relacionar la eficiencia del mismo con respecto a su capacidad. Esto nos permite destacar y observar las condiciones para las cuales el dispositivo es más eficiente es decir mayor amortiguamiento del pico con el menor volumen del mismo.

En cuanto a la variabilidad espacial de los parámetros físicos y de cobertura de la cuenca para la determinación de los hidrogramas en condiciones de predesarrollo y posdesarrollo no controlado podemos inferir que **la variación de los hidrogramas resultantes al momento de considerar condiciones uniformes y no uniformes de la cuenca no es marcada; generándose errores menores al 10%**. Los resultados obtenidos a partir de la simplificación de la cuenca, al considerarla con una distribución uniforme de parámetros físicos y de cobertura, son satisfactorios y pueden ser utilizados sin mayores problemas al momento de su utilización para la ejecución de proyectos. Aunque hay que advertir que **en el caso de que el proyecto requiera mayores precisiones es conveniente trabajar en la condición No Uniforme de la cuenca** y en caso de no hacerlo advertir sobre los errores producidos al realizar la simplificación (aun cuando estos son pequeños).

En cuanto a la consideración de la uniformidad o no de la cuenca al momento de evaluar los parámetros de diseño del dispositivos se pudo observar claramente que los mayores errores se dan para altas recurrencias (Tr: 100 años), esto se debe a que los volúmenes necesarios para amortiguación de crecida son tan elevados que ante variaciones en las condiciones de la cuenca se producen variaciones en los volúmenes necesarios de amortiguación y estos generan dispersiones en la eficiencia del dispositivo, aunque esta dispersión no sea tan marcada, ya que en los casos más desfavorables tenemos una diferencia entre las eficiencia del dispositivo en condiciones Uniforme y No uniforme del orden del $0.3\%/10^3\text{m}^3$.

Los mayores errores relativos registrados en la eficiencia del dispositivo están en el orden del 23%, pero en la mayor parte de los casos los errores no superan el 10%. Por lo cual pese a estas dispersiones observadas, podemos inferir que no se producen errores de importancia al considerar la cuenca con distribución de parámetros uniformes, principalmente en el uso de los mismos para la determinación de la eficiencia del dispositivo, puesto que en general para altas recurrencias las eficiencias son bajas, lo cual no nos genera mayores complicaciones al momento de evaluar, como factible o no, a los dispositivos como solución para el diseño de desagüe urbano.

En el caso de que por la naturaleza del estudio se requiera de mayores precisiones para el diseño del dispositivo es recomendable considerar la distribución no uniforme de la cuenca y tomar las relaciones obtenidas en el presente trabajo para un predimensionado de los dispositivos y luego ajustar las dimensiones finales con un modelo hidrológico adecuado (principalmente en el caso de cuencas urbanas con superficies mayores a las 100 hectáreas).

Dada la situación en la que el sector de estudio se tratase de pequeñas cuencas urbanas (menores a 100 ha) los resultados extraídos de las relaciones (8.1 a 8.3) y los coeficientes de regresión (Tablas 8.3 a 8.5) pueden ser considerados para el diseño final del dispositivo, sobre todo si no se cuenta con información hidrológica de la cuenca.

La simplificación de la cuenca al considerarla con una distribución de parámetros físicos y de cobertura uniforme, no posee una incidencia marcada en los resultados obtenidos en la simulación a la salida de la misma y los mismos pueden utilizarse sin inconveniente para el diseño hidráulico de los componentes de los sistemas de manejo pluvial urbano.

REFERENCIAS

- Chow V.T., Maidment D., Mays L., 1994. "Hidrología Aplicada". Mc. Graw Hill Interamericana S.A.
- Gómez Valentín M., 2007. "Curso de Análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0". ISBN:978-84-611-7817-9. Distribuidora Alfambra de Papelería. Barcelona.
- Huber W., Dickinson R., 1992. "Storm Water Management Model. User's Manual", Versión 4,. U.S. Environmental Protection Agency. Athens, GA.
- McCuen R. H., 1974. "A Regional Approach To Urban Stormwater Detention", Geophysical Research Letters, 74-128, p. 321 – 322.
- Pedraza R., 2007. "Drenaje Urbano". Curso de posgrado. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.
- Riccardi G., 2004. "Hidrología en Medios Antropizados". Curso de posgrado. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.
- Tucci, C., Bertoni, J. C. (Eds.), 2003. "Inundações urbanas na America do Sul". Programa Asociado de Gerenciamiento de Cheias patrocinado por Organização Meteorologica Mundial y Global Water Partnership. 471 p., ISBN: 85-88686-07-4. Associação Brasileira de Recursos Hídricos
- Tucci C., Lalaina Porto T. y De Barros M. 1995. "Drenagem Urbana". Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Tucci C., da Motta Marques D. M., 2000. "Avaliação e controle da drenagem urbana". Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- UDFCD, 1992 & 1999. "Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volume 3 – Best Management Practices". Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado. <http://www.udfcd.org/usdcm/vol3.htm>
- UDFCD, 2001. "Urban Storm Drainage Criteria Manual, Volumes 1 & 2. Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado. http://www.udfcd.org/usdcm/usdcm_orders.htm
- Urbonas B. and Glidden M., 1983. "Potential Effectiveness of Detention Policies", Southwest Storm Drainage Symposium, Texas A & M, November, 1983. (Copy available at <http://udfcd.org/techpapers.htm>).
- Urbonas B., Wulliman J., 2007. "Full Spectrum Detention to Control Stormwater Runoff". http://www.udfcd.org/downloads/pdf/tech_papers/Full%20Spectrum%20Detention%202005-01-01%20Concept%20Paper.pdf
- U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2001. "Urban Drainage Design Manual" (Hydraulic Engineering Circular N° 22, Second edition)". Publication No. FHWA-NHI-01-021.

U. S. Environmental Protection Agency, 2004. “Stormwater Best Management Practice Design Guide”. Volume 1: General Considerations. Volume 2: Vegetative Biofilters.

U. S. Environmental Protection Agency – Urban Watershed Management Research, 2007. “Storm Water Management Model (SWMM) Version 5.0.011”.
<http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/index.htm>

U. S. Soil Conservation Service, 1986. “Technical Release N° 55 Urban Hydrology for Small Watersheds”, National Engineering Publications.

U. S. Water Environment Federation - American Society Of Civil Engineers (ASCE), 1992. “Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems”, ASCE, New York.

Wulliman J., Urbonas B., 2005. “Peak Flow Control for Full Spectrum of Design Storms”.
http://www.udfed.org/downloads/pdf/tech_papers/Full%20Spectrum%20Detention%202007.pdf