

EFFECTOS DE LA DISCRETIZACIÓN EN LA SIMULACIÓN DE ESCORRENTÍA URBANA

José Luis Macor¹ y Raúl A. Pedraza²

Resumen:

La urbanización produce un fuerte impacto sobre las respuestas hidrológicas de las cuencas. El incremento de la impermeabilidad aumenta notablemente los escurrimientos superficiales. Para evacuar los excedentes pluviales urbanos, se diseñan y construyen sistemas de drenaje, utilizando modelos matemáticos que permiten realizar los cálculos de diseño, operación y planificación de tales sistemas. El avance de la informática ha generalizado la aplicación de la modelación distribuida, lo que supone una mejora de la descripción de los fenómenos que participan en la transformación lluvia-escorrentía. Sin embargo, incorpora una incertidumbre relacionada con la elección del tamaño de la discretización superficial apropiada para la simulación.

Este trabajo examina los efectos de la discretización espacial sobre la simulación del escurrimiento en una red de conductos pluviales, analiza la variación del parámetro de calibración W para diferentes escalas espaciales de una cuenca urbana y propone criterios para elegir la mayor escala espacial que satisfaga una precisión deseada en los resultados. Para ello se realizaron ensayos numéricos con el modelo SWMM sobre una cuenca urbana teórica y sobre una cuenca urbana experimental.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que la escala espacial influye en los resultados de la simulación con el modelo SWMM. La red de drenaje adiciona almacenamiento al sistema, atenuando y retardando los caudales pico. A medida que aumenta la escala una parte de la red es removida y en consecuencia se empuntan los hidrogramas y se anticipan los picos.

Para que el modelo represente, a una escala mayor, una función de respuesta similar a la obtenida con la escala de detalle, es necesario compensar la pérdida de almacenamiento. Para ello, se debe reducir el ancho total de la cuenca, es decir, aumentar la longitud de escurrimiento.

Para aplicaciones del modelo SWMM en cuencas similares a la del estudio, una vez discretizada la cuenca y si no se dispone de información pluvio-hidrométrica, se puede estimar el valor medio del parámetro W a partir de la relación ancho medio de escorrentía - área media de subcuencas. Para la cuenca experimental estudiada la escala espacial más grande que conserva la precisión admisible de los hidrogramas a la salida y de niveles de agua en nodos de interés es la meso escala.

Palabras clave: efectos de escala, modelación distribuida, escurrimientos urbanos

INTRODUCCIÓN

El rápido avance en la disponibilidad, velocidad de cálculo y capacidad de memoria de las computadoras ha generalizado la aplicación de los denominados modelos distribuidos en lugar de los modelos agregados. Esto es particularmente importante en hidrología urbana ya que, a diferencia de muchos sistemas rurales, los sistemas urbanos se caracterizan por ser distribuidos. Es

decir, los sistemas urbanos presentan una fuerte variabilidad de los parámetros que los caracterizan como son el uso del suelo, la pendiente, la rugosidad, etc.

Este cambio de la herramienta de simulación refleja el propósito de aumentar la precisión de los resultados y de mejorar la capacidad para describir los fenómenos físicos que intervienen en el proceso de transformación precipitación-escorrentía.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Ciudad Universitaria, 3000 Santa Fe, Argentina. Tel: 54-342-4575233, Fax: 54-342-4575224, email: josem@fich1.unl.edu.ar, rpedraza@fich1.unl.edu.ar

Artículo recibido el 7 de abril de 2005, recibido en forma revisada el 21 de julio de 2005 y aceptado para publicación el 13 de diciembre de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

No obstante, la modelación distribuida incorpora una incertidumbre en la selección del tamaño apropiado de la discretización espacial para la simulación (Coyler, 1982; Calomino, 1993). La influencia del tamaño de la discretización espacial sobre los resultados de la modelación distribuida ha sido reconocida por varios autores, entre otros por Tao y Kowen (1989)D. Goodrich (1990), Mazion y Yen (1994), Pedraza et al. (1996; 2005), Macor (2001).

En este estudio se investigan los efectos de la discretización espacial sobre la simulación del escurrimiento en un sistema de drenaje pluvial. Para ello, se ha implementado y calibrado un modelo de transformación precipitación-escurrimiento y de simulación de escurrimiento en redes de conductos (Storm Water Management Model) a una cuenca urbana hipotética, primeramente y después a una cuenca urbana real. En los dos casos, se consideran varios tamaños de la discretización espacial de la red (escalas espaciales) y se investiga la influencia de estas escalas sobre los resultados de las simulaciones.

A partir de los años 70, la modelación matemática se ha convertido en una herramienta muy importante para la planificación y el diseño de sistemas de drenaje. Varios investigadores han aportado sus conocimientos al desarrollo de modelos matemáticos para resolver las ecuaciones de Saint Venant de manera completa (modelos hidrodinámicos) o simplificada (modelos difusivos y cinemáticos).

La influencia y la importancia de la escala espacial sobre la modelación precipitación-escurrimiento han sido reconocidas por diversos autores. Algunos de los cuales han estudiado el nivel mínimo de escala espacial a ser utilizada en la modelación hidrológica para representar de manera apropiada la heterogeneidad espacial de las cuencas. Así, por ejemplo, Bathurst (1986) ha propuesto que una cuenca debe ser dividida en elementos no mayores al 1% de la superficie total, para asegurar que cada elemento será más o menos homogéneo.

Warwick (1989) propuso investigar la relación entre simplicidad y complejidad geométrica de la modelación con relación al esfuerzo de cálculo y a la economía.

Tao y Kouwen (1989) investigaron el efecto de la resolución espacial sobre los resultados de un modelo distribuido, analizando dos tamaños de

mallas de 5x5 y de 10x10 kilómetros, sobre una cuenca al sudeste de Ontario, Canadá.

Goodrich (1990) estableció que el nivel de complejidad geométrica de un modelo es función de las escalas de cuencas y climáticas, así como de la variabilidad de los datos de entrada.

Mazion y Yen (1994) investigaron el efecto del tamaño de la discretización sobre los resultados de la simulación utilizando tres modelos diferentes sobre una cuenca hipotética y homogénea. Observaron que los resultados de las simulaciones estaban significativamente afectados por la escala utilizada.

Pedraza et al. (1996a) implementaron y calibraron los modelos HEC-1, SWMM, OTTHYMO y OCINE sobre la cuenca urbana experimental Guadalupe Oeste, Santa Fe, Argentina. Consideraron dos escalas espaciales: una *macro* (5 subcuencas) y otra *micro* (26 subcuencas) y calibraron los modelos en base a eventos precipitación-escurrimiento observados. Los autores encontraron, para todos los modelos chequeados, diferencias significativas entre el coeficiente de rugosidad de calibración promedio de los segmentos de cuenca de cada escala y una disminución del mismo con el aumento de la escala.

Pedraza (1998) investigó el efecto de la escala espacial en la respuesta del modelo de onda cinemática y una metodología para cuantificar la rugosidad equivalente entre distintas escalas espaciales, basada en el concepto de almacenamiento de equilibrio.

Macor (2002) realizó un análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo Runoff-SWMM, y estudió la influencia de dicho parámetro en los hidrogramas de diseño de sistemas de drenaje urbanos.

Pedraza et al. (2005) propone un procedimiento de discretización de esquemas de modelación y de parámetros, para la simulación de escurrimiento en cuencas urbanas usando modelos basados en la onda cinemática. El procedimiento permite pasar de una discretización detallada de la cuenca a otra más simple (escala agregada), conservando una similitud hidrológica entre escalas. Dicho procedimiento se verificó sobre una cuenca urbana teórica con drenaje superficial y sobre dos cuencas experimentales con drenaje dual: Sant Boi de Llobregat (Barcelona, España) y Guadalupe Oeste (Santa Fe, Argentina), mediante experimentos numéricos.

Estos últimos antecedentes han puesto énfasis en la influencia de la escala espacial sobre el flujo superficial. Este trabajo, en cambio, pone el foco en cómo dicha escala influye sobre la simulación del flujo en la red de conductos.

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El nivel de discretización espacial de la cuenca determina directamente el grado de simplificación de los datos y de concentración de los parámetros. Es inevitable tener cierta concentración de la geometría y/o de los parámetros ya que los sistemas de parámetros distribuidos, formulados como ecuaciones diferenciales en derivadas parciales son, por definición, de dimensión infinita.

La precisión de los resultados es sensible a la discretización espacial adoptada por el modelista. En consecuencia, en la aplicación de un modelo a una cuenca, el usuario debe seleccionar un tamaño apropiado de la discretización espacial que sea físicamente representativa y computacionalmente precisa.

En caso de diseño y/o verificación hidráulica de redes de drenaje, el ingeniero se encuentra frente a una incertidumbre en lo que concierne a la escala espacial a adoptar. Esta incertidumbre se vuelve muy importante en cuencas urbanas, dado que en general no se dispone de información pluviométrica e hidrométrica observada para calibrar los parámetros de manera consistente. La modelación de escurrimiento en medio urbano requiere la discretización espacial del sistema de drenaje, tanto de la cuenca como de los conductos.

Este trabajo evalúa el efecto de la escala espacial en la simulación de escurrimiento en una red de conductos y establece criterios de precisión para orientar a futuros usuarios del modelo SWMM en la elección de la escala adecuada.

EL MODELO SWMM

El modelo SWMM (Storm Water Management Model), permite simular escurrimientos y calidad de agua. Este modelo fue desarrollado a comienzos de los años setenta, con el soporte de la US Environment Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos, siendo uno de los modelos más avanzados de diseño y simulación (Metcalf y Eddy Inc, 1971).

El modelo está organizado en bloques (Runoff, Transport, Extran, etc.) que pueden ser ejecutados secuencialmente o separadamente (Huber y Dickinson, 1992). Básicamente, el bloque Runoff permite la transformación precipitación–escorrentía considerando a las cuencas como reservorios no lineales espacialmente agregados. Las pérdidas por infiltración de las áreas permeables son descontadas utilizando opcionalmente las ecuaciones de Horton o Green-Ampt.

El caudal hacia los canales o conductos de drenaje se calcula mediante:

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

W es el ancho de drenaje, n es el coeficiente de Manning, d es el tirante de agua en el reservorio, d_p es el tirante de almacenamiento en depresión y S es la pendiente de la subcuenca. Nótese que el parámetro W es directamente proporcional a la incógnita.

El escurrimiento superficial es ingresado y propagado a través de los conductos del sistema de drenaje mediante el bloque Extran. Fundamentalmente, este bloque es un modelo hidrodinámico de propagación de flujo en canales abiertos y/o conductos cerrados. El programa permite simular redes de drenaje con fenómenos de remanso, escurrimientos a presión o sobrecarga, transferencia de flujo a través de derivadores, orificios y dispositivos de bombeo, dispositivos de almacenamiento, etc., además de simular canales o conductos con secciones diversas.

El bloque Extran utiliza el concepto enlace-nodo, que facilita la representación del sistema físico. El sistema de drenaje se esquematiza como un conjunto de conductos interconectados a nodos, considerando la hipótesis de escurrimiento no permanente, unidimensional, gradualmente variado, representado por las ecuaciones de Saint Venant, las que forman la base matemática del modelo.

Las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se resuelven de manera secuencial determinando el caudal en cada conducto y la carga hidráulica en cada nodo, en un paso de tiempo Δt . Por ello el modelo utiliza el método numérico de Euler modificado.

EFFECTOS DE LA ESCALA ESPACIAL SOBRE UNA CUENCA HIPOTÉTICA

Dado que las propiedades físicas de las cuencas urbanas varían considerablemente, a fin de minimizar la influencia no deseada de algunos parámetros físicos, se ha adoptado un análisis sobre una cuenca hipotética y homogénea. Se considera una red de conductos también hipotética y vinculada a las subcuencas a través de nodos.

Para este análisis, se aplican los siguientes bloques del modelo SWMM: para la transformación precipitación-escorrentía, el bloque Runoff y para la propagación de escurrimiento en los conductos, el bloque hidrodinámico Extran.

La cuenca hipotética considerada, tiene un área de 64 hectáreas y se analizan 7 escalas espaciales. La forma de la cuenca es cuadrada y se

asume que no tiene almacenamiento en superficie ni existe evaporación. La impermeabilidad de la cuenca es del 100 % con pendientes constantes de 0.015 m/m y rugosidad de 0.025, para todos los niveles de discretización. Las características físicas de la cuenca y la red de conductos se presentan en las tablas 1.

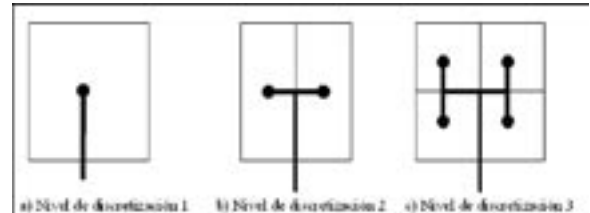


Figura 1. Esquemas topológicos de la cuenca hipotética para los primeros órdenes de discretización.

La figura 1 presenta, de manera ilustrativa, tres esquemas topológicos de la cuenca correspondiente a los niveles de discretización de menor detalle.

Tabla 1 – Características físicas de la cuenca y la red de conductos hipotéticas

Nivel de discretización	Subcuencas			Conductos				
	Número	Área (ha)	Ancho de drenaje (m)	Orden	Número total	Diámetro (m)	Longitud (m)	Longitud total (m)
7	64	1.0	100.00	1	64	0.60	50.00	3200.00
				2	32	0.70	70.70	2262.40
				3	16	0.80	100.00	1600.00
				4	8	0.90	141.40	1131.20
				5	4	1.00	200.00	800.00
				6	2	1.20	282.80	565.60
				7	1	1.40	400.00	400.00
6	32	2.0	141.42	1	32	0.70	70.70	2262.40
				2	16	0.80	100.00	1600.00
				3	8	0.90	141.40	1131.20
				4	4	1.00	200.00	800.00
				5	2	1.20	282.80	565.60
				6	1	1.40	400.00	400.00
5	16	4.0	200.00	1	16	0.80	100.00	1600.00
				2	8	0.90	141.40	1131.20
				3	4	1.00	200.00	800.00
				4	2	1.20	282.80	565.60
				5	1	1.40	400.00	400.00
4	8	8.0	282.84	1	8	0.90	141.40	1131.20
				2	4	1.00	200.00	800.00
				3	2	1.20	282.80	565.60
				4	1	1.40	400.00	400.00
3	4	16.0	400.00	1	4	1.00	200.00	800.00
				2	2	1.20	282.80	565.60
				3	1	1.40	400.00	400.00
2	2	32.0	565.69	1	2	1.20	282.20	565.60
				2	1	1.40	400.00	400.00
1	1	64.0	800.00	1	1	1.40	400.00	400.00

EFFECTOS DE LA DISCRETIZACIÓN EN LA SIMULACIÓN DE ESCORRENTÍA URBANA

Los conductos del sistema de drenaje hipotético son de sección circular y siguen un orden jerárquico. Los tamaños y las longitudes de los conductos aumentan con el orden jerárquico de los mismos y todos tienen una pendiente uniforme similar a la cuenca drenante (0.0015 m/m) y un coeficiente de Manning de 0.0125.

El número de subcuencas total aumenta con el nivel de discretización, del mismo modo la longitud total de la red de conductos. Así, pasar de un orden 7 a un orden 1, implica reducir la longitud total del sistema de 3200 m a 400 m.

Por otro lado, la lluvia utilizada en este análisis es una lluvia hipotética con una intensidad

constante de 20mm/h que no genere desbordamientos del sistema de drenaje. Se analizan varias duraciones de la lluvia: 20, 30, 60 y 120 minutos a fin de cubrir un rango de duraciones hasta el tiempo de concentración de la cuenca (120 minutos).

Huber y Dickinson (1992) propusieron calibrar el modelo a través del parámetro ancho de subcuenca, W_s , (cociente entre el área y la longitud de flujo), ya que influye directamente en los hidrogramas de diseño. Macor (2002) también sugiere el ajuste de este parámetro, dado que depende del criterio adoptado por el modelador para realizar la discretización o idealización de las subcuencas.

Tabla 2. Resultados de las simulaciones con el modelo SWMM

Duración de la lluvia = 20 minutos									
Núm. Subc.	Q (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Tp (min.)	α	W_s (m)	W_c (m)	ErQ (%)	ErV (%)	ErT (%)
64	1.40	4.27x10 ³	37	1.00	100.0	6400.0	0.0	0.0	0.0
32	1.40	4.27x10 ³	35	1.40	198.0	6336.0	0.0	0.0	5.0
16	1.40	4.27x10 ³	32	1.95	390.0	6240.0	0.0	0.0	14.0
8	1.40	4.27x10 ³	30	2.68	758.0	6064.0	0.0	0.0	19.0
4	1.40	4.27x10 ³	27	3.70	1480.0	5920.0	0.0	0.0	27.0
2	1.40	4.27x10 ³	25	5.07	2868.0	5736.0	0.0	0.0	32.0
1	1.40	4.27x10 ³	21	6.80	5440.0	5440.0	0.0	0.0	43.0
Duración de la lluvia = 30 minutos.									
Núm. Subc.	Q (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Tp (min.)	α	W_s (m)	W_c (m)	ErQ (%)	ErV (%)	ErT (%)
64	1.91	6.40x10 ³	41	1.00	100.0	6400.0	0.0	0.0	0.0
32	1.91	6.40x10 ³	40	1.37	194.0	6208.0	0.0	0.0	2.0
16	1.91	6.40x10 ³	36	1.80	360.0	5760.0	0.0	0.0	12.0
8	1.91	6.40x10 ³	34	2.50	707.0	5656.0	0.0	0.0	17.0
4	1.91	6.40x10 ³	33	3.35	1340.0	5360.0	0.0	0.0	20.0
2	1.91	6.40x10 ³	33	4.48	2534.0	5068.0	0.0	0.0	20.0
1	1.91	6.40x10 ³	30	5.72	4576.0	4576.0	0.0	0.0	27.0
Duración de la lluvia = 60 minutos									
Núm. Subc.	Q (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Tp (min.)	α	W_s (m)	W_c (m)	ErQ (%)	ErV (%)	ErT (%)
64	2.55	1.28x10 ⁴	65	1.00	100.0	6400.0	0.0	0.0	0.0
32	2.55	1.28x10 ⁴	65	1.17	165.0	5280.0	0.0	0.0	0.0
16	2.55	1.28x10 ⁴	64	1.34	268.0	4288.0	0.0	0.0	2.0
8	2.55	1.28x10 ⁴	64	1.58	447.0	3576.0	0.0	0.0	2.0
4	2.55	1.28x10 ⁴	63	1.88	752.0	3024.0	0.0	0.0	3.0
2	2.55	1.28x10 ⁴	62	2.33	1318.0	2636.0	0.0	0.0	5.0
1	2.55	1.28x10 ⁴	61	3.00	2400.0	2400.0	0.0	0.0	6.0
Duración de la lluvia = 120 minutos									
Núm. Subc.	Q (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Tp (min.)	α	W_s (m)	W_c (m)	ErQ (%)	ErV (%)	ErT (%)
64	3.55	2.56x10 ⁴	120	1.00	100.0	6400.0	0.0	0.0	0.0
32	3.55	2.56x10 ⁴	120	1.32	187.0	5984.0	0.0	0.0	0.0
16	3.55	2.56x10 ⁴	120	1.85	370.0	5920.0	0.0	0.0	0.0
8	3.55	2.56x10 ⁴	120	2.60	735.0	5880.0	0.0	0.0	0.0
4	3.55	2.56x10 ⁴	120	3.65	1460.0	5840.0	0.0	0.0	0.0
2	3.55	2.56x10 ⁴	120	5.30	2913.0	5826.0	0.0	0.0	0.0
1	3.55	2.56x10 ⁴	120	7.20	5760.0	5760.0	0.0	0.0	0.0

ErQ, ErV y ErT son los errores relativos de los caudales pico, volumen y tiempo al pico.

El parámetro W_s es del orden de magnitud de la raíz cuadrada del área de la subcuenca (Villeneuve y Gaume, 1993), y puede expresarse como:

$$W_s = \alpha \sqrt{A_s} \quad (2)$$

donde A es el área de la subcuenca expresada en metros cuadrados y α es un coeficiente a ser determinado en la calibración.

Siguiendo el criterio propuesto por Huber y Dickinson, se calibró el parámetro W_s para las escalas espaciales mayores a la de detalle (64 subcuencas), a efectos de conservar el caudal pico obtenido en esta escala. La calibración de W_s se realizó por prueba y error, considerando constantes los otros parámetros (rugosidad y pendientes de subcuencas y conductos) entre las distintas escalas.

A partir de la ecuación (2), se determinó el ancho de cada subcuenca (W_{s_i}) como función del área de la subcuenca y del coeficiente α común a todas las subcuencas.

En el caso de la cuenca teórica, para una escala dada, la superficie de las subcuencas es la misma, el ancho W_{s_i} es el mismo también para todas las subcuencas. Para cada escala se probaron diferentes valores de α hasta que el caudal pico calculado a la salida se ajustó al caudal pico calculado para la escala más fina. Finalmente, para cada escala se calculó el ancho total de la cuenca:

$$W_c = \sum_i W_{s_i} \quad (3)$$

A partir de los resultados obtenidos (tabla 2) se tiene que, para conservar los caudales pico, a medida que aumenta la escala se debe disminuir W_c .

A medida que la escala aumenta, una parte de la red de conductos es removida (la longitud total de conductos disminuye), se produce una pérdida de almacenamiento en el sistema y en consecuencia, se empunta el hidrograma y produce una concentración más rápida del flujo hacia la salida de cada subcuenca.

Para que con una escala mayor el modelo represente una función de respuesta similar a la obtenida con la escala más fina, es necesario compensar esta pérdida de almacenamiento. Para ello, se disminuye W_c , lo que equivale a aumentar la longitud del escurrimiento superficial.

EFFECTOS DE LA ESCALA ESPACIAL SOBRE UNA CUENCA REAL

En una cuenca real, en la cual la variabilidad de las propiedades físicas es muy grande, es imposible eliminar la influencia de algunos parámetros físicos. Sin embargo, es interesante la aplicación de este estudio a una cuenca real ya que da una idea de la medida en que la modelización simplificada afecta los resultados y las decisiones.

La cuenca elegida para este análisis es la cuenca urbana experimental Guadalupe Oeste, ubicada en la ciudad de Santa Fe, Argentina (Pedraza et al, 1996b). Esta cuenca, de 194 hectáreas (figura 2), ha experimentado en los últimos veinte años una fuerte urbanización que continúa en dirección norte, siguiendo el sentido de crecimiento de la ciudad. Este proceso de urbanización se ha visto alentado con la ejecución de obras de infraestructura y de servicios.



Figura 2. Cuenca Urbana Experimental Guadalupe Oeste.

El uso predominante del suelo es del tipo residencial unifamiliar, aunque existen, pero en menor medida, usos residencial multifamiliar, comercial, industrial y depósitos, institucional (escuelas, iglesias, estadios cubiertos, etc.) y espacios abiertos (plazas, parques, campos de juego, etc.). La Figura 3 ilustra los diferentes usos de suelo de la cuenca.

Dicho proceso de urbanización ha producido un incremento importante del área impermeable respecto de las condiciones previas. En la actualidad, la superficie impermeable media estimada representa un 44% de la superficie total de la cuenca. La impermeabilidad media directamente conectada al sistema de drenaje pluvial se estimó hidrológicamente en 32% de la superficie total y representa un 73% de la superficie impermeable total.

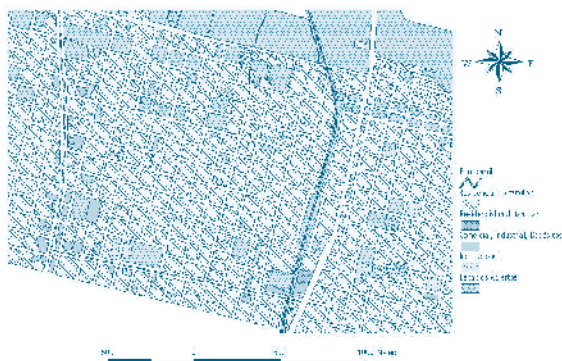


Figura 3. Usos del Suelo

La cuenca se caracteriza por tener pendientes superficiales bajas, en promedio, del orden del 0.3%. Los coeficientes de rugosidad para las áreas permeables e impermeables se estimaron en 0.25 y 0.10 respectivamente y fueron obtenidos mediante la calibración de modelos matemáticos (Pedraza et al., 1996a; Macor, 2001).

Para la calibración de los modelos se cuenta con caudales observados, obtenidos a partir de la transformación, mediante una curva de descarga o curva de gasto, de los niveles medidos por un dispositivo limnigráfico a la salida de la cuenca.

De acuerdo a las características topográficas, hidrológicas e hidráulicas de la cuenca se han determinado 59 subcuencas (escala de detalle o micro escala, figura 4). Esta escala se definió como aquella que permite identificar el área de aportes a cada imbornal (o grupos de imbornales si hay más de uno en una bocacalle). A partir de este nivel de discretización o micro escala de cálculo, se consideró la agregación espacial en 25 subcuencas o meso escala (figura 5) y en 6 subcuencas o macro escala (figura 6). En la tabla 3 se detalla un resumen estadístico de cada discretización.

Se efectuaron varias simulaciones con el modelo SWMM para las tres escalas de cálculo. Para cada nivel de discretización y para varias tormentas se calibró el parámetro W , ajustando los hidrogramas simulados a los hidrogramas observados de cada evento.

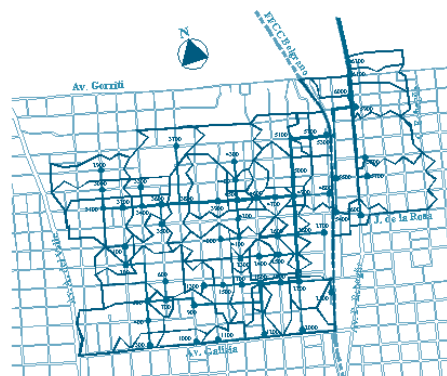


Figura 4. Discretización en 59 subcuencas



Figura 5. Discretización en 25 subcuencas



Figura 6. Discretización en 6 subcuencas

Se obtuvo, así, para cada escala un valor medio de la longitud de escurrimiento, tomado como valor de referencia. En la tabla 4 se muestra un resumen de las simulaciones para las tres escalas de discretización.

Tabla 3. Resumen de las características de las escalas de discretización

Escala	Canti- dad	Subcuencas					Conductos			
		Área (ha) (*)	Long. flujo superficial (m) (*)	Pen- diente (m/m) (*)	W (m) (*)	Imperm. (%) (*)	Longitud total (m)	Rugosi- dad (*)	Pen- diente (m/m) (*)	
Micro	59	3.3	132	0.0031	137	36	8630	0.02	0.0016	
Meso	25	7.8	427	0.0031	182	36	5765	0.02	0.0014	
Macro	6	32.4	808	0.0034	352	36	3026	0.02	0.0012	

(*) Valores medios

Tabla 4. Resumen de eventos de calibración del modelo SWMM

		EVENTO							
Fecha		28/04/95	05/05/95	30/01/96	28/02/96	11/03/96	12/03/96	15/06/96	
Duración		65	70	240	75	270	230	290	
Intens. máxima		30	30	72	36	30	48	78	
Lámina total		14	14	18	15	20	31	34	
Escala de discretización	Macro	Qp (m³/s)	0.88	0.61	1.10	0.99	1.06	1.57	1.46
		Tp (min)	106	223	95	93	220	124	127
		ErQ (%)	12.9	18.7	19.6	12.5	11.6	23.6	16.8
		ErT (%)	32.5	6.2	17.5	32.8	4.8	12.7	15.5
	Meso	Qp (m³/s)	0.74	0.53	0.96	0.86	0.91	1.41	1.36
		Tp (min)	105	279	91	91	227	123	124
		ErQ (%)	26.7	29.3	4.3	2.3	4.2	1.9	8.1
		ErT (%)	31.3	32.9	13.8	30.0	8.1	11.8	4.6
	Micro	Qp (m³/s)	0.64	0.47	0.85	0.76	0.79	1.24	1.22
		Tp (min)	94	287	81	79	224	118	117
		ErQ (%)	36.6	37.3	7.6	13.6	16.8	2.4	2.4
		ErT (%)	17.5	36.7	1.3	12.9	6.7	7.3	10.0

Qp es el caudal pico calculado, Tp es el tiempo al pico, ErQ y ErT son los errores relativos de los caudales pico y de los tiempos al pico.

De las calibraciones del modelo, se han obtenido los valores medios del ancho de subcuencas, W_s , de 104, 130 y 385 m para las escalas micro, meso y macro, respectivamente, las cuales son del orden de los valores estimados geoméricamente. Los valores de α fueron 0.57, 0.46 y 0.68, respectivamente. Los valores de la longitud total de la cuenca han sido: 6136 m (104 m x 59 subcuencas), 3250 m (130 m x 25 subcuencas) y 2310 m (385 m x 6 subcuencas) para las escalas micro, meso y macro, respectivamente.

Se adoptó como criterio para aceptar el desempeño del modelo que los errores relativos del caudal pico y del tiempo simulados fueran simultáneamente inferiores al 20% (Alley, 1986).

Considerando que la escala de detalle representa mejor la geometría de la cuenca, se la consideró como escala de referencia. Comparando los resultados de las simulaciones de las escalas mayores respecto de la micro escala se puede ver que para la macro escala los errores relativos de caudal pico son mayores al 20%. Por el contrario, los errores relativos de la escala media son menores simultáneamente al 20%. Además, los valores medios del coeficiente de correlación de los hidrogramas obtenidos respecto de los obtenidos para la micro escala son superiores a 0.80.

A partir de estos valores de los errores y de la consistencia geométrica de los valores de W_s obtenidos, se acepta la calibración realizada. A la relación entre el ancho medio de escorrentía y el área media de subcuencas, obtenidas de la calibración para las 3 escalas espaciales, se ajustó la ecuación (2), obteniéndose un valor medio del parámetro α igual a 0.63.

A modo ilustrativo se presentan en las figuras 7 y 8 los hidrogramas obtenidos de la simulación para dos tormentas y para las tres escalas espaciales consideradas. Se puede observar que existe una tendencia de disminución de los caudales pico y aumento del tiempo de base del hidrograma, a medida que aumenta la escala.

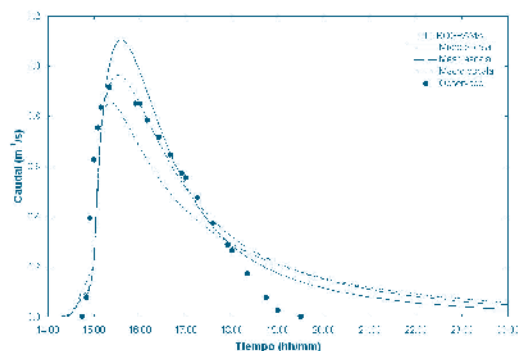


Figura 7. Hidrogramas simulados del evento del 30/01/1996

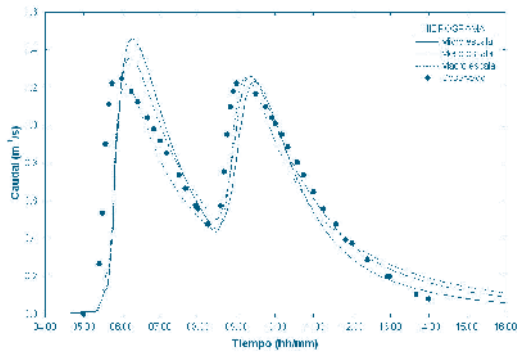


Figura 8. Hidrogramas simulados del evento del 15/06/1996

Esto significa que la escala espacial no sólo afecta el caudal pico, sino también la forma del hidrograma. El efecto de la escala sobre la forma del hidrograma puede estar originado en el grado de simplificación de las escalas y en la naturaleza no lineal de la transformación lluvia-escorrentía del bloque Runoff.

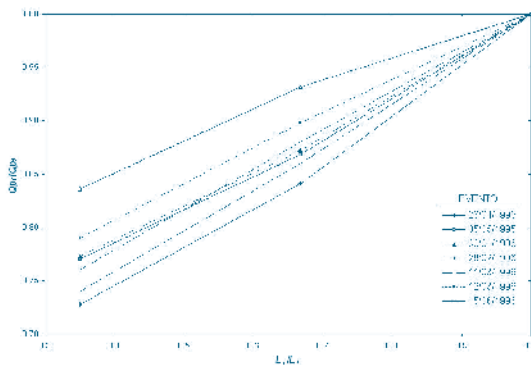


Figura 9- Efectos de la discretización espacial sobre la descarga pico

En la figura 9 se muestran los resultados de este análisis en forma adimensional, por medio de la relación entre el caudal pico de una escala genérica i , Q_{p_i} , y el caudal pico de referencia (microescala), Q_{p_f} , frente a la relación entre la longitud total de conductos de la escala i , L_i , y la longitud total de conductos de la microescala, L_f . La ordenada de la figura 9, Q_{p_i}/Q_{p_f} , representa la afectación del caudal pico debida a la escala espacial representada por la relación L_i/L_f .

Tabla 5 – Características de los eventos de verificación

Fecha	Duración (minutos)	Intensidad máxima (mm/h)	Lámina precipitada (mm)	Caudal pico (m³/s)	Tiempo al pico (min)	Volumen (m³)
07/03/95	295	198	61	3.5	60	4.8×10^4
08/04/95	270	90	56	2.4	60	3.1×10^4
03/02/96	240	72	18	1.3	65	1.4×10^4

Se puede observar que el efecto de la discretización espacial para la escala media varía entre 0.85 y 0.95 y entre 0.70 y 0.85 para la macro escala. En general este efecto es pronunciado para las duraciones más cortas. Para los órdenes de discretización más finos el efecto de la duración de la lluvia sobre los resultados de la simulación parece ser relativamente menos marcado.

VERIFICACIÓN DEL MODELO

Una vez calibrado el modelo para las tres escalas, se lo aplicó a tres tormentas de mayores intensidades. Los nuevos eventos son las lluvias del 07/03/95, 08/05/95 y 03/02/96. Las características de estas lluvias se muestran en la tabla 5.

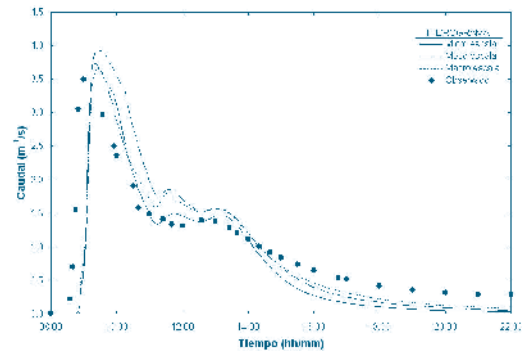


Figura 10. Hidrogramas del evento 07/03/95

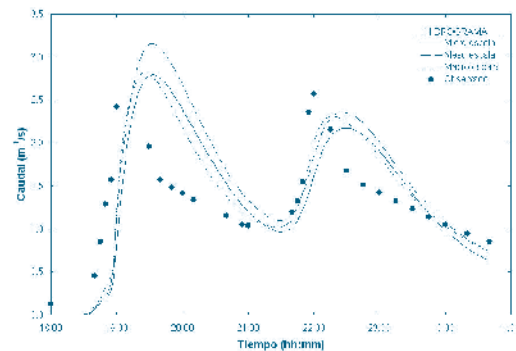


Figura 11. Hidrogramas del evento 08/04/95

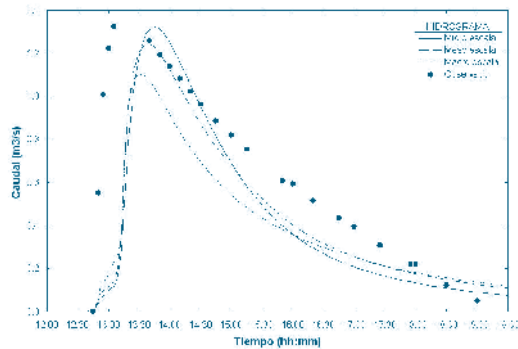


Figura 12 – Hidrogramas del evento 03/02/96

Durante estos eventos la capacidad de conducción fue sobrepasada en algunos tramos de la red de conductos, generándose efectos de sobrecarga. Los hidrogramas observados y calculados para los eventos considerados son mostrados en las figuras 10, 11 y 12. Sobre la base del análisis de estos hidrogramas y del criterio de los errores relativos de caudal pico, volumen y tiempo al pico, se aceptó la verificación del modelo.

PARÁMETROS DE AGREGACIÓN ESPACIAL

Se establecieron los siguientes parámetros para indicar el nivel de agregación espacial:

a)
$$\bar{A} = \sum \frac{A_i}{N} \quad (4)$$

\bar{A} : área media de subcuencas (ha), N es el número total de nodos.

b)
$$\eta = \frac{N}{L} \quad (5)$$

L es la longitud total de conductos en km.

c)
$$\kappa = \frac{L}{A} \quad (6)$$

L es la longitud total de conductos en km y A es el área total de la superficie de la cuenca en km².

Tabla 6 - Resumen de valores de los indicadores de agregación espacial

Escala	N	\bar{A} (ha)	W_s (m)	L (km)	η	κ
Micro	59	3.3	104	8.6	7	44
Meso	25	7.8	130	5.8	4	30
Macro	6	32.4	385	3.0	2	15

En la tabla 6 se visualizan los valores de los indicadores de agregación espacial expresados

mediante las ecuaciones (4), (5) y (6) para las tres escalas consideradas.

El parámetro \bar{A} da idea del tamaño medio de las subcuencas para cada escala. El parámetro η da idea del número de nodos (imbornal o grupo de imbornales) por longitud de conductos y el parámetro κ es un indicador de la densidad de conductos en cada escala. De la tabla 6 se desprende que a medida que aumenta la escala de discretización espacial, la superficie de las subcuencas aumenta pero la densidad de conductos disminuye notablemente, al igual que el número de nodos por longitud de conductos.

A partir de los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones se concluyó que la mayor escala que conserva una precisión admisible de caudales y niveles de agua en secciones de interés es la escala media, para la cual $\bar{A} = 8$ ha, $\eta = 4$ y $\kappa = 30$.

CONCLUSIONES

El uso de modelos de parámetros distribuidos para la simulación, diseño y/o verificación hidráulica de sistemas de drenaje pluvial se ha generalizado en los últimos años. Sin embargo, el modelista se encuentra ante una incertidumbre respecto al tamaño apropiado de la discretización espacial para la aplicación de los modelos.

El nivel de discretización determina directamente el grado de simplificación de los datos y de concentración de los parámetros de las subcuencas. A partir de los resultados, la escala espacial influye significativamente en los resultados de la simulación con el modelo SWMM.

La red de drenaje adiciona almacenamiento al sistema, atenuando y retardando los caudales pico. A medida que aumenta la escala una parte de la red es removida y en consecuencia se empuntan los hidrogramas y se anticipan los picos. Para que el modelo represente, con una escala mayor, una función de respuesta similar a la obtenida con una escala de detalle, es necesario compensar la pérdida de almacenamiento. Para ello, se debe reducir el ancho total de la cuenca, es decir, aumentar la longitud de escurrimiento.

Para futuras aplicaciones del modelo SWMM en cuencas similares a la del estudio (en cuanto a tamaño, impermeabilidad, pendientes y tipo de

lluvia), una vez que el modelista ha discretizado la cuenca, si no dispone de información pluviométrica, puede estimar el valor medio del parámetro W_s a partir de la ecuación (2) y del área media de las subcuencas. Nótese que $\eta = 4$ significa que se ha representado, en promedio, un nodo cada 250 m de longitud de conducto.

Para la cuenca experimental estudiada la escala espacial más grande que conserva la precisión admisible de los hidrogramas a la salida y de niveles de agua en nodos de interés es la meso escala.

Por lo tanto, si el objetivo de la aplicación del modelo requiere conocer con suficiente precisión el nivel de agua en nodos de interés, se sugiere el siguiente criterio de agregación: $\bar{A} \leq 8$ ha, $\eta \leq 4$ y $\kappa \geq 30$.

Las conclusiones obtenidas en este trabajo son válidas para las condiciones estudiadas tanto de lluvias como de la cuenca analizada. Futuros estudios con mayor cantidad de eventos y en otras cuencas urbanas, permitirían validar estas conclusiones bajo otras condiciones y eventualmente generalizar las mismas.

A fin de mejorar los resultados de esta investigación y de las posibles extensiones de este trabajo, es preciso contar con una suficiente cantidad de datos de las diversas variables involucradas, con mediciones distribuidas espacialmente en los principales nodos de la cuenca.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de la subcuenca
\bar{A}	Área media de subcuencas
d	Tirante de agua en el reservorio
d_p	Tirante de almacenamiento en depresión
ErQ	Error relativo del caudal pico
ErT	Error relativo del tiempo al pico
ErV	Error relativo del volumen
L	Longitud del canal o conducto
L_f	Longitud total de drenaje de la escala de referencia
L_i	Longitud total de drenaje del i ésimo nivel de discretización
N	Número entero
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
Q	Descarga o caudal
Qp	Caudal pico
Qp_f	Caudal pico de referencia
Qp_i	Caudal pico del i ésimo nivel de discretización
S	Pendiente de la subcuenca

S_f	Pendiente de fricción
T_p	Tiempo al pico del hidrograma
W	Ancho de escurrimiento o de la subcuenca
W_c	Ancho total de cuenca
W_s	Ancho de subcuenca
α	Coefficiente de ponderación
Δt	Intervalo de tiempo
η	Parámetro del nivel de agregación superficial
κ	Parámetro del nivel de agregación superficial

REFERENCIAS

- Alley, W. (1986) Summary of experience with the Distributed Routing Rainfall-Runoff Model (DR3M). Urban Drainage Modelling. Proceedings, International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data, UDM86, Dubrovnik. Edited by Maksinovic and Radojkovic. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1986.
- Bathurst J. C. (1986) Sensivity analysis of the Systeme Hydrologique Europeen for an upland catchment. Journal of Hydrology, 87 (Mar.), pp103-123.
- Calomino F. (1993) Hydrological uncertainties as a limiting factor in the improvement of models. Urban Storm Drainage. Precedings, US-Italy Bilateral Seminar. Water Resources Publications. Highlands Ranch, Colorado, USA.
- Coyler P. (1982) Storm data collection and analysis. Urban Storm Water Hydraulics and Hydrology. Proceedings Second International Conference on Urban Storm Drainage, Urbana, Illinois. Water Resources Publications. Highlands Ranch, Colorado, USA.
- Goodrich D. (1990) Basin scale and runoff model complexity. Technical Reports on Natural Resource Systems. Technical Report N° HWR 91-010. University of Arizona and USDA Agricultural Research Service, Southwest Watershed Research Center. Tucson, USA.
- Huber W. y Dickinson R. (1992) Storm Water Management Model, User's Manual, Version 4. U.S. Environment Protection Agency, Athens, USA.
- Macor, J.L. (2001) Efectos de la discretización espacial en la simulación de flujo de agua en redes de conductos. Informe de Tesis (defensa: junio 2001), Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos. FICH-UNL, Santa Fe, Argentina.
- Macor, J.L. (2002) Análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo Runoff-SWMM. . Revista Ingeniería Hidráulica en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Vol. XVII, N° 2, II época, pp. 17-26. Morelos, México. Abril-Junio 2002.
- Mazion E. y Yen B. C. (1994) Computational discretization effect on rainfall-runoff simulation. Journal of Water Resources Planning and Management, vol 120, N° 5, pp 715-734

- Metcalfe y Eddy, Inc., University of Florida y Water Resources Engineers, Inc. (1971) Storm Water Management Model, volume I - Final Report. EPA Report 11024DOC07/71 (NTIS PB-203289), Environmental Protection Agency, Washington,DC., USA.
- Pedraza, R.; Collins, J.; Macor J.; Pusineri, G.; Ocampo, C. (1996a) Influencia de la discretización espacial de las cuencas urbanas sobre parámetros de calibración de modelos de diseño. II Jornadas Nacionales de Saneamiento Pluvial Urbano, Córdoba, Argentina, 1996.
- Pedraza, R.; Collins, J.; Macor J.; Pusineri, G.; Ocampo, C. (1996b) Implementación y operación de una cuenca urbana piloto en la ciudad de Santa Fe (Prov. Santa Fe). XVI Congreso Nacional del Agua, San Martín de los Andes, Argentina, 1996.
- Pedraza, R., Gómez Valentín, M., Reyna, S. (2005) Un procedimiento de agregación de esquemas de modelación basado en relaciones de similitud hidrológica (Parte I y II). XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, Argentina, 2005.
- Roessner L. y Dickinson R. (1992) Storm Water Management Model User's Manual Version4: Extran Addendum. U.S. Environment Protection Agency, Athens, USA.
- Tao T. y Kouwen N. (1989) Spatial resolution in hydrologic modeling. Chanel flow and catchment runoff. Proceedings International Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula, B. C. Yen, editor, Charlottesville, Virginia, USA.
- Villeneuve, JP.; Gaume, E. (1993) Mise au point du modèle de simulation des axes secondaires. Contrôle de l'Operation des ouvrages d'interception de la communauté urbaine de Québec. Rapport Rp-28-A. Paris, Francia.
- Warwick J. (1989). Interplay between parameter uncertainty and model aggregation error. Water Resources Bulletin, 25 (2) pp 275-283.