

Discretización temporal de la tormenta sintética de Chicago

José L. Macor
Raúl A. Pedraza

Universidad Nacional del Litoral - Santa Fe, Argentina

El Método de Transformación Precipitación-Escorrentía es uno de los métodos utilizados frecuentemente para el cálculo de hidrogramas de proyecto en áreas urbanas. Su función de entrada es un hietograma sintético maximizado denominado tormenta de diseño. Aunque la distribución temporal de la tormenta de diseño es a menudo expresada como una función continua, para su aplicación en modelos de escurrimiento debe ser discretizada en intervalos de tiempo, generalmente coincidentes con el paso de tiempo computacional. A medida que dicho intervalo de tiempo es mayor, mayor es la atenuación de la intensidad pico instantánea, principalmente en funciones de máximos agudos como la Tormenta de Chicago, lo cual modifica los resultados de la modelación, principalmente en cuencas pequeñas y cuando se aplican modelos no lineales. Cuanto mayor es el intervalo de tiempo usado para definir el Hietograma de Chicago, mayor es la atenuación o amortiguamiento del caudal pico calculado. Se evalúa la influencia de la discretización temporal de la Tormenta de Chicago en los resultados de la simulación de una cuenca urbana piloto de la ciudad de Santa Fe, Argentina, obtenidos por aplicación del modelo SWMM (Storm Water Management Model).

Palabras clave: hidrogramas de proyecto, hietograma sintético, tormenta de diseño, distribución temporal, Tormenta de Chicago, discretización temporal, cuenca urbana.

Introducción

Esquematización de las cuencas urbanas para el diseño hidrológico

El diseño hidrológico es el proceso de evaluación del impacto de los eventos hidrológicos en un sistema y de determinación de parámetros hidrológicos (caudales, niveles, volúmenes, velocidades máximas) necesarios para el diseño de obras y/o para la implementación de medidas no estructurales (ej. zonificación de áreas de riesgo hídrico, pronóstico de crecidas en tiempo real y otros).

Para modelar los procesos hidrológico-hidráulicos en una cuenca urbana, en general se esquematiza la misma como un conjunto de subcuencas de características hidrológicas e hidráulicas homogéneas, vinculadas por tramos de canales y/o conductos.

La discretización de la cuenca se basa generalmente en los patrones de drenaje, pendientes superficiales, patrones de cobertura y uso del suelo. El mapa

de dinámica hídrica es un elemento básico para la subdivisión en subcuencas. En lo posible debe tener información al nivel de boca de tormenta, incluyendo el detalle de badenes y sentido del flujo.

Las subcuencas pueden variar en tamaño desde unas pocas hasta decenas de hectáreas. Las superficies de la cuenca y las subcuencas se determinan a partir de mapas topográficos y de contemplar los planes de crecimiento de la ciudad.

La superficie impermeable es una característica física clave de una cuenca urbana. Las superficies impermeables varían entre el 10 y el 30% de la superficie total en zonas residenciales de baja densidad, entre el 30 y el 60% en zonas residenciales de alta densidad y entre el 80 y el 100% en zonas comerciales centrales. La superficie impermeable puede dividirse en dos categorías:

- Superficie impermeable directamente conectada: es la que drena directamente al sistema de conductos o canales de drenaje (ej. techos y cubiertas im-

permeables de patios y veredas con desagües hacia un cordón-cuneta, calles pavimentadas y playas de estacionamiento).

- Superficie impermeable no conectada: es la que drena el agua pluvial sobre superficies permeables antes de llegar al sistema de drenaje (ej. techos y cubiertas que drenan sobre patios o jardines de suelo permeable).

En general, las metodologías basadas en la transformación precipitación-escurrimiento, distinguen dos tipos de superficie en la cuenca: la impermeable directamente conectada y la restante, también denominada *permeable*, compuesta por el suelo permeable más la superficie impermeable no conectada. Cada una de ellas incluye sus correspondientes parámetros geométricos e hidrológicos como superficie, longitud del flujo superficial, pendiente, tipo de suelo (pérdidas de escurrimiento) y coeficiente de rugosidad. Esta distinción se realiza debido a que:

- Las pérdidas de escurrimiento en ambas superficies son distintas: en la permeable se producen pérdidas por cobertura vegetal, almacenamiento superficial e infiltración, mientras que en la impermeable sólo existe el segundo tipo de pérdidas.
- Los tiempos de retardo son distintos: la superficie impermeable directamente conectada tiene una respuesta más rápida que la permeable, por lo que afecta principalmente la zona de pico del hidrograma (principalmente para las tormentas frecuentes), mientras que la permeable afecta la curva de recesión.
- La distinción entre los dos tipos de superficie permite calibrar en forma independiente el tiempo de retardo de cada una de ellas.

El Método de Transformación Precipitación-Escurrimiento permite determinar el hidrograma de proyecto en cuencas donde no se dispone de suficiente información hidrométrica (falta de datos, registro demasiado breve o incompleto), que es el caso más común en las cuencas urbanas. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Se determina un hidrograma areal maximizado, denominado *tormenta de diseño*, cuya lámina precipitada total es máxima para una recurrencia dada, con una duración y una distribución espacio-temporal especificadas.
- Se descuenta a la tormenta de diseño las pérdidas por interceptación, almacenamiento en depresiones superficiales e infiltración.

- Se calcula el hidrograma de escurrimiento generado por la tormenta de diseño mediante la aplicación de un modelo de transformación precipitación-escurrimiento. Se asume que la recurrencia del hidrograma calculado es la misma que la de la *tormenta de diseño*.

La principal crítica reside en el hecho de asignar a la crecida la misma recurrencia de la lámina total precipitada, despreciando los efectos sobre el hidrograma, tanto de la distribución espacio-temporal de la lluvia como del estado de humedad antecedente de la cuenca. En efecto, debe notarse que la recurrencia asociada a la tormenta puede ser distinta a las recurrencias asociadas con el caudal pico, el volumen de escurrimiento o la carga de contaminantes que resultan de esa lluvia.

Existen dos tipos de tormentas de diseño: sintéticas e históricas. Las primeras se obtienen a partir de la síntesis y generalización de datos puntuales de precipitación de un gran número de tormentas observadas, y las segundas son eventos que han ocurrido en el pasado, los cuales pueden ser bien documentados en términos de sus impactos sobre el sistema de drenaje.

Para el diseño hidrológico, las tormentas se definen por su duración, altura total precipitada, patrón temporal, características espaciales (distribución espacial media, movimiento de la tormenta, desarrollo espacial y decaimiento) y alguna medida de la lluvia antecedente.

Duración de la tormenta de diseño

La duración de la tormenta de diseño es un parámetro importante que define la altura de lluvia para una recurrencia dada y, por lo tanto, afecta el caudal pico resultante. En la selección de la duración se deben considerar tanto las características de la respuesta hidrológica de la cuenca como las duraciones típicas de las tormentas intensas de la región.

A diferencia de las cuencas rurales, en una cuenca urbana no existe solamente una función de respuesta sino dos: la correspondiente al área impermeable directamente conectada y la que pertenece al área restante, con distintas capacidades relativas de producción de escurrimiento y distintos tiempos de concentración (t_c). El máximo caudal pico puede estar dominado por la cuenca total o sólo por la parte impermeable directamente conectada.

La práctica corriente consiste en adoptar la duración de la tormenta de diseño igual o mayor que el t_c de la cuenca total. Sin embargo, por lo apuntado anteriormente, es aconsejable calcular los caudales generados para diferentes duraciones de la tormenta de di-

seño, contemplando los tiempos de concentración de las dos áreas mencionadas y luego adoptar aquella que produce la máxima descarga. El análisis de distintas duraciones es indispensable cuando se analizan sistemas con dispositivos de detención y/o retención, en los cuales la condición más crítica puede alcanzarse para largas duraciones una vez que se llenan los almacenamientos.

El tiempo de concentración de una sección de la red de drenaje es el tiempo de traslado de una onda desde el punto hidráulicamente más remoto (en tiempo) del área de aportes a dicha sección (ASCE, 1992). Es un parámetro fundamental en el diseño del sistema de drenaje.

Si bien muchas referencias definen el tiempo de concentración como el tiempo de traslado de una masa de agua al moverse aguas abajo en la cuenca, se debe notar que la velocidad de la onda cinemática para flujo superficial, usando la ecuación de Manning, es 5/3 de la velocidad del agua.

Si el estudio hidrológico tiene por objeto determinar parámetros de diseño para la construcción de obras nuevas o el reacondicionamiento de las actuales, se debe considerar en los cálculos el t_c del sistema con obras (o futuro), que será probablemente menor que el t_c del sistema actual.

Tormenta de Chicago

La distribución temporal de la precipitación total maximizada es un factor importante que afecta el volumen de escurrimiento y la magnitud y ubicación temporal del caudal pico.

Un método muy popular es el de la Tormenta de Chicago, desarrollado por Keifer y Chu (1957) con el objeto de determinar crecidas de diseño para el dimensionamiento de sistemas de drenaje urbanos. Se basa en la hipótesis que la intensidad media para cualquier duración menor a la duración total, tiene la misma recurrencia (es igual a la intensidad obtenida de la curva intensidad-duración-frecuencia, IDF, para dicha duración).

Estas tormentas son generalmente asimétricas. Un estudio de las probabilidades condicionales de lluvias intensas de diferentes duraciones (Frederick *et al.*, 1977) indica que esta hipótesis es muy conservadora, particularmente para tormentas largas.

El método permite determinar un hietograma patrón de pico único, con dos sectores: para tiempos anteriores al pico, con intensidad creciente y para tiempos posteriores, con intensidad decreciente.

Las lluvias intensas de duraciones cortas (treinta minutos o menos) usualmente ocurren dentro de tor-

mentas de duraciones largas, más que como eventos aislados. Este método contempla esta característica y considera una lluvia intensa de corta duración como parte de una lluvia de larga duración.

En general, se considera que la subcuenca en estudio está comprendida en un área mayor o conjunto de subcuencas. La duración del periodo de lluvia intensa se adopta igual al tiempo de concentración de la subcuenca y la duración de lluvia más larga es el máximo t_c asociado al proyecto de drenaje, t^* . Se supone que la precipitación antecedente para t^* es nula.

La intensidad media durante esta duración se obtiene de la curva IDF, cuya expresión para una recurrencia dada es:

$$i = \frac{a}{(b - t)^n} \quad (1)$$

i : intensidad media máxima correspondiente a una duración t [mm/h].

t : tiempo [min]

a, b y n : parámetros.

La lámina precipitada durante un tiempo t es:

$$P = i \frac{t}{60} \quad (2)$$

Sustituyendo (1) en (2):

$$P = \frac{a}{(b + t)^n} \frac{t}{60} \quad (3)$$

Derivando (2) y (3) con respecto al tiempo e igualando:

$$i = a \frac{(1 - n) t + b}{(t + b)^{n+1}} \quad (4)$$

Remplazando en (4) el t_c de la subcuenca, se obtiene la intensidad media para esa duración (periodo de lluvia intensa).

La posición del pico se establece con el parámetro, que da la medida del adelantamiento del pico en el hietograma (ilustración 1):

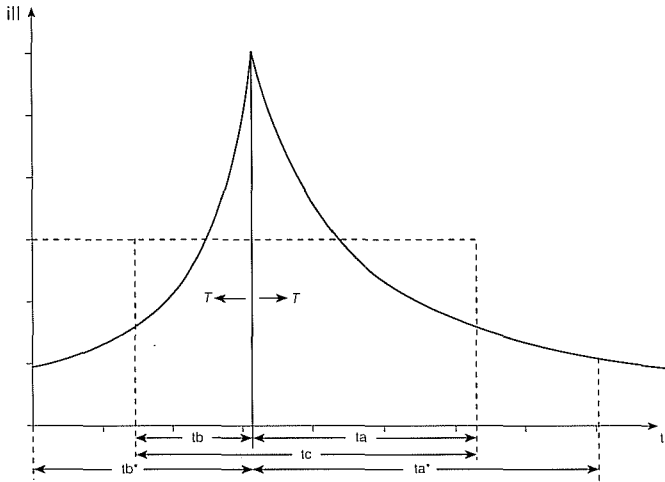
$$t_b = \gamma t_c \quad (5)$$

$$t_a = (1 - \gamma) t_c \quad (6)$$

$$t_b^* = \gamma t_c^* \quad (7)$$

$$t_a^* = (1 - \gamma) t_c^* \quad (8)$$

1. Método de Chicago



- γ : coeficiente de avance de la tormenta.
 t_b y t_b^* : tiempos anteriores al pico, medidos desde éste hacia la izquierda.
 t_a y t_a^* : tiempos posteriores al pico, medidos desde éste hacia la derecha.
 t_c y t_c^* : tiempos de concentración de la subcuenca (duración del periodo de máxima intensidad) y de la cuenca total, respectivamente.

varía entre 0 y 1. Si $\gamma = 0$ el pico se ubica al comienzo de la lluvia y si $\gamma = 1$ el pico se ubica al final. Despejando t_c de (5) y reemplazando en (4) se obtiene la expresión de la rama ascendente del hietograma:

$$i_b = a \frac{(1 - \gamma) \frac{t_b}{\gamma} + b}{\left(\frac{t_b}{\gamma} + b \right)^{n+1}} \quad (9)$$

Despejando t_c de (6) y reemplazando en (4) se obtiene la expresión de la rama descendente del hietograma:

$$i_a = a \frac{(1 - \gamma) \frac{t_a}{1 - \gamma} + b}{\left(\frac{t_a}{1 - \gamma} + b \right)^{n+1}} \quad (10)$$

Dada una precipitación total P de duración t , la parte de la precipitación caída antes del pico es:

$$P_b(t) = \gamma P = \gamma \frac{a}{(b + t)^n} \frac{t}{60} \quad (11)$$

Se supone que la precipitación antecedente $A(t^*) = 0$. La precipitación antecedente para un instante genérico t es ($t \propto t^*$):

$$A(t) = P_b(t^*) - P_b(t) \quad (12)$$

Influencia de la discretización temporal

Aunque la distribución temporal de la Tormenta de Chicago se expresa a menudo como una función continua, para su aplicación en modelos de transformación precipitación-escorrentía debe ser discretizada en intervalos de tiempo, generalmente coincidentes con el paso de tiempo computacional.

A medida que dicho intervalo de tiempo es mayor, mayor es la atenuación de la intensidad pico instantánea, lo cual modifica los resultados de la modelación, principalmente en cuencas chicas y cuando se aplican modelos no lineales.

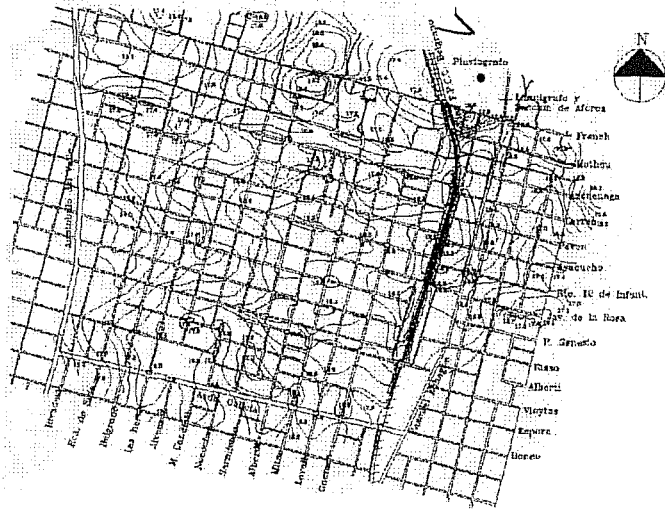
Para evaluar la influencia de la discretización temporal de la Tormenta de Chicago en los resultados de la modelación, se aplicó la misma a la cuenca urbana Piloto Guadalupe Oeste (Santa Fe, Argentina).

La cuenca piloto se ubica en la zona norte de la ciudad de Santa Fe, con una superficie de 202.9 ha. Las viviendas predominantes son de tipo residencial unifamiliar, aunque también existen, en escasa proporción, tinglados y galpones utilizados como depósitos y talleres. La cobertura impermeable total es del 50% y la impermeable directamente conectada a la red de drenaje representa el 36% de la superficie total. Las pendientes superficiales son bajas, del orden del 0.1%. El sistema de drenaje es dual, es decir, conformado por un componente superficial (cordón-cunetas) y otro subterráneo (conductos de hormigón armado de secciones circular y rectangular), vinculados por un con-

2. Foto aérea cuenca piloto



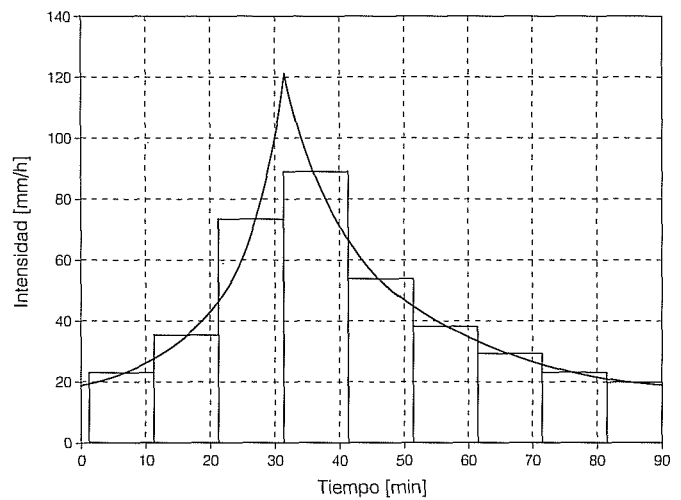
3. Planialtimetría de la cuenca piloto



junto de bocas de tormenta combinadas (sobre solera y cordón).

Se realizó la recopilación y análisis de información básica planialtimétrica y de fotografías aéreas en escalas 1:2500 y 1:5000, a partir de las cuales se elaboró un mosaico aerofotográfico semicontrolado actualizado (ilustración 2). También se recopilaron planos conforme a obra de pavimentos y desagües. Se realizó un extenso relevamiento planialtimétrico de la cuenca, consistente en la nivelación de perfiles transversales y longitudinales de calles y conductos (vinculados al sistema del Instituto Geográfico Militar), a partir del cual se elaboró un plano base semicontrolado, en escala 1:2500, con curvas de nivel sobre calzada cada 20 cm (ilustración 3). También se elaboró, en la misma esca-

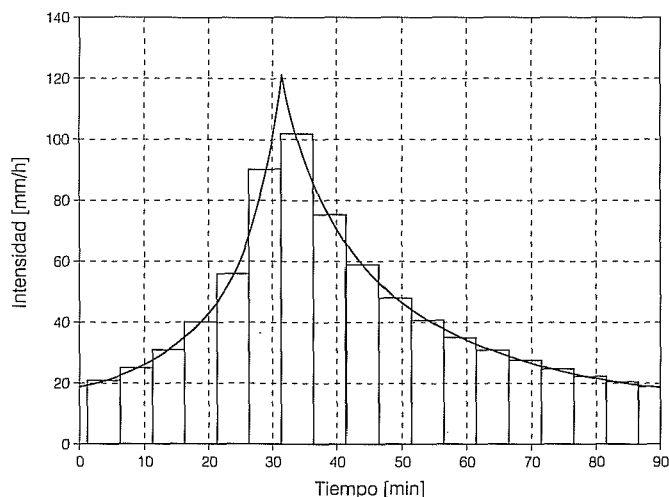
5. Discretización en 10 minutos



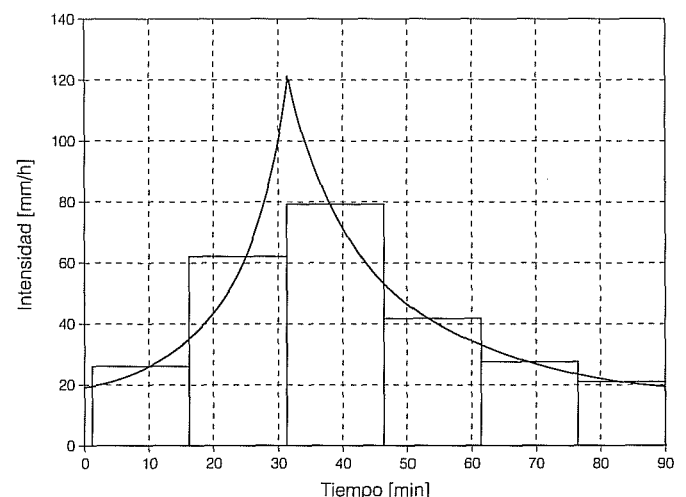
la, un mapa temático de dinámica hídrica. Se instalaron un pluviógrafo y un limnógrafo, que miden en forma sincronizada y en intervalos de tiempo pequeños de hasta un minuto. Se operan ambos aparatos desde febrero de 1995, disponiéndose en la actualidad de pares hietograma-hidrograma de una cantidad considerable de eventos. Se ejecutaron aforos líquidos en una sección de control a la salida de la cuenca para distintos estados hídricos, a partir de los cuales se determinó la curva de descarga. Se determinaron los parámetros geométricos y los porcentajes de superficie impermeable total y directamente conectada de cada subcuenca.

Para la aplicación de la Tormenta de Chicago se utilizó el modelo SWMM (*Storm Water Management Mo-*

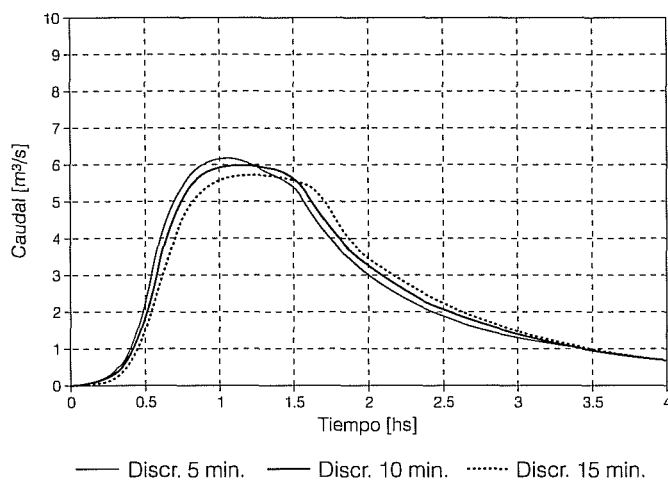
4. Discretización en 5 minutos



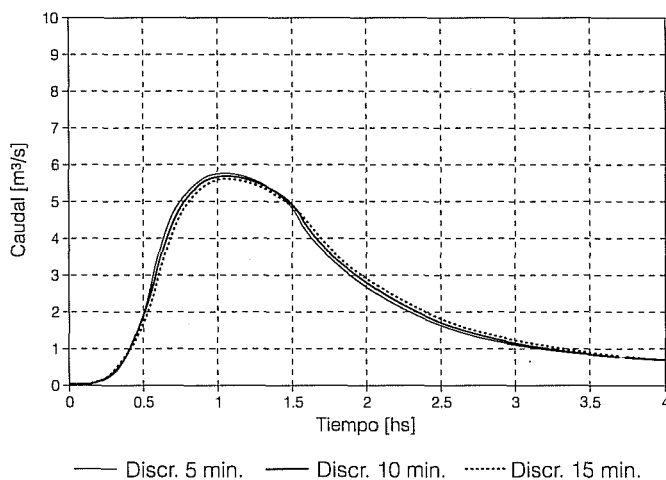
6. Discretización en 15 minutos



7. Hidrogramas resultantes cuenca número 1



8. Hidrogramas resultantes cuenca número 2



del), previamente calibrado a partir de datos de precipitación y escurrimiento registrados en la cuenca.

Se aplicó el modelo a tres subcuencas suficientemente impermeables para evitar que las pérdidas de escurrimiento pudieran influir en los resultados. Los parámetros físicos más relevantes de dichas subcuencas para la aplicación del modelo se resumen en el cuadro 1.

1. Parámetros relevantes

	Cuenca Nº 1	Cuenca Nº 2	Cuenca Nº 3
Área [hectárea]	71.5	65.7	23.9
Ancho [metros]	620	580	210
Pendiente [%]	2.3	2.2	3.1
Tiempo de concentración [min.]	18	18	16

Luego de calcular las funciones continuas de la Tormenta de Chicago, se discretizó la misma considerando intervalos de tiempo de cinco, diez y 15 minutos, y se aplicó el modelo a cada uno de los hietogramas discretos (ilustraciones 4 a 6). En las tres aplicaciones se utilizó un intervalo de tiempo computacional igual a un minuto.

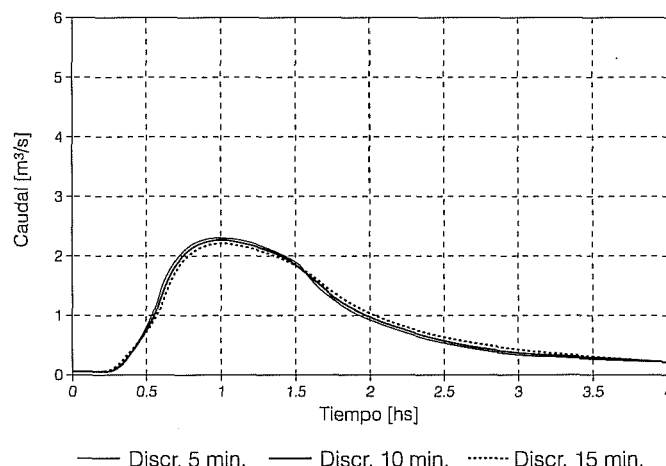
Para determinar el hietograma en intervalos de tiempo, se integró la función por el método de los trapecios. Al aplicar trapecios se consideraron intervalos suficientemente pequeños (un minuto) y luego se agruparon los incrementos de precipitación hasta completar el intervalo deseado (cinco, diez o 15 minutos), para

evitar que la integración incorporase un error por exceso en la precipitación por efecto de la aproximación lineal del hietograma.

Las atenuaciones de la intensidad máxima obtenidas fueron: 15.7, 26.7 y 34.8 % para las discretizaciones en intervalos de cinco, diez y 15 minutos, respectivamente. Los hidrogramas resultantes de las aplicaciones a cada subcuenca se muestran en las ilustraciones 7 a 9.

Se encontró una disminución del caudal pico con el aumento del intervalo de discretización temporal de la Tormenta de Chicago. Las atenuaciones del caudal pico obtenidas en cada subcuenca se presentan en el cuadro 2 y están referidas al caudal obtenido con la discretización temporal de la tormenta de cinco minutos.

9. Hidrogramas resultantes cuenca número 3



2. Disminuciones del caudal pico

Discret. temporal	Cuenca Nº 1	Cuenca Nº 2	Cuenca Nº 3
10 [minutos]	1.0%	1.0%	0.83%
15 [minutos]	2.3%	2.3%	1.93%

Conclusiones

La discretización temporal de la tormenta de Chicago introduce una atenuación del caudal pico calculado con los modelos de diseño. Cuanto mayor es el intervalo de tiempo usado para definir el Hietograma de Chicago, mayor es la atenuación o amortiguamiento del caudal pico calculado.

Los parámetros de calibración de los modelos (como la longitud y coeficiente de rugosidad del flujo superficial), además de representar las características hidráulicas de cada subcuenca, tienen incorporados implícitamente un sesgo relativo a la discretización espacio-temporal adoptada para simular el sistema real. Por lo tanto, si es posible calibrar dichos parámetros a partir de información pluviométrica e hidrométrica ob-

servada, corresponde asociar los valores calibrados a la discretización espacio-temporal utilizada y especificar la misma.

Recibido: noviembre, 1997

Aprobado: enero, 1998

Referencias

- Chow, V.T., D., Maidment y I., Mays. 1995. *Hidrología aplicada*. Capítulo 14: Tormentas de Diseño, pp. 455-505. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Frederick, R. H., Myers, V. A. y Auciello, E. P. *Five to 60 minute precipitation frequency for the eastern and central United State*. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-34, Silver Springs, MD.: U.S. National Weather Service.
- Huber, W. C. y R. E., Dickinson. 1988. *Storm water management model. Version 4*. Athens, GA.: U.S. Environmental Protection Agency.
- Keifer, C. J. y H. H. Chu. 1957. Synthetic storm pattern for drainage design. *ASCE J Hydraulics Division*.
- Water Environment Federation - American Society of Civil Engineers (ASCE). 1992. *Design and construction of urban stormwater management systems*. New York: ASCE.

Abstract

Macor J.L. & R. A. Pedraza "Temporal discretization of the synthetic Chicago storm". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XIII Num. 3, pages 5-11 September-December, 1998.

One of the methods frequently used for the project hydrographs calculation in urban areas is the precipitation - runoff transformation method. Its input function is a synthetic maximized hyetograph that it is called "design storm". Although the temporal distribution of the design storm is often expressed as a continue function, its application in runoff models needs to be discretized in time intervals that generally coincide with the computational time step. The greater the interval of time, the greater the instantaneous peak intensity attenuation, mainly in sharp maxima as the Chicago storm, that modifies the simulation results, specially in small basins and when no lineal models are applied. The greater the time interval used to define Chicago hyetograph, the greater the attenuation of the calculated peak flow. The results of the experimental basin simulation on Santa Fe city (Argentina) are obtained by the application of SWMM model (Storm Water Management Model). The temporal discretization influence of the Chicago Storm on these results is evaluated here.

Key words: Project hydrographs, Synthetic hyetograph, Design storm, time distribution, Chicago storm, time segregation, urban catchment.

Dirección institucional de autores:

José L. Macor, Raúl A. Pedraza

Universidad Nacional del Litoral - Santa Fe, Argentina
C.C. 495 - 3000 Santa Fe (SF) - Argentina
Teléfono: (54) (42) 57 12 24
Email: josem@fich.unl.edu.ar