

Análisis de la peligrosidad de la escorrentía pluvial en zona urbana utilizando un enfoque numérico-experimental

Leonardo S. Nanía-Escobar

Universidad de Granada, España

Manuel Gómez-Valentín

José Dolz-Ripollés

Universidad Politécnica de Catalunya, España

La escorrentía en las calles a causa de la lluvia es un hecho frecuente en ciudades con sistemas de drenaje pluvial tanto superficial como subterráneo. Los sistemas superficiales se utilizan para transportar las aguas pluviales hasta ejes drenantes de mayor importancia y los subterráneos llevan el agua pluvial por un camino superficial antes de llegar a los imbornales o bocas de tormenta. En el presente artículo se describen las características de la escorrentía en calles y se presenta un modelo numérico creado para analizar el flujo en redes de calles, utilizando los resultados experimentales obtenidos en cruces de calles con relaciones de anchos 1:1, 1:2 y 2:3, e incluyendo la simulación numérica de la captación de caudales a través de imbornales. Se describen los criterios existentes para evaluar el riesgo del flujo en las calles, dos de los cuales son de desarrollo propio. Como ejemplo de aplicación se presenta el análisis del flujo en una red de calles de la ciudad de Mendoza, Argentina, con el modelo numérico descrito. Se analizan los resultados en función de cuatro criterios de riesgo diferentes. Se concluye que el modelo presentado es una herramienta sumamente útil para el análisis del flujo en redes de calles, la aplicación de los criterios de riesgo existentes y para estudiar la influencia del número de imbornales en el cumplimiento de dichos criterios.

Palabras clave: análisis del riesgo, cruces de calles, división del flujo, escorrentía en calles, estudio experimental, imbornales, modelo numérico, redes de calles.

Introducción

Normalmente las calles no se diseñan para conducir el agua de lluvia en grandes cantidades, sino para facilitar la circulación de vehículos y personas en general. Sin embargo, suelen estar preparadas para conducir una cantidad de agua, principalmente la que se genera en la misma calle a causa de la lluvia, con el propósito de que sea interceptada en el transcurso de un corto trayecto por alguna boca de tormenta o imbornal.

En ciudades en crecimiento es común que el sistema de drenaje quede infradimensionado para tormentas medianas, entre otras razones, debido al aumento del área impermeable aguas arriba del sistema de drenaje en cuestión. En estas situaciones, el sistema alcanza rápidamente su máxima capacidad, pudiendo incluso funcionar a presión, en el caso de que sea subterráneo, y su línea piezométrica llega a alcanzar la cota del terreno.

A partir de ese momento, el agua que escurre por las calles ya no puede ser captada y si esta situación se agrava aún más, los imbornales no sólo son inútiles para admitir el agua, sino que se convierten en una fuente de salida de agua. Si esto sucede sólo en un imbornal, puede que el exceso de escorrentía sea captado a una corta distancia aguas abajo, pero si la situación se generaliza, es posible que la escorrentía se transforme en una gran corriente de agua que se mueve por las calles. Así, los calados y las velocidades, más aún si la pendiente de las calles es importante, pueden poner en peligro la seguridad de peatones e impedir la circulación de vehículos. Por esta razón es importante conocer no sólo los caudales, sino también los calados y velocidades máximas que pueden alcanzarse en las calles en relación con una tormenta de un determinado periodo de retorno. Además, esta información puede ayudar en gran medida a localizar las zonas donde podría ser necesario

un redimensionamiento del sistema de drenaje y dónde sería más urgente o prioritario.

Otro motivo por el cual puede ser interesante modelar el flujo en redes de calles es para complementar la modelación del flujo en un sistema de drenaje pluvial. Surge así el concepto de *drenaje dual*, que considera al agua generada por la lluvia en medio urbano moviéndose en dos planos paralelos: uno subterráneo, formado por el sistema de alcantarillado, y uno superficial, formado por la red de calles, ambos interconectados por medio de las bocas de tormenta o imbornales, donde se permite el libre intercambio de flujo entre ambos planos en todo momento; esto es lo que sucede realmente; por lo tanto, una modelación de este tipo permitiría un análisis más riguroso del drenaje urbano.

Utilizando este concepto, si un sistema de drenaje es insuficiente para conducir toda la escorrentía que se genera en la superficie, pero se demuestra a través de la modelación del flujo en las calles que el agua que no entra en el sistema produce calados y velocidades que no superan ciertos límites impuestos como criterios de diseño, o que la duración de la situación no es importante, sería posible contar con una *capacidad adicional* del sistema que brindaría esa conducción *controlada* del agua por las calles, con lo que quizá podría evitarse una costosa obra de rehabilitación.

En este tipo de análisis cobra importancia no sólo el estudio de la escorrentía en las calles sino también el de la eficiencia de los imbornales o bocas de tormenta. Esta metodología también puede usarse para determinar el número óptimo de imbornales compatible con los criterios de riesgo adoptados.

Características del flujo en las calles

El flujo en las calles puede considerarse unidimensional, mientras que en los cruces de calles el flujo puede tener una estructura bi- o tridimensional. Otra característica particular de flujo en calles es su relación de aspecto (relación entre el calado y el ancho), que puede ser desde diez, para los calados del orden de 1 m, hasta cien, en el caso de que los calados sean del orden de la decena de centímetros.

Descripción del modelo numérico *Menred*

Se trata de un modelo no comercial desarrollado en la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, por Nanía (1999), con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico del flujo en una red de calles. Recientemente el modelo fue mejorado al incluir la extracción de caudales de las calles a través de los imbornales o rejillas de captación (Guirado, 2003).

A continuación se describe brevemente el modelo, que consta de un módulo de transformación lluvia-escorrentía y de otro que resuelve el flujo en la red de calles propiamente dicha.

Módulo de transformación lluvia-escorrentía

La transformación lluvia-escorrentía se realiza en la superficie de las manzanas, que son simuladas mediante planos inclinados de área equivalente, caracterizados por sus dimensiones, pendientes y coeficientes de rugosidad de Manning. Se aplica la teoría de la onda cinemática para transformar la precipitación que cae en estos planos inclinados en escorrentía, suponiendo que el flujo que se desarrolla en ellos es el denominado *overland flow*. De este modo se simula el tránsito del agua desde el momento en que cae hasta que alcanza el conducto principal de desagüe.

Resolución del flujo en las calles

Para el cálculo del flujo en las calles se utilizan las ecuaciones completas de Saint-Venant (1871). Dada la naturaleza de estas ecuaciones, es necesario recurrir a métodos numéricos para su resolución. Mediante estos métodos numéricos se obtiene la solución del flujo en puntos seleccionados de una malla en el dominio espacio-tiempo, proceso conocido como discretización. De esta manera, cada calle se divide en N número de tramos iguales de una longitud x , con lo que queda discretizada en $N-1$ puntos interiores y dos puntos extremos, en los cuales se obtienen las características del flujo en términos de calado y velocidad. El esquema numérico empleado para resolver el flujo en los puntos interiores de la calle es el esquema de MacCormack (Chaudhry, 1993), mientras que en los puntos extremos se utiliza el esquema de intervalos específicos del método de las características (Gómez, 1988). Para un tratamiento detallado de las condiciones iniciales y de contorno consideradas en el modelo numérico puede consultarse el trabajo de Nanía (1999).

Cálculo del caudal extraído por los imbornales o rejillas de captación

Para incluir la influencia de los imbornales o rejillas de captación se utilizan las curvas de eficiencia de captación obtenidas experimentalmente por Gómez *et al.* (2000), que responden a la función:

$$E = A \left(\frac{Q}{y} \right)^{-B} \quad (1)$$

donde E es la eficiencia de captación, definida como Q_i/Q ; Q_i es el caudal interceptado; Q es el caudal circulante por una calle de 3 m de ancho, en l/s; y es el calado del flujo inmediatamente aguas arriba de la reja, en mm, y A y B son parámetros de ajuste que se definen en función de las características geométricas de las rejillas como sigue:

$$A = \frac{0.39}{A_g^{-0.35} p^{-0.13}} (n_t + 1)^{0.01} (n_l + 1)^{0.11} (n_d + 1)^{0.03} \quad (2)$$

$$B = 0.36 \frac{l}{a}$$

donde A_g es el área que engloba todos los huecos de la reja; $p = A_H/A_g \times 100$, el porcentaje de área de huecos respecto al área que los engloba a todos; n_t es el número de barras transversales al flujo; n_l , el número de barras longitudinales; n_d , el número de barras diagonales; l , la longitud de la reja en la dirección del flujo y a , el ancho de la reja. Con estas relaciones se puede calcular el caudal que extrae cada una de las rejillas de captación de la calle en función del calado inmediatamente aguas arriba de la reja y de las características geométricas de la misma.

Resolución del flujo en los cruces de calles

Según sea el tipo de flujo en las calles de entrada y en las de salida, y según sea el tipo de cruce de que se trate, se usa el enfoque experimental o el teórico para la resolución del flujo en los cruces. El enfoque experimental se basa en los resultados de ensayos realizados en un cruce de calles ortogonales con flujo supercrítico tanto

en las calles de aproximación como en las de salida del cruce. Para el caso de cruces de calles de anchos iguales, estas experiencias se recogen en Nanía (1999) o Nanía *et al.* (2004), en donde se obtienen las relaciones entre las potencias de los flujos de entrada y los caudales de salida (presentados en la ilustración 1) y otras relaciones útiles para la formulación del modelo numérico. En la ilustración 1, W_x y W_T se refieren a la potencia del flujo de entrada en la dirección "x" y a la suma de potencias de ambos flujos de entrada, respectivamente, y Q_{sx} y Q_T se refieren al caudal de salida por la calle de la dirección "x" y a la suma de caudales de salida, respectivamente. La potencia del flujo de entrada en la dirección "x", W_x , se puede calcular como:

$$W_x = \frac{\gamma}{b^{2/3} g^{1/3}} \cdot \frac{Q_{ex}^{5/3}}{F_{ex}^{2/3}} \cdot \left(1 + \frac{F_{ex}^2}{2} \right) \quad (3)$$

donde γ es el peso específico del fluido; Q_{ex} y F_{ex} son el caudal y número de Froude, respectivamente, del flujo de entrada en la dirección "x"; b es el ancho de la calle, y g es la aceleración gravitatoria.

Para el caso de cruces de calles de anchos desiguales (relaciones de anchos 1/2 y 2/3), se utilizan los resultados experimentales de Gonzalo (2002), que también obtiene una relación entre la potencia de los flujos de entrada y los caudales de salida (ilustración 2). Las funciones de ajuste a los datos experimentales se indican en dicha ilustración.

Los cruces que no reúnen las condiciones necesarias para que pueda aplicarse la metodología experimental, así como todas las bifurcaciones y uniones, se resuelven

Ilustración 1. Ley de variación que fija la proporción entre caudales de salida en la dirección "x", en función de la proporción de potencia del flujo de entrada en la misma dirección para calles de anchos iguales (Nanía, 1999).

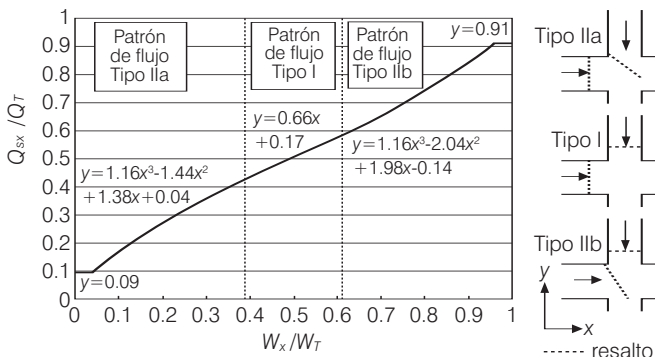
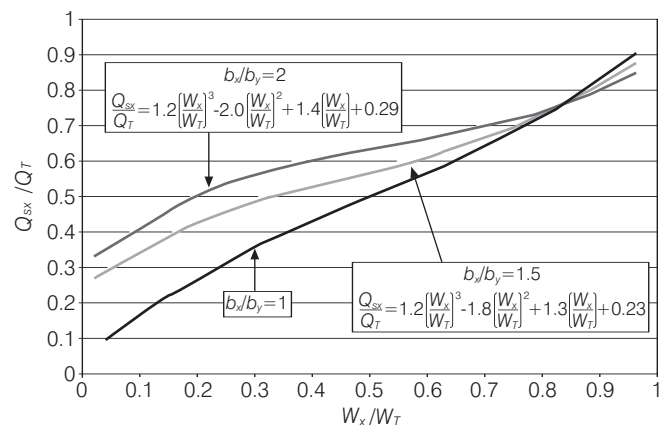


Ilustración 2. Ley de variación que fija la proporción entre caudales de salida en la dirección "x", en función de la proporción de potencia del flujo de entrada en la misma dirección para calles de anchos desiguales (Gonzalo, 2002).



de manera que se cumplan los principios de conservación de la masa y de la energía entre los flujos de entrada y de salida del cruce.

Criterios para la evaluación de la peligrosidad del flujo en las calles

La seguridad de las actividades ciudadanas durante el suceso de lluvia, como el tránsito peatonal y vehicular, o la no inundación de viviendas, es el objetivo principal del funcionamiento del sistema de drenaje. No puede negarse la importante función que cumplen las calles en este sentido, debido a la gran capacidad de transporte del flujo que muchas de ellas pueden tener, pero su función principal sigue siendo, por una parte, la acera, la circulación de personas y, por la otra, la calzada, el tránsito de vehículos.

El flujo circulante por calles y aceras debería ser tal que los parámetros hidráulicos de la misma, calados, velocidades o combinaciones de los mismos, se mantuvieran por debajo de ciertos valores límite aconsejables. No hay muchos trabajos referentes a criterios de seguridad del flujo en zona urbana. Entre los encontrados en la bibliografía podemos citar los siguientes:

Criterios basados en un calado máximo admisible del flujo

En lo que concierne a daños materiales y a minimización de los mismos, podemos convenir que un calado máximo admisible en una calle es aquel que no permite el ingreso del agua pluvial en edificios públicos y privados. Los criterios basados en este concepto son los que se describen a continuación:

Criterio de Denver. El *Manual de criterios de drenaje de Denver*, Colorado, Estados Unidos (Wright-McLaughlin, 1969), establece que en las calles definidas como "locales", categoría en la que entrarían las calles sujetas a este tipo de estudio, se permite un calado tal que la cota de la lámina de agua no produzca la inundación de la planta baja de edificios residenciales, públicos, comerciales e industriales, y como máximo se aceptan 45 cm sobre el nivel mínimo de la calle. En calles de mayor importancia, los criterios van siendo cada vez más restrictivos.

Criterio de Mendoza. En la ciudad de Mendoza (República Argentina), dadas las características de la urbanización y siguiendo el criterio de Denver, el calado máximo admisible en la calle que no produciría el ingreso del agua en edificios públicos o privados se ha considerado de 30 cm. Este criterio ha sido utilizado como parámetro para analizar la peligrosidad del flujo en las calles de esa ciudad (Nanía, 1999).

Criterio del Condado de Clark. El *Manual de criterios hidrológicos y de diseño del drenaje del condado de Clark*, Nevada, Estados Unidos (CCRFCD, 1999) establece que para las calles locales con anchos menores a 24 m se permite considerar un calado máximo sobre la parte más baja de la calle, normalmente junto al bordillo, de 30 cm, para evaluar la capacidad de transporte de la misma. Por otro lado, en zonas con riesgo de inundación, se establece que el nivel de piso terminado en las viviendas debe ser, como mínimo, 45 cm sobre el nivel de la parte alta del bordillo, o bien, deben estar protegidas contra inundaciones, lo que estaría aceptando, en esas zonas, la ocurrencia de calados de ese calibre.

En otras ciudades, como Austin, Texas, Estados Unidos, se utiliza el criterio de dejar reservada una zona de la calzada, la más alta, junto a la coronación, para la circulación de vehículos de emergencia. De este modo no se define un calado máximo en forma explícita, sino que se hace implícitamente, definiéndolo como aquel que no supere la cota de la coronación de la calle, valor que puede variar ampliamente en función del ancho de la calle y de las pendientes transversales que posea (*City of Austin Department of Public Works*, 1977).

Criterios basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo

Muchas veces no es suficiente con definir sólo un calado máximo para saber si un determinado flujo es peligroso, sino que es necesario saber algo con respecto a la velocidad o la combinación entre calado y velocidad. Los criterios que tienen en cuenta también la velocidad se describen a continuación:

Criterio de Témez. Este criterio, propuesto por Témez (1992), se utiliza para definir una zona de inundación peligrosa, aquella en donde existe serio riesgo de pérdida de vidas humanas o graves daños personales. Para que una zona merezca tal calificativo deben darse las siguientes condiciones: calado mayor a 1 m, velocidad mayor a 1 m/s y producto de calado por velocidad mayor a 0.5 m²/s. Este calado máximo de 1 m podría resultar adecuado para el análisis de vías de intenso desagüe y para evaluar el riesgo de pérdida de vidas, pero puede resultar excesivo en zonas densamente pobladas, pues un calado de esa magnitud, sin tener en cuenta la velocidad, ocasionaría, quizá no pérdida de vidas, pero sí cuantiosos daños materiales. En cambio, una velocidad máxima de 1 m/s puede resultar demasiado restrictiva, como se verá más adelante en el ejemplo de la ciudad de Mendoza.

Criterio de Abt. El criterio de peligrosidad utilizado por Témez para velocidades de entre 0.5 y 1 m/s, evaluado

como un producto límite de velocidad por calado de $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$, es un criterio tomado aparentemente de las experiencias de Abt *et al.* (1989), quienes tuvieron en cuenta velocidades del flujo de 0.36 a 3.05 m/s y calados de 0.49 a 1.2 m . Por este motivo, estimamos que ese valor límite del producto de la velocidad por el calado puede tomarse como criterio, por lo menos con velocidades de hasta unos 3 m/s . Para estas condiciones del flujo, Abt *et al.* encontraron que las personas perdían la estabilidad para valores del producto velocidad por calado de 0.70 a $2.12 \text{ m}^2/\text{s}$, dependiendo de la altura y peso de las personas (a mayor producto peso por altura, mayor estabilidad). Teniendo en cuenta estos valores e imponiendo un límite de $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$, independientemente del peso y altura de las personas, estaríamos considerando coeficientes de seguridad de 1.4 a 4.2 .

Criterio del Condado de Clark. En el *Manual de criterios hidrológicos y de diseño del drenaje del condado de Clark*, Nevada, EE.UU. (CCRFCD, 1999) se exige que en las calles con anchos menores a 24 m , el producto del calado en la parte más baja de la calle, junto al bordillo, por la velocidad no supere el valor de $0.55 \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor es algo superior al del criterio anterior, por lo que se tomará como referencia el de Abt.

Criterio de estabilidad al deslizamiento. Este criterio fue propuesto por Nanía (1999), ante la ausencia de otros criterios que tomaran en cuenta la velocidad y el calado del flujo, en conjunto. Para elaborar este criterio, se consideró la estabilidad al deslizamiento de una persona ante la fuerza de arrastre que ejerce el flujo sobre ella. Para establecer dicho criterio, se planteó que la fuerza que ejerza el agua sobre una persona debe ser tal que no provoque su deslizamiento ni su caída (ilustración 3). La fuerza de arrastre del agua puede evaluarse como:

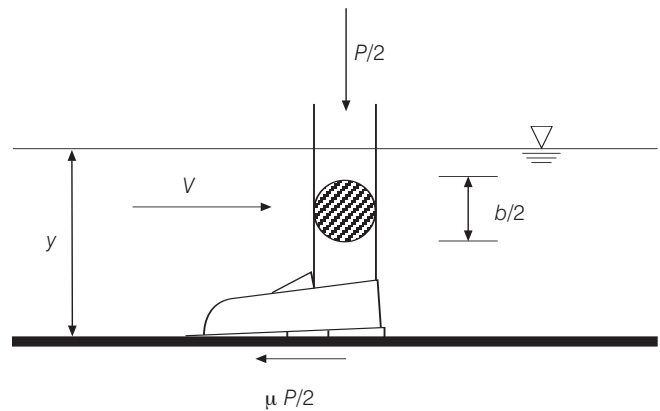
$$F_1 = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (4)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre, que depende básicamente de la forma de la superficie contra la cual choca el fluido; ρ es la densidad del fluido; A , la proyección frontal del área en donde actúa la fuerza del agua, que es igual a $y \cdot b$, el calado por el ancho de la persona, en este caso de las piernas, y V es la velocidad del fluido. Por otro lado, suponiendo que la persona en cuestión sea capaz de mantenerse en pie, la fuerza que equilibrará a la de arrastre será la de la fricción del calzado sobre el suelo y que sería igual a:

$$F_2 = \mu P \quad (5)$$

donde μ es el coeficiente de fricción, que depende de los materiales del calzado y del suelo, y del estado de

Ilustración 3. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía.



ambos, y P es el peso de la persona. No se tiene en cuenta aquí el empuje vertical hacia arriba generado por el volumen líquido desalojado por la parte sumergida del cuerpo. Considerando que el coeficiente de arrastre para un cilindro de altura infinita es igual a 1.2 (Streeter y Wylie, 1979), que la densidad del agua es de $1,000 \text{ kg/m}^3$, el ancho de las piernas $b = 0.1 \text{ m} \times 2 = 0.2 \text{ m}$, el peso de la persona es de 60 kg y el coeficiente de fricción entre caucho y hormigón húmedos es igual a 0.50 (Gieck, 1981) —con un coeficiente de seguridad de dos, para incluir el efecto del empuje y la posible variación de los parámetros incluidos—, la condición de estabilidad vendría dada por la siguiente desigualdad:

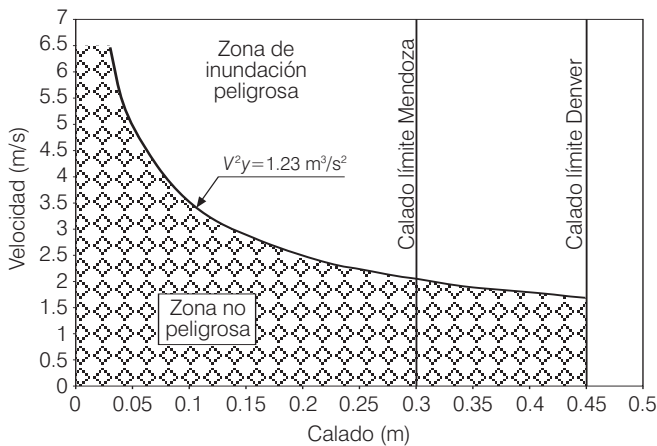
$$V^2 y \leq \frac{2\mu P}{C_D \rho b^2} = \frac{2 \cdot 0.5 \cdot 60 \cdot 9.81 \text{ m}^3}{1.2 \cdot 1,000 \cdot 0.2 \cdot 2 \text{ s}^2} = 1.23 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \quad (6)$$

El criterio de peligrosidad elaborado quedaría así definido, teniendo en cuenta también los criterios de calados máximos, como se muestra en la ilustración 4.

Criterio de estabilidad al vuelco. En el estudio realizado por la Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica de la Universidad Politécnica de Catalunya (2001) para analizar el espaciamiento entre imbornales de la ciudad de Barcelona, España, se consideró la estabilidad al vuelco de un peatón para obtener un criterio de seguridad. Considerando al peatón como un sólido rígido, hipótesis que se cumple sólo en forma aproximada, el momento volcador, M_v , será el provocado por la fuerza dinámica del flujo sobre el peatón, definida anteriormente como F_1 , aplicada a una altura de la mitad del calado:

$$M_v = F_1 \cdot \frac{y}{2} = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \frac{y}{2} \quad (7)$$

Ilustración 4. Criterio propuesto para la delimitación de la zona de inundación peligrosa.



Por otra parte, el momento estabilizador, M_e , está constituido por el peso de la persona, aplicado en su centro de gravedad, por lo que, suponiendo que el peatón se encuentra de frente hacia aguas arriba, tendrá un brazo de palanca igual a la mitad del diámetro de las piernas, es decir, $b/4$:

$$M_e = P \cdot \frac{b}{4} \quad (8)$$

Si efectuamos el equilibrio de fuerzas en un peatón, como el considerado en la sección anterior, y aplicamos aquí también un coeficiente de seguridad de dos para considerar el efecto del empuje y una posible variación de los parámetros considerados, podemos llegar a la siguiente desigualdad:

$$V^2 y^2 \geq \frac{Pb/4}{C_D \rho b^2/4} = \frac{60 \cdot 0.05}{1.2 \cdot 1,000 / 9.81 \cdot 0.2/2} \frac{\text{m}^4}{\text{s}^2} = 0.25 \frac{\text{m}^4}{\text{s}^2} \quad (9)$$

La cual arrojaría un valor de $Vy > 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$, que coincide finalmente con el criterio de Abt.

Estudio de caso: aplicación del modelo Menred a un sector de la ciudad de Mendoza, Argentina

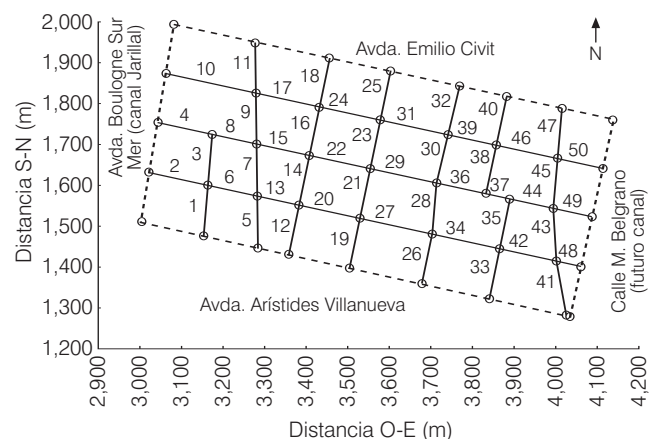
El terreno donde se asienta la ciudad de Mendoza posee una pendiente dominante importante (1 al 4%), que va disminuyendo progresivamente hacia aguas abajo conforme se avanza hacia el este. Además, su red de calles es aproximadamente ortogonal; las calles con la misma dirección tienen la misma pendiente y los cruces formados tienen la misma fisonomía que los estudiados experimentalmente por Nanía (1999).

La subcuenca en estudio se encuentra dentro de una zona de aproximadamente 1 km de ancho, limitada al este por un futuro canal de drenaje (calle Belgrano) y al oeste por un canal de riego (canal Jarillal), situado en el costado este de la calle Boulogne Sur Mer, que ante una tormenta actúa como canal de drenaje (ilustración 5). La subcuenca está delimitada por las calles Emilio Civit, al norte, y Arístides Villanueva, al sur, con un área de 52 ha. Las calles poseen pendientes tales que se prevé encontrar flujos supercríticos a la salida de casi todos los cruces, por lo que será posible aplicar las relaciones experimentales antes presentadas.

Características de la red de calles

La subcuenca en estudio abarca treinta manzanas; la red está formada por cincuenta tramos de calles y 21 cruces, entre los cuales existen dos uniones y una bifurcación en "T". Las calles son más o menos paralelas entre sí, corren unas en sentido sur-norte y otras en sentido oeste-este, y forman una red aproximadamente ortogonal (ilustración 5). El intervalo de pendientes de las calles se extiende del 0.4 al 2.5 %. La pendiente media de las calles de la dirección oeste-este es de 1.8% y la de la otra dirección es de 1.1%. En cuanto al ángulo entre calles, la mitad de los cruces son en ángulo recto. La sección transversal de las calles tiene una distancia entre líneas de edificación de aproximadamente 20 m y un ancho de calzada de 10 m. Teniendo en cuenta estas dimensiones y considerando el 0 relativo en el punto más bajo de la calle, la cota de la acera sería de 10-20 cm y la cota del umbral de entrada a las viviendas de 30 cm. Las calzadas son de pavimento bituminoso o de hormi-

Ilustración 5. Red de calles pertenecientes a una subcuenca de la ciudad de Mendoza elegida para la aplicación del modelo numérico.



gón, mayoritariamente de este último, en muy buen estado de conservación, por lo que se estimó adecuado un coeficiente medio de rugosidad de Manning de 0.015. Para efectos de la simulación numérica, se consideró horizontal la superficie del terreno en el cruce y con un área de $10 \times 10 \text{ m}^2$.

Geometría de la red de calles

Con la información referente a las coordenadas tridimensionales de los cruces de las calles puede definirse la totalidad de la red: longitud y pendiente de las calles, ángulo entre calles y superficie de las manzanas. Para determinar la porción de superficie de cada manzana que desagua a cada calle, se la supuso igual al cociente entre la longitud de la calle y el perímetro de la manzana.

Tormentas de proyecto y condiciones iniciales y de contorno

Las tormentas de proyecto utilizadas son las que el Instituto del Agua desarrolló específicamente para la ciudad de Mendoza, correspondientes a periodos de retorno de 5, 10 y 25 años, y de una hora de duración. No se consideraron pérdidas de precipitación, pues se partió de la hipótesis pesimista de que hubiera llovido antes de caer la tormenta de proyecto, con la intensidad y duración suficientes como para que el suelo estuviera saturado y las depresiones llenas de agua.

Como condiciones iniciales y de contorno, en las calles de entrada a la red por el límite oeste, calles 2, 4 y 10, se consideró un hidrograma de entrada mínimo, puesto que se supondrá que la mayoría del caudal que proviene del oeste de la subcuenca es interceptado por el canal Jarillal. Se consideró este caudal constante e igual a $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras dura la tormenta, lo que equivale a calados aproximados de 6 a 7 cm en esas calles.

En las calles de entrada a la red por el límite sur, calles 1, 5, 12, 19, 26, 33 y 41, se deberían incluir como hidrogramas de entrada, los hidrogramas de salida obtenidos en la modelación de la subcuenca situada aguas arriba. Por facilidad, se supuso un caudal de entrada equivalente al aporte de media manzana aguas arriba de cada calle considerada.

Criterios de peligrosidad aplicados

Para evaluar la peligrosidad del flujo en las calles de la ciudad de Mendoza se utilizaron cuatro criterios, a saber:

1. Criterio de calado máximo admisible, $y = 0.30 \text{ m}$, llamado criterio de Mendoza.

2. Criterio de velocidad máxima admisible, $V = 1 \text{ m/s}$, llamado criterio de Témez.
3. Criterio del producto máximo de la velocidad por el calado, $Vy = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$, llamado criterio de Abt o de estabilidad al vuelco.
4. Criterio del producto máximo de la velocidad al cuadrado por el calado, $V^2y = 1.23 \text{ m}^3/\text{s}^2$, llamado criterio de estabilidad al deslizamiento.

Resultados de la simulación

Hidrogramas de salida

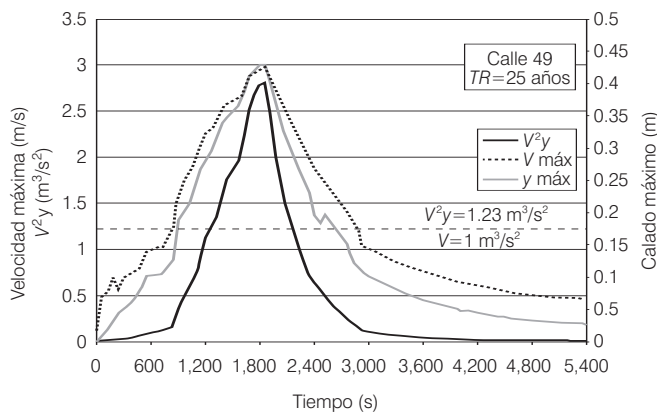
La primera información importante que puede obtenerse es la de los hidrogramas de salida de la red, tanto por el límite norte como por el este. De esta manera se tendrán seis hidrogramas de salida correspondientes a otras tantas calles cuyo flujo abandona la cuenca por el límite norte: calles 11, 18, 25, 32, 40 y 47, que podrán utilizarse como hidrogramas de entrada en el caso en que se desee analizar el flujo en las calles de la subcuenca situada al norte o aguas abajo de la considerada.

También se tendrán los hidrogramas de salida correspondientes a las calles cuyo flujo abandona la cuenca por el límite este —calles 48, 49 y 50— y podrían ser útiles para estudiar el flujo de las calles de la cuenca situada al este o aguas abajo de la considerada, o bien, para el diseño y dimensionamiento de un futuro canal de drenaje junto a calle Belgrano (ilustración 5).

Calados y velocidades

Una importante ventaja de la metodología presentada es que se pueden conocer en cada instante de tiempo analizado, los calados y velocidades en cada punto de la malla de cálculo, en este caso, cada 6 a 7 m de longitud y cada segundo. En consecuencia, pueden conocerse los calados y velocidades máximos que se han producido en cada tramo de calle a lo largo del tiempo. Esta información será útil a la hora de comparar los calados y velocidades obtenidos con los criterios de valoración de la peligrosidad del flujo adoptados y establecer la duración de esta situación. Como ejemplo, en la ilustración 6 se presenta la evolución en el tiempo de estos parámetros correspondientes a la calle 49, asociados a un periodo de retorno de 25 años. Cabe aclarar que los calados y velocidades máximos se producen, en general, para diferentes instantes en diferentes secciones. También se presenta en la misma ilustración el valor máximo del producto del calado por el cuadrado de la velocidad que servirá para aplicar el criterio de peligrosidad correspondiente. Una explicación detallada de es-

Ilustración 6. Evolución de los calados máximos, velocidades máximas y del valor máximo del producto V^2y a través del tiempo en la calle 49.



tos hidrogramas, así como una evaluación del error cometido en la modelación numérica, pueden consultarse en Nanía (1999).

Influencia del número de rejillas en el caudal de escorrentía

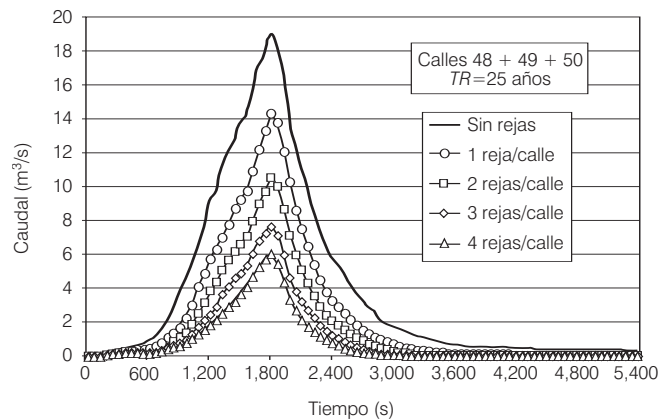
Una característica importante del modelo es que permite evaluar la influencia de la colocación de rejillas de captación en el comportamiento del flujo en toda la red. De esta manera es posible realizar una planificación del tipo de rejillas a utilizar y la distribución de las mismas en toda la red de una manera óptima, colocándolas sólo en aquellas calles en que sean necesarias y en la cantidad óptima para evitar problemas derivados de una escorrentía peligrosa.

En la ilustración 7 podemos observar como ejemplo la influencia de las rejillas de captación en el caudal de las calles de salida de la cuenca por el límite este (calles 48 + 49 + 50), para un periodo de retorno de 25 años. En estas simulaciones, se han colocado 1, 2, 3 y 4 rejillas a cada lado de las calles, en todas y cada una de las calles de la red, excepto en la calle 37, en la que se ha fijado la cantidad de rejillas en una en todas las simulaciones debido a su corta longitud.

Análisis de resultados

En las ilustraciones 8 a 11 se presenta la duración de la peligrosidad del flujo en cada calle para cada periodo de retorno, tomando como base los cuatro criterios comentados arriba. En general, se detectaron flujos muy rápidos en las calles para los tres periodos de retorno estudiados. Para el periodo de retorno de 25 años se

Ilustración 7. Influencia de las rejillas de captación en el hidrograma de caudal de las calles de salida de la cuenca por el límite este (calles 48 + 49 + 50), para $TR = 25$ años. Nota: una rejilla por calle significa una rejilla a cada lado de la calle.



encontraron velocidades del flujo que en ocasiones superaron, aunque por poco, los 3 m/s durante un lapso de nueve minutos.

Casi la mitad de las calles superaron la velocidad de 2 m/s durante más de diez minutos. Las altas velocidades encontradas están relacionadas con las fuertes pendientes de las calles, en las que se comprueba que el flujo alcanza régimen supercrítico en todas, excepto en la 41. Los números de Froude máximos del flujo varían entre 1.1 y 2.2, según la calle. Por este motivo, el criterio de Témez se cumplió sólo en la calle 41. En las demás, esa situación llegó a durar más de 45 minutos en 12 calles, más de 30 minutos en 34 calles y más de 20 minutos en todas ellas. Las calles más desfavorecidas son las que tienen dirección oeste-este.

Ilustración 8. Duración de la peligrosidad por calle, en minutos, según el criterio de calado máximo aplicado en la ciudad de Mendoza.

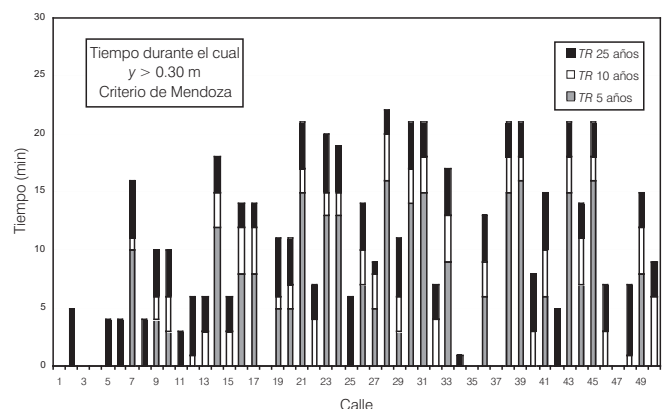
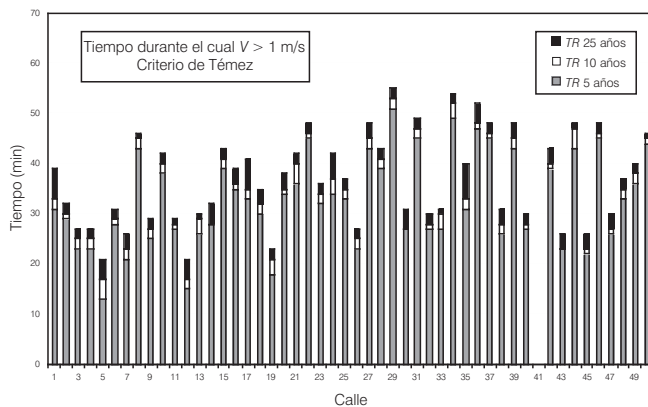


Ilustración 9. Duración de la peligrosidad por calle, en minutos, según el criterio de velocidad máxima de Témez (1992).



En lo que respecta al criterio de calados máximos adaptado a Mendoza, para un periodo de retorno de 25 años, 43 calles superaron en algún momento los 30 cm de calado, nueve de las cuales lo hacen durante más de 20 minutos y 25 durante más de diez minutos. Las calles que poseen dirección sur-norte tienden a ser las que alcanzan mayores calados.

El criterio de Abt no se cumple en 23 calles para un periodo de retorno de 25 años y en seis de ellas la situación dura más de diez minutos y en 17, más de cinco minutos. Por último, el criterio de peligrosidad que tiene en cuenta la estabilidad al deslizamiento no se cumple en 14 de las calles para un periodo de retorno de 25 años, de las cuales, en cinco, la situación dura entre 10 y 19 minutos, en tanto que en cinco calles esta duración es de cinco a nueve minutos.

En la ilustración 11 podemos ver la influencia de la densidad de rejillas de captación en la duración de la peli-

Ilustración 10. Duración de la peligrosidad por calle, en minutos, según el criterio del producto de la velocidad por el calado.

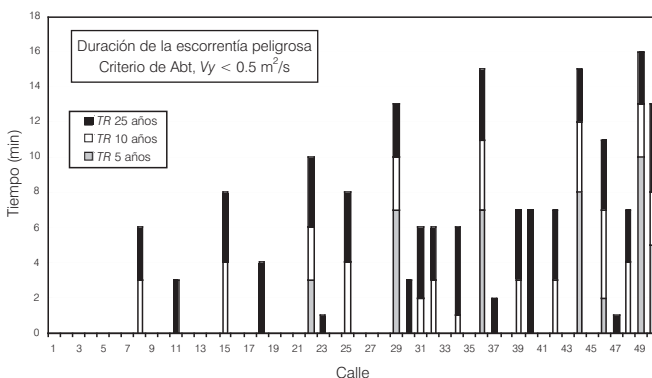
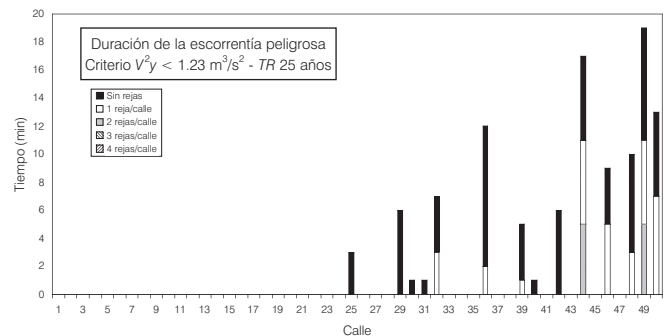


Ilustración 11. Duración de la peligrosidad por calle, en minutos, según el criterio propuesto del producto de la velocidad al cuadrado por el calado, para un periodo de retorno de 25 años e influencia de las rejillas de captación.



grosidad de la escorrentía, evaluada con el criterio de la velocidad al cuadrado por el calado para un periodo de retorno de 25 años. Podemos ver cómo, para densidades de tres y cuatro rejillas por calle, no existe ninguna calle en la red en la que se observe escorrentía peligrosa según este criterio. Estas simulaciones fueron realizadas con una densidad fija de rejillas en todas las calles de la red, pero también sería completamente factible con este mismo modelo realizar simulaciones con densidades de rejillas variables calle a calle, buscando el número de rejillas mínimo necesario y sus ubicaciones óptimas, compatibles con los criterios de seguridad que se adopten. Este tipo de análisis hace suponer, además, que la red de alcantarillado diseñada con los caudales captados por dichas rejillas, sería la red más económica posible y compatible con la seguridad de los ciudadanos. Obsérvese que incluso podría existir cierto número de calles que no necesiten poseer una red de alcantarillado con capacidad para captar escorrentía pluvial, por lo que sería suficiente diseñarlas para conducir sólo las aguas residuales.

Si hacemos una comparación de la aplicación de los dos criterios que evalúan la velocidad y el calado en conjunto (ilustraciones 10 y 11), podemos apreciar que ambos criterios son, en este caso, complementarios. En general, se aprecia que en calles de menor pendiente (11, 18, 25, 32, 40, 47) prima el criterio de la velocidad por el calado, mientras que en algunas calles de mayor pendiente (44, 48, 49), tiene mayor influencia el criterio de la velocidad al cuadrado por el calado, lo que es lógico, por las mayores velocidades. Esto obliga a no decantarse por ningún criterio en particular, sino a considerar siempre el más restrictivo de todos para las características de la red de calles y las condiciones del flujo que estemos analizando.

Conclusiones

Se presenta una nueva metodología para el estudio de la escorrentía de origen pluvial en medio urbano. Se presenta un modelo numérico que es capaz de simular, a partir de una tormenta de proyecto determinada, el flujo que circulará por cada una de las calles que conforman la red. Dicho modelo simula también la captación de agua a través de bocas de tormenta (Guirado, 2003), utilizando relaciones de eficiencia obtenidas experimentalmente por Gómez *et al.* (2000). La división de flujos en los cruces de calles se resuelve aplicando los resultados experimentales de Nanía (1999, 2004) para flujos supercríticos y cruces de anchos iguales, y también los de Gonzalo (2002) para cruces de calles de anchos desiguales. Se hace una revisión de los criterios existentes para evaluar el riesgo asociado a la escorrentía. Se presenta un nuevo criterio basado en la estabilidad al deslizamiento de una persona expuesta a la escorrentía. La metodología presentada ha demostrado ser útil para la aplicación de los criterios de riesgo mencionados, ya que permite la determinación del flujo en términos de calados y velocidades en toda la red de calles y a través del tiempo. Dicha metodología puede utilizarse para la determinación de mapas de riesgo en zonas urbanas, en donde se indiquen las calles con mayor riesgo según los diferentes criterios adoptados.

Recibido: 18/01/2005
Aprobado: 22/06/2005

Referencias

- ABT, S.R., WITTLER, R.J., TAYLOR, A. *Predicting human instability in flood flows*. Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering. Nueva York: ASCE, 1989, pp. 70-76.
- CHAUDHRY, M.H. *Open-channel flow*. Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1993.
- CITY OF AUSTIN DEPT. OF PUBLIC WORKS. *Drainage criteria manual*. Austin, Texas. 1977.
- CCRFCD. CLARK COUNTY REGIONAL FLOOD CONTROL DISTRICT. *Hydrologic criteria and drainage design manual*. Disponible en web en <http://www.co.clark.nv.us>, Clark City. 1999.
- GIECK, K. *Manual de fórmulas técnicas*. México, D.F.: Rep. y Servicios de Ingeniería S.A. 1981.
- GONZALO, R. *Estudio de la distribución de caudales en cruces de calles con anchos diferentes*. Tesina de Especialidad. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. 2002.
- GÓMEZ, M. *Contribución al estudio del movimiento variable en lámina libre en las redes de alcantarillado. Aplicaciones*. Tesis Doctoral, ETSECCPB. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. 1988.
- GÓMEZ, M., MARTÍNEZ, P. y GONZÁLEZ, J. *Análisis del comportamiento hidráulico de rejillas y sumideros*. Córdoba, Argentina: XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo III, 2000.
- GUIRADO, V. *Estudio de la influencia de las rejillas de captación sobre el comportamiento de la escorrentía superficial en medio urbano*. Tesina de Especialidad. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. 2003.
- NANÍA, L.S. *Metodología numérico-experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles*. Tesis Doctoral. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. 1999.
- NANÍA, L.S., GÓMEZ, M. y DOLZ, J. Experimental study of the dividing flow in steep street crossings. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 42, Número 4, 2004, pp. 406-412.
- SAINT-VENANT, A.J.C. B. de. Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. *Resúmenes de la Academia de Ciencias*, Vol. 73, 1871, pp.147-154 y 237-240.
- SECCIÓN DE ING. HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA, UPC. *Definición de criterios de riesgo para el flujo en calles. Análisis del espaciamiento para rejillas e imbornales utilizados en la ciudad de Barcelona*. ETSECCP. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.
- STREETER, V.L. y WYLIE, E.B. *Mecánica de los fluidos*. México, D.F.: McGraw-Hill, 1979.
- TÉMEZ, J.R. Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. *Inundaciones y redes de drenaje urbano*, J. Dolz, M. Gómez, J.P. Martín (editores). Madrid: Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, núm. 10, 1992, pp.105-115.
- WRIGHT-MCLAUGHLIN. *Urban storm drainage criteria manual*. Denver: Urban Drainage and Flood Control District. 1969.

Abstract

NANÍA-ESCOBAR, L.S., GÓMEZ-VALENTÍN, M. & DOLZ-RIPOLLÉS, J. *Danger analysis associated to urban runoff using a numerical and experimental approach*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish), vol. XXI, no. 2, April-June, 2006, pp. 5-15.

Urban runoff is frequent in cities with both superficial and underground drainage systems. Streets are used to convey storm water either to drainage elements of greater capacity or to gutters. A numerical model to study the flow in street networks is presented. It uses experimental results obtained in a scale model of street crossings having width ratios of 1:1, 1:2 and 2:3 and including the simulation of gutters. The existing criteria to evaluate the risk associated to urban runoff are described. Two of these criteria were developed by the authors. As a study case, the flow analysis in a street network of the city of Mendoza, Argentina using the described numerical model is presented, as well as the results of the application of four risk criteria. As a conclusion, the present model is a very useful tool to study the flow in street networks, to analyse the risk applying different criteria and to evaluate the influence of the number of gutters in the fulfilment of the criteria.

Keywords: risk analysis, street crossings, dividing flow, urban runoff, experimental study, gutter, numerical modeling, street network.

Dirección institucional de los autores:

Dr. Leonardo Santos Nanía- Escobar

Universidad de Granada, Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Edificio Politécnico, Campus de Fuentenueva, 18071, Granada, España,
teléfono: + (34) 958 241000, ext. 31160,
fax: + (34) 958 132479,
lnania@ugr.es

Dr. Manuel Gómez- Valentín

Dr. José Dolz- Ripollés

Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Jordi Girona, 1-3, Edificio D-1, 08034, Barcelona, España,
teléfono: + (34) 93 4016475,
fax: + (34) 93 4017357,
manuel.gomez@upc.es,
j.dolz@upc.es