

METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA ESCORRENTÍA DE ORIGEN PLUVIAL EN MEDIO URBANO. DOS APLICACIONES EN LA CIUDAD DE MENDOZA

Leonardo S. Nanía¹, Jorge A. Maza², Manuel Gómez³ y José Dolz³

¹Universidad de Granada, Depto. de Mecánica de Medios Continuos y T. E.

Edificio Politécnico. Campus de Fuentenueva, 18071 Granada, España.

Tel: ++34 958 129895. Fax: ++34 958 132479. E-mail: lnania@ugr.es

²Instituto Nacional del Agua, Centro Regional Andino

Calle Belgrano 210 Oeste, M5500FIF, Mendoza. E-mail: maza@ina.gov.ar

³Universidad Politécnica de Cataluña, Depto. de Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental

Jordi Girona, 1-3, Edificio D-1, 08034 Barcelona, España. E-mail: manuel.gomez@upc.es y j.dolz@upc.es

RESUMEN

El objetivo del artículo es presentar una metodología que se ha probado útil para el estudio de la escorrentía en medio urbano, ya que permite calcular el flujo en redes de calles. La aplicación de criterios de peligrosidad de la escorrentía permite analizar su riesgo en el caso de tormentas de mediana y gran intensidad.

El punto crítico en la determinación de los flujos en la red de calles, es la división de flujos en los cruces de calles. Para dar solución a este problema, para el caso de flujos supercríticos, se han realizado experimentos en modelo físico de un cruce de calles que concluyeron en la obtención, entre otras, de relaciones entre la proporción de potencias del flujo de entrada y la proporción de caudales de salida.

Los resultados del estudio experimental se utilizaron en la formulación de un modelo de simulación de la escorrentía en redes de calles que también se presenta aquí y que permite, a través de una tormenta de proyecto dada, establecer el flujo en la red en función del tiempo.

Para el estudio de la peligrosidad del flujo se han analizado dos criterios existentes, uno que tiene en cuenta sólo los tirantes y otro que evalúa el producto del tirante por la velocidad que demostró ser demasiado permisivo. Se presentan los fundamentos de un nuevo criterio basado en la valoración del producto del tirante por el cuadrado de la velocidad.

Para ilustrar la utilidad de estos resultados, se presenta, por un lado, un estudio sobre la división de flujos en cruces de calles destinado al proyecto de un canal de evacuación pluvioaluvional en Guaymallén, Mendoza, y, por otro, la aplicación del modelo de simulación para el análisis de la peligrosidad del flujo en una subcuenca urbana de Mendoza, obteniéndose, mediante la aplicación de los criterios expuestos, mapas de peligrosidad de la escorrentía asociados a una frecuencia determinada.

Se concluye que la metodología presentada es sumamente útil para la determinación del flujo en los cruces de calles y también para el análisis del flujo no permanente en una red de calles, permitiendo a su vez, la evaluación de su peligrosidad.

INTRODUCCIÓN

En ciudades que tienen un sistema de drenaje pluvial superficial, como es el caso de Mendoza, pero también en aquellas donde el sistema de alcantarillado subterráneo es deficiente, el flujo en las calles es una característica habitual. Algunas veces el problema puede presentarse al querer determinar la división de flujos en un cruce de calles o el caudal que saldría de la cuenca a través de varias calles. Otras veces, si además las calles poseen una elevada pendiente, del orden de las centésimas, pueden presentarse casos en los que la magnitud de los parámetros que definen la escorrentía, como son el tirante y la velocidad, impliquen un riesgo para los habitantes de la ciudad, tanto peatones como conductores.

En Nanía (1999) y Nanía et al. (1999, 2004) se presenta un estudio experimental del flujo supercrítico en un cruce de calles y se propone un modelo numérico para estudiar la escorrentía pluvial en una red de calles ortogonal. En este trabajo se describe brevemente el dispositivo experimental utilizado, las relaciones más importantes obtenidas y el modelo numérico que permite hallar el tirante y la velocidad del flujo a lo largo del tiempo en toda la red, durante un evento de lluvia. Esto permitirá resolver el primer problema planteado en el párrafo anterior.

Además, para evaluar el riesgo asociado a esta escorrentía se analizan varios criterios existentes y se propone uno nuevo que utiliza como parámetro de comparación el producto del tirante por el cuadrado de la velocidad (Nanía, 1999 y Nanía et al., 2000).

Se presentará un estudio previo al proyecto de un canal de evacuación pluvioaluvional en el cual era necesaria la determinación de la división del flujo en varios cruces de calles y donde se utilizaron las relaciones obtenidas experimentalmente.

El modelo numérico descrito es aplicado a una subcuenca urbana de la ciudad de Mendoza y los resultados son analizados en función de los criterios de diseño presentados. Con ambas aplicaciones se demuestra la utilidad y el alcance de la metodología presentada.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRUCES DE CALLES EN MODELO FÍSICO

Descripción del Dispositivo Experimental

Las dimensiones del dispositivo experimental fueron fijadas teniendo en cuenta estudios previos en modelo numérico bidimensional y el criterio que se siguió fue que se logran flujos unidimensionales en las calles de salida. Dichas dimensiones son (Figura 1):

- Ancho de calles: 1,50 metros.
- Longitud de las calles de aproximación al cruce: 2,00 metros.
- Longitud de las calles de salida del cruce: 5,00 metros.
- Altura de los cajeros: 0,35 metros.

Las calles forman entre sí ángulo recto en planta y el cruce queda entonces formado por una superficie cuadrada de 1,5 metros de lado que permanece fija y horizontal. Las calles pivotan sobre cada una de las aristas de esta superficie, permitiendo cambiar las pendientes de las calles desde un mínimo de 0 hasta un máximo del 5% en la dirección del flujo. En la Figura 1 se presenta un esquema del dispositivo experimental y sus dimensiones. Los caudales de trabajo máximos fueron de 100 litros por segundo por cada una de las dos entradas. Los dos caudales de entrada y uno de los de salida fueron medidos a través de vertederos triangulares.

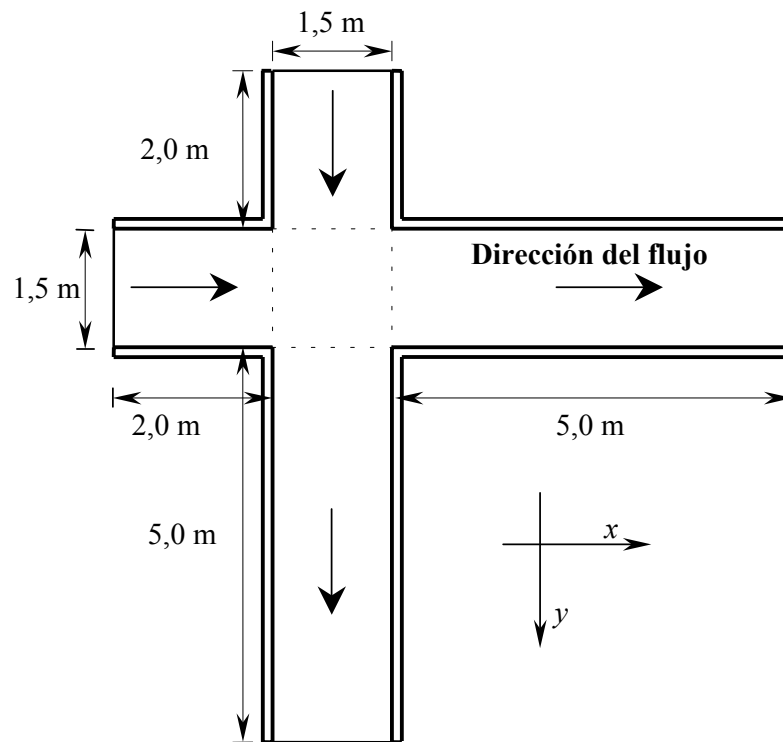


Figura 1: Esquema en planta del dispositivo experimental con sus dimensiones.

Rango de los parámetros estudiados: El rango de los parámetros estudiados para combinaciones de pendientes de calles del 1 al 4% se detallan a continuación:

- Caudales: de 8,2 a 100,6 l/s
- Tirantes en la sección de entrada al cruce: 1,3 a 14,3 cm. Dado que el ancho de las calles es de 1,5 m, el rango de las relaciones de aspecto queda comprendido entre 10,5 y 115
- Tirantes aguas arriba del resalto: 0,7 a 5,0 cm
- Velocidad del flujo en la sección de entrada al cruce: 0,09 a 1,67 m/s
- Velocidad del flujo aguas arriba del resalto: 0,79 a 1,67 m/s
- Números de Froude del flujo en la sección de entrada al cruce: 0,11 a 3,39
- Números de Froude del flujo aguas arriba del resalto: 1,9 a 3,39

A continuación se detallan los rangos de números de Froude aguas arriba del resalto, correspondientes a los principales caudales estudiados:

- $Q = 25$ l/s; $F = 2,40$ a $3,39$
- $Q = 50$ l/s; $F = 2,08$ a $3,10$
- $Q = 75$ l/s; $F = 2,17$ a $2,78$
- $Q = 100$ l/s; $F = 1,90$ a $2,68$

Observamos que para un determinado caudal existen diversos números de Froude, lo que se consiguió variando la pendiente de las calles de entrada. La cota inferior de los números de Froude vino fijada por la necesidad de conseguir régimen supercrítico en la correspondiente calle de entrada.

Patrones de flujo

Aunque el flujo en las calles de entrada fue supercrítico, experimentalmente se ha observado que tiende a ser subcrítico en el cruce. Esta circunstancia produce, obviamente, la formación de un resalto hidráulico en algún punto de la calle de entrada o incluso dentro del cruce. También se ha observado que es posible la formación de sólo un resalto dentro del cruce. Se deduce entonces que sólo caben dos posibilidades relacionadas con la posición de los resaltos, en función de las cuales podemos hablar de dos patrones de flujo y sólo dos:

- Patrón de flujo Tipo I: cuando los dos resaltos se producen en las calles de aproximación al cruce.
- Patrón de flujo Tipo II: cuando uno de los resaltos se produce en una calle y el otro en el cruce.

Patrón de flujo Tipo I: este patrón de flujo ocurre cuando las potencias de los flujos de las calles de entrada están en una relación de 0,64 a 1,56:1. Estos límites están bien definidos y se detallan más adelante. Este patrón de flujo se caracteriza por la formación de los resaltos hidráulicos en las calles de entrada al cruce, cuyas distancias con respecto al cruce dependen del número de Froude del flujo de aproximación. En la Figura 2(a) se presenta un esquema de la posición de los resaltos, donde D_{Rx} y D_{Ry} son las distancias desde los resaltos hasta la sección de entrada al cruce.

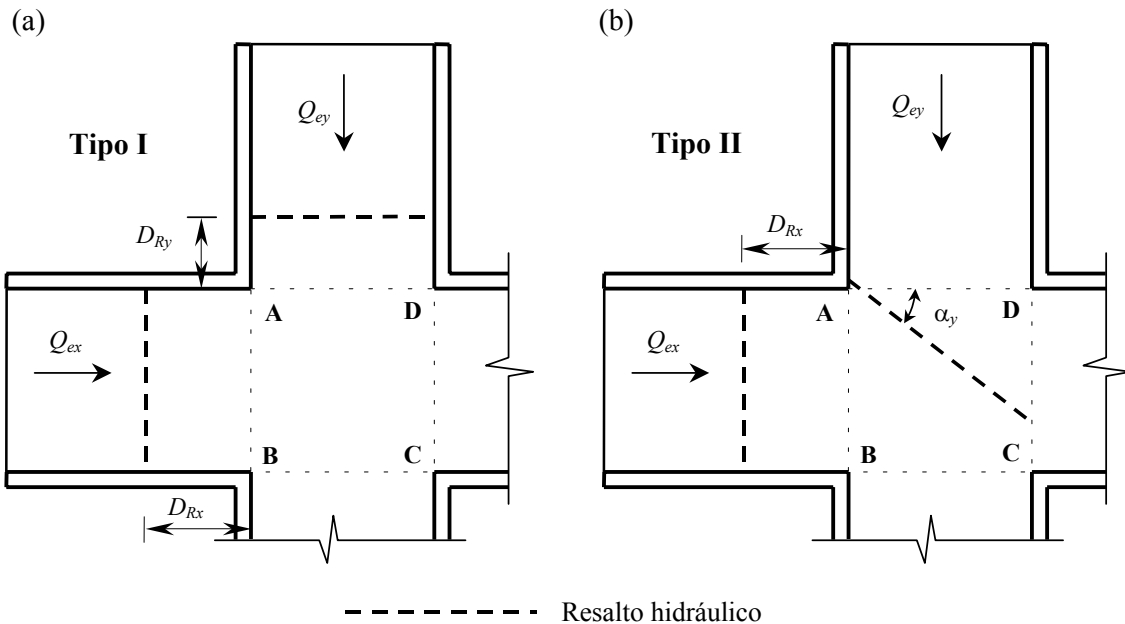


Figura 2: Esquema de los patrones de flujo: (a) Tipo I y (b) Tipo II.

Patrón de flujo Tipo II: este patrón de flujo ocurre cuando las potencias de los flujos de las calles de entrada difieren entre sí una relación mayor al límite establecido en la definición del patrón de flujo Tipo I. La característica fundamental de este patrón de flujo es que uno de los resaltos ocurre dentro del cruce y eso ocurre en la dirección en la cual la potencia del flujo es mayor. Conforme la diferencia entre potencias se va haciendo mayor, el resalto que está dentro del

cruce se introduce más en el cruce y el otro se mueve más hacia aguas arriba en la calle. En la Figura 2(b) se muestra la posición de los resaltos.

Para mayor detalle acerca de la descripción de los resaltos y el análisis de los patrones de flujo observados se remite al lector a las referencias: Nanía (1999) y Nanía et al. (2000, 2004).

Relación entre la potencia de los flujos de entrada y los caudales de salida

Como se demuestra en Nanía (1999) y Nanía et al. (2004), el flujo en un cruce de calles con flujos de entrada supercríticos puede describirse a través de ciertos parámetros tales como los caudales y números de Froude del flujo en la sección de entrada al cruce. Una magnitud física del flujo que es función de estos dos parámetros es la potencia. La potencia del flujo, W , que ingresa al cruce por una de las calles de entrada es igual a:

$$W = \gamma \cdot Q \cdot H = \gamma \cdot Q \cdot \left(z + y + \frac{V^2}{2g} \right) \quad (1)$$

siendo γ el peso específico del agua, Q el caudal, H la energía por unidad de peso, z la cota del punto en el cual se está calculando la potencia, con respecto a un plano de referencia, y el tirante del flujo, V la velocidad media del flujo en la sección transversal y g la aceleración gravitatoria. Considerando la ecuación de continuidad, la del número de Froude y tomando como plano de referencia el plano del cruce, podemos deducir que la potencia del flujo en la sección de entrada al cruce en la dirección "x" es igual a:

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

refiriéndose el subíndice ex a la calle de entrada en la dirección "x". Si consideramos ahora la proporción de potencia del flujo asociada a una dirección con relación a la suma de las potencias de ambas direcciones, siempre contabilizadas en la sección de entrada al cruce y simplificamos nos queda:

$$\frac{W_x}{W_T} = \frac{\left(1 + \frac{F_{ex}^2}{2} \right)}{\left(1 + \frac{F_{ex}^2}{2} \right) + \left(\frac{Q_{ey}}{Q_{ex}} \right)^{5/3} \left(\frac{F_{ex}}{F_{ey}} \right)^{2/3} \left(1 + \frac{F_{ey}^2}{2} \right)} \quad (3)$$

donde W_T es la suma de las potencias de los flujos en las secciones de entrada al cruce en ambas direcciones. Nótese que la ecuación (3) no es otra cosa que una expresión función de los caudales y los números de Froude del flujo.

En la Figura 3 se presenta gráficamente la relación existente entre la proporción de potencia en la dirección "x" y la proporción de caudales de salida en la misma dirección. En este tipo de representación, podemos observar que los datos se distribuyen de forma aproximadamente uniforme a lo largo del eje "x" y en función del patrón de flujo al que pertenece cada uno, estando los límites entre patrones de flujo en las proporciones de potencia de 0,39 y 0,61. Sabiendo que la función que representa estos datos debe ser simétrica con respecto al punto [0,5;0,5] y pasar por dicho punto, se

obtuvo una curva que representa los datos experimentales pertenecientes a proporciones de potencia mayores a 0,5, que tienen una dispersión mucho menor, y se consideró luego la curva simétrica a la anterior como representativa de los datos cuyas proporciones de potencia son menores a 0,5. La razón de esta dispersión se analiza en Nanía (1999), además se realiza un planteamiento teórico-práctico que avala la utilización de este procedimiento. Se encontró que un polinomio de tercer grado se ajusta muy bien a los datos experimentales correspondientes al patrón de flujo tipo II. Uniendo ambas funciones por una recta se obtuvo la aproximación a los datos pertenecientes al patrón de flujo tipo I. En la Tabla 1 se presentan las funciones obtenidas. Se puede concluir aquí que, conociendo la potencia de los flujos de entrada, es posible determinar el reparto de caudales.

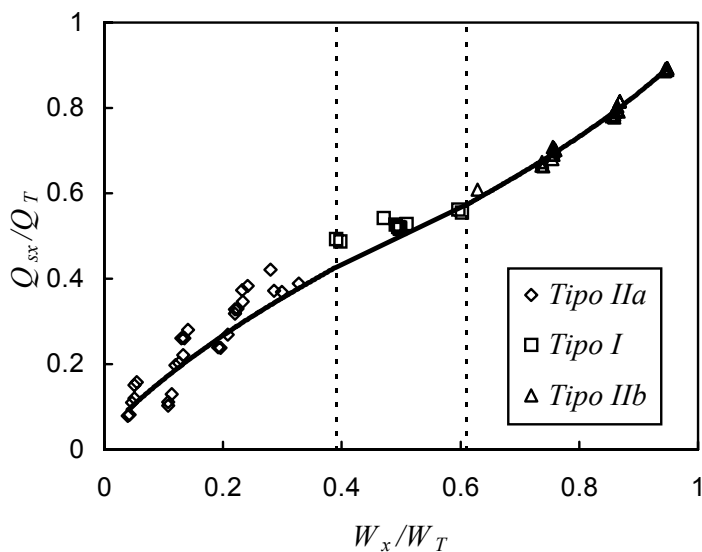


Figura 3: Relación entre la proporción de potencia del flujo de entrada al cruce en la dirección "x" y la proporción de caudal de salida en la misma dirección. Datos experimentales.

Tabla 1: Descripción de las relaciones necesarias para el cálculo de la división del flujo en cruces de calles.

Zona	Patrón de Flujo	Rango de $x = W_x/W_T$	Función	Coefficiente de correlación R^2
1	Tipo IIa	0.04-0.39	$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 1.16x^3 - 1.44x^2 + 1.38x + 0.04$	0.87
2	Tipo I	0.39-0.61	$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 0.664x + 0.168$	0.83
3	Tipo IIb	0.61-0.96	$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 1.16x^3 - 2.04x^2 + 1.98x - 0.14$	0.99

CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE LA ESCORRENTÍA EN LAS CALLES

La seguridad de las actividades ciudadanas durante el suceso de lluvia, como el tráfico peatonal o la no inundabilidad de viviendas, es el objetivo principal que guía el funcionamiento del sistema de drenaje. La escorrentía circulante por calles y veredas o aceras debería ser tal que los parámetros hidráulicos de la misma, tirantes, 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 tenemos los siguientes:

Tirante máximo admisible: En lo que concierne a daños materiales y a minimización de los mismos, podemos convenir que un tirante máximo admisible en una calle es aquel que no permita el ingreso de la escorrentía en los comercios o viviendas particulares.

El Manual de Criterios de Drenaje de Denver, Colorado, EE.UU. (Wright-McLaughlin, 1969), establece que en las calles definidas como locales, categoría en la que entran las calles de la subcuenca en estudio, se permite un tirante tal que la cota de la lámina de agua no produzca la inundación de la planta baja de edificios residenciales, públicos, comerciales e industriales, a menos que estén protegidos contra inundaciones y como máximo un tirante de 45 cm sobre el nivel mínimo de la calle. En calles de mayor importancia los criterios van siendo cada vez más restrictivos. Aunque no se manifiesta explícitamente en el manual, este límite parecería estar fijado basándose en la minimización de problemas de circulación de automóviles, ya que resultaría peligrosa e inconveniente la conducción de un vehículo con tirantes mayores a 45 cm.

En Mendoza, dadas las características de la urbanización y siguiendo el criterio de Denver, un tirante máximo admisible en la calle que no produzca el ingreso del agua en edificios públicos o privados podría ser de 30 cm, criterio que se considerará válido para establecer la zona de inundación.

Definición de zona de inundación peligrosa: Témez (1992) define la zona de inundación peligrosa, como 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 condiciones desfavorables de tirante ($> 1\text{m}$) y velocidad del flujo ($> 1\text{m/s}$) y del producto de tirante por velocidad ($> 0,5\text{ m}^2/\text{s}$). El límite de tirantes propuesto por Témez, de 1 m resultaría excesivo en zonas densamente pobladas como las que se estudian con el modelo numérico propuesto, en las que un tirante de esa magnitud, sin tener en cuenta la velocidad del flujo, ocasionaría quizá no pérdida de vidas pero sí cuantiosas pérdidas materiales. En este mismo criterio, el producto del tirante por la velocidad de $0,5\text{ m}^2/\text{s}$ resulta menos restrictivo que el producto de los tirantes máximos de los dos criterios anteriores por la velocidad máxima propuesta por Témez ($0,30\text{ m}^2/\text{s}$ y $0,45\text{ m}^2/\text{s}$, para Mendoza y Denver, respectivamente).

Ante la ausencia de otros criterios en los cuales se tenga en cuenta el tirante y la velocidad en conjunto de la escorrentía, se propone uno teniendo en cuenta la estabilidad de las personas ante la fuerza que ejerce sobre ellas el flujo. Para establecer dicho criterio, se planteó que la fuerza que ejerce el agua sobre una persona sea tal que no provoque su deslizamiento y/o caída (Figura 4). La fuerza de arrastre del agua puede evaluarse como: $F_1 = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot V^2$, siendo C_D es el coeficiente de arrastre, que depende básicamente de la forma de la superficie contra la cual incide el fluido, ρ 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 tirante por el ancho de la persona, en este caso de las piernas, y V la velocidad del fluido. Por otro lado, suponiendo que la persona en cuestión pueda ser capaz de mantenerse en pie, la fuerza que debe equilibrarla es la de fricción del calzado sobre el suelo y que sería igual a: $F_2 = \mu \cdot P$, siendo μ el coeficiente de fricción, que depende de los materiales del calzado y del suelo y del

estado de ambos, y P el peso de la persona. Se desprecia 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, la densidad del agua es de 1000 kg/m^3 , el ancho de las piernas $b = 0,1 \text{ m} \times 2 = 0,2 \text{ m}$, el peso de la persona de 60 kp y el coeficiente de fricción entre caucho y hormigón húmedos igual a 0,50, con un coeficiente de seguridad de 2, la condición de estabilidad vendría dada por la siguiente desigualdad:

$$y \cdot V^2 \leq \frac{2P}{C_D b} = \frac{2 \cdot 0.5 \cdot 60 \cdot 9.81 \text{ m}^3}{1.2 \cdot 1000 \cdot 0.2 \cdot 2 \text{ s}^2} = 1,23 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \quad (4)$$

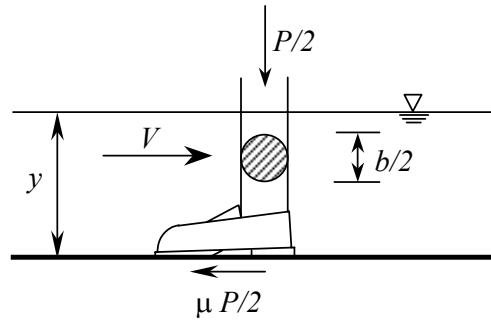


Figura 4: Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, en el caso de estar sometida a la acción de la escorrentía.

El coeficiente de seguridad puede interpretarse aplicado al coeficiente de fricción, dada su incertidumbre por los distintos materiales y estados en los que pueden estar tanto el suelo como el calzado, o también al peso o ancho del peatón, ya que puede darse el caso de que el peso sea menor o el ancho de sus piernas mayor o que exista una combinación desfavorable de los tres factores. El criterio de peligrosidad desarrollado quedaría definido, teniendo en cuenta también los criterios de tirantes máximos, como se muestra en la Figura 5.

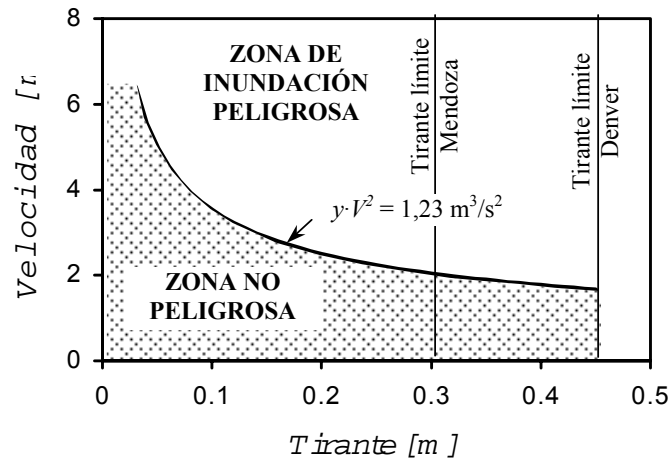


Figura 5: Criterio propuesto para la delimitación de la zona de inundación peligrosa.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Para evaluar el comportamiento hidráulico de la escorrentía superficial en una red de calles, se ha desarrollado un modelo numérico de simulación que consta de un módulo de transformación lluvia-escorrentía y otro para el cálculo de los caudales en la red de calles.

Módulo de transformación lluvia-escorrentía

Simplificando la superficie de escurrimiento de las manzanas, reemplazándolas por planos inclinados de superficie equivalente y caracterizados por sus dimensiones, sus pendientes, y sus coeficientes de rugosidad de Manning, es posible transformar la precipitación que cae en estos planos inclinados en escorrentía mediante la utilización de la teoría de la onda cinemática, suponiendo que el flujo que se desarrolla en ellos es el denominado “overland flow”. Mediante esta teoría se simula el tránsito del agua desde el momento en que cae hasta que alcanza el conducto principal de desagüe.

El cálculo del caudal a la salida de cada plano se realizó con un esquema en diferencias finitas, con un intervalo de tiempo que cumple la condición de Courant-Friedrichs.

Resolución del flujo en las calles

Para el cálculo de la escorrentía en las calles se utilizaron las ecuaciones completas de Saint-Venant. 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 dividirá en N número de tramos iguales de una longitud igual a Δx , quedando discretizada en N-1 puntos interiores y dos puntos extremos, en los cuales se obtienen las características del flujo en términos de tirante y velocidad.

El esquema numérico empleado para resolver los puntos interiores de la calle es el esquema de MacCormack (Chaudhry, 1993). La principal ventaja de este esquema sobre el de las características, por ejemplo, es que tiene la capacidad de modelar flujos subcríticos y supercríticos en una misma calle sin necesidad de aislarlos ni de localizar los resaltos. El principal inconveniente es que, debido a la forma de plantear las diferencias finitas, no es posible resolver los puntos extremos, debiéndose usar para ello otro método si fuera necesario. En este caso, para la resolución del flujo en los puntos extremos se utilizó el esquema de intervalos específicos del método de las características. Para más detalles acerca de las condiciones iniciales y de contorno consideradas en el modelo numérico y de los algoritmos utilizados, puede consultarse Nanía (1999).

Resolución del flujo en los cruces de calles

Para la resolución del flujo en los cruces se usó el enfoque experimental en un caso o un determinado sistema de ecuaciones en otro, según era el tipo de cruce de que se trataba, clasificados según el tipo de flujo en las calles de entrada y en las calles de salida.

El enfoque experimental se basó en los resultados obtenidos en un modelo físico de un cruce de calles con flujo supercrítico tanto en las calles de aproximación como en las de salida del cruce. La descripción de los resultados de estas experiencias se han descrito previamente y en ellas se obtienen las relaciones entre las potencias del flujo en las secciones de entrada al cruce y los caudales de salida del cruce que se detallan en la Tabla 1.

Los cruces en los cuales no pudo aplicarse la metodología experimental por quedar sus parámetros fuera del rango de los parámetros estudiados, así como todas las bifurcaciones y uniones, se resolvieron con un enfoque unidimensional, que es el que se acostumbra aplicar para resolver el flujo en las uniones de dos ó más canales. Se trata básicamente de que entre ellos se cumplan los principios de conservación de la masa y de la energía.

CASO DE ESTUDIO 1: DETERMINACIÓN DE LA DIVISIÓN DEL FLUJO EN CRUCES DE CALLES EN GUAYMALLÉN, MENDOZA

Objeto del Estudio

Para el "Estudio sobre división de flujo en cruces de calles destinado al canal de evacuación pluvioaluvional en calle Allayme, Bermejo, Guaymallén, Mendoza", desarrollado en el Centro Regional Andino del Instituto Nacional del Agua (INA-CRA) por encargo de la Municipalidad de Guaymallén, se necesitaba determinar los caudales de aporte al mencionado canal a proyectar y en consecuencia los que se fugaban de la cuenca en determinados cruces de calles o nodos (Maza, J., 2003). Para ello, se utilizó la metodología descrita en este artículo y se aplicó el modelo de simulación de flujo gradualmente variado HEC-RAS (U.S. HEC, 2003).

Metodología

A partir de la información topográfica de secciones transversales suministrada por el Municipio de Guaymallén en las calles convergentes a los nodos planteados (Ver Figura 6) se aplicó el modelo HEC-RAS con caudales de 2, 5 y 10 m³/s a efectos de determinar los números de Froude de las calles concurrentes en cada nodo. Los caudales se seleccionaron con el criterio de que estuvieran en el rango de capacidad de transporte de las secciones transversales sin superar los 0,20 m sobre el nivel de vereda en correspondencia con la línea de edificación en la mayoría de los casos.

Mediante la aplicación del modelo HEC-RAS se pudo determinar que el Nodo 2 no necesitaba ser tratado ya que no se producía divergencia en los flujos.

Se requirió determinar los números de Froude a efectos de poder aplicar las relaciones de la Tabla 1.

A efectos de suministrar un algoritmo práctico para las determinaciones de caudales salientes se pudo plantear la siguiente correlación válida para los nodos 1, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 y que se representa en la Figura 7:

$$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 0,2501Ln\left(\frac{Q_{ex}}{Q_{ey}}\right) + 0,4953 \quad \text{con } R^2 = 0,9902 \quad (5)$$

En el caso del Nodo 3 (intersección de calles Godoy Cruz y Mitre) se ha podido determinar que la contrapendiente del tramo Mitre-Allayme en calle Godoy Cruz produce un resalto entre las calles Las Heras y Garay; esta situación origina la siguiente relación, que se presenta en la Figura 8:

$$\frac{Q_{sx}}{Q_T} = 0,2Ln\left(\frac{Q_{ex}}{Q_{ey}}\right) + 0,6919 \quad \text{con } R^2 = 0,9482 \quad (6)$$

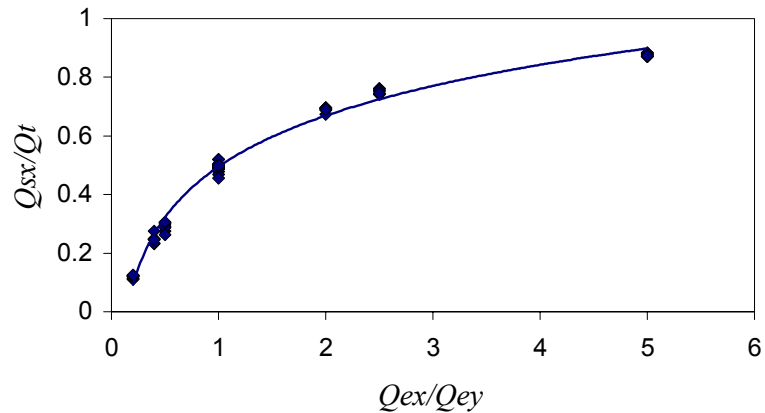


Figura 7: Relación entre caudales entrantes y salientes para los nodos 1, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

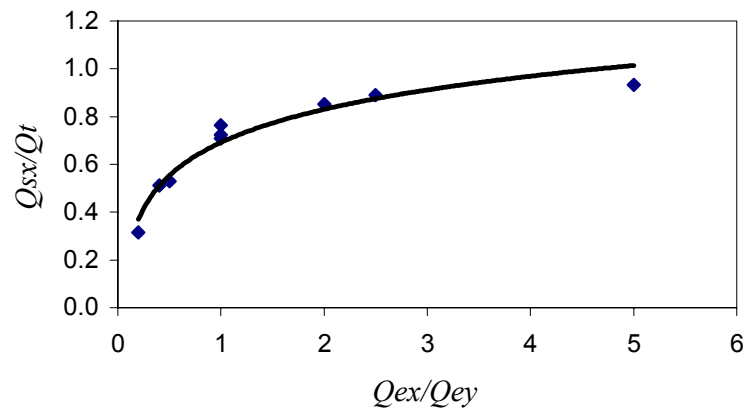


Figura 8: Relación entre los caudales entrantes y salientes para el nodo 3.

CASO DE ESTUDIO 2: ANÁLISIS DEL RIESGO EN UNA SUBCUENCA DE LA CIUDAD DE MENDOZA

La ciudad de Mendoza, como otras pocas ciudades del piedemonte andino de Argentina, posee un sistema de drenaje urbano separativo. Las aguas residuales se conducen por tuberías subterráneas de escaso diámetro, mientras que las aguas de origen pluvial circulan en su totalidad por superficie, a través de las *acequias* -pequeños canales situados a los lados de las calles-, las calles y canales de diferente importancia. En eventos de tormentas de mediana o gran intensidad, las aguas pluviales transforman a las calles en auténticos canales. Si tenemos en cuenta que el terreno donde se asienta la ciudad posee una pendiente dominante importante (1 al 4 %), podemos concluir que el flujo en las calles puede alcanzar características que pueden llegar a ser peligrosas para la seguridad de los ciudadanos y un análisis del riesgo asociado con este flujo podría ser interesante.

La red de calles de Mendoza es aproximadamente ortogonal, teniendo las calles de la misma dirección la misma pendiente y quedando los cruces formados con la misma fisonomía que los estudiados experimentalmente en Nanía (1999) y presentados en este artículo, por lo que son aplicables las relaciones experimentales halladas.

La subcuenca de estudio se encuadra dentro de una zona de aproximadamente 1 km de ancho, limitada al este por un futuro canal (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 de canal de drenaje, recogiendo el desagüe que proviene del parque Gral. San Martín, situado al oeste de esta zona (Figura 9). La subcuenca elegida es la delimitada por las calles Emilio Civit al norte y Aristides Villanueva al sur. El área de esta subcuenca es de unas 52 Ha.

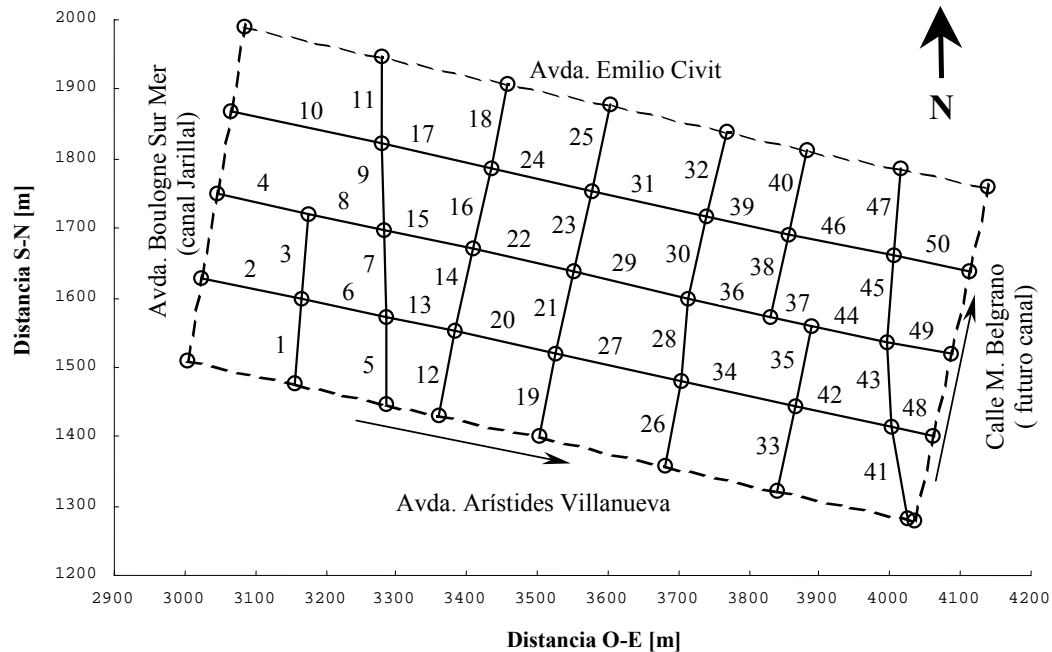


Figura 9: Red de calles perteneciente a una subcuenca de la ciudad de Mendoza elegida para la aplicación del modelo numérico.

En la subcuenca elegida 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 los resultados experimentales para resolver la distribución de los caudales aguas abajo de los mismos.

Características de la red de calles: la subcuenca de estudio abarca 30 manzanas, quedando la red formada por 50 tramos de calles y 21 cruces, existiendo entre ellos dos uniones y una bifurcación en "T". Las calles en la cuenca elegida son más o menos paralelas entre sí y poseen dos direcciones principales, una en sentido sur-norte y la otra en sentido oeste-este, formando una red aproximadamente ortogonal (Figura 9). El rango 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 dirección sur-norte es de 1,1%. En cuanto al ángulo entre las calles, podemos decir que la mitad de los cruces son de ángulo recto.

La sección transversal de las calles de la subcuenca en estudio sigue un patrón como el ilustrado en la Figura 10, con una distancia entre líneas de edificación de aproximadamente 20 m y un ancho de calzada de 10 m. Aunque a veces suele ser menor, la pendiente transversal tanto de la calle como de la acera es del 2 %, para facilitar el drenaje de las superficies hacia las acequias, que normalmente se encuentran situadas entre el bordillo o cordón de la calle y la acera o vereda. Teniendo en cuenta estas dimensiones y ubicando el 0 relativo en el punto más bajo de la calle, las cotas significativas en el análisis de la escorrentía en las calles serían las indicadas en la figura.

Las calzadas se encuentran revestidas con pavimento bituminoso o de hormigón, 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. Las superficies de los cruces de calles poseen una notable falta de uniformidad en cuanto a pendientes transversales y longitudinales. Para la modelación numérica se consideró el área de cruce horizontal e igual al producto de los anchos de las calles que concurren a él, 100 m^2 .

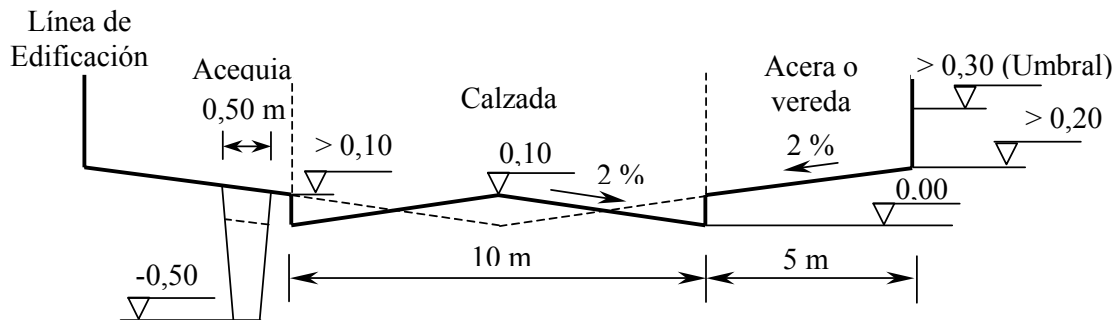


Figura 10: Sección transversal de las calles. (Línea de trazos: sección simulada numéricamente).

Geometría de la red de calles: teniendo la información referente a las coordenadas 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.

Áreas de drenaje conectadas a cada calle: la información necesaria para determinar la porción de superficie de cada manzana que desagua a cada calle, consiste normalmente en un plano catastral en donde están detallados los límites de las propiedades e información sobre la calle sobre la cual desagua cada propiedad. Como no fue posible contar con esa información, se supuso que la porción de desagüe a cada calle es igual al cociente entre la longitud de la calle y el perímetro de la manzana.

Tormenta de proyecto: se utilizaron las tormentas de proyecto de la ciudad de Mendoza correspondientes a periodos de retorno de 5, 10 y 25 años de una hora de duración. Dichas tormentas fueron facilitadas por el INA-CRA (ex-INCyTH).

Lluvia neta: Para este caso, vamos a considerar que las pérdidas son iguales a 0, basándonos en la hipótesis pesimista de que haya habido una lluvia precedentemente al momento de caer la tormenta de proyecto, de intensidad y duración suficiente como para que el suelo estuviera saturado y las depresiones llenas de agua.

Hidrogramas de entrada: 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. Este caudal se consideró constante e igual a $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras dura la tormenta, lo que equivale a tirantes 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 simplicidad, se supuso un caudal de entrada equivalente al aporte de media manzana aguas arriba de cada calle considerada.

Resultados de la Simulación

Hidrogramas resultantes: como resumen de los resultados obtenidos se presentan los hidrogramas de salida de la red tanto por el límite norte como por el este. Los hidrogramas de salida de las calles correspondientes al límite norte, calles 18, 25, 40 y 47 (Figura 11), podrán servir como hidrogramas de entrada en el caso que se desee analizar la escorrentía en la subcuenca situada al norte (o aguas abajo) de la considerada.

Los hidrogramas de salida de las calles que corresponden al límite este, calles 48, 49 y 50, podrían ser útiles para el diseño y dimensionamiento de un futuro canal de drenaje junto a calle Belgrano. En la Figura 12 se presentan los hidrogramas individuales de cada una de estas tres calles para un periodo de retorno de 25 años y el hidrograma que servirá para el dimensionamiento del canal, calculado como la suma de los tres hidrogramas.

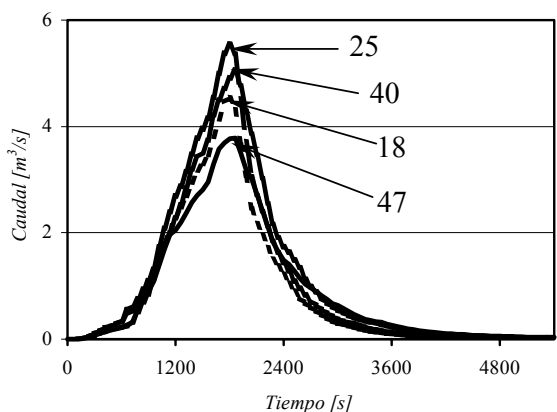


Figura 11: Hidrogramas de las calles de salida de la red por el límite norte. TR 25 años.

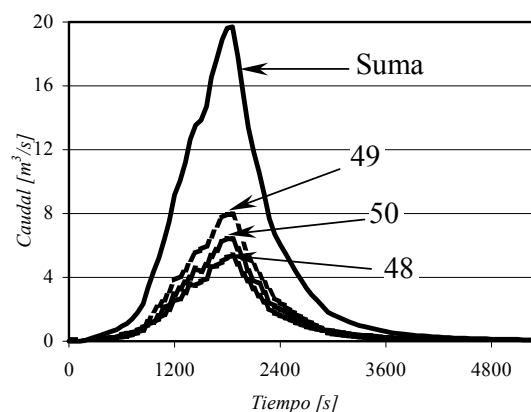


Figura 12: Hidrogramas de las calles de salida de la red por el límite este e hidrograma suma. TR 25 años.

Tirantes y velocidades: Se pueden conocer en cada instante de tiempo analizado, los tirantes y velocidades en cada punto de la malla de cálculo, en este caso, cada 6 a 7 m de longitud y cada 1 segundo. En consecuencia, pueden conocerse los tirantes y velocidades máximos que se han producido en cada tramo de calles a través del tiempo. Esta información será útil a la hora de comparar los tirantes y velocidades obtenidos con ciertos criterios de valoración de la peligrosidad del flujo, tales como los de Témez y de Denver, y establecer la duración de esta situación. Como ejemplo, se presentan en las figuras 13 y 14, estos parámetros correspondientes a las calles 28 y 49, asociados a un periodo de retorno de 25 años. Cabe aclarar que los tirantes y velocidades máximos se producen, en general, para diferentes instantes en diferentes secciones. También se presenta en las mismas figuras el valor máximo del producto del tirante por el cuadrado de la velocidad que servirá para aplicar el nuevo criterio de peligrosidad propuesto. Una explicación detallada de estos hidrogramas, así como una evaluación del error cometido en la modelación numérica puede encontrarse en Nanía (1999).

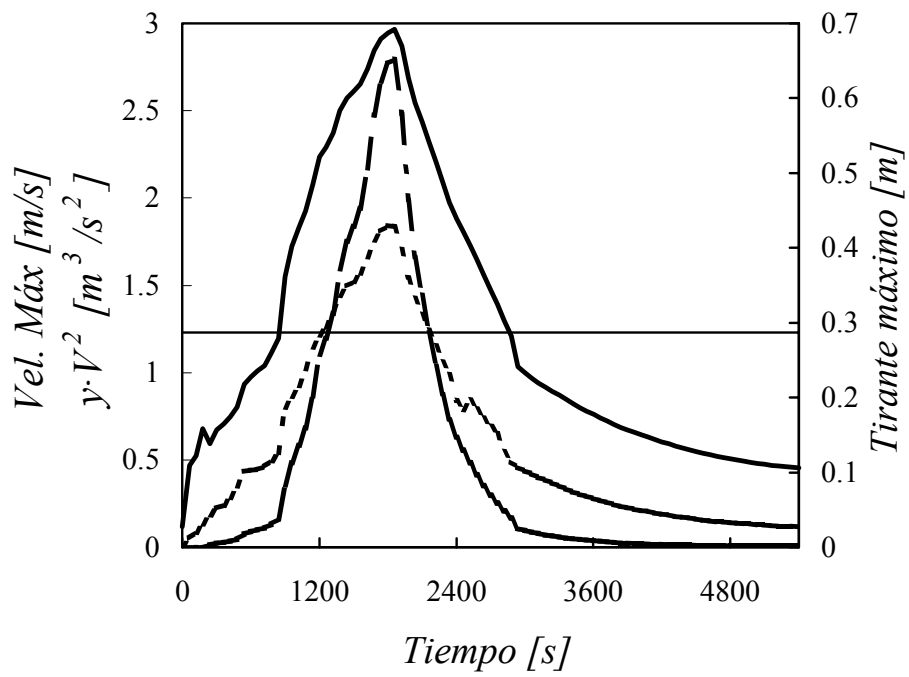
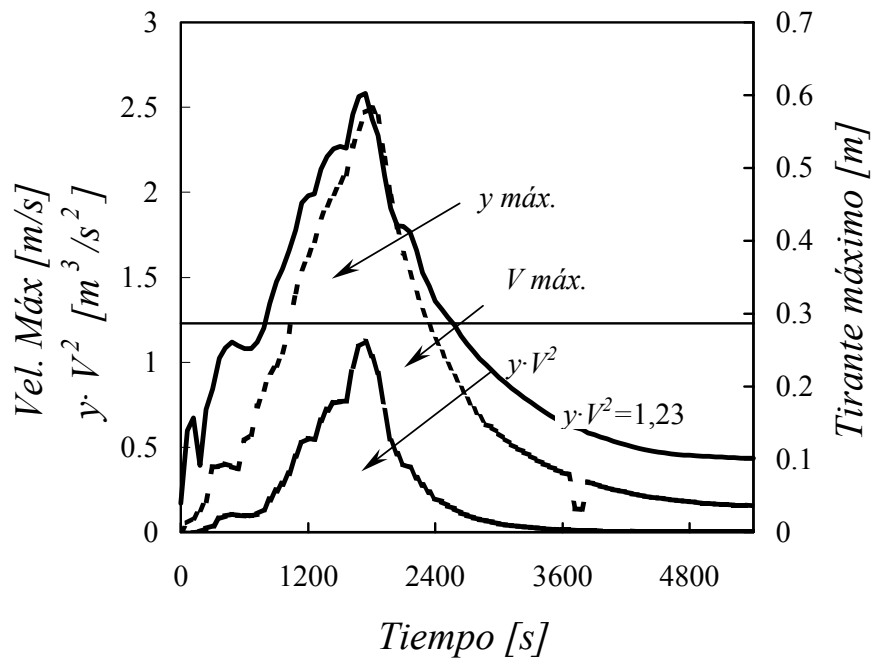


Figura 13: Evolución de los tirantes máximos, velocidades máximas y del valor máximo del producto $y \cdot V^2$ a través del tiempo en la calle 28.

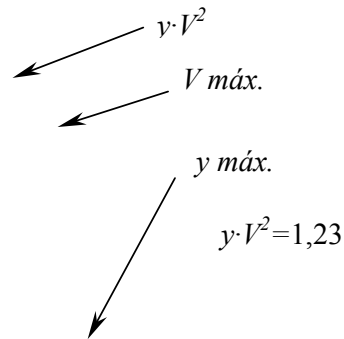


Figura 14: Evolución de los tirantes máximos, velocidades máximas y del valor máximo del producto $y \cdot V^2$ a través del tiempo en la calle 49.

Análisis de Resultados

En las figuras 15 a 18 se presenta la duración de la peligrosidad de la escorrentía en cada calle para cada periodo de retorno, tomando como base los cuatro criterios comentados anteriormente.

En general, se encontró una situación de flujos muy rápidos en las calles para los tres periodos de retorno estudiados. Para un periodo de retorno de 25 años, se encontraron velocidades del flujo que en ocasiones superaron los 3 m/s durante un lapso de tiempo de 9 minutos.

Casi la mitad de las calles superaron la velocidad de 2 m/s durante más de 10 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. Las calles más desfavorecidas son las que tienen dirección oeste-este.

En lo que respecta al criterio de tirantes máximos adaptado a Mendoza, para un periodo de retorno de 25 años, 43 calles superan en algún momento los 30 cm de tirante, 9 de las cuales lo hacen durante más de 20 minutos y 25 más de 10 minutos. Las calles que poseen dirección sur-norte tienden a ser las que alcanzan mayores tirantes.

El criterio de tirantes máximos admisibles de 45 cm, para el periodo de retorno de 25 años, no se cumple en 13 calles de las cuales en sólo una, la 28, esta situación dura más de 10 minutos.

Por último, el criterio de peligrosidad propuesto no se cumple en 20 de las calles para un periodo de retorno de 25 años, de las cuales en 6 la situación dura entre 11 y 15 minutos, en tanto que en 9 calles esta duración es de 6 a 10 minutos.

Análisis del error: Se encontró que los errores numéricos en la conservación de la masa son muy parecidos para los tres periodos de retorno considerados, aunque son muy variables de calles a calle. Esta variación va desde -4 % hasta +5,5 %. En sólo 7 calles el error es mayor de ± 3 % y en más de la mitad es menor a ± 1 %, lo que se consideró bastante satisfactorio. Para un análisis más detallado de las fuentes de error, el lector puede remitirse a Nanía (1999).

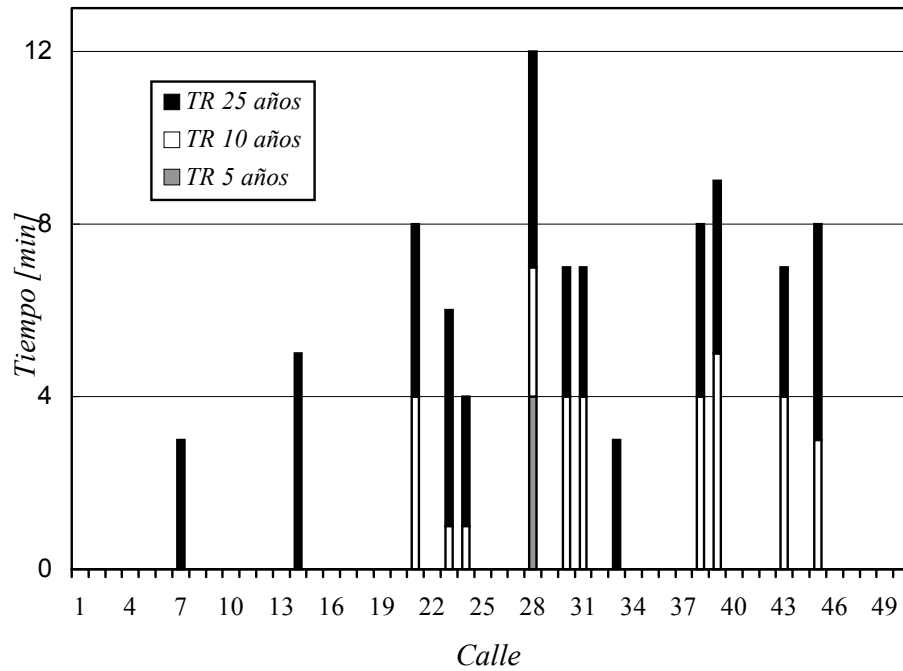


Figura 15: Duración de la peligrosidad por calle, en minutos, según el criterio de tirante máximo admisible en Denver.

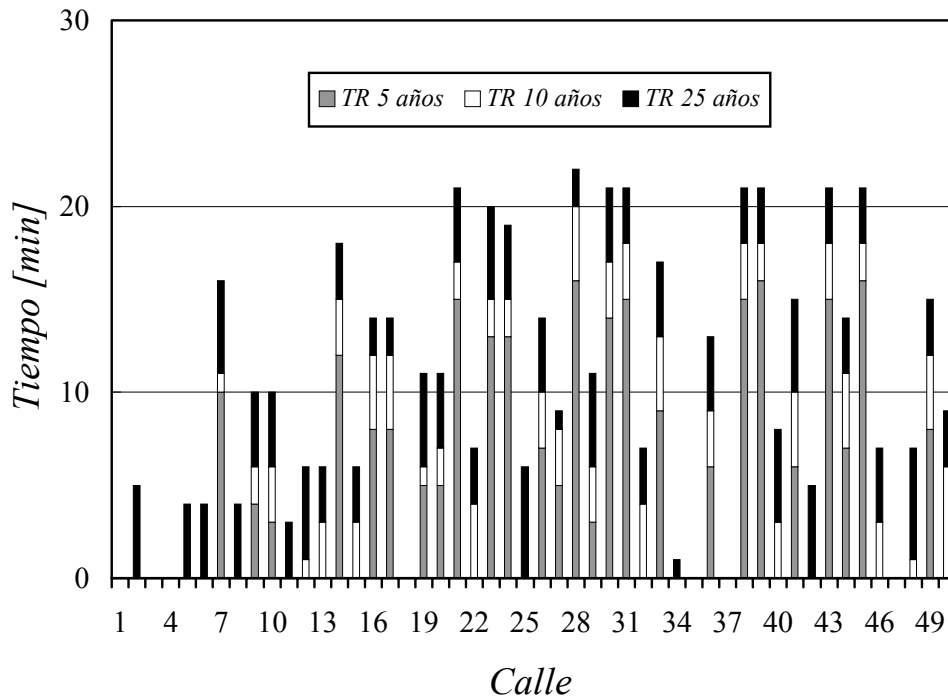


Figura 16: Duración de la peligrosidad por calle, en minutos, según el criterio de tirante máximo de Denver, adaptado para Mendoza.

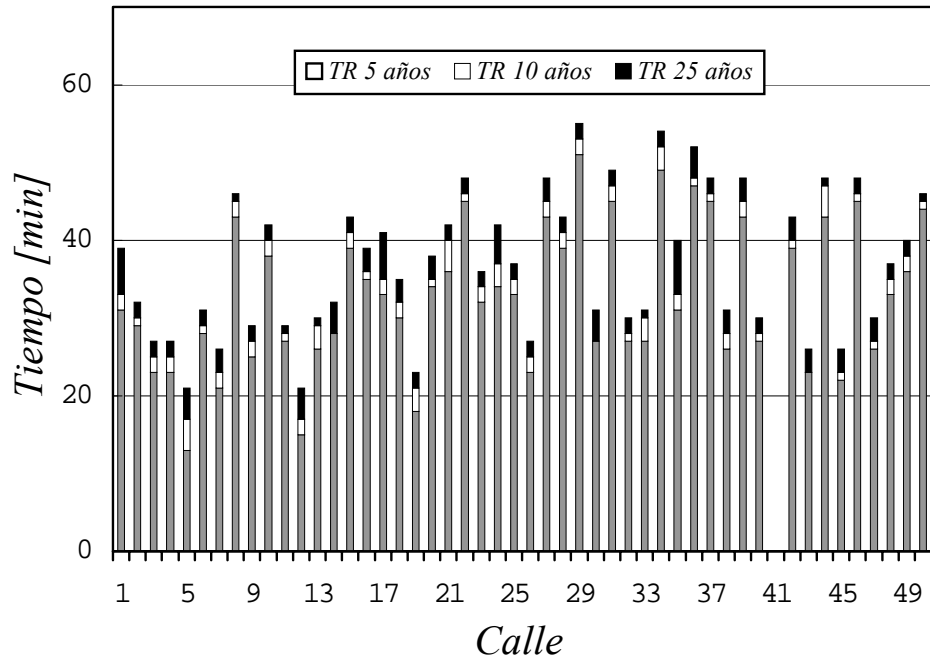


Figura 17: Duración de la peligrosidad por calle, en minutos, según el criterio de velocidad máxima de Témex (1992).

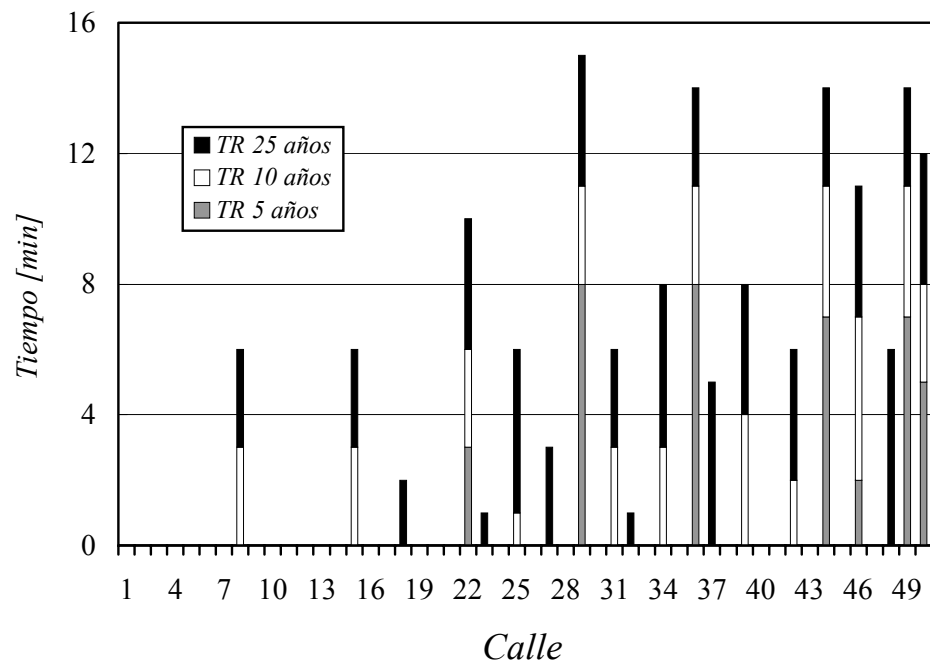


Figura 18: Duración de la peligrosidad por calle, en min., según el criterio propuesto del producto del tirante por el cuadrado de la velocidad.

CONCLUSIONES

Se presentan los resultados de experimentos en un modelo físico de cruces de calles que sirven para definir la división de flujos a la salida del mismo utilizando parámetros de los flujos de entrada, todo ello cuando los flujos son supercríticos.

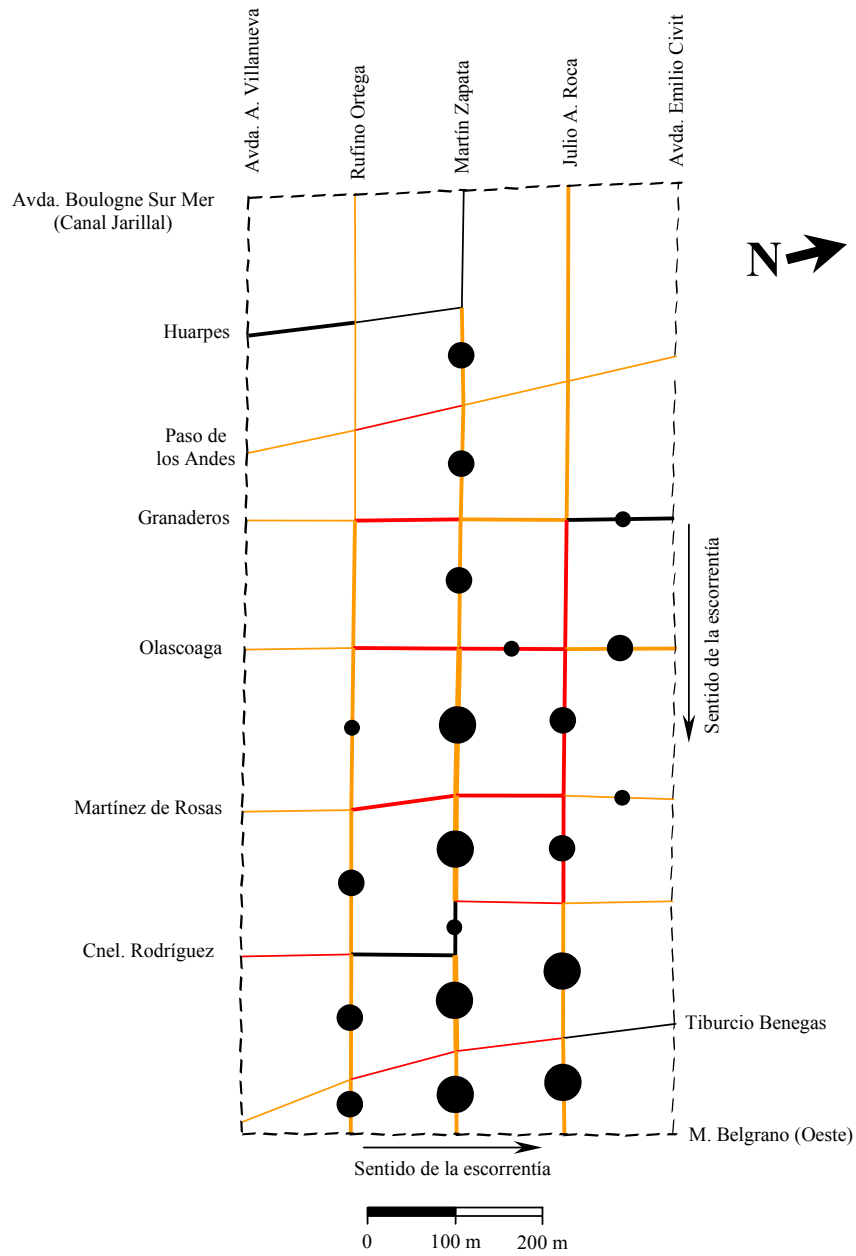
Dichos resultados se han aplicado con éxito en un estudio de división de flujos destinado al proyecto de un canal de evacuación pluvioaluvional en Guaymallén, Mendoza.

Se presenta un modelo de cálculo útil para el estudio de la escorrentía en medio urbano, ya que es capaz de generar escorrentía a través de planos inclinados y posteriormente calcular los flujos en calles que forman una red, utilizando los resultados de los experimentos en modelo físico para determinar la división de flujos de los cruces de calles.

La simulación numérica a través del modelo de cálculo propuesto, se muestra como una herramienta útil para la valoración de la peligrosidad de la escorrentía en calles y del grado de inundabilidad de una cuenca urbana, ya que permite la determinación de los parámetros hidráulicos, tirantes y velocidades del flujo, a través del tiempo.

Para evaluar la peligrosidad de la escorrentía es necesaria la aplicación de criterios. Se evaluaron criterios existentes que tienen en cuenta sólo los tirantes como el de Denver (Wright y McLaughlin, 1969) o el tirante y el producto del tirante por la velocidad (Témez, 1992), aunque éste último se demostró demasiado permisivo. Ante la falta de otros criterios que tengan en cuenta la velocidad del flujo, se elaboró uno nuevo basado en la valoración del producto del tirante por el cuadrado de la velocidad, con su correspondiente justificación teórica.

La aplicación de los criterios mencionados a los resultados obtenidos del modelo de simulación de la escorrentía permite establecer mapas de peligrosidad de la escorrentía en las calles, para diferentes periodos de retorno evaluados sobre la base de algún o algunos criterios tales como los analizados, tal como el que se muestra en la Figura 19. Cabe destacar que, como los resultados se dan en forma de hidrogramas, es posible establecer también la duración de la situación peligrosa.



Tiempo durante el cual es
 $y \cdot V^2 > 1,23 \text{ m}^3/\text{s}^2$

- 1-5 min
- 6-10 min
- 11-15 min

— $y > 0,30 \text{ m}$
 (Criterio de Mendoza)

— $y > 0,45 \text{ m}$
 (Criterio de Denver)

— $V > 1 \text{ m/s}$
 (Criterio de Témez)

— $V > 2 \text{ m/s}$

— $V > 3 \text{ m/s}$

Figura 19: Mapa de peligrosidad de la escorrentía en calles. Cuenca urbana de Mendoza. Periodo de retorno de 25 años.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la inestimable ayuda de Juan Pomares en el diseño y concepción del modelo físico. Parte importante de este trabajo fue posible gracias a la financiación de la Agencia Española de Cooperación Internacional y al Proyecto Europeo ADAPT-AGUA en convenio con la Universidad Politécnica de Valencia, España. Se agradece al Centro Regional Andino del Instituto Nacional del Agua por la información referente a las tormentas de proyecto y al Ing. Francisco Morandini y Alejandro Romano la información topográfica necesaria para el estudio de la red de calles.

Fue de suma importancia el aporte de información brindado por los ingenieros María Susana Domizio y Fernando Brandi de la Municipalidad de Guaymallén, Mendoza.

BIBLIOGRAFÍA

- Chaudhry, M.H.** (1993) *Open-channel Flow*. Prentice-Hall. New Jersey.
- Maza, J.** (2003) *Estudio sobre división de flujo en cruces de calles destinado al canal de evacuación pluvioahuvional en calle Allayme, Bermejo, Guaymallén, Mendoza*. INA-Centro Regional Andino, Mendoza. IT N° 35-CRA.
- Nanía, L.; Gómez, M.; Dolz, J.** (1999) "Numerical and experimental study of the urban storm runoff in a street network". 8th International Conference on Urban Storm Drainage (ICUSD'99). Sydney, Australia, pp. 849-856.
- Nanía, L.; Gómez, M.; Dolz, J.** (2000) "Análisis del riesgo asociado a la Escorrentía Pluvial en una Red de Calles. Aplicación a la Ciudad de Mendoza - Argentina". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina.
- Nanía, L.; Gómez, M.; Dolz, J.** (2004) "Experimental Study of the dividing flow in steep street crossings". Journal of Hydraulic Research, Vol. 42, No. 4, pp. 406-412.
- Nanía, Leonardo S.** (1999) *Metodología numérico-experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Témez, J.R.** (1992) "Control del desarrollo urbano en las zonas inundables". En: *Inundaciones y redes de drenaje urbano*, J.Dolz, M.Gómez, J.P.Martín (editores), Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos No. 10, Madrid, pp.105-115.
- U.S. Hydrologic Engineering Center** (2003) *HEC-RAS River Analysis System. Versión 3.3.1*.
- Wright-Mclaughlin** (1969) *Urban storm drainage criteria manual*. Urban Drainage and Flood Control District, Denver.