

PROBLEMÁTICA DEL DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES EN ZONAS URBANAS Y DEL ESTUDIO HIDRÁULICO DE LAS REDES DE COLECTORES

José Dolz, Manuel Gómez

Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

RESUMEN: Se analiza la problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas, en particular en áreas de rápido y reciente desarrollo urbano como es el caso del litoral mediterráneo español. Se estudia la repercusión que tiene sobre el drenaje un proceso urbanizador no respetuoso con la hidrología de las cuencas naturales preexistentes. Asimismo se analiza de una forma conceptual la problemática que presenta la modelación numérica de los diferentes procesos involucrados en el drenaje urbano, especialmente el comportamiento hidráulico de las redes de colectores.

PROBLEMÁTICA ESPECÍFICA DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE DRENAJE URBANO

Es conocida la tendencia de la población al desplazamiento desde zonas rurales hacia zonas urbanas. En la actualidad casi el 50 % de la población mundial vive en zonas urbanas, habiéndose incrementado más del 80 % en los últimos 20 años. En España también tiene lugar dicho fenómeno, siendo un claro ejemplo de ello el aumento de población (fundamentalmente urbano) que ha sufrido el litoral mediterráneo, donde en algunas zonas se ha producido un incremento anual de población superior al 5 % en el período 1970-1986.

El crecimiento de las ciudades exige notables inversiones en infraestructuras, siendo la mayoría de ellas utilizadas diariamente por el ciudadano. Este es el caso de las vías de comunicación, zonas verdes, centros hospitalarios, redes para el suministro de fluidos, etc. No obstante, el uso de estas infraestructuras y el normal desarrollo de la actividad ciudadana están, en ciertos momentos, condicionados por el correcto funcionamiento de otra infraestructura: la red de drenaje de aguas pluviales.

El disfrute día a día de unas vías de comunicación hace valorar por parte del ciudadano la voluntad política y la capacidad técnica que las hicieron posible. Es difícil que esto ocurra en una red de colectores que permanece "escondida" en el subsuelo, cuya propia naturaleza no contempla el contacto directo con el ciudadano y por tanto le resulta difícil valorar su correcto funcionamiento. Por contra, normalmente es una deficiencia en dicho funcionamiento lo que concita la

atención pública y la posterior sensibilización administrativa para la búsqueda de soluciones.

Además del escaso eco ciudadano que suscitan, existen otros factores que singularizan las actuaciones en las redes de colectores frente a las actuaciones en otras infraestructuras urbanas. Un primer factor es el carácter esporádico de su funcionamiento en las condiciones (caudal) previstas en proyecto: una probabilidad del 10 % de que dentro de un determinado año funcione a plena capacidad durante unos pocos minutos es un criterio normalmente utilizado. Por otra parte, la necesidad de amplias actuaciones (en el espacio y tiempo) en viales de zonas densamente pobladas es un factor determinante de los elevados costes económicos y sociales asociados a estas obras.

Todo lo anterior justifica la necesidad de una decidida voluntad política para la resolución de los importantes problemas de drenaje presentes en muchas ciudades de rápido y reciente desarrollo urbano.

INCIDENCIA DE LA URBANIZACIÓN EN EL DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES

El desarrollo urbano altera sustancialmente la hidrología de las cuencas donde se produce. En particular, se modifican la red de drenaje y el proceso de transformación lluvia-escorrentía. Como consecuencia de la actividad urbanizadora, los cauces naturales que conformaban la red hidrográfica original suelen ser profundamente alterados, lo que afecta de forma directa a su capacidad de desagüe y por tanto se propicia la existencia de inundaciones. La transformación lluvia-escorrentía es alterada como consecuencia

del tradicional criterio presente en muchos procesos de urbanización: las aguas pluviales deben ser eliminadas lo más eficaz y rápido posible. Ello conlleva evitar la temporal retención superficial y la infiltración, así como incrementar la velocidad de circulación del agua hacia las partes más bajas de la cuenca. Esta dinámica da como resultado final el que las redes de drenaje de dichas partes bajas se vean sometidas a hidrogramas con mayor volumen (mayor coeficiente de escorrentía), mayor caudal punta y mayor brusquedad (menos tiempo entre el inicio de la lluvia y la presentación del caudal máximo, disminución del tiempo de concentración). Cuando el desarrollo urbano se realiza desde el núcleo antiguo hacia las zonas situadas a mayor cota, los procesos anteriormente citados suelen dar lugar a un incremento de caudal que no es posible transportar por la red de drenaje existente en la zona urbana antigua, presentándose problemas por inundación. Esta situación es frecuente en ciudades situadas junto al litoral y que han sufrido un rápido crecimiento hacia el interior. Esta problemática es analizada en detalle por Arandes (1992).

Como ejemplo de lo anteriormente expuesto pueden presentarse los resultados obtenidos en una pequeña cuenca experimental (0.97 km²) en Japón, Yoshino y Yoshitani (1990). La cuenca de Minamiosava paso a tener un área urbanizada del 0 % al 61.5 % de su superficie y las consecuencias sobre el drenaje pueden resumirse del siguiente modo:

- El coeficiente de escorrentía paso de tener un valor comprendido entre 0.03 y 0.46 (31 episodios lluviosos estudiados) a otro comprendido entre 0.11 y 0.64 (20 episodios lluviosos estudiados). Cabe indicar que el coeficiente de escorrentía tiende a ser mayor cuanto mayor es la intensidad de la lluvia.
- El tiempo de concentración pasó de estar comprendido entre 60 y 100 minutos antes de la urbanización, a 35-50 después de ésta.

Toda la problemática anteriormente descrita se agrava en determinadas zonas donde se presentan con relativa frecuencia precipitaciones de corta duración pero de intensidad extrema. Este es el caso de muchas zonas del litoral mediterráneo donde la intensidad de la lluvia correspondiente a una determinada duración y probabilidad es aproximadamente el doble que la correspondiente a ciudades europeas no mediterráneas. Así, para un período de retorno de 10 años y 30 minutos de duración en Montpellier y Barcelona la intensidad de lluvia es superior a los 80 mm/h, Ajuntament de Barcelona et al. (1988). Para situar esta cifra, cabe recordar que la precipitación media anual en Barcelona es aproximadamente 550 mm. Un análisis de las características extremas de la precipitación en la España mediterránea puede verse en Martín (1992). Ello provoca caudales específicos muy elevados: en las pequeñas cuencas urbanas del entorno barcelonés, para

un período de retorno de 10 años, son normales caudales punta de 15 a 25 m³/seg/km² en cuencas inferiores a los 25 km². En la cuenca del Bogatell, de unos 25 km² y que drena aproximadamente el 25 % de la superficie de Barcelona, el caudal correspondiente a su desagüe al mar y para un período de retorno de 10 años es aproximadamente 350 m³/s. La capacidad máxima de dicha sección era de 40 m³/s. antes de realizarse la remodelación de la red de drenaje de Barcelona. Se justifican, por tanto, los problemas de drenaje y las frecuentes inundaciones que sufrían las áreas urbanas situadas en la parte baja de la cuenca del Bogatell.

Como resumen de lo expuesto en este apartado podría decirse que frecuentemente el desarrollo urbano ha sido poco respetuoso con la red de drenaje natural, lo que ha provocado graves problemas (inundaciones) por incapacidad de la red de drenaje artificial resultante. Sería de gran interés potenciar la presencia de la Hidrología y en particular el estudio del drenaje de aguas pluviales en la Planificación del Territorio.

ACTUACIONES PARA MEJORAR EL DRENAJE URBANO

Al objeto de solucionar los problemas de inundación existentes en una determinada zona urbana, normalmente se plantean actuaciones que tienden a restituir de una forma artificial el comportamiento natural existente en la cuenca antes de ser ocupada por la ciudad. Fundamentalmente cabe dividir estas actuaciones en dos categorías: las que tienen por objeto incrementar la capacidad de desagüe de la red de colectores (que sustituye a la red hidrográfica natural) y las tendentes a disminuir la escorrentía (aumentar la retención superficial y la infiltración). Además de estas actuaciones, es evidente que una correcta gestión de las infraestructuras y servicios relacionados con el servicio urbano puede ayudar a mejorar su eficacia. En Gutiérrez (1992) se describen la evolución y la tendencia actuales en dicha gestión.

La capacidad de un colector está ligada a sus dimensiones y a la velocidad con que se desplaza el agua en él. La elevada densidad urbana (zobre todo en las zonas antiguas) limita en gran medida las dimensiones de un nuevo colector. Por otra parte, la velocidad está estrechamente vinculada a la topografía, de forma que en zonas litorales la ausencia de desniveles topográficos suele ser un factor determinante en el diseño. Por tanto, queda patente la dificultad que normalmente supone el incremento de la capacidad de desagüe de una red de drenaje urbano. Por este motivo a veces se recurre al bombeo, con el riesgo que supone el depender del correcto funcionamiento de un gran grupo de bombeo durante el corto espacio de tiempo en que se presentan los máximos caudales en el colector. Evidente-

mente, ese riesgo se puede minimizar si se asegura una estricta labor de mantenimiento que, por otro lado, no es fácil debido al carácter altamente esporádico de su funcionamiento. Un detallado análisis de los criterios de diseño de las estaciones de bombeo en colectores puede verse en Cabrera et al. (1992).

La retención natural que tiene lugar en la superficie de una cuenca en zona urbana, puede ser sustituida por depósitos o balsas de retención que almacenen temporalmente una parte de la escorrentía. Un inconveniente para la construcción de estas estructuras es la dificultad en disponer del espacio que requiere su ubicación en la trama urbana. Una variante de los depósitos de retención consiste en utilizar la capacidad de almacenamiento de la propia red de colectores cuando ésta es lo suficientemente extensa y existe una clara diferenciación en la distribución espacial y temporal de la lluvia (no llueve de forma idéntica en toda la cuenca). Si la red está dotada de los elementos de control precisos (compuertas), pueden utilizarse como depósitos aquellos colectores que presenten caudales suficientemente bajos. Esto se puede conseguir operando las compuertas de forma que se desvíe total o parcialmente hacia ellos el agua transportada por colectores con problemas de capacidad. Como es obvio, este tipo de operación en tiempo real requiere, además de la instalación de compuertas, la existencia de una red de medida que permita conocer en todo instante la situación (caudales y niveles) en el sistema de colectores. La instrumentación de redes de colectores ha sufrido notables avances, Martín et al (1992) pero, en nuestra opinión, tanto o más importante que los sistemas de medida y control antes citados, es el poseer un grado de conocimiento lo suficientemente preciso del comportamiento hidráulico de la red, tal que permita en breves instantes tomar las decisiones oportunas para operar las compuertas. Cabe indicar que los caudales extremos en un episodio lluvioso característico de las cuencas urbanas mediterráneas se presentan de una forma muy rápida (en menos de media hora). Un detallado análisis de los criterios de diseño de las balsas y depósitos de laminación puede consultarse en Stahre y Urbonas (1990).

El disminuir de una forma sensible la escorrentía aumentando la infiltración es prácticamente imposible en ciudades tan densamente pobladas como suelen ser las españolas (casi 18.000 habitantes/km² en el caso de Barcelona). Cabe la posibilidad de facilitar la infiltración en determinadas zonas como parques, aparcamientos, plazas, etc. No obstante, desde un punto de vista global de la ciudad (o de una de sus cuencas) estas actuaciones difícilmente por sí solas podrán resolver los problemas de drenaje motivados por un proceso urbanizador que no respetó la hidrografía natural preexistente. Por tanto, normalmente la solución a los problemas de inundación en zonas urbanas densamente pobladas pasa por la

ampliación de la capacidad de desagüe de la red de colectores. La magnitud de los caudales y los condicionantes constructivos que impone la propia ciudad, hacen que dichas actuaciones requieran elevadas inversiones. Así, las obras en las redes de colectores llevadas a cabo en Barcelona durante el período 1986-1992 suponen un coste del orden de los 27.000 millones de pesetas y han permitido resolver en gran medida los problemas existentes: se ha reducido en un 44 % el área inundable que inicialmente era de unos 13 km² (el 13 % del término municipal de Barcelona), Malgrat (1992) y De Glasea et al. (1992). Es claro el gran interés en optimizar estas importantes inversiones y ello exige un detallado conocimiento de los fenómenos hidrológicos e hidráulicos ligados al drenaje urbano. Esta necesidad en el avance del conocimiento ha motivado la aparición, hace no muchos años, de una nueva disciplina denominada Hidrología Urbana, que incorpora y adapta los clásicos conocimientos de la Hidráulica e Hidrología a las particulares características del medio urbano. Dentro de esta disciplina, el estudio del drenaje urbano acapara una notable atención como lo muestra la existencia, cada tres años, de un congreso internacional sobre "Urban Storm Drainage". El primero de ellos se celebró en el año 1978 en Southampton y el próximo está previsto celebrarlo en Julio de 1996 en Hannover.

A modo de resumen, podríamos decir que normalmente la única solución para resolver los problemas de drenaje en ciudades densamente pobladas es el incremento de la capacidad de desagüe de la red de colectores. Ello requiere elevadas inversiones que justifican, e incluso exigen, un detallado conocimiento de los diferentes fenómenos relacionados con el drenaje urbano.

ESTUDIO DEL DRENAJE URBANO. ESQUEMA GENERAL

El estudio del drenaje urbano y el diseño de actuaciones tendentes a mejorarlo requiere el análisis detallado de tres fenómenos de carácter hidrológico-hidráulico: caracterización de la lluvia al objeto de fijar la lluvia de proyecto, transformación de la lluvia en escorrentía superficial a fin de obtener los hidrogramas de entrada en la red de drenaje (colectores) y la propagación de estos hidrogramas por la red. Los tres procesos anteriormente citados son básicos en Hidrología de Superficie, pero presentan características muy diferenciadas cuando se refieren al medio urbano. En lo que sigue nos referiremos a los dos primeros procesos. A partir del siguiente apartado será analizado el comportamiento hidráulico de las redes de colectores.

La lluvia de proyecto puede obtenerse a partir de registros de intensidades de lluvia. Estos registros deben de ser fiables y prolongados en el tiempo,

requisitos normalmente no satisfechos. Vázquez et al. (1987) presentan la metodología utilizada para la caracterización de la intensidad de lluvia en el entorno de Barcelona a partir de las bandas pluviométricas obtenidas en el observatorio Fabra. Cuando no se dispone de registro de intensidades, pueden utilizarse diferentes técnicas para la obtención de una lluvia de proyecto aproximada (S.T.U. 1986). Una vez fijada la lluvia deberá obtenerse el hidrograma correspondiente a la escorrentía superficial. Para ello pueden utilizarse diferentes metodologías que constituyen la base de los modelos normalmente utilizados, Monte y Marco (1992).

En nuestra opinión existe una clara necesidad de mejorar la información actualmente disponible, al objeto de poder aprovechar las elevadas prestaciones de los modelos numéricos existentes para el estudio de la transformación lluvia-escorrentía. En particular es preciso disponer de información fiable referida a las intensidades de lluvia y llevar a cabo estudios de campo que permitan, en un futuro próximo, cuantificar con rigor la capacidad de retención e infiltración de nuestras cuencas urbanas. Los resultados obtenidos en estudios semejantes realizados en otros países no son directamente aplicables en España, en particular en el litoral mediterráneo, debido a las marcadas particularidades pluviométricas y urbanas de nuestras ciudades. Las inversiones precisas para llevar a cabo esta mejora de la información son mínimas, en comparación con el ahorro que podría obtenerse al mejorar el conocimiento de los fenómenos y, por tanto, al disminuir el grado de incertidumbre en los parámetros de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano.

Por otro lado cabe indicar que en nuestro país, las limitaciones al avance del conocimiento en Hidrología Urbana (al igual que en Hidrología) no están en la capacidad de los modelos numéricos para reproducir los fenómenos físicos involucrados o en la capacidad de cálculo de los ordenadores. Dichas limitaciones, muy importantes a nuestro entender, están en la información de campo disponible: lluvias y caudales fundamentalmente. El mejorar esta información pasa por ampliar la red de toma de datos (de muy escasa entidad la actualmente existente en zonas urbanas) y modernizar la transmisión y almacenamiento de la información. Pero dicha mejora también exige un mejor mantenimiento de la red (por ejemplo, no es raro que una serie larga de datos quede truncada por un descuido en el mantenimiento y control de una estación de aforos) y una capacidad (equipo humano) de análisis y síntesis de la información obtenida.

El diseño de las actuaciones precisas para mejorar la capacidad de los colectores requiere aplicar los conceptos propios de las Obras Hidráulicas y en

particular lo relativo al flujo en lámina libre. Una revisión del tema puede verse en Dolz (1992). No obstante, quizás sea de interés exponer brevemente la problemática de un elemento singular de las redes de colectores: las obras de captación. La capacidad de captación de los elementos de entrada como son las rejas o los imbornales depende de parámetros tales como sus dimensiones (largo, ancho y área de huecos), tipología, caudal circulante por la calle y velocidad del agua, grado de limpieza y conservación del mismo, etc. Esta capacidad se estima mediante ensayos en modelo físico, de donde el fabricante puede extraer unas relaciones empíricas para obtener la eficiencia de captación de su elemento (relación entre el caudal interceptado por la reja con respecto al caudal circulante por la calle) en función de las pendientes longitudinal y transversal del vial, del caudal circulante por la calle (la eficiencia puede ser muy alta para caudales bajos y reducirse al aumentar el caudal de escorrentía por la calle), del tipo de superficie del vial, etc. Las relaciones así obtenidas permitirán al proyectista determinar el tipo y número de elementos de captación necesarios para asegurar que la escorrentía urbana entra en la red de drenaje y lo hace en los puntos previstos. Son pocos los suministradores que faciliten datos referentes a la capacidad de captación de sus elementos de intercepción, por lo que el proyectista debe ubicar las rejas o imbornales con criterios más bien geométricos (uno, dos, etc. por manzana de casas, por ejemplo) que con criterios hidráulicos.

Finalmente, pensamos que es de gran interés desarrollar estudios globales referidos a un cierto ámbito geográfico. Estos estudios permitirán homogeneizar los diferentes criterios que condicionan el diseño de las actuaciones: lluvia de proyecto, impermeabilidad, retención, soluciones constructivas, etc. Asimismo permitirán analizar las implicaciones que una determinada actuación puede tener en cuencas vecinas. Todo ello permitirá optimizar las elevadas inversiones a realizar. Un ejemplo de lo anteriormente expuesto puede ser el Plan Especial de Alcantarillado de Barcelona y su Ámbito Hidrológico, Ajuntament de Barcelona et al. (1988), Malgrat y Vázquez (1992).

Resumiendo lo expuesto en este apartado, podemos decir que el estudio del drenaje urbano viene condicionado en gran medida por la disponibilidad (en cantidad y calidad) de los datos de lluvia y grado de conocimiento de la cuenca. Es preciso mejorar dicha información si se desea poder aprovechar las grandes posibilidades que actualmente ofrece la modelación numérica para profundizar en el conocimiento de los fenómenos involucrados en el drenaje urbano y optimizar de este modo las elevadas inversiones a realizar.

COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA RED DE COLECTORES. ASPECTOS GENERALES

Una red de colectores está formada por un conjunto de conductos interconectados entre sí a través de sus uniones que denominaremos nudos. Estos conductos normalmente se diseñan para que trabajen en lámina libre cuando por ellos circula el caudal (hidrograma) de proyecto. El funcionamiento en lámina libre permite la conexión del colector con la superficie de la ciudad, lo que facilita la incorporación de caudales. Si el colector funciona en presión, puede producirse un paso de caudales del colector al exterior. Evidentemente, ello es tanto más probable cuanto menos profundo sea el colector. Cabe indicar que siempre existe la posibilidad de que se presente un caudal superior al considerado en el proyecto y que provoque la entrada en carga del colector.

Dado que los caudales que se introducen en la red son variables en el tiempo, las características del movimiento del agua en los colectores también serán variables en el tiempo.

El movimiento en lámina libre puede tener lugar en régimen lento, crítico y rápido, según que el número de Froude correspondiente a una sección sea inferior, igual o superior a la unidad. El comportamiento hidráulico de un conducto en lámina libre es notablemente, diferente según se presente un régimen u otro. Cuando el movimiento es variable, el número de Froude para una sección varía con el tiempo. El paso de régimen rápido a lento se produce mediante un resalto, que dadas las características no permanentes del movimiento, se desplazará por el colector. Normalmente las redes de colectores disminuyen las pendientes desde las zonas altas de la cuenca a las bajas. Por este motivo el régimen hidráulico suele ser rápido en cabecera de la red de colectores y lento en la parte final. Ello exige la presencia del resalto móvil que permita pasar de un régimen a otro.

Como resumen de lo anterior, podemos decir que una red de colectores es una red de conductos en lámina libre y en funcionamiento variable en el tiempo. Por tanto, su estudio requiere conocer las variables del movimiento (calado y velocidad) en toda sección de la red y en todo instante. O sea, es preciso conocer las variables dependientes velocidad y calado, en función de las variables independientes posición y tiempo. A veces, en lugar de la velocidad, se considera el caudal. Para resolver este problema son necesarias dos ecuaciones: la ecuación dinámica (que exige el equilibrio de las fuerzas actuantes en un volumen elemental de agua) y la ecuación de la continuidad. Estas ecuaciones adoptan formas diferentes según se apliquen al movimiento en un colector o en un nudo. En el caso de un colector, las ecuaciones son las establecidas por

Saint-Venant y la resolución de este sistema de dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales requiere conocer las condiciones de contorno en los extremos del mismo. Para ello hay que resolver las ecuaciones correspondientes a los nudos que constituyen dichos extremos. Observamos, como cabía esperar, que la resolución del movimiento en el nudo condiciona la resolución de los colectores que confluyen en él. Asimismo, el comportamiento hidráulico de un nudo está condicionado por el de los colectores que lo definen. Una vez establecido el modelo matemático del comportamiento de una red de colectores, la resolución de las ecuaciones que lo constituyen se llevará a cabo a través de esquemas numéricos.

Al objeto de que el modelo numérico resultante reproduzca lo más fielmente posible la realidad, debe exigírsele:

- capacidad para incorporar todas las singularidades geométricas de la red.
- capacidad para simular correctamente los diferentes fenómenos hidráulicos presentes en el movimiento no permanente del agua a lo largo de los colectores y de los nudos.
- capacidad para establecer un cómodo y ágil diálogo con el ordenador que permita introducir en el modelo las características de la red y las hipótesis de cálculo, así como una fácil interpretación de los resultados.

El cumplimiento de los anteriores requisitos presenta notables dificultades:

- Dificultad en disponer de la información que permita reproducir la geometría de la red: diferente tipología de secciones, pendientes, trazado en planta y características de los nudos.
- Dificultad debida a la amplia casuística de los fenómenos hidráulicos de carácter no permanente que puedan presentarse en un conducto en lámina libre y a la complejidad de su estudio. Todo ello requiere una notable capacidad de cálculo, lo que ya no suele ser problema debido a las elevadas prestaciones de las computadoras actualmente existentes.
- Las actuales pantallas gráficas y el software disponible para su uso, facilitan en gran medida el diálogo con el ordenador. No obstante, la gran variedad de geometrías y el enorme número de situaciones de carácter hidráulico que pueden presentarse en una red de colectores, hace extremadamente difícil que todas ellas puedan ser previstas en un software para la entrada de datos y análisis de resultados en pantalla gráfica.

En la medida que sean superadas estas dificultades, el modelo será útil para simular con rigor el comportamiento hidráulico de la red de colectores cuando por

ella circulen unos determinados caudales (hidrograma). En lo que sigue, serán analizadas en detalle aquellas características que, a nuestro entender, deben ser exigidas a un modelo numérico que pretenda ser útil para el estudio del comportamiento hidráulico de una red de colectores.

ECUACIONES DEL MOVIMIENTO. MODELOS SIMPLIFICADOS Y COMPLETOS

A diferencia de otros procesos físicos dentro del problema general del drenaje urbano, como por ejemplo la transformación lluvia-esorrentía en la superficie de la ciudad, los aspectos relativos a la descripción matemática del comportamiento hidráulico son mucho mejor conocidos. Dado que predomina la dimensión longitudinal del colector sobre las otras dos, se asume que una descripción unidimensional es válida. El tipo de movimiento más general posible, no permanente, viene descrito por las ecuaciones de Saint-Venant (1871), que para un colector de sección constante tienen la siguiente expresión:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A}{b} \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(I_0 - I_f) = 0$$

donde v es la velocidad media del agua en la sección considerada, y es el calado en dicha sección, g es la aceleración de la gravedad, I_0 , pendiente del colector, I_f , valor de la pendiente motriz (expresión de las fuerzas de fricción), x, t las variables independientes, abscisa de la sección considerada y tiempo. Estas ecuaciones expresan principios básicos como son la conservación de la masa, y el equilibrio de fuerzas. En particular esta última formula el equilibrio entre las fuerzas de inercia (términos de aceleración local y convectiva), fuerzas de presión (término de variación de niveles), fuerzas de gravedad (término de pendiente de solera) y fuerzas de fricción (término de pendiente motriz), que son las actuantes sobre el volumen de agua. La aplicación de estas ecuaciones requiere tan solo conocer el parámetro de estimación de la pendiente motriz, normalmente el coeficiente de rugosidad de Manning.

Las ecuaciones de Saint-Venant constituyen un sistema de dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales

que carece de solución analítica. Debido a ello, se tiene que recurrir al cálculo numérico para su resolución. Hasta la irrupción de nuevos medios informáticos y de

esquemas eficientes de solución numérica, se habían empleado una serie de procedimientos simplificados que se establecieron en la práctica. Por esta razón se puede plantear la disyuntiva siguiente: ¿emplear las ecuaciones completas o será suficiente un método aproximado que despreciando algunos términos de las ecuaciones completas permita resolver suficientemente el problema? La respuesta a esta pregunta se obtiene al analizar estos procesos simplificados, sus ventajas e inconvenientes. Entre los más habituales tenemos:

Métodos hidrológicos, que consideran exclusivamente en su formulación la ecuación de continuidad como por ejemplo los métodos de Puls modificado o de Muskingum. Son el proceso más sencillo en relación al esfuerzo de cálculo que requieren, y suponen en general una trasposición de procedimientos tradicionales de otros campos de la Hidráulica e Hidrología. Si bien son fáciles de implementar, en su definición pueden precisar una serie de parámetros difíciles de estimar. Por ejemplo el método de Muskingum precisa de 2 parámetros, K y X , relacionados con el tiempo de viaje de una onda de caudal por un conducto y con la influencia de las condiciones de contorno aguas abajo del conducto de estudio. Dichos parámetros se deberían extraer a partir de medidas reales de caudal en los tramos estudiados. La bondad de los resultados finales depende de una buena estimación de esos parámetros. En el caso de estudio de redes de drenaje deberíamos estimar los dos parámetros, K y X , para cada uno de los colectores de la red, cosa que es prácticamente imposible. Otro problema añadido radica en que su formulación es exclusivamente en caudales, por lo que no se calculan datos de niveles de agua, imprescindibles a la hora de dimensionar un conducto. Todavía más, el despreciar la ecuación de equi-

ilibrio de fuerzas y no considerar las acciones sobre el agua en movimiento, supone que no se puedan representar todos los fenómenos hidráulicos que se producen en una red de drenaje. Por todas estas razones y ante la existencia de otras alternativas más completas, se acabaría por desaconsejar su empleo.

La aproximación de la **onda cinemática**, aquella que desprecia los términos inerciales y de presión en la ecuación de equilibrio dinámico, considera como preponderantes la acción de las fuerzas de gravedad y de fricción. Se puede aceptar como una buena aproximación a la realidad siempre que en la red de drenaje predominen las pendientes fuertes, superiores a un 1 %, con flujos en régimen rápido. Eso sí, no deberán existir efectos de reflujos entre los colectores concurrentes en un nudo pues esta formulación no permite reproducir dichos efectos. Otro punto limitativo es la imposibilidad de modelar la laminación de los hidro-gramas de caudal (reducción del caudal máximo en su circulación a lo largo del colector). Cualquier laminación obtenida por este método es achacable exclu-

sivamente a efectos numéricos. Esta situación, en caso de analizarse redes de gran longitud (varios kilómetros) y con pendientes reducidas, puede llevar a sobrevalorar los resultados de caudal. La formulación de la onda cinemática está incorporada en diferentes modelos comerciales, bien como proceso principal de cálculo o bien como alternativa de cálculo a elegir entre otras, en el caso de requerir unos resultados aproximados del comportamiento global de una red.

Frente a esta y otras aproximaciones, el empleo de un modelo que incluya las ecuaciones completas de Saint-Venant, lo que denominamos **modelos completos**, supone utilizar un procedimiento de integración numérica, bien sea el método de las características, bien esquemas en diferencias finitas. Existen numerosos esquemas que se han implementado en modelos comerciales (características rectas explícitas, esquemas de Preissmann, Abbott—Ionescu, Euler modificado, McCormack, etc), siendo generalmente todos ellos adecuados a tal fin. No obstante, cabe indicar la dificultad que presentan algunos de estos esquemas para su aplicación al régimen rápido, que como ya hemos dicho se presenta frecuentemente en las redes de colectores, Gómez et al. (1987). El empleo de ecuaciones completas permite de partida incorporar todas las acciones actuantes sobre el agua, lo que supone una mayor aproximación a la realidad de lo que pasa en la red. Todos los fenómenos como la entrada en carga, la interacción entre colectores de una red, los efectos de laminación de caudales, cambios de régimen, etc. se pueden estudiar al permitirlo la formulación empleada. Ello se traducirá en una mayor precisión y exactitud de los resultados del cálculo hidráulico, lo que puede suponer por ejemplo en el caso de estudio de nuevos colectores, un diseño más ajustado y económico a la vez que más seguro. La imputación que se les ha hecho durante años a estos métodos completos de suponer un consumo excesivo de tiempo de ordenador hoy día pierde sentido con la aparición de los PC's de gama alta. Una pequeña red correspondiente a una cuenca de 20 a 30 Ha, analizada con un modelo de este tipo supone segundos de cálculo para un PC'486. Métodos simplificados serán más rápidos, pero creemos que las ventajas de modelación apuntadas, junto con tiempos de cálculo tan reducidos como los que estamos hablando hacen que la elección se decante cada vez más por el empleo de modelos completos. Un análisis de los diferentes tipos de modelos numéricos utilizados para el estudio del comportamiento hidráulico de colectores puede verse en Dolz (1987) y Gómez (1992).

Como resumen puede decirse que, dada la gran capacidad de cálculo que actualmente tienen los ordenadores (incluidos los PC), no se justifica la utilización de modelos simplificados por la simple razón de exigir menos esfuerzo de cálculo. Corno se verá más adelante si existen otras razones que pueden aconsejar su uso en ciertos casos.

CALCULO EN RÉGIMEN PERMANENTE

Tradicionalmente, el dimensionado de los colectores se ha realizado mediante fórmulas tipo Manning considerando régimen permanente y uniforme: calados y velocidades constantes en todo el colector. Es evidente que esta hipótesis de cálculo no tiene en cuenta las interferencias mutuas entre colectores y por tanto su aplicación sólo estará justificada en los casos en que dichas interferencias no condicionen el comportamiento hidráulico. Esta circunstancia puede darse, por ejemplo, en la parte central de un colector de gran longitud y elevada pendiente.

Otra posibilidad es el estudio en régimen permanente gradualmente variado (curvas de remanso) considerando caudal máximo. Ello permite tener en cuenta la incidencia de las condiciones de contorno en el comportamiento hidráulico del colector (por ejemplo, niveles en el extremo aguas abajo). Dadas las dificultades para obtener el hidrograma correcto y la complejidad del cálculo en régimen no permanente, la correcta aplicación de las curvas de remanso puede en muchos casos dar un grado de precisión adecuado para el diagnóstico de una red y el diseño de actuaciones. A nuestro entender, es más aconsejable disminuir el rigor en el tipo de cálculo (por ejemplo, utilizar la teoría de las curvas de remanso) y exigir más precisión en la información de la geometría de la red que a la inversa. En muchas ocasiones se da la circunstancia que la capacidad de desagüe de una red está limitada por la existencia de un pequeño tramo de colector mal diseñado. El cuantificar la incidencia de dicha anomalía y establecer criterios para resolverla, normalmente no exige la simulación de toda la red en régimen variable, sino unos simples cálculos en régimen permanente y la aplicación de sentido común ingenieril.

Evidentemente el cálculo en régimen permanente no es posible cuando se precisa conocer la propagación del hidrograma, como ocurre al considerar la existencia de depósitos o balsas de laminación.

En resumen, en muchas ocasiones es suficiente una simulación en régimen permanente gradualmente variado (curvas de remanso) para analizar el comportamiento hidráulico de una red y definir actuaciones para mejorarlo.

TIPOLOGÍA DE REDES EN PLANTA

El trazado en planta de redes de drenaje presenta muy diversas tipologías, condicionadas en gran medida por el modelo de desarrollo urbano adoptado por cada población. Por ejemplo, un desarrollo radiocéntrico en una población sita junto a un cauce, tiende a producir un crecimiento de ciudad en coronas circula-

res. La parte de ciudad nueva puede tener tendencia a 'engancharse' sus nuevos servicios a la red existente, lo que tendrá como consecuencia primera una estructura arborescente de la red de drenaje. Adicionalmente, estaremos sobrecargando los ejes drenantes antiguos, al conectarles un caudal procedente de la parte de ciudad nueva. Estos ejes podían estar diseñados para servir una superficie de población que no contaba con el futuro desarrollo urbano. Dado que en ocasiones se produce un

funcionamiento desigual entre estos ejes antiguos, (algunos pueden ir sobrecargados mientras otros funcionan con menos caudal para el mismo suceso de lluvia) se puede tender en las zonas finales a interconectar los ejes con objeto de aprovechar al máximo la capacidad de desagüe de la red, redistribuyendo caudales. Como resultado de esta acción aparecen tramos mallados.

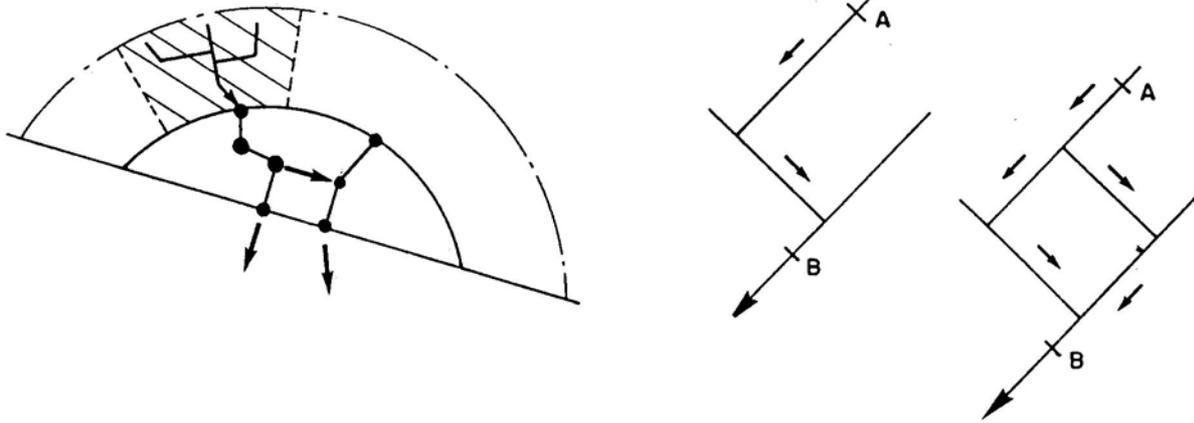


Figura 1. Red arborescente y red mallada.

Hidráulicamente la única diferencia entre una red arborescente y una mallada es que, en la primera, el agua tiene un único camino para ir por la red desde un punto A, hasta otro B aguas abajo, mientras que en la segunda este camino no es único. Figura 1. En principio las redes malladas pueden permitir una mayor flexibilidad a la hora de desaguar una zona. Sin embargo no hay que perder de vista que interconectar colectores puede suponer también una transferencia no solo de caudales sino de problemas de inundación. Zonas que antes nunca se veían afectadas por estos problemas puesto que eran capaces de drenar sus aguas de forma suficiente, pueden comenzar a presentar problemas al transferírseles más caudal del que pueden absorber.

En conclusión, cualquier formulación que adoptemos, deberá permitir el estudio de redes de drenaje arborescentes y malladas. Si bien en la gran mayoría de casos nuestra red va a ser arborescente, en ocasiones una correcta diagnosis de zonas cercanas a desembocadura de colectores requerirá la modelación de las mallas e interconexiones existentes.

ENTRADA EN PRESIÓN

Aunque el criterio de diseño habitual es que las redes de drenaje funcionen en lámina libre, ya sea porque estemos analizando el comportamiento de una red existente muy insuficiente o porque estudiemos el comportamiento de

una red de nueva planta para un caudal superior al de diseño, es necesario considerar el problema de la entrada en presión y el cálculo de partes de la red funcionando en presión.

Este es un punto del que carecen algunos modelos comerciales, ya que desde una visión general de modelación se trata de una de las condiciones más complejas de simular. Desde el punto de vista de cálculo hidráulico, la técnica más extendida es el empleo del denominado 'Preissmann slot', o ranura de Preissmann, consistente en representar una sección cualquiera de colector prolongada en su parte superior por un estrecho canal (de ancho pocos cm), junto con un esquema en diferencias finitas implícitas, por ejemplo el de Preissmann. Figura 2. En estas condiciones, cuando el nivel del agua entra en la zona de la ranura de Preissmann, es como si estuviéramos calculando todavía un flujo en lámina libre (al fin y al cabo tenemos una superficie libre, por estrecha que sea) por lo que seguimos aplicando la misma formulación. La altura de presión a que está sometido el colector será precisamente la altura de agua en la ranura. La elección del ancho de ranura es una decisión crucial pues anchos muy pequeños provocan problemas de inestabilidad numérica, mientras que anchos muy grandes pueden falsear los resultados de cálculo al transportar un porcentaje importante de caudal por la zona de la ranura de Preissmann. Un criterio fijado en función de

la discretización y condiciones de flujo existentes (Gómez et al. 1992), permite establecer un rango de anchos de ranura de Preissmann que combinan estabilidad en el cálculo con unos resultados prácticamente iguales para todo el rango de anchos de ranura utilizados. La ventaja de esta metodología es que, desde la óptica del cálculo, el modelo emplea la misma formulación para el flujo en lámina libre o en presión.

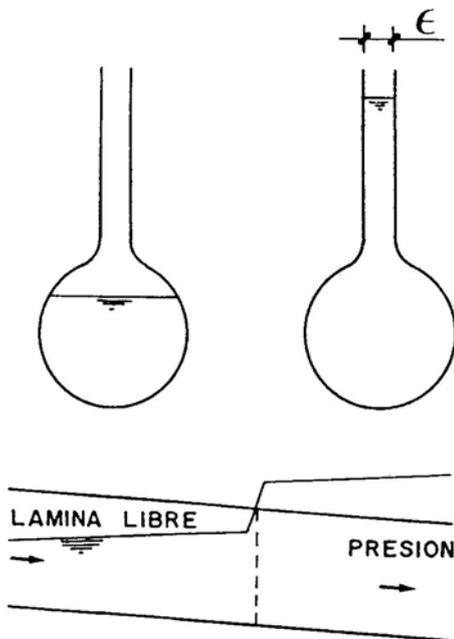


Figura 2. Flujo en presión. Ranura de Preissmann.

Otra metodología posible consiste en separar el cálculo de los flujos en lámina libre y en presión, adoptando para la lámina libre la formulación de las ecuaciones de Saint-Venant, y para la parte en presión una formulación de movimiento en bloque del agua, despreciando los efectos de compresibilidad del flujo. Ello requiere adicionalmente un tratamiento específico y un seguimiento de la transición entre flujos: el frente de entrada en presión.

Estudios numéricos y experimentales que se están llevando a cabo comparando las dos metodologías presentadas indican que los resultados son semejantes, y que en ambos casos se puede seguir el proceso de entrada en presión con suficiente precisión (Diéguez, 1994).

Cabe indicar que frecuentemente la entrada en carga es debida al incremento de calado que provoca un resalto móvil desplazándose por el colector. Por tanto la correcta simulación de la entrada en carga requiere tener en cuenta la posible presencia del resalto móvil, es decir: detectar su formación, seguir su desplazamiento

y desaparición. Ello presenta una notable complejidad y por este motivo no todos los modelos lo tienen en cuenta. Un detallado análisis de la modelación del resalto móvil puede verse en Gómez (1988).

Teniendo en cuenta los problemas de capacidad que normalmente presentan las redes de colectores, es de gran interés que los modelos numéricos contemplen el funcionamiento en presión. Ello requiere a su vez modelar correctamente el resalto móvil.

NUDOS DE UNION DE COLECTORES

El trazado en planta de una red de drenaje es una sucesión de tramos de colector enlazados mediante nudos de unión. Si la formulación presentada con anterioridad respondía a la solución del problema hidráulico en los colectores de la red, los nudos de unión de los mismos presentan una problemática específica y como veremos uno de los niveles de complejidad mayores del problema. En un nudo pueden concurrir colectores con alineaciones verticales y horizontales muy diferentes, producirse cambios de sección y pendiente así como notables variaciones de caudal entre colectores de entrada y salida. El tipo de flujo que se produce en un nudo es claramente tridimensional por lo que la formulación utilizada hasta ahora no sería válida. Se proponen formulaciones basadas en el balance de caudal global entre los colectores de entrada y salida y en la conservación de la energía entre flujos entrantes y salientes (incorporando las pérdidas de carga que se producen en el nudo), que permiten una descripción suficientemente aproximada del flujo en un nudo.

Desde el punto de vista hidráulico el hecho más significativo de un nudo es que puede originar efectos de reflujos en los colectores de entrada, elevando los niveles de agua en el extremo aguas abajo de los mismos y modificando así de manera significativa su capacidad de desagüe. De este modo, cualquier insuficiencia local en un nudo, se traducirá en problemas de falta de capacidad aguas arriba del mismo. Referente al cálculo hidráulico, los colectores de entrada y salida pueden presentar múltiples combinaciones de los diferentes tipos de flujo. Si sólo consideramos las condiciones en lámina libre, un colector de entrada puede presentar hasta 4 tipos distintos de flujo: régimen crítico cuando vierte libremente y sin influencias del nivel de agua en el nudo, régimen supercrítico también sin influencias desde aguas abajo, régimen subcrítico dependiente del nivel de agua en el nudo, y resalto hidráulico localizado junto al nudo. Un colector de salida presentará tan solo 2 condiciones posibles de flujo: régimen crítico para los colectores de salida con gran pendiente y régimen subcrítico para los colectores de salida con pendiente moderada. Cualquier nudo de una red, en función del número de colectores de entrada y salida, presenta un elevado número de posibles combinaciones de flujo. Para un caso con 3 colectores de entrada y 2 de salida, podemos plantear un total

256 combinaciones distintas de flujo. El modelo de cálculo debe ser lo suficientemente flexible para dar una respuesta correcta a todas y cada una de ellas, lo cual no es sencillo. Si añadiéramos al resultado anterior la posibilidad de flujo en presión, el número de combinaciones de flujo se dispara, complicando extraordinariamente el proceso de solución. Un análisis de las diferentes posibilidades de funcionamiento de un nudo y de su modelación numérica puede verse en ().

Podemos afirmar que la calidad de los resultados del cálculo hidráulico de una red depende fundamentalmente de una solución correcta de los nudos de la misma ya que ello condiciona las interacciones mutuas entre los colectores de la red y por tanto su funcionamiento hidráulico.

CAPACIDAD DE INCORPORAR GEOMETRÍAS VARIADAS

Si hasta ahora hemos hablado del interés de reproducir lo más fielmente posible los fenómenos hidráulicos que están produciéndose en el interior de la red de drenaje, condición "sine qua non" para ello será introducir correctamente la geometría en perfil y en sección de la red. Respecto a los perfiles de los colectores hay que introducir los datos de cotas de solera, pendientes, escalones de solera, rápidas, obras singulares, etc. Las secciones transversales son un punto de gran interés puesto que la tipología que podemos encontrar en muchas redes es enormemente variada. Algunos modelos de cálculo se limitan al empleo de tipologías preestablecidas, sección circular, ovoide, cajón rectangular, etc. que se supone recogen la gran mayoría de secciones existentes en una red. Sin embargo, la experiencia indica que también pueden aparecer secciones abovedadas muy rebajadas, combinaciones de bóveda y cajón mixto, etc. que deberían poder ser incorporadas en el cálculo hidráulico. La selección del modelo a emplear deberá tener en cuenta esta posible situación.

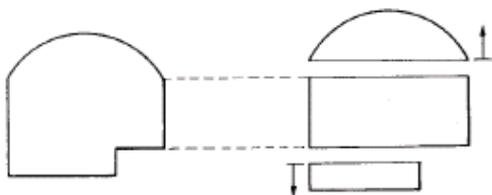


Figura 3. Descomposición de una sección en subsecciones.

Una manera de poder tener en cuenta esta gran variabilidad en sección puede ser el tratamiento geométrico de las secciones como composición de tipologías simples. Así una sección como la mostrada en

la figura 3 se puede subdividir en tres subsecciones, de abajo hacia arriba, un cajón rectangular, otro cajón rectangular de ancho mayor y una sección abovedada. De esta manera casi la totalidad de secciones pre-existentes en una red pueden obtenerse como combinación de tipologías como la abovedada (arco de círculo), rectangular o trapecial y contrabóveda (arco de círculo) en la parte inferior si existe. Parametrizando cada una de estas tipologías se pueden reproducir fielmente las geometrías de sección de una red. Esta metodología fue puesta a punto para el estudio de las redes de colectores de Barcelona, Gómez (1988).

Como comentario final, indicar que la calidad de los resultados estará en relación directa con la calidad de la información que se le suministre al modelo. En este caso, la fiabilidad de la información disponible sobre la geometría debe ser suficientemente contrastada con campañas de toma de datos de la red, mantenida y conservada por los servicios municipales que actualicen e incluyan las modificaciones que se realicen a lo largo de los años. Lamentablemente, esta situación no es la habitual y ello constituye una imponente limitación para llevar a cabo un estudio hidráulico de garantía.

De lo dicho en este apartado se desprende la necesidad de que el modelo numérico admita una tipología de secciones lo más variada posible y asimismo es del todo imprescindible disponer de una información actualizada que permita definir con rigor la geometría de la red.

ENTRADA DE DATOS, SALIDA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La complejidad de la geometría de una red de colectores hace necesario facilitar al máximo su incorporación al modelo numérico. Asimismo el volumen de resultados obtenidos (valores del calado y caudal en numerosas secciones de la red y a lo largo de un prolongado tiempo) justifica la necesidad de que el modelo dedique una especial atención al análisis de resultados. Si existen estas capacidades para establecer un diálogo cómodo y ágil con el ordenador, se potenciará en gran medida la utilidad del modelo para el análisis del comportamiento hidráulico de una red y el estudio de alternativas para mejorar dicho comportamiento. Ello es actualmente posible gracias a las pantallas gráficas y software disponible para su uso. No obstante, como ya ha sido anteriormente comentado, la gran variedad de geometrías y el enorme número de fenómenos hidráulicos posibles en el movimiento del agua en una red, dificultan en gran medida la puesta a punto de un software que contemple esta amplia casuística.

Cabe indicar finalmente el gran interés en que la selección del valor de los parámetros a introducir en el modelo y el análisis de resultados sean realizados por

técnicos de claro perfil ingenieril que conozcan las características de la red y posean un buen conocimiento físico de los fenómenos hidráulicos presentes en ella. Hay que evitar que, como frecuentemente ocurre, la modelación numérica se encomiende a personas expertas en modelación pero desconocedoras de la realidad física ligada a la red y a su comportamiento hidráulico. Ello es tanto más importante cuando los resultados de la modelación serán utilizados para el proyecto de costosas obras de infraestructuras que requieren unos claros conocimientos de Ingeniería Hidráulica a fin de optimizar su diseño.

Como resumen puede decirse que es de gran interés que el modelo numérico incorpore utilidades (pantalla gráfica) que permitan una fácil introducción de las características geométricas de la red y ayuden al análisis de resultados. Por otra parte, la selección de los parámetros a introducir en el modelo deben de ser realizados por personas conocedoras de la red y de los fenómenos hidráulicos estudiados.

OBRAS DE CAPTACIÓN

Para que el funcionamiento de una red de drenaje sea acorde con el diseño inicial que se hizo de la misma, es fundamental que se verifique el esquema previsto de caudales de entrada en la red. El diseño de colectores se ha hecho atendiendo a un estudio hidrológico que preveía unos caudales o hidrogramas de entrada en puntos específicos de la red. Si luego estas previsiones no se cumplen, por ejemplo porque no somos capaces de conseguir que el agua de escorrentía entre en la red en los sitios programados, todo el esquema inicial de caudales de cálculo cambia y se modifica sensiblemente el comportamiento hidráulico de la red. Obras de captación insuficientes pueden ocasionar una transferencia de caudal entre cuencas urbanas, sobrecargando colectores que en principio estarían bien diseñados si el agua se introdujera en la red en los puntos previstos, y también provocan situaciones opuestas como colectores funcionando muy por debajo de su máxima capacidad de desagüe debido a la falta de aporte de caudal.

Otra situación que se puede dar es que la cuenca definida por la red de colectores no coincida con la definida por la topografía de la superficie. Esta situación, no del todo extraña en cuencas urbanas, puede provocar que la escorrentía superficial debida a una incapacidad de la red (o de sus obras de captación) en las zonas altas de la cuenca, sea incorporada a otra red en zonas aguas abajo. Poder prever y simular estas situaciones requeriría modelos que tuvieran en cuenta tanto la red de colectores como la propagación en superficie. Evidentemente, ello supone una notable dificultad.

Es imprescindible conocer dónde y cómo se incorporan los caudales a la red para poder analizar su comportamiento hidráulico.

CONCLUSIONES

El desarrollo urbano altera de una forma notable la hidrología de las cuencas donde tiene lugar. En particular, se disminuye la capacidad de desagüe de la red de drenaje de aguas pluviales y se incrementan los caudales extremos y el volumen de escorrentía. Estos fenómenos están muy presentes en diferentes zonas de España y en particular en el litoral mediterráneo donde, además de una urbanización intensiva no respetuosa con la hidrología, se presentan con relativa frecuencia precipitaciones de elevada intensidad.

Toda la problemática anteriormente expuesta da lugar a graves problemas por inundación en zona urbana. El resolver estos problemas requiere una decidida voluntad política para potenciar la presencia de la Hidrología como herramienta de la Planificación del Territorio y para arbitrar soluciones a los problemas existentes. Normalmente, la única solución para resolver los problemas de drenaje en ciudades densamente pobladas es el incremento de la capacidad de desagüe de la red de colectores. Ello requiere elevadas inversiones, que exigen un detallado conocimiento de los diferentes fenómenos asociados con el drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas. En particular, es de interés analizar el comportamiento hidráulico de las redes de colectores. Actualmente no existen limitaciones importantes en la capacidad de los modelos numéricos para simular con rigor dicho comportamiento, ni tampoco en la capacidad de cálculo de los ordenadores. Las limitaciones están en la información disponible referente a la geometría de la red y en los datos de campo precisos para determinar los caudales. Cabe señalar que, en ocasiones, la calidad y cantidad de dicha información no justifica el uso de modelos numéricos de elevadas prestaciones, sino más bien aconsejan la realización de sencillos cálculos por parte de técnicos con un adecuado conocimiento de la red de colectores y de los fenómenos hidráulicos que en ella se presentan. Vemos, por tanto, que la mejora del conocimiento en el campo del drenaje urbano está condicionada en gran medida por la disponibilidad (en calidad y cantidad) de los datos de lluvia, así como del grado de conocimiento de la cuenca y de la red de colectores. Es preciso mejorar dicha información si se desea poder aprovechar las grandes posibilidades que actualmente ofrece la modelación numérica para analizar los diferentes fenómenos involucrados en el drenaje urbano y poder optimizar, de este modo, las elevadas inversiones a realizar en infraestructura.

REFERENCIAS

- Arandes, R. (1992). "Planeamiento urbanístico y drenaje urbano" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Ayuntamiento de Barcelona - CMB (1988). "Pla Especial de Clavegueram de Barcelona i el seu àmbit hidrològic". Equipo redactor: Ramón Arandes, Pere Malgrat y Ramón Vázquez.
- Cabrera, E., García Serra, J., Martínez, F. (1992). "Bombeo de aguas pluviales en grandes colectores" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- De Glasea, J.R., Andújar, M.A., Arderiu, J.N. (1992). "Los colectores del frente marítimo, su diseño y ejecución" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Diéguez, J.M. (1994) "Estudio numérico-experimental de la entrada en presión en colectores urbanos". Tesina de Especialidad. ETSECCP. Barcelona.
- Dolz, J. (1987). "Propagación de avenidas. Métodos de cálculo" en 'Avenidas: Sistemas de previsión y alarma', Ed. L. Berga, J. Dolz. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Dolz, J., (1992). "Grandes colectores. Criterios hidráulicos de diseño" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Dolz, J., Gómez, M., Martín Vide, J.P. (1992). "Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano". Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Gómez, M., Dolz, J., Berga, L. (1987). Numerical problems of supercritical flow. XXII Congreso de la IAHR. Lausanne. Poster session.
- Gómez, M. (1988). "Contribución al estudio del movimiento variable en lámina libre, en las redes de alcantarillado. Aplicaciones". Tesis Doctoral. E.T.S. Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona.
- Gómez, M., Dolz, J., Martín, J.P., Puertas, J., Bateman, A. (1990) "Reform of the Barcelona Sewer Network on the occasion of the games of the XXV Olympiad" en Urban Drainage Technologies UDT-91. Ed. C. Maksimovic. Elsevier. Londres.
- Gómez, M. (1992). "Análisis hidráulico de las redes de drenaje urbano" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Gómez, M., Pérez, A., Dolz, J. (1992). "Transient free surface-pressure flow. Slot width sensitivity analysis". en HYDROSOFT 92. pp. 419-430. Ed. W.R. Blain, E. Cabrera. Elsevier Ap. Science. Londres.
- Gutiérrez, C. (1992). "La gestión de las infraestructuras de drenaje urbano" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Malgrat, P., Vázquez, R. (1992). "El Plan Especial de Alcantarillado de Barcelona" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Martín Vide, J. (1992). "Características extremas de la precipitación en el área mediterránea", en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Martín Vide, J.P., Niñerola, D., Polo, J. (1992). "Sistemas de Medida en Redes de Drenaje Urbano" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Monte, V., Marco, J. (1992). "Formación de la escorrentía urbana. Procesos físicos y métodos de cálculo" en 'Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano' Ed. J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Saint-Venant, A.J.C. (1871). "Théorie du mouvement non-permanent des eaux avec applications aux crues des rivières et a l'introduction des marées dans leur lit". Resúmenes de la Academia de Ciencias. Vol. 73. pp. 148-154 y 237-240. París.
- Service Technique de l'Urbanisme (1986). "Modelisation de l'écoulement dans les réseaux. Guide de construction et d'utilisation des pluies de project". Editions du STU. París.
- Stahre, P., Urbonas, B. (1990). "Stormwater Detention". Prentice Hall. New Jersey.
- Vázquez, R., Redaño, A., Lorente, J. (1987). "Curvas IDF. Barcelona-Fabra". Revista de Obras Públicas. Febrero, pp. 91-102.
- Yoshino, F., Yoshitani, J. (1990). "Estimation of runoff changes due to urbanization in Japan". Fifth International Conference on Urban Storm Drainage. Osaka. Japón.