

EL SENTIDO FÍSICO DE LOS PARÁMETROS EN LA MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL DRENAJE URBANO

Jerónimo Puertas Agudo, Joaquín Suárez López y Juan Cagiao Villar

Resumen

En el presente artículo se analizan dos filosofías de modelización de los procesos vinculados al drenaje urbano, y se distingue entre dos tipos: aquéllos que se pueden calificar como “conceptuales”, y los que carecen de una base teórica tradicional o “no conceptuales”, ejemplo de los cuales pueden ser los basados en redes de neuronas artificiales.

Dentro de los modelos conceptuales se analizan los procesos de discretización y calibración y se presentan resultados de un estudio concreto. Uno de los objetivos es demostrar que al decidir cuáles son los parámetros a calibrar y dar valores a los considerados como fijos, estamos asignando responsabilidades a una serie de parámetros variables a la hora de reproducir la respuesta (caudal) ante una excitación (precipitación), y esto se ve reflejado en que el mejor ajuste puede llevar a posibles valores “irregulares” de los parámetros calibrados. Se plantea si importa realmente este hecho, al considerar como fin último del modelo su poder de predicción ante excitaciones diferentes a las del proceso de calibración. El sentido físico “teórico” de los parámetros se relega a un segundo plano frente a su sentido “real” dentro de un modelo y simulación determinados. ¿Nos encontramos en un punto de inflexión en la evolución de la modelización, en el que la base conceptual cede su protagonismo a la evidencia de los datos reales?.

Palabras clave: Drenaje urbano, modelos numéricos, ajuste de parámetros, calibración, redes de neuronas artificiales (RNA).

MODELOS DE CÁLCULO EN DRENAJE URBANO

El proceso de transformación lluvia-escorrentía es aquél mediante el cual la precipitación caída en una zona va discurriendo por calles y tejados hasta concentrarse en puntos de entrada a la red de saneamiento; tras este proceso, el agua circula por una red arbolada de canales, que van uniéndose hasta llegar a un elemento aguas abajo, bien sea una estación depuradora, bien sea el medio río, lago, mar-, bien sea una estructura de control de aguas pluviales. No es el objeto de este texto el análisis de estos puntos bajos, sino de cómo se calculan los caudales de agua que llegan a ellos en un evento concreto de lluvia.

Centrándonos en el proceso de transformación lluvia-escorrentía, existen varias filosofías de cálculo,

de entre las que se mencionarán dos por ser las que cuentan con más implantación, excepción hecha del método racional: en este trabajo no se hará mención de él, ya que se analizarán métodos que sean capaces de trabajar con hietogramas de intensidad variable en el tiempo; si bien el método racional permite ser discretizado tanto en el tiempo como en el espacio (definición de subcuencas), no es habitual utilizarlo con ese grado de detalle, ya que los métodos que se comentarán a continuación lo sustituyen ventajosamente Ashley (1998), Roesner (1992).

El método basado en hidrogramas unitarios tiene una mayor implantación en cuencas rurales que en cuencas urbanas. Es habitual sin embargo encontrar en la bibliografía referencias al mismo, y los modelos comerciales de cálculo suelen contener algún módulo de cálculo basado en esta filosofía. El hidrograma unitario tiene un número acotado de

Universidad Da Coruña, ETS Ing. Caminos, Campus de Elviña, s/n, 15192 A Coruña, España
Puertas@iccp.udc.es; Suarez@iccp.udc.es

Artículo recibido el 23 de enero de 2001, recibido en forma revisada el 15 de enero de 2002 y aceptado para su publicación el 2 de abril de 2002. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las “Instrucciones para autores”. En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

parámetros (entre 1 y no más de 3 ó 4) en los que se concentra la información hidráulica e hidrológica de la cuenca: las variables puramente geométricas, como la superficie, se aceptan en general como datos incuestionables; el resto de parámetros deben calcularse y estimarse, y cualquier persona que los haya manejado es consciente del grado de indeterminación que se da al fijarlos.

La propia naturaleza de los hidrogramas unitarios sintéticos (disponer de hidrogramas unitarios basados en datos reales no es lo más habitual) induce ya a plantearse la separación entre lo conceptual y lo real: el hidrograma unitario de Nash (Viessman, 1989), basado en depósitos en cascada, acepta como parámetro un número no entero de depósitos, con lo que su deducción conceptual deriva en una formulación matemática, más orientada a la flexibilidad que a la reproducción de los fenómenos físicos. Muchos de los hidrogramas unitarios coinciden prácticamente con funciones de distribución de probabilidad: son funciones cuya forma varía fuertemente al variar el valor de sus parámetros, y en eso radica su capacidad de reproducir fenómenos físicos. Lo que queda en entredicho es el sentido físico de tales parámetros, su relación con el fenómeno natural que quieren reproducir.

Quizá no está en el espíritu de los hidrogramas unitarios la voluntad de dar sentido físico a sus parámetros, aunque de hecho para evaluarlos sí se apela a su relación con variables geométricas e hidráulicas. No es infrecuente asociar a un parámetro de un hidrograma unitario una enrevesada relación de variables físicas, obtenida a partir de campañas de experimentación, y que no son otra cosa que un ajuste o resolución de lo que se conoce como “problema inverso” en optimización (ver por ejemplo los modelos de cálculo implementados en Hydroworks para la constante de tiempo K del hidrograma unitario de depósitos en cascada (Nash), o los métodos incluidos en (Viessman, 1989). El parámetro sintetizado no tiene un sentido físico concreto, y la relación obtenida, que no proviene de un análisis dimensional, no es sino el mejor ajuste en un problema que, por el número de variables en juego, no parece tener una solución única aplicable a cualquier cuenca.

En oposición a los modelos basados en un hidrograma unitario se presentan los modelos basados en la reproducción, más o menos fiel, de los procesos hidráulicos que realmente se dan en la cuenca. Estos son los modelos más frecuentemente utilizados, y se basan en el uso de las ecuaciones de

Saint-Venant o en alguna de sus simplificaciones, entre las que destacan la aplicación de las ecuaciones de la onda cinemática o formulaciones de tipo similar (como la implementada en el módulo RUNOFF del modelo SWMM Huber (1992), probablemente el más extendido a nivel mundial).

En este tipo de modelos, la cuenca se idealiza en una serie de planos que representan los tejados y los tramos de calle, que se van interconectando entre sí, y cada uno de los cuáles tiene unas características hidráulicas (retención inicial, coeficiente de fricción, etc), cuyo sentido físico es conocido. Estos parámetros hidráulicos, junto con la geometría idealizada, forman una red de canales que se analiza mediante las ecuaciones ya mencionadas, aceptando que la lluvia es un aporte de caudal distribuido a lo largo de la superficie de las subcuencas.

Un modelo de transformación lluvia-escurrimiento como el que se presenta conecta de modo natural con el módulo de transporte de las aportaciones recogidas por escorrentía en la red de drenaje, utilizando las ecuaciones de Saint-Venant (o alguna de sus simplificaciones, aunque en este caso se suelen utilizar las ecuaciones completas), Roesner (1992). De hecho, desde este punto de vista no hay ninguna diferencia conceptual entre uno y otro fenómeno. El cálculo del tránsito de los hidrogramas recogidos en los puntos de entrada a lo largo de la red de drenaje exige conocer su geometría y el tipo de material (coeficiente de fricción) de las superficies y la existencia de puntos singulares (pozos, vertederos ...).

En definitiva, la modelización mediante el uso de las ecuaciones de Saint Venant del cálculo de los caudales generados por un evento de lluvia implica un gran conocimiento de la red de drenaje, de las características de las estructuras de entrada de caudales en la red, de la topografía urbana, etc. Si se pretende estructurar una cuenca en elementos de características hidráulicas homogéneas, el proceso de discretización lleva en rigor a la definición de una infinidad de pequeños elementos cuyas características deben ser definidas de modo individual.

Dado que no es posible por motivos de economía abordar esta tarea, en general se define un número razonable de subcuencas, cada una de las cuales debe contener información de varios procesos: por ejemplo, aún dividiendo un bloque de viviendas en cuatro subcuencas correspondientes a sus cuatro vertientes, si las tiene, no es factible modelar cada uno de los canalones y de las bajantes y las cone-

xiones de éstas con la red de drenaje. Incluso aceptando que se desea trabajar con rigor, este sistema se suele sustituir por otro, que imponga por ejemplo un tiempo de retención hidráulica correspondiente a todo ese tránsito; lo mismo cabría decir del agua que queda retenida en estos elementos, etc.

El proceso de modelización implica discretización y también simplificación, y los parámetros que en rigor cuentan con un sentido físico claro (p.e. coeficiente de rugosidad en un conducto) acaban englobando otros cuyos efectos son similares (pérdidas de carga generada por los pozos de registro, retardos en el paso a través de los imbornales,...).

Al considerar esta simplificación, se acepta también que los parámetros que se manejan, síntesis de la infinidad realmente implicados, no son representativos de fenómenos concretos sino de agregaciones, y sus valores por tanto no pueden ser, o al menos no deben ser, los que cabría esperar si realmente pudiese desagregarse su efecto.

La modelización de una red de drenaje, incluyendo escorrentía superficial y transporte a lo largo de la red, exige valores para todos y cada uno de los parámetros escogidos; desde la perspectiva que se presenta, el escoger parámetros "razonables" para, por ejemplo, el coeficiente de Manning de un conducto no es una cuestión trivial, ya que un parámetro será o no razonable dependiendo de la carga conceptual que se le haya dado, lo que a su vez es función de la discretización que se haga, del número de parámetros que se consideren representativos, etc. El verdadero problema es que esto no siempre está presente al modelizar, y se puede caer en el error de dar valores a los parámetros con la ayuda de un manual, según la denominación de los mismos: así, si estamos evaluando el coeficiente de Manning de un conducto de hormigón, le asignaremos un valor del intervalo 0.012-0.016. Es demasiado grosero el error que se comete para que un técnico olvide incluir el efecto de los pozos, pero hay otros, también implícitos, que pueden (y suelen) pasar desapercibidos.

Se puede aceptar que imponer los parámetros de un modelo apelando a un manual no es el mejor método, pero ¿cómo deben entonces ser escogidos?; ¿existe un método alternativo?. Este artículo no pretende responder a esa pregunta de un modo taxativo, ni desautorizar todos los trabajos que se vienen haciendo sin más ayuda que la bibliografía. Es obvio que limitaciones de tiempo y medios eco-

nómicos obligan a realizar estudios con carencias en materia de precisión o contraste. Cabría plantearse, no obstante, y tampoco se va a hacer en este artículo, qué sentido tiene apelar a herramientas tan sofisticadas como los modelos actualmente en uso (SWMM, MOUSE, Hydroworks), si nuestra capacidad de nutrirlos con datos fiables es tan limitada.

EL PROBLEMA INVERSO EN DRENAJE URBANO

Un método que se acepta como fiable, y que se usa en la medida en que los medios y las limitaciones de tiempo lo permiten, es el contraste con datos reales. No es obviamente una herramienta válida para el diseño, ya que la comparación se realiza en fase de explotación, pero sí es útil para analizar el funcionamiento de una red, o para estudiar la posible conexión a otras estructuras (depósitos de retención, ...) aguas abajo.

El contraste se basa en la instrumentación de la cuenca con uno o varios pluviómetros, y uno o varios caudalímetros. Si sólo se dispone de uno, se sitúa en el punto más bajo de la red, donde confluyen todas las aguas. El hidrograma registrado por el caudalímetro puede superponerse al que ofrece el modelo numérico una vez se le ha suministrado el registro de lluvia. De su comparación determinaremos si el modelo reproduce la realidad de un modo suficientemente fiel, y hasta qué punto algunos parámetros han sido sobre o sub estimados; así, si los picos registrados y medidos no coinciden en el tiempo habrá que pensar que aquellos parámetros que implican retardo (fricción,...) no han sido bien estimados; si el volumen final y el inicial no coinciden la culpa será de los parámetros que implican retención, y así sucesivamente.

Con los datos de un evento de lluvia (precipitación y caudal), es muy sencillo ajustar los parámetros para que los hidrogramas medido y calculado tengan un aspecto similar, pero no existen garantías de que esos parámetros corregidos den un buen resultado ante otro suceso. Si se realiza el mismo ejercicio con una sucesión de lluvias, sí cabe pensar que se llegará a un conjunto final de parámetros promediados con capacidad de predicción sobre futuras lluvias, aunque el ajuste que ofrezcan a cada lluvia concreta no sea tan bueno como el que se obtendría si sólo se ajustase ese evento.

En este punto convendría plantearse de cuántos parámetros se está hablando. En un modelo nu-

mérico, no es muy costoso dividir una cuenca en cincuenta o cien unidades, cada una de las cuáles tiene dos o tres parámetros significativos (aparte de los geométricos, como la superficie, la forma y la pendiente media, sobre los que habría mucho que discutir pero que en este trabajo se aceptan como bien medidos). Es perfectamente posible dar valores “razonables” a cada uno de esos parámetros con la ayuda de un manual, lo que lleva a la obtención de un hidrograma. Al contrastar ese hidrograma con el medido, aceptado como real, y decidir que se van a modificar esos parámetros: ¿realmente se van a retocar doscientos o trescientos parámetros?. Aún en el caso de que fuese humanamente posible hacerlo con seriedad, sería muy difícil que el nuevo juego de parámetros respondiese bien ante el evento siguiente.

Lo cierto es que el técnico que modeliza realmente no escoge ese gran número de parámetros; en general se agrupan de modo automático las características de las subcuencas según su uso: jardines, calles, tejados de un tipo, tejados de otro tipo, etc, y a cada grupo se les asigna un juego de parámetros, hasta un total de no más de veinte o treinta, estos sí, escogidos de modo consciente y distintos entre sí.

A la hora de ajustar estos parámetros, es obvio que el número de registros disponible (un hidrograma en el punto bajo) es insuficiente para el número de parámetros a fijar, o lo que es lo mismo: hay un gran número de combinaciones de valores de veinte parámetros que permiten ajustar un hidrograma. No cabe ya plantearse el carácter “razonable” de estos parámetros, ya que en un número acotado de datos se está comprimiendo un fenómeno con muchos más grados de libertad, mucho más complejo. Los parámetros representan ya más de lo que su nombre indica.

Si se comparan por ejemplo dos métodos para la estimación de hidrogramas en un proceso de transformación lluvia-escorrentía, como son el hidrograma unitario aplicado a la cuenca en su conjunto y el uso de ecuaciones hidráulicas con la consiguiente subdivisión en subelementos, se observa el desequilibrio evidente entre el número de parámetros implicado en uno y otro método: no más de cuatro parámetros en un hidrograma unitario y una buena veintena de ellos cuando se usan ecuaciones hidráulicas.

A esto se le suma el hecho de que la estructura conceptual de un hidrograma unitario es muy ende-

ble, y su forma depende fuertemente de sus parámetros, mientras que el uso de las ecuaciones hidráulicas, y la imposición de la geometría correcta y con una discretización fina ya genera una gran rigidez en el resultado, con cierta independencia de los parámetros, que salvo que adopten valores muy extraños, sirven para matizar el valor de unos picos y unos retardos que las propias ecuaciones marcan. Así, los tres o cuatro parámetros de un hidrograma unitario tienen que ocuparse de definir la estructura y los valores de un hidrograma real, compitiendo con un método cuya estructura es mucho más clara y cuyo número de parámetros es muy superior. Sin embargo, la experiencia acumulada de muchos investigadores demuestra que se pueden conseguir resultados del mismo nivel de fiabilidad con un método o con otro, si existe un contraste que los ajuste.

EL SENTIDO FÍSICO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS

¿Es realmente preciso manejar grandes cantidades de parámetros, cuyo sentido físico realmente ya se ha perdido?. ¿No estarán imperando matices estéticos, cuando en el fondo de lo que se trata es de poder predecir los caudales asociados a una precipitación, independientemente de los parámetros de la cuenca?.

El problema del ajuste de parámetros (problema inverso) ha sido estudiado con profusión en todos los ámbitos de la ingeniería, y tiene además vinculaciones con otras técnicas, llamadas paramétricas, de predicción de comportamientos a partir del estudio de series temporales (los conocidos modelos AR, MA, ARMA). En el estudio de estos modelos prevalece el principio conocido como parquedad (o parsimonia) que, si bien adopta formulaciones distintas para cada problema, tiene como filosofía el tender a explicar el fenómeno con un mínimo de parámetros, evitando aquéllos que puedan ser suplidos por combinaciones de los remanentes (Mc. Kay, 1988).

Cabría plantearse si se está aplicando la filosofía del principio de parquedad a los estudios de sistemas de drenaje, o si se pretende utilizar más parámetros de los realmente necesarios para explicar el problema. El problema al que hay que enfrentarse es una optimización no lineal, con una función objetivo definida en un espacio de dimensión veinte, o el número concreto de parámetros que se desee. Este problema es contemplado con mucho respeto por matemáticos e ingenieros especialistas en optimiza-

ción, mientras que muchos técnicos en drenaje urbano aceptan la primera combinación de veinte parámetros escogidos a estima cuya gráfica se parece al resultado real, y toman cada uno de ellos como el correcto, e incluso se plantean si su valor es o no “razonable”. En apartados posteriores, en los que se desarrollará un ejemplo concreto, se pondrá de manifiesto lo cuestionable de tal proceder.

MODELOS SIN BASE CONCEPTUAL

Tanto en los modelos basados en el hidrograma unitario como en los que reproducen las ecuaciones hidráulicas existe una base conceptual o al menos una estructura a priori, de modo que el sistema de cálculo está predeterminado a dar una cierta respuesta (caudal) ante un cierto impulso (lluvia). La esencia misma del método del hidrograma unitario se basa en asignar una forma (hablando en términos gráficos) a una excitación puntual. Esa forma básica es la estructura a priori, implica una atenuación, un tránsito, una respuesta diferida en el tiempo a una acción puntual. Las ecuaciones de Saint-Venant también imponen obviamente una estructura, mucho más rígida que la comentada antes, ya que las ecuaciones tienen una mayor base conceptual.

A estos modelos se opone una familia de métodos de predicción sin base conceptual alguna: son los métodos basados en redes de neuronas artificiales y los llamados algoritmos genéticos, que amplían el enfoque de los anteriores.

Las redes de neuronas artificiales Shamseldin (1997), Ning(1996), se usan de modo casi rutinario en ciertos ámbitos de la ingeniería, y comienzan a ser una herramienta común en el campo de la Hidráulica. Los artículos que se leen sobre estos modelos utilizan una terminología propia, muy vinculada al campo de la informática, y que se aparta de la propia de la ingeniería civil, lo que hace difícil comprender la esencia del método de cálculo.

Sin entrar a detallar la mecánica de cálculo, sí se indicará que las redes de neuronas artificiales no se basan en principio físico alguno, y no tienen estructura a priori: no hay ecuaciones constitutivas, el resultado ante una señal de entrada no está predeterminado, ni en forma ni en magnitud, y depende única y exclusivamente del proceso de aprendizaje al que se somete al sistema, que contiene funciones mudas cuyos valores dependen únicamente de los valores que van adoptando sus parámetros, inicializados de forma aleatoria, y al que se le suministran

únicamente pares de lluvia y escorrentía que deben proceder de medidas reales -en este método, la calibración precede a la predicción, al contrario de lo que sucedía en los anteriores-.

A partir de los pares obtenidos de la experimentación en la propia cuenca, que forman series de centenares o miles de datos, se procede a un ajuste de parámetros, exactamente igual que se hizo con los modelos basados en hidrogramas unitarios o ecuaciones hidráulicas: se intenta ajustar el dato obtenido por la red neuronal al realmente medido, lo que lleva a la optimización de sus parámetros (llamados conexiones). Los parámetros de la red no tienen sentido físico en absoluto; es imposible asignar a una de las conexiones una característica (rugosidad, área,...), lo que lleva a que el proceso de ajuste de parámetros no pueda ser realizado por inspección simple sino mediante algoritmos numéricos de optimización (que algunos programas de Hidrología -incluso el histórico HEC-1- también incorporan para el ajuste de los parámetros hidrológicos). La esencia es en cualquier caso similar: a partir de unos datos iniciales -semilla- cuyo resultado es malo, se mejora modificando el valor de los parámetros.

Como ya se comentó con anterioridad, se tiene un problema con muchos grados de libertad, y el problema es muy sensible a la semilla. Volviendo a un cálculo con ecuaciones hidráulicas, establecer unos u otros parámetros iniciales da lugar a una solución mejor o peor cuyas expectativas de mejora con retoques a estima son distintas: quizás si la semilla es pésima, ni con una modificación drástica se llega a una solución aceptable, mientras que si la semilla es buena, ligeros retoques dan lugar a una solución aparentemente correcta.

Dado que el problema es el mismo, y sólo estamos cambiando el enfoque de cálculo, la sensibilidad a la semilla se reproduce en un cálculo basado en redes de neuronas, con la agravante de que en este caso no tenemos un manual de referencia, y las semillas suelen generarse a partir de series de números aleatorios. En un problema como el que nos atañe, con una función objetivo no lineal de muchos grados de libertad, los mínimos relativos de la función de error son numerosos, y se converge a uno u otro según sea la semilla elegida; es decir, llegaremos a soluciones aparentemente aceptables a partir de juegos de parámetros muy distintos, y sus errores respecto de la realidad también serán distintos, por lo que cabe prever que habrá unas combinaciones mejores que otras.

El estudio de esa casuística da lugar a lo que se conoce como algoritmos genéticos, que en esencia prueban la respuesta a distintas semillas y clasifican los grupos de parámetros resultantes (grupos de conexiones) según sea la bondad de ajuste, realizando operaciones –intercambios de parámetros, sustitución de un parámetro por un número aleatorio,... - entre ellos con objeto de buscar mejores grupos. Además, también dentro de este nombre se contempla la posibilidad de estudiar el comportamiento de redes con distintos números de parámetros (con distintas arquitecturas, atendiendo a su notación).

Existe un evidente paralelismo entre este método y los anteriormente mencionados, si se acepta que los parámetros que se manejan en los métodos conceptuales carecen de sentido físico: lo único que queda determinado a priori en estos métodos es una estructura, unas reglas del juego, en forma de ecuaciones (ya sean las del hidrograma unitario o las de Saint Venant) y esto es probablemente el único rasgo diferencial, ya que en los métodos basados en redes de neuronas incluso la estructura se extrae del ajuste de los parámetros.

El uso de estos métodos impone la predominancia de los datos reales sobre las hipótesis a priori: no sólo se duda ya del sentido físico de los parámetros sino de la validez del modelo mismo, de su estructura. El único activo de este método, que no puede ser analizado (ya que no es más que un conjunto de números, que no tienen sentido por separado) ni extrapolado (ya que los parámetros son válidos para una cuenca y sólo una –piénsese que incluso el área de la cuenca queda impresa en las conexiones), es su capacidad de predicción; el hecho evidente de que una vez entrenado, el sistema reproduce de modo correcto –tan correcto como los demás métodos- el caudal dada una precipitación, y esto lo hace con una gran economía en lo que a esfuerzo humano se refiere.

El número de parámetros implicados (pueden ser quince, veinte, o incluso más, dependiendo del problema) está sujeto a las leyes del principio de parcidad, pero debe ser generoso ya que ese conjunto de números debe reproducir una estructura –recuérdese que no hay ecuaciones constitutivas-, además de fijar los valores concretos del caudal. Así, las conexiones son algo más que parámetros; toda la información, incluyendo las leyes físicas, está impresa en ellos.

DISCUSIÓN SOBRE UNA APLICACIÓN CONCRETA

Los apartados anteriores incluyen reflexiones que pueden ser discutibles; con el objeto de afianzarlas, se va a presentar un estudio concreto, sobre el que se han aplicado las metodologías comentadas, y que se aprovechará para poner de manifiesto algunas de las cuestiones anteriormente expuestas.

Dentro de un estudio más general en cuanto a sus objetivos, los autores de este artículo han realizado un seguimiento de algunas de las cuencas urbanas de la ciudad de Santiago de Compostela. En este artículo se presentarán dos: una de tipo unitario (Ensanche) y una de tipo separativo (Fontiñas). Para el estudio de ambas cuencas se cuenta con pluviómetros más o menos centrados en la cuenca y con registros de caudal en los puntos aguas abajo, que cierran la cuenca analizada.

Las cuencas fueron discretizadas utilizando como criterio una definición geométrica muy detallada, con lo que los edificios se dividieron por vertientes, y cada segmento de calle se constituyó en subcuenca: esto dio lugar a divisiones del orden de doscientas subcuencas para cada uno de los casos. Esa división es la señalada en la figura 1. La discretización de la red de drenaje es de un orden similar.

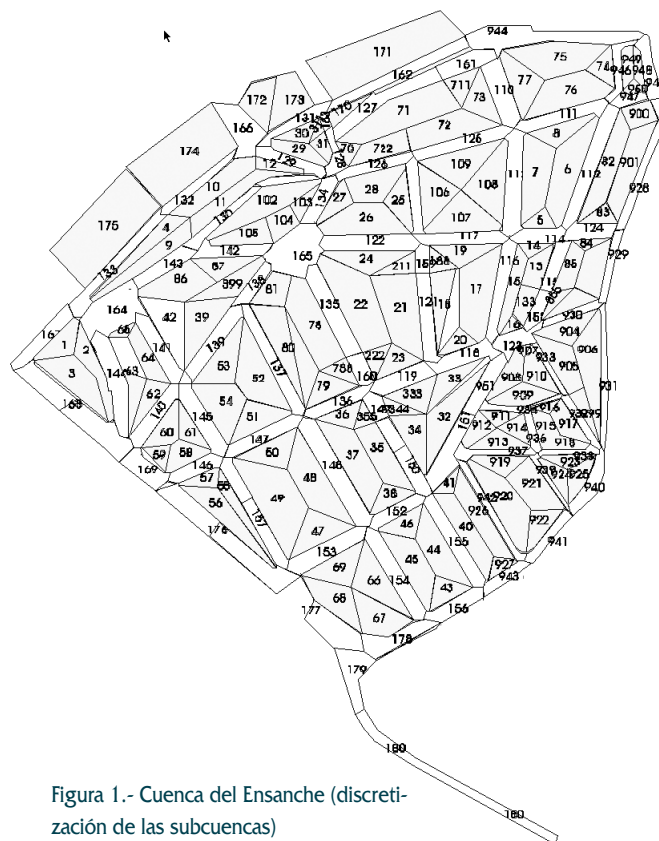


Figura 1.- Cuenca del Ensanche (discretización de las subcuencas)

El modelo de cálculo inicialmente empleado fue SWMM. Dentro de este modelo, se trabajó con el módulo RUNOFF (modelo de tipo hidrológico, con una filosofía similar a la aproximación de la onda cinemática de las ecuaciones de Saint-Venant) para la determinación de la escorrentía superficial y con el módulo EXTRAN (que se basa en las ecuaciones de Saint Venant, sin simplificaciones) para el tránsito a lo largo de la red de drenaje (Roesner, 1992).

El proceso de calibración llevó a plantear un ajuste de parámetros y, en lugar de optar por un ajuste manual (a estima) se prefirió utilizar un modelo numérico de resolución del problema inverso; en particular el modelo PEST (Parameter Estimation), que utiliza el conocido método de Levenberg-Mardquardt. Este programa ejecuta SWMM tantas veces como es preciso hasta minimizar el error, cambiando los valores de los parámetros que se indican como ajustables.

Utilizar un módulo de ajuste de parámetros obliga a plantearse cuántos de ellos se van a fijar y cuántos se van a ajustar. Un buen método para discriminar entre parámetros relacionados entre sí es analizar la matriz de correlación de las variables de ajuste. Altas correlaciones entre parámetros dan lugar a dificultades en el ajuste, e indican que, desde el punto de vista de la optimización, no se está respetando el principio de parquedad.

Los primeros intentos de optimización jugando con quince o veinte parámetros sobre la cuenca del Ensanche dieron resultados muy deficientes: parámetros inmutables, parámetros que se disparaban varios órdenes de magnitud, parámetros absolutamente correlacionados entre sí. Lograr mejorar el ajuste con tal cantidad de parámetros no era sencillo, ya que existían malos condicionamientos numéricos, y una absoluta dependencia de la semilla.

Se redujo drásticamente el número de parámetros, observando cuáles de ellos tenían un comportamiento más o menos errático, hasta un total de

seis, que contenían la esencia física del problema –a estas alturas del trabajo no se había renunciado aún a esa esencia-.

La ejecución realizada inicialmente no fue sino una de las posibles. Si se cambia la semilla el resultado es otro, pero se obtiene un ajuste aceptable de los datos y una cierta capacidad de predicción tanto en un caso como en el otro, lo que ya se comentó con anterioridad: un problema no lineal con seis parámetros tiene distintos ajustes óptimos relativos, distintos entre sí, unos mejores que otros.

Se presentan tabuladas las variables escogidas, y el resultado de dos ejecuciones con dos semillas determinadas.

Los parámetros ajustados no tienen un sentido intrínseco: no se han impuesto restricciones estrictas –se han definido intervalos de variación amplios- y eso da lugar a que semillas basadas en valores extraídos de un manual deriven en ajustes muy alejados de ellos. Se puede apreciar que las dos familias de variables tras el ajuste son distintas, pero el error del ajuste es similar: ¿cabe plantearse si los resultados son razonables?.

A título de ejemplo se comentará que en una primera fase del ajuste, y ante la evidencia de que el coeficiente de Manning de los conductos tendía a adoptar valores altos (en el entorno 0.02-0.03), teniendo en cuenta que, por ser los tubos de hormigón, cabía esperar valores más bajos, se consultó en la “web” la opinión sobre el tema: a respuestas del tipo: “si es lo que sale, acéptalo”, se unieron otras del tipo: “seguro que cometes un error”. Posiblemente ambos sectores tenían algo de razón, y en cualquier caso la pregunta estaba mal formulada o no se podía responder sin más información. En la tónica de este texto, ese parámetro será o no aceptable dependiendo de qué variables englobe y, aceptando la imposibilidad material de enumerarlas todas, el hecho de que tenga o no un valor razonable carece de sentido.

Tabla 1.- Ajuste con seis parámetros de la red del Ensanche, según la notación de SWMM

Parámetro (SWMM)	Semilla 1	Semilla 2	Res. 1	Res. 2
G6 /ROUGH (Manning saneamiento)	0.017	0.022	0.0218	0.0213
WW(5) (Manning calles)	0.017	0.021	0.056	0.0384
WSTORE (Det. Inicial calles)	1	0.5	0.31	0.47
WSTORE (Det. Inicial tejados)	1	0.5	0.052	0.296
WW(5) (Manning tejados)	0.015	0.021	0.024	0.00434
WSLOPE (Pendiente de los tejados)	0.001	1e-5	0.00137	1.67e-5
Error medio cuadrático:			0.01833	0.01846

Tabla 2.- Ajuste con tres parámetros de la red del Ensanche

Parámetro (SWMM)	Semilla 1	Semilla 2	Res. 1	Res. 2
G6/ROUGH (Manning saneamiento)	0.015	0.02	0.0212	0.0209
WSLOPE (Pendiente de los tejados)	1e-5	1e-4	1.76e-4	1.52e-4
WSTORE (Det. Inicial)	1	0.5	0.0515	0.133
Error medio cuadrático:			0.01892	0.01896

Conviene plantearse para qué se plantea si un valor es o no razonable. Si lo que se busca es una excusa para exportar ese valor a otra cuenca y ahorrar así el calibrado, hay que ser muy crítico. La exportabilidad de los parámetros no está garantizada: de hecho, este artículo va orientado a plantear que los parámetros no son algo intrínseco, y por lo tanto no son exportables.

Analizada la matriz de correlación de la ejecución con seis parámetros, se observa que varios de ellos siguen correlacionados. A raíz de esto se escogen combinaciones parciales de entre dos y tres parámetros, que logran, con la misma fiabilidad, reproducir el hidrograma medido. Los parámetros desechados deben ser fijados en un valor dentro del entorno de trabajo (evitemos el término razonable) y toda su incertidumbre se traslada a los parámetros que realmente se ajustarán, dos o tres parámetros para toda una cuenca, cuya división geométrica es de casi doscientas subcuenas.

En la tabla 2 se presentan los resultados de dos ejecuciones con los mismos parámetros y dos semillas distintas. Otros parámetros y otras semillas habrían dado también buenos resultados. En la figura 2 se presenta el ajuste obtenido con la primera serie, cuyo aspecto visual es agradable. La ejecución representa un suceso de más de 100 horas de duración.

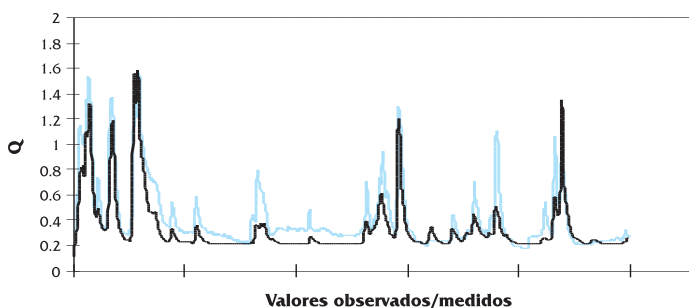


Figura 2.- Resultados del ajuste con tres parámetros de la red del Ensanche

En este punto conviene hacer las reflexiones siguientes:

- ¿Realmente tiene sentido dividir una cuenca

en doscientas unidades, para acabar ajustándola con tres parámetros?

- Al manipular con más o menos acierto los parámetros en un ajuste o calibración manual a estima, dentro de los límites de los razonables, ¿qué hay de riguroso, y qué de arbitrario?
- ¿Tienen algún sentido los valores de los doscientos, veinte o tres parámetros ajustados?
- ¿No es la capacidad de predicción del sistema lo único verdaderamente valioso, siendo lo demás accesorio, y muy cuestionable?

Los mismos datos que se utilizaron para el calibrado del modelo SWMM se aplicaron a una red de cinco neuronas, completamente recursiva, con un esquema como el que se presenta en la figura 3. Sin jugar con distintos tipos de arquitectura, y explorando de modo manual (muy rudimentario) distintas semillas y sus resultados, se obtuvo sin dificultad una (sin duda no la mejor) cuya capacidad de predicción era comparable (sino mayor) al mejor de los modelos obtenidos con SWMM. La red en sí misma no significa nada, pero es un buen modelo de predicción, según se aprecia en la figura 4, donde se presentan los ajustes y predicciones de la red neuronal, frente a los datos medidos. Se utilizaron los 650 primeros datos como entrenamiento, y el resto como predicción.

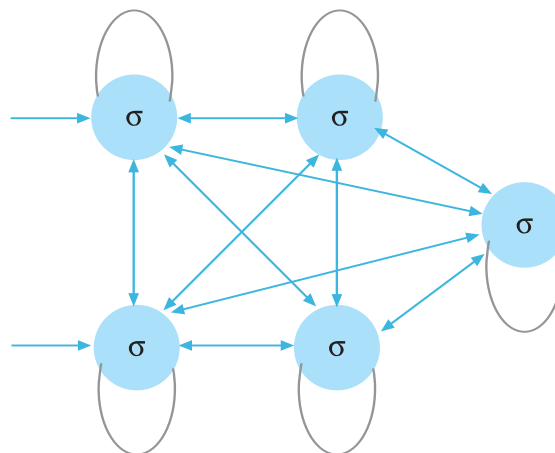


Fig. 3.- Arquitectura de la red neuronal escogida

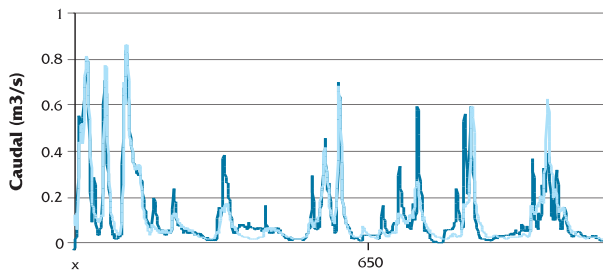


Fig. 4.- Ajustes y predicciones sobre la red del Ensanche de una red de neuronas utilizando 1175 datos, 650 como entrenamiento y el resto para la predicción

Los resultados que se presentan a partir del valor 650 son de predicción pura, es decir, no han formado parte del proceso de ajuste de la red neuronal. Estos valores dan una idea de la capacidad predictiva de la red.

Se repitió el proceso en la red de drenaje de Fontiñas, en la que además se modeló con un hidrograma unitario de Nash (incluyendo el transporte, como si fuese una única cuenca natural). Sin duda el mejor modelo es el de la red de neuronas, pero los tres logran reproducir el aspecto del fenómeno estudiado con bastante dignidad (figura 5), utilizando en el caso de los modelos conceptuales no más de tres parámetros (la red neuronal considerada utiliza veinticinco, sin duda no es la óptima según criterios de parquedad, se utiliza a título de ejemplo: éste no pretende ser un artículo que analice la optimización de las redes). Obviamente, los ajustes obtenidos para los parámetros utilizados en SWMM fueron distintos de los obtenidos para la cuenca del Ensanche. Se destaca que en la gráfica figura una etapa de calibración y una de validación, es decir, de predicción pura. Es sobre esta zona sobre la que se debe centrar la comparación.

No se debe caer en el error de pensar que las redes neuronales, al tener gran número de parámetros, no juegan limpio, ya que pueden ajustar casi cualquier curva, al tener mucha flexibilidad: la fase de calibrado, donde hay una referencia a la que ceñirse, no debe ser considerada en la comparación; obviamente, con veinticinco parámetros se puede ajustar cualquier forma; lo interesante está en la predicción, donde no hay referencia, donde cada modelo da un resultado sin poder apoyarse en nada: es ahí donde hay que valorar cuál es mejor, cuál funciona y cuál no, y en ese proceso, tener más o menos parámetros no es una ventaja.

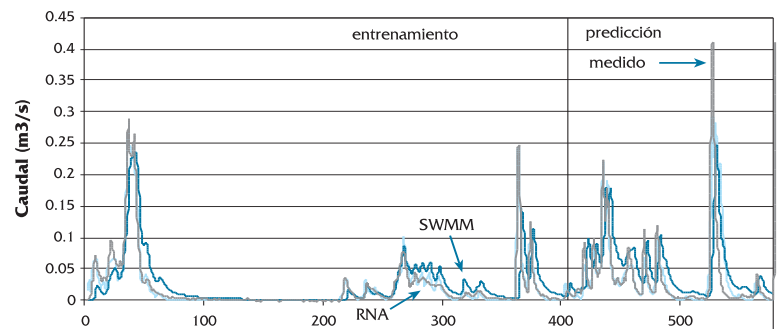
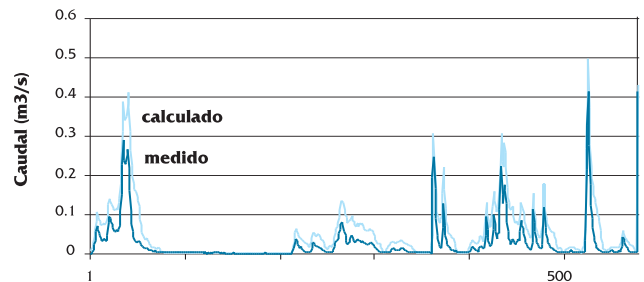


Fig. 5.- Ajustes y predicciones sobre la red de Fontiñas del modelo SWMM con tres parámetros de ajuste, de una red de neuronas y de un modelo basado en el hidrograma unitario de Nash (abajo)



CONCLUSIONES

Como resumen de todo lo apuntado, se destacan las siguientes ideas:

- Los modelos numéricos manejan parámetros cuyo sentido físico es muy cuestionable, con lo que no parece que se deba invertir mucho tiempo en plantear si los valores que se manejan son o no razonables, ya que no se dispone de un criterio serio para llegar a averiguarlo.
- El grado de discretización de una cuenca y el número de parámetros que la definen suele ser algo arbitrario en los estudios hidráulicos. Cabe plantearse la influencia de lo uno y de lo otro, sobre todo si el modelo no se va a contrastar. En el caso de que un modelo se contraste, unos parámetros asumirán la incertidumbre de otros. Si no se contrasta, se pueden olvidar o definir erróneamente parámetros asociados a fenómenos fundamentales.
- El hecho de que un modelo tenga más parámetros de ajuste que otro no garantiza que sus resultados sean mejores, ni aún cuando se pueda calibrar. Hay que señalar que calibrar un modelo no es una labor trivial

- Los modelos sin base conceptual tienen tanta capacidad predictiva como los modelos con base física, si se cuenta con datos reales

- Cuando se utiliza un modelo numérico sin posibilidad de contraste (en fase de proyecto), hay que asumir que se puede cometer un error importante, y que la magnitud del error nos es desconocida a priori

REFERENCIAS

1. ASAAD Y. SHAMSELDIN (1997). Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* vol.199, 272-294. ISBN:0022-1694.
2. ASHLEY R.M., HVITVED-JACOBSEN T. and BERTRAND-KRAJEWSKI J-L. (1998). Quo Vadis Sewer Process Modelling?. UDM'98 Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling, 21-24 September 1998 London, UK, vol 1 35-50. Sponsors: IAWQ, IAHR, Joint IAHR/IAWQ and Unesco.
3. HUBER W.C. and DICKINSON R.E. (1992). Storm Water Management Model, user's manual, version 4. U.S. Envir. Protection Agency, Athens, Ga.
4. MC KAY M.D. (1988). Sensitivity and Uncertainty Analysis Using a Statistical Sample of Input Values. *Uncertainty Analysis*, Y. Ronen, ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 145-186.
5. NING G., DENOUX T. and BERTRAND-KRAJEWSKI J-L. (1996). Neural Networks for Solid Transport Modelling in Sewer Systems during Storm Events. *Wat.Sci.Tech.* vol.33 n°9, pags.85-92. ISBN:0273-1223.
6. NIX S.J. (1994). *Urban Stormwater Modeling and Simulation*. Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
7. ROESNER L.A., ALDRICH J.A. and DICKINSON R.E. (1992). Storm Water Management Model, user's manual, version 4, EXTRAN addendum. U.S. Envir. Protection Agency, Athens, Ga.
8. SHAMSELDIN, A.Y., (1997), Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling, *Journal of Hydrology*, 199, 272-294.
9. SOROOSHIAN S. and GUPTA V.K. (1995). *Model Calibration. Computer Models of Watershed Hydrology*, Vijay P. Singh ed., Water Resources Publications, Baton Rouge, LA, 23-68.
10. VISSMAN, W; LEWIS, G; KNAPP, J (1989). *Introduction to Hydrology*, Harper Collins