

Efecto de las variaciones temporales de la intensidad de precipitación en el hidrograma de la crecida generada^(*)

Por RAFAEL GARCIA BARTUAL

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dept. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

Una primera cuestión que se plantea a la hora de abordar un estudio hidrológico local, y en particular sobre crecidas en pequeñas cuencas, es la adecuación entre las herramientas de análisis y la naturaleza de los datos disponibles. En el caso más habitual de escasez de datos, nuestras hipótesis de trabajo se simplifican al máximo, y nos vemos obligados a ignorar muchos de los aspectos clave en los procesos de generación de escorrentía. Pero, ¿qué trascendencia real tienen estas simplificaciones? La respuesta a cuestiones como ésta exige estudios de detalle, como el que se presenta aquí. En particular, es analizado el efecto que las puntas de precipitación pueden producir sobre el hidrograma de la crecida, para una pequeña cuenca cercana a Valencia y aforada por la red automática SAIH.

1. INTRODUCCION

El lugar de honor entre las fórmulas usadas en hidrología de superficie, le pertenece seguramente a la fórmula racional de Kuichling, si no a la fórmula de Manning. No en vano se celebraba no hace mucho en la Universidad de Virginia (EE.UU) el congreso conmemorativo del centenario de su presentación (International Conference on Channel Flow and Catchment Runoff: Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula, Virginia, 1989).

En relación con la fórmula racional, (Dooge, J.C.I., 1973) señala una interesante anotación histórica, extraída de (Mulvaney, T.J., 1850) en la que se adelantaba ya en el año 1850 una intuición que cristalizaría años más tarde en la popular fórmula racional:

"La primera cuestión importante a estudiar en el caso de una cuenca pequeña o montañosa es el tiempo necesario para que una crecida alcance su máximo, bajo la acción de una lluvia de intensidad constante. Puede asumirse que este tiempo es el que invierte la lluvia caída en la porción más remota de la cuenca en recorrerla hasta alcanzar la salida, pues entiendo que el caudal debe ser máximo cuando las aportaciones

procedentes de las diferentes zonas de la cuenca llegan simultáneamente al punto de desagüe... Este tiempo debe depender principalmente de la extensión, forma y pendiente de la superficie de la cuenca; y por lo tanto un importante tema de investigación es la relación entre estas causas y sus efectos. De esta manera, podremos ser capaces de determinar, en primer lugar, la duración de la lluvia constante requerida para producir un caudal máximo, y en consecuencia fijar la intensidad máxima de lluvia aplicable al caso. Es evidente que, al reducir el intervalo de tiempo, la intensidad de lluvia se incrementa."

La fórmula racional, tal y como la conocemos hoy, se atribuye a Kuichling (Kuichling, E., 1889) y establece que:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (1)$$

siendo

Q = Caudal punta
C = Coeficiente de escorrentía
I = Intensidad de precipitación de proyecto
A = Área de la cuenca

Esta fórmula ha sido objeto de un extendidísimo uso, y también, paradójicamente, blanco de las críticas más duras. Lo cierto es que hoy en día (por lo poco que sabemos, o por lo buena de la fórmula) sigue constituyendo una herramienta clave en la estimación de caudales, y especialmente en el ámbito de la hidrología urbana.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 29 de febrero de 1992.

La fórmula tiene virtudes incuestionables, comenzando por su simplicidad, que la hacen sin duda indicada para un amplio abanico de problemas en hidrología. Sin embargo, lo que pretende representar o modelar, es decir, los fenómenos de producción de escorrentía, son tremendamente complejos, como sabemos bien. La formación y propagación de una crecida en una pequeña cuenca natural, o la evolución de las aguas en un barrio de una ciudad desde que las gotas alcanzan los tejados y calles hasta que entran en un colector de la red, son evidentemente procesos extraordinariamente complejos si se pretenden estudiar en detalle. La descripción rigurosa de cada elemento interviniente, con la aplicación de las leyes físicas operantes en cada caso resulta en la práctica una tarea inabordable.

De ahí que los métodos usados en las aplicaciones hidrológicas, desde el método racional hasta los sofisticados modelos de simulación hidrológica con abundantes requerimientos de información, sean todos ellos simplificaciones de la realidad basadas en conceptualizaciones más o menos aproximadas que recogen aquellos aspectos esenciales del proceso. O al menos, los que son importantes a los efectos que le interesen al ingeniero.

¿Cuál es el grado de detalle adecuado en cada caso? Dependerá, principalmente, de los siguientes factores:

- a) Envergadura y objetivos del proyecto, y por lo tanto, grado de fiabilidad y de detalle requerido en las estimaciones de carácter hidrológico que se lleven a cabo.
- b) Naturaleza de la información hidrológica disponible.
- c) Medios de cálculo disponibles.

Más que la aplicación sistemática e indiscriminada de procedimientos tabulados o empaquetados en programas, parece que la búsqueda de soluciones de compromiso para cada supuesto es el enfoque más adecuado. Porque en hidrología no hay, que yo conozca, métodos universales "siempre mejores" que otros. Procedimientos desarrollados para cierto tipo de clima o una determinada tipología de cuenca puede (y suele suceder así), dar resultados nefastos en zonas geográficas con otras características. Incluso en una misma región, los eventos hidrológicos de carácter extremo, como las máximas crecidas, muestran una fenomenología diferenciada, de tal forma que algunos de los supuestos básicos

empleados en la modelación de las crecidas de menor magnitud dejan de ser válidos. (Patton, P.C., 1988).

En consecuencia, para lograr una mejora real de las bases para el diseño en hidrología, es importante la apreciación cualitativa de la forma como se producen estos fenómenos (y en particular las crecidas), así como un conocimiento de las herramientas de análisis existentes que nos permitan cuantificar estos fenómenos. De ahí la importancia de los estudios hidrológicos en los que se contrasten modelos y metodologías para casos reales, tratando de sintetizar sus virtudes y defectos, y profundizando en el conocimiento de los procesos de generación de escorrentía. Investigaciones de esta clase, esencialmente científicas, pueden dar luz a cuestiones de importancia práctica para los que trabajamos en temas de ingeniería hidrológica.

La investigación presentada aquí responde a este enfoque. Es decir, se pretende profundizar en el análisis de un suceso concreto (una crecida en una cuenca pequeña, en este caso), para poner a prueba cierta metodología y profundizar en cuestiones de relevancia para las aplicaciones en ingeniería.

En particular, se analizó una cuestión de indudable interés: ¿Es grave olvidar en nuestros cálculos la distribución temporal que experimenta la intensidad de lluvia $i(t)$ durante un aguacero? ¿En qué medida puede afectar a los resultados (expresados en términos de caudales máximos o hidrograma de una crecida) la fuerte variación en el tiempo de $i(t)$?

La precipitación es la componente fundamental de entrada a los sistemas hidrológicos, bien sean cuencas naturales o urbanas. Es obviamente el condicionante prioritario, y causante de la producción de escorrentía. Pero a la vez, es normalmente la componente del ciclo más desconocida.

Lo más habitual en los estudios hidrológicos es reducir esta "componente incómoda" a una constante "I" (caso del método racional) o quizás a un pluviograma de diseño muy simple. Y es muy frecuente vernos forzados a ésto, aunque estemos seguros de que nuestra representación se aleja mucho de la realidad, ya que nos "comemos" toda la variabilidad espacio-temporal que experimenta la intensidad de precipitación. La norma de drenaje superficial (MOPU - Instrucción de Carreteras 5.2-IC "Drenaje Superficial", 1990),

incluye por ello, y con carácter general, un coeficiente mayor o igual a 1.2, equivalente a una valoración del error en el caudal por ignorar las puntas de precipitación en la fórmula racional del 17% (expresado respecto del caudal máximo).

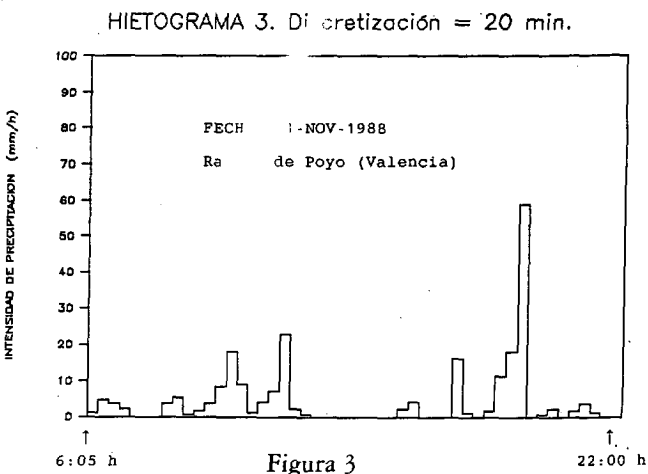
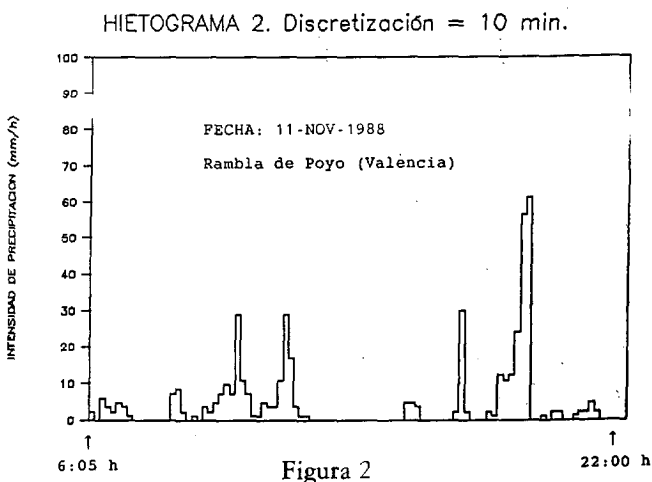
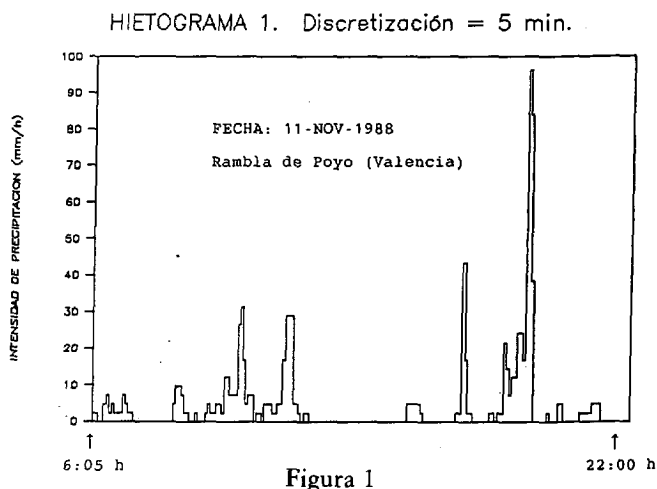
Afortunadamente, las mejoras en los sistemas de medida y recogida de datos de precipitación están siendo importantísimas en nuestro país. Cada año tenemos un conocimiento más preciso de la cuantía y distribución espacial y temporal de las precipitaciones. Tanto la red nacional de radares meteorológicos (Camacho Ruiz, J.L., 1987), como las redes de pluviografos automatizadas (redes SAIH —Sistema Automático de Información Hidrológica— (Milla Riera, A., 1987) y nuevas redes de los Centros Meteorológicos) están ya contribuyendo decisivamente a la construcción de bases de datos de enorme valor desde el punto de vista hidrológico. Y aprovecho para referirme al apartado b) anteriormente citado: La naturaleza de la información cambia. Y los métodos usados, deben también adecuarse en consonancia.

En este artículo se analiza con cierto detalle la crecida ocurrida en la Rambla de Poyo (Valencia) en Noviembre de 1988, registrada por los sensores de la red SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar, y se cuantifica el error introducido en los cálculos para este caso, cuando ignoramos las oscilaciones de la variable $i(t)$ (intensidad de precipitación) en las escalas temporales menores.

2. LA DEFINICION TEMPORAL DE LA PRECIPITACION EN UN PUNTO GEOGRAFICO

La precipitación es obviamente un proceso que se desarrolla en el espacio y en el tiempo. Pero cuando nos referimos a un punto geográfico, o trabajamos con medias areales, el fenómeno se describe sólo en su dimensión temporal, y podemos referirlo a una función $i(t)$ que representa la intensidad de precipitación en el instante t (con dimensiones LT^{-1}). Interesa notar que en realidad $i(t)$, como tal, es un valor teórico (Lorente Castelló, J. y Redaño Xipell, A., 1989), y nunca es medido ni observado, pues lo que se registra en los pluviografos es la altura de precipitación acumulada durante un intervalo de tiempo Δt , o intervalo de agregación. Esto plantea dos cuestiones que interesa mencionar:

a) Aun cuando el proceso $i(t)$ pueda tener cierta estructura o naturaleza matemática, sólo lo conocemos numéricamente a través de sus valores medios en intervalos consecutivos. Es un hecho comprobado que la estructura que ofrecen



HIETOGRAMA 4. Discretización = 30 min.

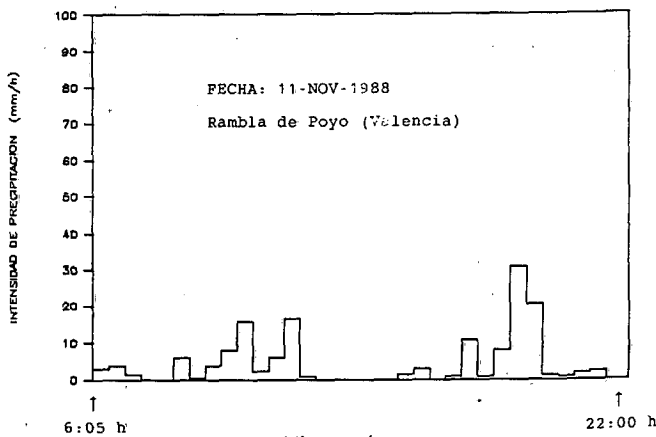


Figura 4

HIETOGRAMA 5. Discretización = 40 min.

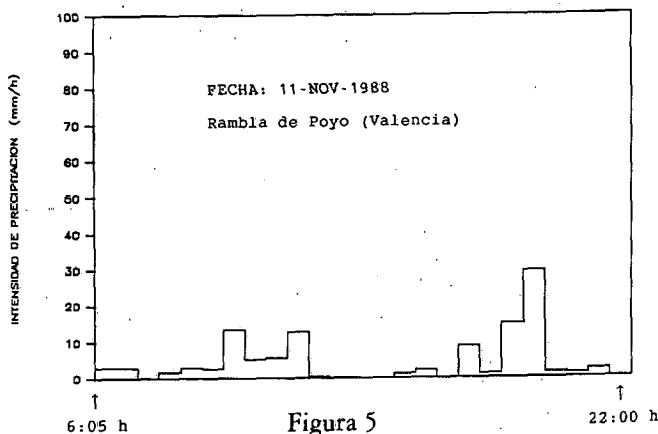


Figura 5

HIETOGRAMA 6. Discretización = 50 min.

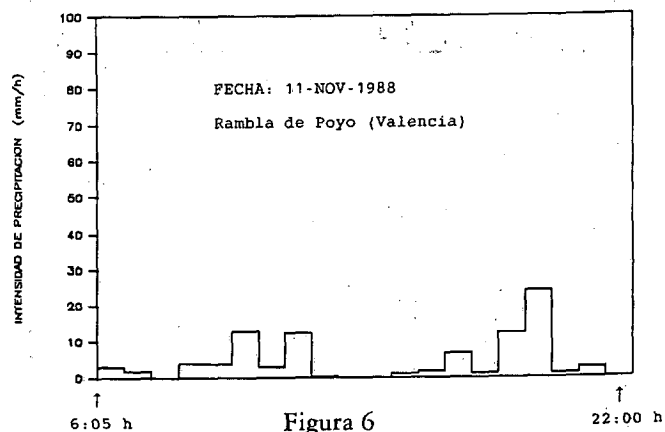


Figura 6

estas series varía muy significativamente según sea el intervalo de agregación utilizado, aunque se trate de información correspondiente a un único suceso. (Rodríguez-Iturbe, I., 1986; Rodríguez-Iturbe et al., 1989).

Basta observar las figuras 1,2,3,4,5 y 6: Se trata de pluviogramas de una misma precipitación, ocurrida en la Rambla de Poyo (Valencia). El primero de ellos es el registrado por el pluviógrafo 0004 de la red SAIH. Los otros son los que se hubiesen registrado si el intervalo de agregación (o la resolución del pluviógrafo), en vez de 5 minutos, hubiera sido de 10, 20, 30, 40 ó 50 minutos.

Sin duda, la construcción de modelos matemáticos de estructura temporal de la precipitación es un tema particularmente complejo (Rodríguez-Iturbe et al. 1989), y ha recibido una muy importante atención internacional por parte de un buen número de investigadores durante pasada década. Para las lluvias torrenciales mediterráneas de carácter convectivo, y a partir de datos pluviográficos de Valencia, existe un modelo estocástico que ha sido utilizado en aplicaciones en hidrología urbana. (García Bartual, R. y Marco, J., 1990). La importancia de las intensidades de precipitación en las escalas temporales más finas ha sido también puesta de manifiesto y estudiada con detalle en base a datos pluviográficos en Barcelona (Gómez Caffarena, C., 1988).

b) Elección de la escala temporal de definición adecuada, según sea la naturaleza del estudio o proyecto a realizar. Obviamente una punta muy acusada de intensidad de precipitación podría, por ejemplo, provocar la insuficiencia de desagüe en un imbornal, y ser a la vez absolutamente irrelevante, por sí sola, en la formación de una crecida en una cuenca importante. Muestro a continuación los resultados obtenidos para el caso de una crecida producida en una cuenca de 187 Km² por la precipitación mostrada en la figura 1.

3. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA CUENCA ESTUDIADA

La Rambla de Poyo es un curso de agua efímero, con origen en las sierras de Los Bosques y La Cabrera. A partir de éstas sierras se organiza siguiendo una dirección ibérica NW-SE en tres cauces principales: el barranco Grande, el de la Cueva Morica y la Rambla de Gallo-Chiva (figura 7) (Camarasa, A., 1990). Tras la triple confluencia, toma el nombre de Rambla de Poyo, para acabar desembocando en la Albufera de Valencia, donde se conoce como Barranco de Torrent. A los efectos de esta investigación, únicamente se

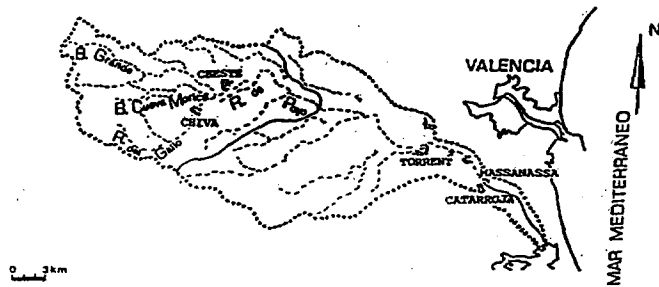


Figura 7. Subcuenca de la Rambla del Poyo.

considera la parte de la cuenca controlada por la estación de registro foronómico del SAIH, que cubre una extensión de 187 Km².

La subcuenca considerada presenta una topografía con importantes contrastes y fuerte control estructural (Brinkmann, 1931; Parga, 1969), así como una importante actividad neotectónica.

Desde el punto de vista geomorfológico, se distinguen tres unidades, que de oeste a este son las siguientes: (Camarasa, A., 1990).

a) La zona montañosa de cabecera situada en el sector occidental, instalada sobre materiales resistentes calizo-dolomíticos, y con relieve germánico dispuesto en gradería.

b) Un sector hundido intramontano relleno de depósitos cuaternarios, donde se instalan los tres lechos principales: el barranco Grande, el barranco de la Cueva Morica y la Rambla de Gallo-Chiva. Dentro de este sector, existen elementos geomorfológicos tales como conos torrenciales y barras de canal, los cuales provocan un funcionamiento en situación de crecida del tipo *flash flood* (Duran et al., 1985), al tiempo que existen otros espacios de drenaje deficiente en el corredor Buñol-Chiva-Cheste que constituyen zonas con capacidad de laminación considerable.

c) Por último, el sector oriental es de relieve subtabular y está integrado por materiales margo-arcillosos muy desmantelados. Sobre este sector se desarrollan gran número de cauces de fondo plano.

La red de drenaje es de tipo subdendrítica de orden 5 según el sistema de jerarquización de Horton-Strahler (Horton, R.E, 1945; Smart, J.S., 1972). Tiene bajas relaciones de bifurcación, longitud y de elongación, lo cual favorece la rápida concentración de caudales:

$$R_b = 3.18; R_L = 1.8; R_e = 0.39$$

La densidad de drenaje es de 1.02 Km/Km², lo cual representa una densidad más bien baja. En cuanto al cauce principal de la Rambla del Galló merece destacar la superficie considerable que ha sido excavada artificialmente, mientras que la mayoría de los barrancos de fondo plano se han acondicionado para el desarrollo de cultivos.

4. METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DEL HIDROGRAMA

El método aplicado para la estimación del hidrograma está basado en la teoría de hidrograma unitario (Sherman, 1932). Esta teoría, que significó un avance decisivo en la historia de la hidrología, fue reformulada con mayor rigor a la luz de la teoría lineal de sistemas (Dooge, 1959). Una excelente revisión sobre el tema puede encontrarse en (Dooge, 1973).

4.1. Componentes del modelo

En la figura 8 se muestra el esquema conceptual aplicado, que permite obtener la función de caudales $Q(t)$ en el punto de control en función del pluviograma de precipitación media sobre la cuenca. Esta aproximación sólo incluye la modelación del hidrograma de escorrentía directa, ignorando la contribución del flujo de base. Caso de ser éste importante, deberá ser considerado independientemente, y añadido a la componente superficial. Para muchas de las ramblas mediterráneas, sin apenas caudal circulante durante la mayor parte del año, el proceso de formación del hidrograma en situación de crecida puede ser adecuadamente descrito por el esquema indicado.

Conforme a éste, el proceso de generación de caudal puede sintetizarse matemáticamente a través de las dos operaciones de transformación (1) y (2) señaladas en la figura 8. Las funciones indicadas son las siguientes:

$i(t)$: Intensidad de precipitación media sobre la cuenca en el instante "t".

$i_e(t)$: Intensidad efectiva o neta de precipitación, contribuyente a la formación de caudales de escorrentía directa.

$\phi(t)$: Tasa instantánea de pérdidas (cantidades de agua por unidad de tiempo y área que no pasan a formar parte de la escorrentía de superficie).

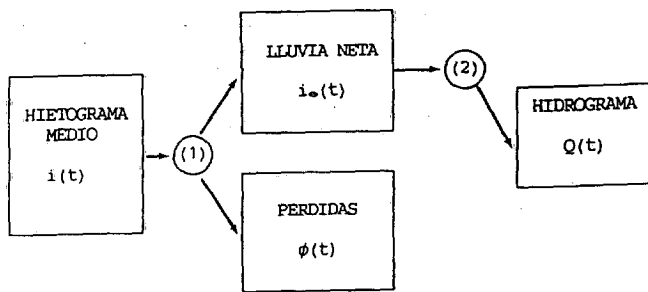


Figura 8. Componentes del modelo.

$Q(t)$: Caudal en el punto de desagüe, en el instante "t".

Operación (1): Para la representación de las pérdidas se ha utilizado el criterio del U.S. Soil Conservation Service (Témez, J.R., 1978). Si $P(t)$ es la función de precipitación total acumulada hasta el instante "t" desde el comienzo de la precipitación, la fracción eficaz que produce escorrentía viene dada por la siguiente función de parámetro P_0 (umbral de escorrentía):

$$E(t) = \begin{cases} 0 & \text{Para } P \leq P_0 \\ \frac{[P(t) - P_0]^2}{P(t) + 4 \cdot P_0} & \text{Para } P > P_0 \end{cases} \quad (2)$$

siendo $E(t)$ la componente de escorrentía o lluvia neta acumulada hasta el instante "t" medido desde el comienzo del chaparrón.

Es sencillo reformular esta operación (1) en términos de las funciones $i_e(t)$ y $\phi(t)$, ya que:

$$P(t) = \int_0^t i(t) dt ; P_0 = P(t_0) = \int_0^{t_0} i(t) dt \quad (3) \text{ y } (4)$$

$$i_e(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t \leq t_0 \\ \frac{dE(t)}{dt} = i(t) \frac{[P(t) - P_0][P(t) + 9 \cdot P_0]}{[P(t) + 4 \cdot P_0]^2} & \text{para } t > t_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\phi(t) = i(t) - i_e(t) \quad (6)$$

El coeficiente de escorrentía, o fracción de la lluvia que produce escorrentía directa de superfi-

cie, puede obtenerse como:

$$C = \frac{E(t_F)}{P(t_F)} = \frac{[P(t_F) - P_0]^2}{[P(t_F) + 4 \cdot P_0] P(t_F)} \quad (7)$$

en donde t_F representa la duración de la precipitación (tiempo final).

Operación (2): Esta operación representa la transformación de la lluvia efectiva en caudales (hidrograma de la crecida en el punto de control). La transformación utilizada, sigue los principios del hidrograma unitario, es una transformación lineal, siendo la función de Green del sistema (o función impulso-respuesta) el hidrograma unitario instantáneo (IUH) de la cuenca, y dado por la función $u(t)$. Conforme al resultado fundamental de ésta teoría, la respuesta del sistema $Q(t)$ (o hidrograma, en este caso), viene dada por la ecuación de convolución:

$$Q(t) = A \cdot \int_0^t i_e(x) \cdot u(t-x) \cdot dx \quad (8)$$

siendo A el área de la cuenca.

El IUH debe contener la información necesaria de la cuenca, entendida como un sistema transformador lluvia neta-escorrentía. La función $u(t)$ escogida para representar el IUH en el caso que nos ocupa es el hidrograma de Nash, (Nash, 1957), de amplio uso por su particularmente buena adaptación a las formas observadas en los hidrogramas registrados: (figura 9)

$$u(t) = \frac{t^{\alpha-1} \cdot e^{-t/k}}{k^{\alpha} \cdot \Gamma(\alpha)} \quad (9)$$

α = Parámetro de forma

k = Parámetro de escala

Γ = Función gama

Naturalmente, son susceptibles de utilización en este punto otros hidrogramas unitarios, dada la generalidad con la que se plantea el proceso lineal de transformación lluvia-escorrentía. Incluso el propio método racional puede formularse en el marco de la teoría lineal de sistemas, sin más que considerar un hidrograma unitario dado por una función uniforme de tiempo base igual al tiempo de concentración de la cuenca (Singh y Cruise, 1989).

El modelo, por lo tanto, queda totalmente

HIDROGRAMA UNITARIO DE NASH

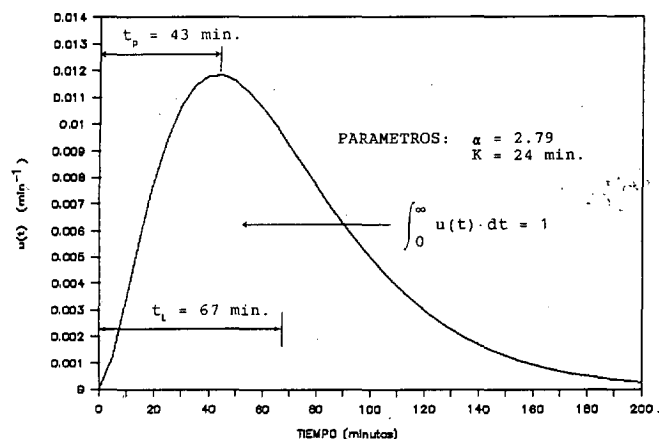


Figura 9

definido y listo para operar una vez estimados sus tres únicos parámetros, " P_o ", " α " y " k ".

4.2. Calibración del modelo

La calibración del modelo propiamente dicha se ha realizado con los parámetros P_o y k , mientras que el parámetro de forma α ha sido estimado en base a las características geomorfológicas de la cuenca, proporcionando una base física a la modelación empleada.

Los datos utilizados en esta calibración corresponden a la crecida registrada en la Rambla de Poyo el día 11 de noviembre de 1988, crecida que fue registrada por los sensores hidrológicos de la red SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar. En concreto, el hietograma de precipitación que sirvió de base para la calibración es el mostrado en la figura 1, correspondiente a la tormenta ocurrida en tal fecha, y con intervalo de agregación de 5 minutos.

Los hidrogramas correspondientes, tanto el registrado en la sección de control por los radiómetros de la red SAIH, como el estimado teóricamente con el modelo se muestran en la figura 10. Este último se obtuvo para los siguientes valores de los parámetros:

$$\begin{aligned} P_o &= 36.6 \text{ mm.} \\ \alpha &= 2.79 \\ k &= 24 \text{ min.} \end{aligned}$$

El primero de estos parámetros, P_o , se determina de forma rápida:

Como el hidrograma aforado nos permite, por integración, determinar la aportación total de la

HIDROGRAMAS OBSERVADO Y ESTIMADO
(MODELO CALIBRADO PARA REPRODUCIR Q_p)

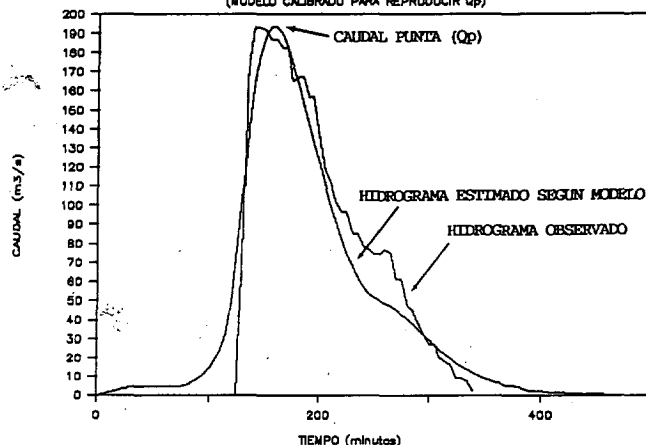


Figura 10

crecida, es inmediato obtener el coeficiente global de escorrentía C , y podemos entonces despejar en la fórmula (7) el valor de P_o .

El parámetro k , o parámetro de escala del IUH, queda fijado al imponer la igualdad de los caudales máximos en los hidrogramas estimado y simulado ($Q_p = 194 \text{ m}^3/\text{s}$, en este caso). Es el parámetro más trabajoso de estimar, pues (8) debe resolverse en cada iteración. Otra alternativa es obtener el valor de k que minimice la diferencia de cuadrados entre ambos hidrogramas (Caroni, E. et al, 1986), aunque no elimina el inconveniente.

Por último, el valor del parámetro α es estimado en base a la geomorfología de la cuenca. Para ello hemos aplicado la ecuación de Rosso (Rosso, R., 1984):

$$\alpha = 3.29 \cdot R_L^{0.07} \cdot \left[\frac{R_b}{R_a} \right]^{0.78} \quad (10)$$

Esta aproximación tiene un interés práctico importante, pues refleja en el modelo el efecto sobre el hidrograma de la estructura y disposición de la red de drenaje, a través de los índices geomorfológicos R_a , R_b y R_L . (García Bartual, R., 1989).

Con los tres parámetros así estimados, el modelo se encuentra operativo y está listo para realizar transformaciones lluvia-escorrentía para distintos INPUTs o precipitaciones sobre la cuenca.

5. EFECTO DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACION EN EL HIDROGRAMA

Una prueba interesante consiste en introducir al sistema como nuevos INPUTs la misma lluvia ocurrida en Noviembre de 1988 (figura 1), pero con resolución temporal progresivamente menor (hietogramas de las figuras 2, 3, 4, 5 y 6).

La respuesta producida en cada caso se muestra en la figura 11. Se observa, tal y como debíamos esperar, una reducción de los máximos conforme aumenta el intervalo de agregación temporal usado. Para $\Delta t = 50$ min., Q_p es 139 m^3/s , es decir, se tiene un error por defecto del 28% respecto del valor Q_p registrado. En la figura 12 se muestran, para los diferentes Δt considerados, el error por subestimación del caudal máximo obtenido. Evidentemente se trata de un efecto nada despreciable, especialmente para incrementos Δt cercanos al tiempo de respuesta de la cuenca, t_L (67 min., en el caso tratado).

6. CONCLUSIONES

1) La teoría lineal de sistemas ofrece un marco conceptual versátil en la modelación hidrológica de avenidas, y de particular interés para abordar cuestiones específicas (como la relativa a la distribución temporal de la precipitación, tratada en esta investigación), así como en aplicaciones prácticas que requieran la definición en el tiempo del hidrograma, tanto en cuencas aforadas como en cuencas no aforadas.

2) Los resultados mostrados en la figura 12 no son generalizables, pues resultan de la modelación aplicada a una cuenca particular.

3) No obstante, se evidencia el importante efecto que produce la variabilidad temporal de la intensidad de precipitación dentro del chubasco en los caudales máximos. Para un intervalo de agregación temporal Δt algo menor al tiempo de retraso de la cuenca, se ha podido cuantificar un error de subestimación de Q_p (caudal punta) cercano al 30%, en relación al valor máximo Q_p realmente registrado.

4) Dado que básicamente la escala de proceso en la dimensión temporal está afectado por el tamaño y rapidez de respuesta de la cuenca, así como por la estructura interna del chaparrón, la profundización de cuestiones como la planteada, y por lo tanto la generalización de resultados requiere:

a) Estudios sobre la estructura estocástica de la precipitación.

b) Caracterización de la rapidez y forma de la respuesta hidrológica en base a la geomorfología de las cuencas.

c) Establecimiento de parámetros adimensionales expresados como cociente de parámetros temporales característicos de los puntos a) y b).

REFERENCIAS

BRINKMANN, R. (1931): "Betikum und Keltiberikum in Südostpanien". Trad. al español en 1948 por J. Gómez de Llarena con el título "Las Cadenas Béticas y Celtibéricas

HIDROGRAMAS GENERADOS POR EL MODELO

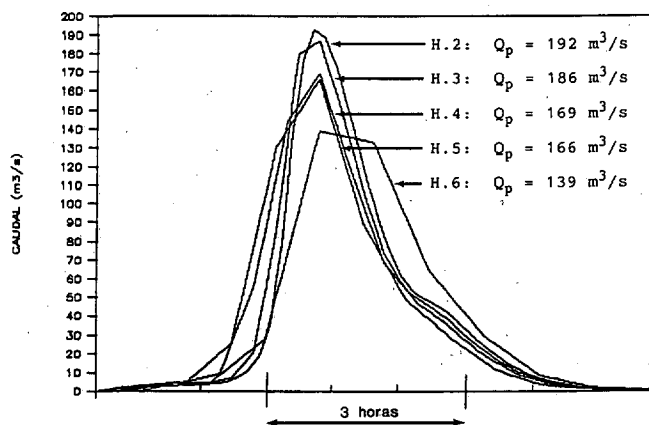


Figura 11

SUBESTIMACION DEL CAUDAL PUNTA (%)

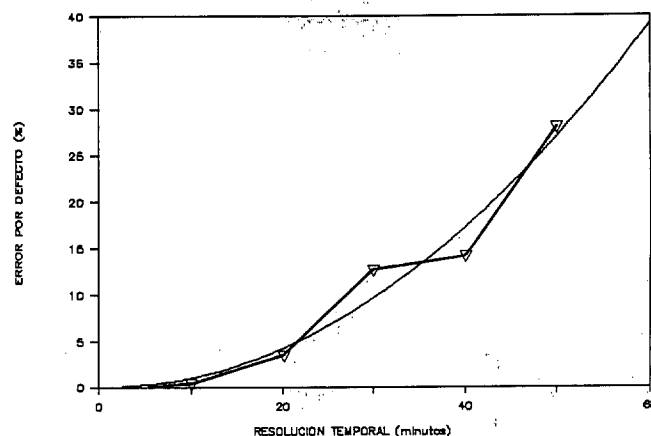


Figura 12

del Sureste de España", en Publ. Extr. Geol. España, 4, 305-431.

CAMACHO RUIZ, J.L. (1987): "Medida de precipitaciones por radar. Red nacional de radares meteorológicos". Avenidas. Sistemas de previsión y alarma. Editado por L. Berga y J. Dolz. Colegio de Ingenieros, Canales y Puertos.

CAMARASA, A. (1990): "La Rambla de Poyo: Estudio hidrogeomorfológico". Tesis de Licenciatura. Universidad de Valencia. Facultad de Geografía e Historia.

CARONI, E., ROSSO, R. y F. SICCARDI (1986): "Non-linearity and time-variance of the hydrologic response of a small mountain creek". Scale problems in hydrology. Runoff generation and basin response. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.

DOOGE, J.C.I. (1959): "A general theory of the unit hydrograph". Jour. Geophys. Res. 64(2): 241-256.

DOOGE, J.C.I. (1973): "Linear theory of hydrologic systems". Agricultural Research Service. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C.

DURAN, J.J., ELIZAGA, E., GARZON, J., LAMAS, D.L., LENDIDEZ, A., PRIETO, C., AYALA, F.J. (1985): "Geología y prevención de daños por inundación". Madrid. Instituto Geológico y Minero.

GARCIA BARTUAL, R. (1989): "Estimación de la respuesta hidrológica de una cuenca sobre la base de la teoría del hidrograma unitario geomorfológico". Cuaternario Geomorfología, vol. 3 (1-4). Págs. 1-7, 1989.

GARCIA BARTUAL, R. y MARCO, J. (1990): "A stochastic model of the internal structure of convective precipitation in time at a raingauge site". Journal of Hydrology. 118. Págs. 129-142.

GOMEZ CAFFARENA, C. (1988): "Hacia el conocimiento de la intensidad máxima absoluta de las precipitaciones atmosféricas. Una deducción más de las curvas IDF. Barcelona-Fabra". gy. 118. Págs. 129-142.

GOMEZ CAFFARENA, C. (1988): "Hacia el conocimiento de la intensidad máxima absoluta de las precipitaciones atmosféricas. Una deducción más de las curvas IDF. Barcelona-Fabra". Revista de Obras Públicas. Junio 1988. Págs. 577 a 598.

HORTON, R.E. (1945): "Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology". Geol. Soc. Am. Bull., 56: 275-370.

KUICHLING, E. (1889): "The relation between the rainfall and the discharge or sewers in populous districts". Amer. Soc. Civ. Engin. Trans. 20: 1-56.

LORENTE CASTELLO, J. y REDAÑO XIPELL, A. (1989): "Análisis conceptual de términos meteorológicos correspondientes a situaciones atmosféricas extremas. Comentarios al Reglamento de Riesgos Extraordinarios sobre las personas y los bienes". Revista de Obras Públicas, Enero de 1989. Págs. 39 a 48.

MILLA RIERA, A. (1987): "Programa General de Seguridad y Explotación de las Presas del Estado. Sistema Automático de Información Hidrológica (S.A.I.H.)". Revista de Obras Públicas, Enero 1987. Págs. 3 a 13.

M.O.P.U. (1990): Instrucción de Carreteras 5.2-IC "Drenaje Superficial".

MULVANY, T.J. (1850): "On the use of self registering rain and flood gauges". Inst. Civ. Engin. Proc. 4(2): 1-8. Dublin.

NASH, J.E. (1957): "The form of the instantaneous unit hydrograph". International Association for Hydraulic Research Publication, 42, 114-118.

PARA, J.R. (1969): "Spatvariszische Bruchsysteme im Hesperischen Massiv". Geol. Rodsch., T. 59, Págs. 323-336.

PATTON, P.C. (1988): "Floods Geomorphology".

RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1986): "Scale of fluctuation of rainfall models". Water Resources Research, Vol. 22, No. 9. Págs. 15S-37S, August, 1986.

RODRIGUEZ-ITURBE, I., FEBRES DE POWER, B., SHARIFI, M.B. y GEORGAKAKOS, K.P. (1989): "Chaos in rainfall". Water Resources Research, Vol. 25, No. 7, Págs. 1667-1675. July 1989.

ROSSO, R. (1984): "Nash model relation to Horton order ratios". Water Resources Research., 20(7): 914-920.

SHEP' K. (1932): "Stream flow from rainfall by the unit-graph method. Engin. News. Rec. 108: 501-505.

SINGH, V.P. y CRUISE, J.F. (1989): "A note on the rational method". Proceedings of the International Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula. University of Virginia. Charlottesville, Virginia.

SMART, J.S. (1972): "Channel networks". Adv. Hydros. ci., 8: 305-346.

TEMEZ, J.R. (1978): "Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales". M.O.P.U.- Dirección General de Carreteras. Madrid, 1978.

YEN, B.C. (1989): "Channel flow and catchment runoff". Proceedings of the International Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula. University of Virginia. Charlottesville, Virginia.

Rafael García Bartual

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1989), por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Es Profesor Titular I. del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV, e imparte docencia en la asignatura de "Hidráulica e Hidrología" de la E.T.S. Ing. de Caminos de Valencia. Profesor responsable de la asignatura "Hidrología Física" del Programa Master en Hidrología y Gestión del Agua de la UPV. Especialidad: Modelación matemática en hidrología de superficie.