

ESTIMACION DE LA RESPUESTA HIDROLOGICA DE UNA CUENCA SOBRE LA BASE DE LA TEORIA DEL HIDROGRAMA UNITARIO GEOMORFOLOGICO

ESTIMATION OF THE HYDROLOGICAL RESPONSE IN DRAINAGE BASINS ON THE BASIS OF THE GEOMORPHOLOGICAL UNIT HYDROGRAPH

GARCIA-BARTUAL, R.

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia,
Camino Vera s/n. Valencia

RESUMEN

Se analiza desde un punto de vista cuantitativo la influencia de variables geomorfológicas fundamentales en el proceso de generación de caudal originado por un suceso de precipitación sobre una cuenca de drenaje.

Son expuestas las bases para la incorporación de índices morfométricos en la formulación de modelos hidrológicos basados en la teoría clásica del hidrograma unitario, revisándose algunas aproximaciones recientes aparecidas en la literatura hidrológica sobre la estimación de la respuesta unitaria de la cuenca en función de tales índices.

Palabras clave: Hidrología, Modelización, Hidrograma unitario geomorfológico.

ABSTRACT.

This paper centers on the role of basic descriptors of catchment geomorphology in the runoff generating mechanisms from a quantitative point of view.

Some procedures for studying flood frequency from drainage network structure are revised, in the context of the geomorphologic unit hydrograph theory, and an application case of hydrograph estimation is presented for a small catchment near Alicante (Spain).

Key words: Hydrology, Modelling, Geomorphological unit hydrograph.

INTRODUCCION

La hidrología aplicada debe dar respuesta a una serie de cuestiones de carácter práctico. Tal es el caso de la estimación de los caudales producidos en una cuenca no aforada por determinada precipitación. Este problema, que ha centrado la atención de investigadores durante más de 100 años, conduce al análisis de los mecanismos generadores de caudal, así como de los procesos físicos concurrentes.

Dicho análisis resulta inabordable cuando se trata de abarcar simultáneamente toda la diversidad y complejidad de los procesos involucrados y todas las interrelaciones existentes entre los elementos que componen los sistemas hidrológicos.

La necesaria simplificación de estos sistemas lleva a la construcción de modelos, basados en un razonamiento físico o en observaciones y relaciones entre cantidades, de

tal forma que las variables menos importantes son ignoradas, y los procesos son agregados y conceptualizados según esquemas que permitan cuantificar la respuesta hidrológica.

Entre los factores de mayor relevancia en los procesos físicos de generación de caudales en las cuencas hidrográficas, se encuentra la morfología de la red de drenaje (Baker, V.R.; Craig, R. y Patton, P.C., 1989). Su naturaleza, estructura y dimensiones afectan decisivamente a la respuesta hidrológica, y por ello, tales características deben recogerse en el modelo utilizado, por simple que éste sea. El análisis morfométrico de redes de drenaje proporciona índices y parámetros que describen cuantitativamente la estructura de la red, por lo que pueden incorporarse en la formulación de modelos matemáticos.

Este artículo pretende poner de manifiesto el interés del uso de esquemas simples de transformación lluvia-escorrentía que incorporen conceptos geomorfológicos sintetizadores de las propiedades de la cuenca como sistema transformador. La teoría del hidrograma unitario geomorfológico representa un marco adecuado para la utilización de ciertos conceptos básicos de geomorfología cuantitativa en modelos lineales de transformación lluvia-escorrentía.

PRINCIPIOS DEL HIDROGRAMA UNITARIO

La aproximación del hidrograma unitario puede interpretarse como un intento de abordar determinadas cuestiones de interés en hidrología, evitando la complejidad de la geometría y procesos físicos que acompañan al fenómeno de la transformación de la lluvia en escorrentía.

Como tal, dicha aproximación ignora en cierto modo los detalles de la física del proceso, el cual es descrito sobre una base conceptual, y tiene por lo tanto limitaciones importantes. A pesar de ello, constituye una útil herramienta en el análisis hidrológico, que ha sido objeto de un uso extendido en hidrología aplicada, debido principalmente a su clara formulación, sencilla, intuitiva y manejable desde el punto de vista matemático. Resulta de especial interés en la síntesis e identificación de sistemas hidrológicos, así como en problemas de predicción de caudales.

El hidrograma unitario puede definirse como la representación de la evolución temporal de los caudales en el punto de desagüe de una cuenca, generados por una precipitación neta teórica de volumen unitario sobre la misma.

Los fundamentos de la teoría del hidrograma unitario fueron presentados por SHERMAN (1932), quien ilustró el proceso de obtención del hidrograma producido por una tormenta de intensidad de precipitación uniforme, a base de superponer hidrogramas unitarios con forma triangular desplazados en el tiempo (fig. 1). Posteriormente, JOHNSTO-

NE y CROSS (1949) establecieron los supuestos básicos del hidrograma unitario, que justifican el procedimiento de construcción del hidrograma:

I. Para una cuenca dada, la duración de la escorrentía superficial es esencialmente constante para cualquier precipitación teórica de una duración dada e intensidad uniforme, independientemente del valor de dicha intensidad.

II. Para una cuenca dada, dos precipitaciones de intensidad uniforme e igual duración producen volúmenes totales de escorrentía diferentes, de tal forma que la relación entre los caudales en un instante dado es igual a la relación entre los volúmenes de precipitación correspondientes.

III. La distribución de la escorrentía en el tiempo para un intervalo de lluvia dado es independiente de las escorrentías ocurridas en periodos de lluvia precedentes.

Ninguno de estos supuestos es estrictamente correcto. Se pueden analizar resultados de laboratorio, o de experiencias y mediciones de campo, que demuestran la no-linealidad del proceso. Para multitud de propósitos, sin embargo, estas hipótesis pueden resultar de gran utilidad, conduciendo a resultados aceptables, e ilustrando en un simple esquema la intervención de las componentes esenciales en el fenómeno.

La teoría de sistemas, desarrollada con posterioridad, permite, en un contexto más amplio, identificar las anteriores hipótesis como los principios matemáticos de proporcionalidad (I y II) e invarianza temporal (III). Ello equivale a caracterizar la cuenca como un sistema lineal transformador de un INPUT de lluvia neta en un OUTPUT de escorrentía. La no-linealidad tiene entonces su origen principalmente en la componente de aportaciones subterráneas, que debe ser tenida en cuenta separadamente.

Conforme a los resultados de la teoría lineal de sistemas, un esquema de transformación como el mencionado conduce a la clásica convolución matemática, que permite expresar el hidrograma $Q(t)$ mediante la ecuación (1). Dicha ecuación resulta de aplicar los mismos conceptos ilustrados en la figura 1, y especificados en los principios del hidrograma unitario, haciendo uso del cálculo infinitesimal.

$$(1) \quad Q(t) = A \int_0^t i_c(x) \cdot u(t-x) \cdot dx + Q_B(t)$$

- donde
- A = Área de la cuenca.
 - $Q(t)$ = Caudal resultante en el instante t.
 - $i_c(x)$ = Intensidad de precipitación neta en el instante x.
 - u = Hidrograma instantáneo unitario.
 - Q_B = Componente subterránea.

Esta formulación implica que la función u , o hidrograma instantáneo unitario (IUH), sintetiza la información necesaria sobre la cuenca como sistema transformador.

En consecuencia, el éxito de la aplicación de un modelo

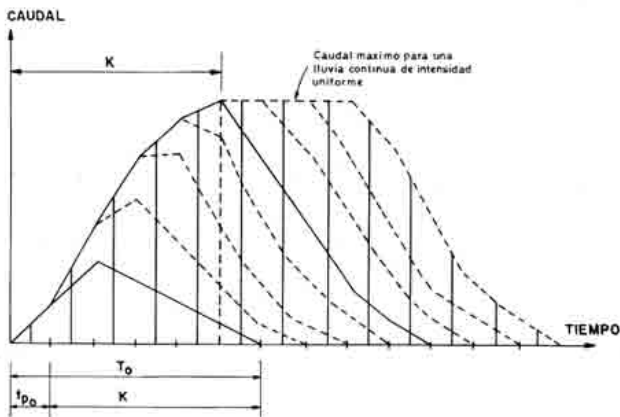
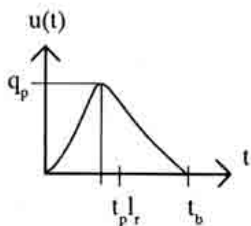


Figura 1. Obtención del hidrograma producido por una precipitación de intensidad uniforme, mediante superposición de hidrogramas unitarios triangulares.

Figure 1. Hydrograph produced by a precipitation of uniform intensity, by overlapping of triangular unit hydrographs.

de estas características depende fundamentalmente del acierto en la elección de la función u , de la capacidad de tal expresión para reproducir satisfactoriamente la respuesta unitaria de la cuenca, así como de los criterios aplicados para la estimación de los parámetros correspondientes que definen dicha función.

Las propiedades principales de un hidrograma unitario instantáneo son las siguientes:



t_p = Tiempo de base, (T)

t_p = Tiempo al pico, (T)

t_L = Tiempo de desfase o demora, (T)

q_p = Máximo ó pico, (T⁻¹)

$$\text{AREA} = \int_0^{\infty} u(t) \cdot dt = 1$$

La literatura hidrológica muestra diferentes fórmulas empíricas y familias de curvas propuestas para representar el IUH, así como métodos de diversa índole para la estimación de sus parámetros y características principales. Una de las formas más ampliamente aceptadas es la dada por la función gamma de dos parámetros, o modelo de Nash (1958), quien derivó tal formulación como resultado de conceptualizar el comportamiento hidrológico de la cuenca como el debido a una cascada de embalses lineales. La función $u(t)$ que resulta, o hidrograma unitario de Nash, puede escribirse en la forma:

$$(2) \quad u(t) = \frac{t^{\alpha-1} \cdot \text{EXP}(-t/k)}{k^{\alpha} \cdot \Gamma(\alpha)}$$

siendo:

$u(t)$ = Hidrograma instantáneo unitario de Nash

α = Parámetro de forma

k = Parámetro de escala

$\Gamma()$ = Función gamma

Los valores correspondientes de t_p , t_L y q_p pueden expresarse en función de los parámetros α y k como sigue:

$$(3) \quad t_p = (\alpha-1) \cdot k$$

$$(4) \quad t_L = \alpha \cdot k$$

$$(5) \quad q_p = \frac{(\alpha-1)^{\alpha-1} \cdot \text{EXP}(1-\alpha)}{k \cdot \Gamma(\alpha)}$$

Recientemente, algunos autores han centrado sus investigaciones en la obtención de relaciones entre los parámetros de diversos IUH y conceptos básicos de geomorfología cuantitativa (RODRIGUEZ-ITURBE y VALDES, 1979; GUP-TA y OTROS, 1980; HEBSON y WOOD, 1982; KIRSHEN y BRAS, 1983; SINGH, 1983; ROSSO, 1984; AGNESE y OTROS, 1988). Esta línea de trabajo ha dado lugar a la llamada teoría del hidrograma unitario geomorfológico, la cual establece un vínculo entre las propiedades de los sistemas hidrológicos lineales y la morfometría de las redes de drenaje. De esta forma, los esquemas para la ordenación de cauces, ratios de Horton, y otros descriptores geomorfológicos (HORTON, 1945; STRAHLER, 1952; SHREVE, 1967; SMART, 1968, 1972) son incorporados en la formulación clásica de los sistemas hidrológicos lineales.

EL HIDROGRAMA UNITARIO GEOMORFOLOGICO

Según RODRIGUEZ-ITURBE y VALDES (1979), el hidrograma unitario instantáneo (IUH) puede interpretarse como la distribución de probabilidad del tiempo de recorrido de una gota de agua hasta que alcanza el punto de desagüe de la cuenca, suponiendo aleatoria su posición inicial en la cuenca. La media de dicha distribución (t_p) correspondería al tiempo medio de recorrido, o tiempo de desfase característico, y es un valor indicativo de la demora que se produce entre la lluvia y la respuesta hidrológica de la cuenca.

RODRIGUEZ-ITURBE y VALDES (1979) asumen el criterio de Strahler para la ordenación de los cauces en la cuenca. Siendo n el orden de la misma, su red de drenaje contendrá cauces o segmentos desde orden 1 a orden n . La red que definen estos segmentos, y sus correspondientes áreas drenadas, determinan el recorrido seguido por una gota de agua desde el punto donde cae hasta el punto de salida de la cuenca. En general, un recorrido podrá suponerse compuesto de dos fases: la primera, correspondiente al flujo de ladera, y la segunda, debida al flujo en la red, de tal forma que el tiempo de recorrido total se obtendría como suma de los tiempos en los sucesivos estados (fase de flujo de ladera + tiempo de permanencia en los sucesivos cauces de órdenes crecientes). Suponiendo una distribución exponencial de los tiempos de permanencia en un cauce de un orden dado, Rodríguez-Iturbe y Valdés derivan una expresión para el IUH en función de los ratios de Horton, sobre la base de la ordenación de cauces de Strahler.

Para una cuenca de orden n , la formulación de Rodríguez-Iturbe conduce a un IUH que puede expresarse en la forma (Rosso, 1983):

$$(6) \quad u(t) = (a_n \cdot t + b_n) \cdot \text{EXP}(-2 \cdot v \cdot L^{-1} \cdot t) + \sum_{i=1}^{n-1} b_i \cdot \text{EXP}(-2 \cdot v \cdot L^{-1} \cdot t \cdot R_i^{n-1})$$

siendo:

- $u(t)$ = Hidrograma unitario geomorfológico, (T^{-1})
- v = Velocidad media de la corriente, (LT^{-1})
- L = Longitud media de las corrientes de orden superior, (L)
- a_n = Funciones de $R_a, R_b, R_c, \lambda_i, \lambda_n$ (T^{-2})
- b_i = Funciones de R_a, R_b, R_c, λ_i (T^{-1})
- R_a, R_b, R_c = Ratios de área, bifurcación y longitud
- λ_i = Inversa del tiempo medio de permanencia en la corriente de orden i , igual a v/L_i , (T^{-1})

- λ_n = Inversa modificada del tiempo medio de permanencia en la corriente de orden superior, (T^{-1})
- L_i = Longitud media de la corriente de orden i , (L)

RODRIGUEZ-ITURBE y VALDES (1979) proponen ecuaciones para la estimación de los parámetros a_n y b_i ($i=1,2,\dots,n$) para una cuenca de tercer orden. Dada la complejidad de tales ecuaciones, y con vistas a las aplicaciones prácticas, derivaron relaciones alternativas mediante análisis de regresión, las cuales permiten obtener el pico q_p y el tiempo al pico t_p del IUH en función de R_a, R_b, R_c , y v/L , para una cuenca de orden arbitrario:

$$(7) \quad q_p = 0.364 \cdot R_c^{0.43} \cdot v \cdot L^{-1}$$

$$(8) \quad t_p = 1.584 \cdot (R_b / R_a)^{0.55} \cdot R_c^{-0.38} \cdot L \cdot v^{-1}$$

GUPTA et al (1980) reformularon los resultados de Rodríguez-Iturbe y Valdés, llegando a un esquema más general que ha sido después utilizado por otros autores. Concretamente, CORRADINI et al (1986) han utilizado esta aproximación geomorfológica para estudiar los hidrogramas en la cuenca del Alto Tiber (Italia).

Rosso (1984) utiliza la función gamma de dos parámetros (o modelo de Nash), probando su flexibilidad para modelar el IUH. En efecto, Rosso demuestra en su trabajo que esta función, introducida sobre la base de la analogía con la cascada de embalses lineales, es capaz de reproducir la aproximación de Rodríguez-Iturbe y Valdés, lo cual representa un importante avance de cara a las aplicaciones en hidrología.

Siguiendo los estudios de R. Rosso, el parámetro de forma α agrega los efectos de las leyes físicas que determinan la estructura de la red de drenaje, y el parámetro de escala k condensaría la dinámica del transporte de agua en la cuenca.

Las relaciones que propone Rosso para la determinación de tales parámetros son las siguientes:

$$(9) \quad \alpha = 3.29 \cdot (R_b / R_a)^{0.78} \cdot R_c^{0.07}$$

$$(10) \quad K = 0.70 \cdot (R_a / R_b \cdot R_c)^{0.48} \cdot L/v$$

Dichas relaciones resultan del análisis de regresión múltiple en el espacio logaritmico sobre las ecuaciones que resultan de identificar el producto ($q_p \cdot t_p$) en ambos IUH (ecuaciones 3, 5, 7 y 8), e imponer la condición $\alpha - 1 = t_p/k$,

propia de la función gamma.

Estas fórmulas representan una interesante alternativa para la cuantificación de la influencia de la naturaleza y estructura de la red de drenaje, descrita a través de los ratios de Horton, en los hidrogramas resultantes. La figura número 2 ilustra la potencialidad de las mismas en este sentido. En ella se representa la variación del pico q_p (Ecs. 5, 9 y 10) del hidrograma unitario respecto del ratio R_b , cuando se mantienen constantes el resto de los parámetros. En concordancia con las observaciones empíricas, se comprueba que una reducción de la relación de bifurcación se corresponde con incrementos en el pico, conforme muestra la figura número 2.

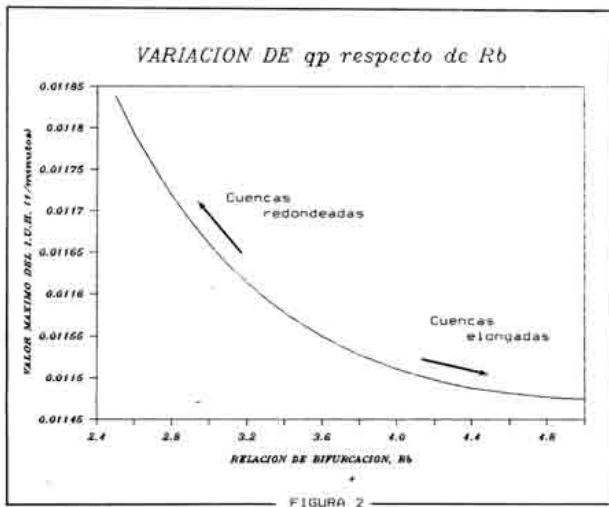


Figura 2. Efecto de la variación de R_b sobre el máximo del hidrograma unitario instantáneo, según fórmulas de Rosso (1984). $R_a=3.76$, $R_l=1.78$, $L/v=40.4$ min.

Figure 2. Effect of the R_b variation on the maximum of the instantaneous unit hydrograph, from Rosso (1984) formulas.

Existen también otras aproximaciones geomorfológicas para la estimación del IUH basadas en la representación de SHREVE (1966, 1974) de la red de drenaje. Los trabajos de GUPTA y WAYMIRE (1983), y TROUTMAN y KARLINGER (1985, 1986) son los más representativos.

Frecuentemente, el problema principal en la aplicación de estos modelos de base geomorfológica radica en la determinación del parámetro de escala, es decir, el parámetro k en el caso del mencionado modelo de Nash. Esto es debido a que dicho parámetro es función de la velocidad de la corriente mediada en el espacio y en el tiempo, existiendo limitaciones teóricas y prácticas importantes para medirla y estimarla. Este problema ha sido recientemente analizado por AGNESE et al (1988), quienes proponen y aplican en Italia un método para la obtención de tal parámetro cinemático. En dicho método, se deriva el parámetro de escala a partir de la velocidad efectiva de la corriente en el canal de orden superior, y la distribución espacial de la velocidad en

la totalidad de la red de drenaje.

No obstante, los errores que se cometen en la estimación del factor cinemático " v " son menos acusados para lluvias de carácter extremo, como ha comprobado PILGRIM (1976, 1977) en una serie de estudios experimentales, en los cuales llega a la conclusión de que tanto los valores de " v " como los tiempos de recorrido tienden a un valor asintótico para las avenidas máximas.

APLICACION

Una vez obtenido el hidrograma unitario instantáneo (IUH) para una cuenca determinada, puede calcularse el hidrograma producido por cualquier precipitación de hietograma conocido, mediante la resolución numérica de la ecuación de convolución (1). Se presenta a continuación un ejemplo sencillo para ilustrar la aplicabilidad de las metodologías expuestas. La resolución de la ecuación de convolución se realiza numéricamente, de tal manera que el caudal en un instante dado se evalúa por suma de las aportaciones de cada uno de los intervalos de precipitación precedentes. La lluvia o entrada del sistema es descrita únicamente en su dimensión temporal mediante el correspondiente hietograma de intensidades de precipitación.

La resolución numérica de la ecuación de convolución admite una variedad de aproximaciones. CHAPMAN (1985) propone distintos algoritmos numéricos eficientes, desarrollados para diferentes casos posibles de formato numérico en la definición de $i_c(t)$ y $u(t)$, según sean $i_c(t)$ y $u(t)$ funciones escalonadas, series de segmentos lineales, o polinomios.

El método que se propone aquí es únicamente válido para entradas de precipitación consistentes en series de intensidades medias en intervalos de tiempo de amplitud ΔT . Es decir, admite cualquier hietograma siempre que el intervalo de discretización permanezca constante a lo largo de la tormenta. El caso que se presenta corresponde a un suceso de precipitación registrado en el pluviógrafo de la estación de Ciudad Jardín (Alicante), y que se muestra en la figura número 3. Este hietograma se ha obtenido por discretización en intervalos de 10 minutos a partir de la banda del pluviógrafo.

Para ilustrar la aplicabilidad del hidrograma unitario geomorfológico en la estimación de caudales, se presentan los resultados obtenidos en el barranco de Pina para la citada tormenta. Este es un pequeño barranco, situado a pocos kilómetros de la ciudad de Alicante, que drena una superficie de 35 km^2 , y que se integra en la superficie vertiente del Barranco de Las Ovejas. Presenta una densidad de drenaje de $2.16 \text{ km}^2/\text{km}^2$, con una red caracterizada por afluentes de escasa longitud. La importante degradación de la cobertura vegetal y el tipo de suelos en la zona dan lugar a coeficientes de escorrentía elevados y tiempos de concentración reducidos, característicos de una res-

puesta hidrológica rápida que acentúa los riesgos de avenidas repentinas cuando se presentan lluvias de carácter torrencial.

Las pérdidas por infiltración se han estimado según la ecuación de Horton (1940), en base a medidas de campo en la zona realizadas con cilindro simple. La ecuación utilizada es:

$$(11) \quad \Phi(t) = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) \cdot \text{EXP}(-\Omega \cdot t)$$

donde:

$\Phi(t)$ = Tasa de infiltración en el instante t, medido desde el inicio de la tormenta.

f_0, f_{∞}, Ω = Parámetros.

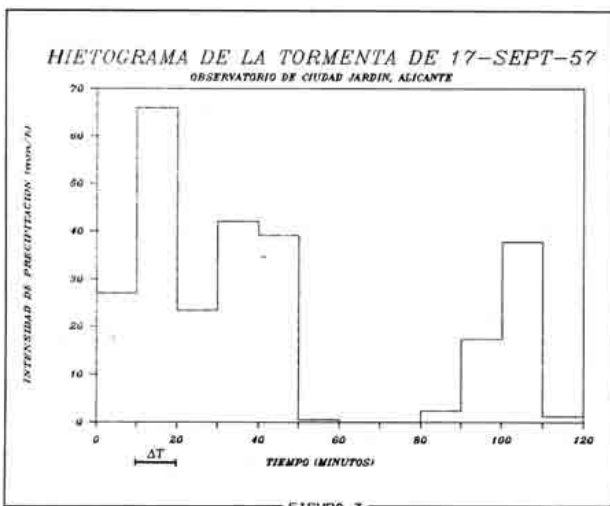


Figura 3. Hietograma correspondiente a la tormenta registrada en Alicante, el 17 de Septiembre de 1957.

Figure 3. Hietograph of the 17th of September 1957 storm in Alicante.

El hidrograma unitario instantáneo utilizado es el hidrograma de Nash (2), parametrizado según las fórmulas de Rosso (fórmulas 9 y 10) que sirven para estimar los valores de α y k. La totalidad de los índices y parámetros utilizados se resumen en la tabla número 1.

Los resultados obtenidos en la estimación del hidrograma producido por la tormenta considerada se muestran en la figura número 4. Como se puede comprobar, el caudal máximo estimado resulta ser de 74.5 m³/s, lo cual representa una punta de crecida significativamente elevada teniendo presente el área contribuyente considerada. En la figura se observa también la evolución experimentada por los caudales con el tiempo, y la forma resultante del hidrograma correspondiente a la respuesta hidrológica

PARAMETROS ESTIMADOS		
- Índices morfológicos y parámetros del IUH:		
Ra = 3.76	} $\alpha = 3.23$	} k = 22.24 min.
Rb = 3.49		
RL = 1.78		
L/v = 40.4 min.		
- Parámetros de infiltración:		
$f_0 = 1.0$ mm/min.		
$f_{\infty} = 0.4$ mm/min.		
$\Omega = 0.17$ min. ⁻¹		

Tabla 1. Los valores de Rb, Ra, RL, L se han tomado de *Lluvias torrenciales e inundaciones en Alicante*. Instituto Universitario de Geografía. Univ. de Alicante. Editado por el Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. 1983.

Table 1. Rb, Ra, RL, L values from *Lluvias torrenciales e inundaciones en Alicante*. Instituto Universitario de Geografía. Univ. de Alicante. Editado por el Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. 1983.

estimada de la cuenca. El efecto amortiguador y de almacenamiento de la cuenca provoca, por un lado, la suavización de las puntas de intensidad de precipitación locales, y por otro, la acumulación de los efectos correspondientes a lapsos de lluvia separados en el tiempo. En el caso de la tormenta considerada, de corta duración, se distinguen dos intervalos de actividad lluviosa claramente definidos, los cuales provocan una respuesta agregada, con un único pico, como se comprueba en la figura número 4.

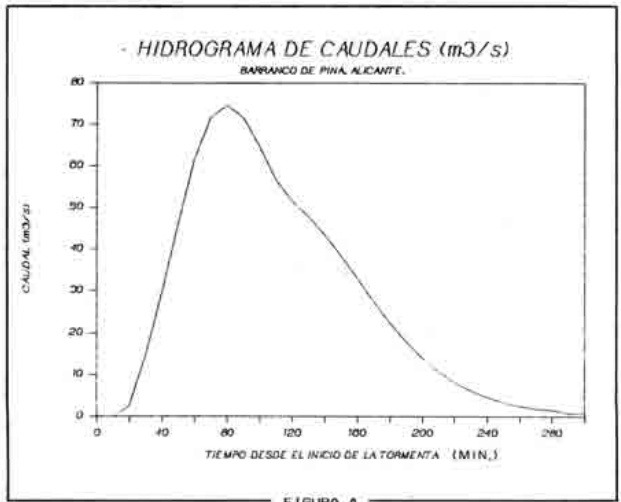


Figura 4. Hidrograma estimado para el barranco de Pina (Alicante), correspondiente a la tormenta del día 17 de Septiembre de 1957.

Figure 4. Estimated hydrograph for the gully of Pina (Alicante), corresponding to the storm from 17th of September 1957.

CONCLUSION

La utilización de esquemas simples de transformación lluvia-escorrentía, en los que se incorporen conceptos geomorfológicos para sintetizar las propiedades de la cuenca como sistema transformador, representa una interesante aproximación al problema de la estimación de los hidrogramas de avenida en cuencas no aforadas. Tal aproximación no es sustitutiva de modelos de simulación hidrológica más complejos, que requieran una cuidadosa calibración y abundantes de datos de campo. En efecto, los procedimientos aquí presentados constituyen herramientas de utilidad principalmente para la estimación de caudales en cuencas no aforadas, similitud hidrológica entre cuencas, distribuciones derivadas de caudales máximos e influencia de índices geomorfológicos en la respuesta hidrológica. También tienen interés en la obtención de primeras aproximaciones en estudios hidrológicos de mayor escala, que alimenten posteriormente modelos más detallados. Representan, por otro lado, un marco idóneo para vincular los resultados de la geomorfología cuantitativa, y concretamente los relativos a morfometría de redes de drenaje, con la aproximación de la teoría de sistemas aplicada a los fenómenos de generación de caudal en las cuencas de drenaje.

REFERENCIAS

- AGNESE, C., D'ASARO, y GIORDANO, G. (1988). Estimation of the time scale of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph from effective streamflow velocity. *Water Resour. Res.*, 24(7): 969-978.
- BAKER, V.R., CRAIG, R. y PATTON, P.C. (1989). *Flood Geomorphology*. New York, Wiley, 503 pp.
- CHAPMAN, T.G. (1985). Continuous convolution with hydrologic data. *Water Resour. Res.*, 21(6): 847-852.
- CORRADINI, C., MELONE, F., UBERTINI, L. y SINGH, V.P. (1986). Geomorphologic approach to synthesis of direct runoff hydrograph from the upper Tiber basin, Italy. *Scale problems in hydrology*, ed. por Rodriguez-Iturbe, I., Gupta V.K. y Wood, E. Pag. 57-79. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- GUPTA, V.K., WAYMIRE, E. y WANG, C.T. (1980). A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.*, 16(5): 855-862.
- GUPTA, V.K. y WAYMIRE, E. (1983). On the formation of an analytical approach to hydrologic response and similarity at the basin scale. *J. Hydrol.*, 65: 95-123.
- HEBSON, C. y WOOD, E. (1982). A derived flood frequency distribution using Horton order ratios. *Water Resour. Res.*, 18(5): 1509-1518.
- HORTON, R.E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil. Sci. Amer. Proc.*, 5: 399-417
- HORTON, R.E. (1945). Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 56: 275-370.
- JOHNSTONE, D. y CROSS, W.P. (1949). *Elements of applied hydrology*. 276 pag. New York.
- KIRSHEN, D.M. y BRAS, R.L. (1983). The linear channel and its effect on the geomorphologic IUH. *J. Hydrol.*, 65.
- NASH, J.E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph, *IAHS AISH Publ.*, 42: 114-118.
- NASH, J.E. (1958). Determining runoff from rainfall. *Inst. Civ. Engin. Proc.* 10: 163-184.
- PILGRIM, D.H. (1976). Travel time and non linearity of flood runoff from tracer measurement on a small watershed. *Water Resour. Res.*, 12(3): 487-496.
- PILGRIM, D.H. (1977). Isochrones of travel time and distribution of flood storage from a tracer study on a small watershed. *Water Resour. Res.*, 13(3): 587-595.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I. y VALDES, J.B. (1979). The geomorphologic structure of the hydrologic response. *Water Resour. Res.*, 15(6): 1409-1420.
- ROSSO, R. (1983). Sulla taratura della risposta idrologica in base ai caratteri morfologici della rete idrografica. *Idrotecnia*, 1: 3-25.
- ROSSO, R. (1984). Nash model relation to Horton order ratios. *Water Resour. Res.*, 20(7): 914-920.
- SHERMAN, L.K. (1932). Stream flow from rainfall by the unit-graph method. *Engin. News-Rec.* 108: 501-505.
- SHREVE, R.L. (1966). Statistical law of stream numbers. *J. Geol.*, 74: 17-37
- SHREVE, R.L. (1967). Infinite topologically random channel networks. *J. Geol.*, 75: 178-186.
- SHREVE, R.L. (1974). Variation of main stream length with basin area in river networks. *Water Resour. Res.*, 10(6): 1167-1177.
- SINGH, V.P. (1983). A geomorphic approach to hydrograph synthesis, with potential for application to ungauged watersheds, Tech. Rep., *Water Resour. Res. Inst.*, Louisiana, State University, Baton Rouge, LA, 101 pp.
- SMART, J.S. (1968). Statistical properties of stream lengths. *Water Resour. Res.*, 4, 1001-1014.
- SMART, J.S. (1972). Channel networks. *Adv. Hydrosoci.*, 8: 305-346.
- STRAHLER, A.N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 63:1117-1142.
- TROUTMAN, B.M. y KARLINGER, M.R. (1985). Unit hydrograph approximations assuming linear flow through topologically random channel networks. *Water Resour. Res.*, 21(5): 743-754.
- TROUTMAN, B.M. y KARLINGER, M.R. (1986). Averaging properties of channel networks using methods in stochastic branching theory. *Scale problems in hydrology*, ed. por Rodriguez-Iturbe, I., Gupta V.K. y Wood, E. Pag. 57-79. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.

Recibido en Diciembre de 1989
Aceptado en Marzo de 1990