

CÁLCULO DE HIDROGRAMAS DE CRECIDA EN CUENCAS SEMIÁRIDAS. APLICACIÓN DEL HIDROGRAMA GEOMORFOLÓGICO INSTANTÁNEO UNITARIO

J.C. GIMÉNEZ; M. BERTOMEU

(1)

(2)

- (1) Ingeniero de Montes. Escuela de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad de Extremadura. Avda Virgen del Puerto nº 2. 10600 PLASENCIA. jcfernand@unex.es
- (2) Dr. Ingeniero de Montes. C/ Francisco García 3, 3º dcha. 28025 MADRID. mbertomeu@terra.es

RESUMEN

Se analiza un modelo hidrológico para la simulación de eventos en cuencas hidrográficas semiáridas no aforadas. Para representar las pérdidas y calcular la lluvia neta en cada celda en que se ha dividido la cuenca, el modelo presentado aplica el método del número de curva del USDA SCS. La escorrentía es posteriormente conducida, siguiendo los caminos de máxima pendiente, hasta el punto de desagüe. Como complemento, se presenta una metodología para extraer de forma automática la información geomorfológica necesaria a partir de un Modelo Digital de Elevaciones. En este proceso se obtiene automáticamente la cuenca y se determina el orden jerárquico de Strahler, así como los ratios de Horton imprescindibles para la aplicación del Hidrograma Geomorfológico Instantáneo Unitario.

P.C.: hidrología, hidrograma, cuenca hidrográfica, SIG, escorrentía superficial.

SUMMARY

A hydrological model for the simulation of events in semiarid drainage basins is analysed. In order to calculate losses and net rainfall on each cell in which the basin has previously been divided, the model presented uses the USDA *Soil Conservation Survey* method. Runoff is led or carried through maximum slope paths up to the drainage outlet. In addition, a methodology to capture the geomorphologic information automatically from a Digital Elevation Model is presented. This way the basin is directly defined and Strahler's hierarchical order as well as Horton's ratios necessary to estimate the Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph are determined.

K.W.: hydrology, hydrograph, drainage basin, catchment, GIS, runoff.

INTRODUCCIÓN.

De entre los numerosos temas que abarca la Hidrología, uno de los más interesantes y de mayor trascendencia social es el de las crecidas. Estos fenómenos torrenciales acarrear un enorme coste económico y social, por lo que su estudio tiene un gran interés, todavía mayor en el ámbito forestal, donde la escasez de cuencas aforadas y de estudios de detalle hacen muy difícil la estimación de los caudales de avenida.

Los hidrólogos siempre han tratado de describir la relación existente entre lluvia y escorrentía. Este interés no se centra exclusivamente en la medida de dicha relación sino también en la descripción del proceso mediante el cual el hietograma o pluviograma da origen al hidrograma, expresión integral de las características físicas y climáticas que gobiernan las relaciones entre precipitación y escorrentía.

Sherman (1932) introduce el concepto de Hidrograma Unitario como un método para transformar la lluvia efectiva o neta en escorrentía directa. Un Hidrograma Unitario es la respuesta de una cuenca ante una precipitación efectiva unitaria y uniforme distribuida en toda la cuenca.

Las hipótesis que asume el modelo del Hidrograma Unitario establecido por *Sherman* son en cierto modo muy restrictivas, y se pueden resumir en: invariabilidad en el tiempo, proporcionalidad o linealidad y superposición. Hay que aclarar que estas hipótesis no se cumplen en la realidad.

MATERIAL Y MÉTODOS.

Los datos analizados pertenecen a 5 cuencas semiáridas del levante español. Estas cuencas se seleccionaron, de entre las que tiene el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) del Júcar, por ser "naturales", es decir, por tener escasa perturbación humana, además de por su tamaño,

que varía desde los 25.6 km² de la Rambla Gallinera hasta los 254 km² de Estubeny. Los datos existentes se analizaron y se seleccionaron los eventos más representativos para cada una de las cuencas. Finalmente se calibró y validó el modelo para el conjunto de las cuencas.

CUENCA	Superficie (km ²)	Nº de eventos
CARRAIXET	133.2	5
RAMBLA POYO	220	8
ESTUBENY	254	8
VERNISSA	100	8
GALLINERA	25.6	8

DISCUSIÓN.

Muchos autores han intentado relacionar las características geomorfológicas de una cuenca con la *función de respuesta* representada por el Hidrograma Unitario (*Gupta et al. (1980), Rodríguez-Iturbe (1993), Rodríguez-Iturbe & Valdés (1979), Sivapalan et al. (1990), Snell & Sivapalan (1994), Valdés et al. (1979), Camarasa & García Bartual (1991)*). Un ejemplo de estos intentos es el Hidrograma Geomorfológico Instantáneo Unitario de *Rodríguez-Iturbe y Valdés (1979)*, en donde se relaciona la respuesta de una cuenca ante un evento (representada por el Hidrograma Unitario Instantáneo) con los parámetros geomorfológicos de dicha cuenca. El Hidrograma Unitario fue interpretado como la función de densidad de probabilidad, para un volumen instantáneo unitario de lluvia neta distribuida en toda la cuenca, del tiempo de viaje de una gota de agua caída aleatoriamente sobre la cuenca hasta la salida de la misma.

Los principales parámetros geomorfológicos de una cuenca pueden obtenerse mediante el método de clasificación de la red fluvial de *Horton (1945)* basado en el sistema de *Gravelius. Strahler (1957)* modificó las hipótesis de *Horton* y planteó el método más utilizado hoy en día, si bien la compleja geometría de las cuencas hidrográficas y la multitud de factores que intervienen en la formación de la escorrentía hacen difícil, incluso imposible, el cálculo de los parámetros necesarios para estos modelos con base geomorfológica.

En el modelo propuesto por *Horton* y *Strahler*, básicamente se considera que la cuenca tiene una única salida o punto de desagüe. Los puntos en los que se unen dos segmentos de canal son los nudos internos; los nudos externos son aquellos a partir de los cuales se origina un segmento de canal (es decir, la cabecera de todos los afluentes de la cuenca); los tramos de canal son los segmentos entre nudos, siendo internos si conectan nudos internos, y externos si conectan un nudo exterior y el siguiente nudo interior aguas abajo.

Así, *Strahler* clasifica los canales de acuerdo con el siguiente criterio:

- 1) Los canales originados en un nudo externo son definidos como canales de primer orden.
- 2) Cuando dos canales del mismo orden, i , se unen en un nudo interior dan lugar a un canal de orden superior, $i+1$, aguas abajo.
- 3) Cuando se unen dos canales de distinto orden en un nudo interior dan lugar a otro canal que conserva el mayor de los órdenes.
- 4) El orden de la cuenca, ω , es el del canal de mayor orden.

Horton (1945) desarrolló sus conocidos “*ratios*”, las llamadas leyes de los números de corriente y de las longitudes de corriente. La ley de los números de corriente establece que el número de canales de un determinado orden sigue una relación geométrica inversa con dicho orden:

$$N_i = R_B^{\omega-i}$$

donde N_i es el número de canales de orden i , ω es el mayor orden de los canales de la cuenca y R_B es una constante característica de la cuenca llamada Ratio de Bifurcación. Los pares de puntos $(i, \log N_i)$ de todos los órdenes de la cuenca se ajustan a una línea recta de pendiente negativa. El valor absoluto de dicha pendiente es el logaritmo de R_B .

Así mismo, la ley de los números de corriente se puede expresar como:

$$R_B = \frac{N_{i-1}}{N_i}$$

La ley de las longitudes de corriente establece que:

$$\frac{\bar{L}_i}{\bar{L}_{i-1}} = R_L$$

donde \bar{L}_i es la longitud media de los canales de orden i y R_L es otra constante característica de la cuenca llamada Ratio de Longitud.

Schumm (1956) propuso la ley de las áreas de corriente, con el mismo fundamento que las dos leyes anteriormente establecidas por Horton:

$$\frac{\bar{A}_i}{\bar{A}_{i-1}} = R_A$$

donde \bar{A}_i es el área drenante media a los canales de orden i y R_A es el Ratio de Área.

Los ratios de longitud y área se consiguen, al igual que el ratio de bifurcación, ajustando sendas rectas a los pares de puntos $(i, \log \bar{L}_i)$ e $(i, \log \bar{A}_i)$ y obteniendo las pendientes de dichas rectas.

Morisawa (1962) propuso otras dos leyes: la ley de las pendientes de corriente y la del relieve de la cuenca, cuyas expresiones son, respectivamente:

$$\bar{S}_i = R_S^{\omega-i} \bar{S}_1$$

$$\bar{E}_i = R_E^{i-1} \bar{E}_1$$

donde R_S es el Ratio de Pendiente, R_E el Ratio de Relieve, \bar{S}_i es la pendiente media de los canales de orden i , y \bar{E}_i la altura o elevación media de las cuencas de orden i .

El modelo de jerarquización de Horton-Strahler, el más utilizado en la actualidad, es la base de los llamados hidrogramas unitarios geomorfológicos, como el de *Rodríguez-Iturbe y Valdés (1979)* o el de *Rosso (1984)*, modificado por *García Bartual (1990)*.

Partiendo de estos planteamientos y considerando una velocidad de propagación constante (v) se obtiene el Hidrograma Geomorfológico Instantáneo Unitario, que queda definido por el caudal punta y el tiempo punta de la siguiente manera:

$$q_p = 0.364 \cdot R_L^{0.34} \cdot \frac{v}{L_\omega}$$

$$t_p = 1.584 \cdot R_L^{-0.38} \cdot \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} \cdot \frac{\bar{L}_\omega}{v}$$

Esta formulación introduce la no linealidad de la escorrentía al introducir el parámetro de la velocidad de propagación (v). El importante papel que juega este parámetro se puede estudiar en *Al-Wagdany & Rao (1997, 1998)*, *Franchini & Oconel (1996)*, *Maidment et al. (1996)*.

Los Sistemas de Información Geográfica se han venido utilizando desde que en los años 70 aparecieron como una herramienta útil para el almacenamiento y análisis de la información espacial. El uso de los SIG en Hidrología se ha ido extendiendo al igual que en otras ciencias afines, jugando actualmente un papel muy importante en el campo de la modelización hidrológica. Los Modelos Digitales de Elevaciones constituyen la herramienta fundamental para la construcción de un modelo hidrológico distribuido (*Olivera & Maidment*).

Un Modelo Digital de Elevaciones es una forma de representar digitalmente la topografía de una determinada zona. A partir de este tipo de información se pueden calcular, de forma automática los parámetros hidrológicos y geomorfológicos esenciales para el desarrollo de estos modelos con base geomorfológica (*Band (1993)*, *Daros & Borga (1997)*, *Fairfield & Leymarie (1991)*, *Garbrecht & Martz (1997)*, *Helmlinger et al. (1993)*, *Jenson (1988)*, *Martz & Garbrecht (1992)*, *Tarbotom et al. (1990)*).

En estos trabajos se analiza el procedimiento a seguir para extraer los parámetros geomorfológicos de un MDE. Para un análisis más detallado se puede consultar los trabajos de *Daros*

& Borga (1997), Jenson (1988), Lanfear (1990). De forma esquemática podríamos resumir dicho procedimiento de la siguiente manera:

1. Definir el punto de salida de la cuenca.
2. Para permitir que el agua fluya “ladera abajo”, es necesario eliminar del MDE los “sumideros”, es decir, las celdas rodeadas por celdas a mayor cota.
3. Calcular la dirección del flujo, es decir, para cada celda, la dirección en la que se moverá el agua (siempre será la de máxima pendiente y existen 8 direcciones posibles, tantas como celdas vecinas).
4. Calcular, para todas las celdas, la acumulación del flujo, es decir, el número de celdas que vierten a una dada. Teniendo en cuenta la resolución del MDE conoceremos para cada celda el área vertiente.
5. Establecer un umbral para que una celda pertenezca a la red de drenaje.
6. Asignar a cada tramo el número de orden correspondiente.
7. Delimitar las subcuencas para todos y cada uno de los nodos del sistema.
8. Realizar los cálculos de los Ratios de Horton.

CONCLUSIONES

Los modelos hidrológicos desarrollados sobre SIG ofrecen una nueva perspectiva para afrontar el estudio hidrológico de eventos en pequeñas cuencas hidrográficas a partir de sus propiedades físicas y geomorfológicas, con importantes ventajas frente a los sistemas clásicos. Las principales ventajas derivan de la posibilidad de considerar la variabilidad despatial de la información implicada, lo que a posteriori implica un considerable incremento en la calidad de los resultados frente al tratamiento clásico con modelos agregados.

La metodología del Número de Curva plantea una problemática importante por el tratamiento que recibe el estado de humedad antecedente y no existen otras metodologías de fácil aplicación que supongan una alternativa clara. Ante esta situación se hace necesario palntear posibles mejoras que proporcionen una relación continua entre el Número de Curva y el estado de humedad antecedente.

Las principales mejoras introducidas en el modelo presentado, se pueden resumir de la siguiente manera:

- La precipitación no se distribuye uniformemente por la superficie de la cuenca, y menos aún si tenemos en cuenta que hablamos de precipitación neta. El modelo presentado es capaz de manejar una precipitación variable en el espacio. Desde este punto de vista estaremos hablando por lo tanto de un modelo distribuido.
- El tiempo base no es constante, varía con la intensidad de la lluvia. El modelo representa satisfactoriamente el hecho de que lluvias más intensas originan hidrogramas más “estrechos”.
- El fenómeno lluvia-escorrentía no es lineal, es decir, lluvias más intensas provocan hidrogramas más “esbeltos”.
- La hipótesis de superposición no se cumple completamente en la realidad, es decir, la velocidad de propagación de la onda de avenida hace que el modelo tenga *memoria* y por lo tanto, lo que ha ocurrido en períodos anteriores influye en el sistema.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha desarrollado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, y ha sido financiada por el Ministerio de Educación y Cultura a través de una Beca de Formación del Profesorado Universitario.

BIBLIOGRAFÍA

AL-WAGDANY, A.S. & RAO, A.R.; (1997). *Estimation of the Velocity Parameter of the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph*. Water Resources Management, Vol 11.

AL-WAGDANY, A.S. & RAO, A.R.; (1998) *Correlation of the Velocity Parameter of Thee Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph Models*. Hydrological Processes, Vol 12, Num 4,

pp 651-659.

BAND, L.E.; (1993). *Extraction of Channel Networks and Topographic Parameters from Digital Elevation Data*. Channel Network Hydrology.

CAMARASA, A.M. & GARCIA BARTUAL, R.; (1991). *Estimación del Hidrograma de Crecida a Partir de un Modelo Conceptual de Base Geomorfológica*. Tecnología del Agua, Num. 8.

DAROS, D. & BORGA, M.; (1997). *Use of Digital Elevation Model Data for the Derivation of the Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph*. Hydrological Processes, Vol 11, Num 1, pp 13-33.

FAIRFIELD, J. & LEYMARIE P.; (1991). *Drainage Networks from GRID Digital Elevation Models*. Water Resources Research, Vol 27, Num 5, pp 709-717.

FRANCHINI, M. & OCONNEL, P.E.; (1996). *An Analysis of the Dynamic Component of the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph*. Journal of Hydrology, Vol 175, Num 1, pp 407-428.

GARBRECHT, J. & MARTZ, L.W.; (1997). *Automated Channel Ordering and Node Indexing for Raster Channel Networks*. Computers & Geoscience, Vol 23, Num 9, pp 961-966.

GUPTA, V.K.; WAYMIRE, E. & WANG, C.T.; (1980). *A Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph from Geomorphology*. Water Resources Research, Vol 16, Num 5, pp 855-862.

HELMLINGER, K.R.; KUMAR, P. & FOUFOULAGEORGIOU E.; (1993). *On the Use of Digital Elevation Model Data for Hortonian and Fractal Analyses of Channel Networks*. Water Resources Research, Vol 29, Num 8, pp 2599-2613.

JENSON, S.K.; (1988). *Applications of Hydrologic Information Automatically Extracted from Digital Elevation Models*. Hydrological Processes, Vol 5, Num 1, pp 31-44.

JENSON, S.K. & DOMINGUEZ, J.O.; (1988). *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information Systems Analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 54, Num 11, pp 1593-1600.

LANFEAR, K.J.; (1990). *A fast Algorithm for Automatically Computing Strahler Stream Order*. Water Resources Bulletin, Vol 26, Num 6, pp 977-981.

MAIDMENT, D.R. *GIS and Hydrologic Modeling*. Environmental Modeling with GIS, Ed. Goodchild, M.J.; Park, B.O. & Steyaert, L.T., N.Y. Oxford University Press.

MAIDMENT D.R.; OLIVERA, F., CALVER, A., EATHERALL, A. & FRACZEK, W.; (1996). *Unit Hydrograph Derived from a Spatially Distributed Velocity Field*. Hydrological Processes, Vol 10, Num 6, pp 831-844.

MARTZ, L.W. & GARBRECHT, J.; (1992). *Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas from Digital Elevation Models*. Computers & Geoscience, Vol 18, Num 6, pp 747-761.

OLIVERA, F. & MAIDMENT, D. *Runoff Computation Using Spatially Distributed Terrain Parameters*.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; (1993). *The Geomorphological Unit Hydrograph*. Channel Network Hydrology.

RODRIGUEZ-ITURBE, I. & VALDES, J.B.; (1979). *The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response*. Water Resources Research, vol. 15, Num. 6, pp. 1409-1420.

SIVAPALAN, M.; WOOD, E.F. & BEVEN K.J.; (1990). *On Hydrologic Similarity. 3. A Dimensionless Flood Frequency Model Using a Generalized Geomorphologic Unit Hydrograph and Partial area Runoff Generation*. Water Resources Research, Vol 26, Num 1, pp 43-58.

SHERMAN, L.K.; (1932). *Stream Flow from Rainfall by the Unit Graph Method*. Engineering News-Record, Vol 108, pp 501-505.

SMART, J.S.; (1968). *Statistical Properties of Stream Lengths*. Water Resources Research, Vol 4, Num 5, pp 1001-1014.

SNELL, J.D. & SIVAPALAN, M.; (1994). *On Geomorphological Dispersion in Natural Catchments and the Geomorphological Unit Hydrograph*. Water Resources Research, Vol 30, Num 7, pp 2311-2323.

TARBOTOM, D.G.; BRAS, R.L. & RODRIGUEZ-ITURBE, I.; (1990). *On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data*. Hydrological Processes, Vol 5, Num 1, pp 81-100.

VALDES, J.B. ; FIALLO, Y. & RODRIGUEZ-ITURBE, I.; (1979). *A Rainfall-Runoff Analysis of the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph*. Water Resources Research, Vol 15,

Num 6.

YEN, B.C. & LEE, K.T.; (1997). *Unit Hydrograph Derivation for Ungauged Watersheds by Stream-Order Laws*. Journal of Hydrologic Engineering.