

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Victoriano Martínez Álvarez

Resumen:

En este estudio se propone una metodología para obtener, de forma automática, el Tiempo de Concentración (TC) de cuencas hidrográficas siguiendo la formulación más actual del USDA-SCS. La metodología desarrollada se basa en la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), cuyas capacidades actuales permiten realizar el análisis geomorfológico de las cuencas con gran facilidad y, por tanto, deducir automáticamente parámetros hidrológicos basados en dicha geomorfología. La metodología se caracteriza por calcular el TC teniendo en cuenta los distintos tipos de flujo con que se puede presentar la escorrentía: flujo en ladera, flujo encauzado y flujo mixto, por lo que resulta especialmente recomendable para su aplicación en pequeñas cuencas, donde la importancia relativa de los tres tipos de flujo es significativa. A modo de ejemplo, se ha aplicado en una pequeña cuenca de la Comunidad de Madrid, con una extensión aproximada de 17 km², empleando el SIG ArcView.

Palabras clave: tiempo de concentración, MDT, SIG, análisis geomorfológico.

INTRODUCCIÓN

El estudio hidrológico de avenidas en cuencas hidrográficas es imprescindible para el diseño de numerosas infraestructuras hidráulicas. En la mayoría de las ocasiones no se dispone de información foronómica suficiente para abordar un estudio hidrológico de avenidas a partir de su análisis estadístico, sobre todo en el caso de pequeñas cuencas, por lo que es habitual recurrir a modelos hidrometeorológicos. Estos modelos estiman el valor de determinadas variables hidrológicas, como el caudal máximo, a partir del conocimiento de las variables meteorológicas que originan el evento y de las características físicas y geomorfológicas de la cuenca.

Para la síntesis del hidrograma producido por una determinada lluvia sobre una cuenca se pueden emplear numerosas técnicas, pero la mayor parte de ellas se caracterizan por estar basadas en la teoría del Hidrograma Unitario (HU). Esta teoría, introducida por Sherman (1932), es actualmente la más utilizada para transformar el hietograma de lluvia neta en hidrograma de escorrentía

superficial de la cuenca. La determinación del HU de una cuenca rara vez se realiza a partir del análisis de registros pluviométricos y foronómicos correspondientes a varios eventos bien definidos, ya sea por su habitual escasez o por la complejidad que entraña su tratamiento, siendo mucho más frecuente recurrir al empleo de HU sintéticos obtenidos de forma experimental.

La determinación del HU sintético en una cuenca generalmente está asociada a la estimación de ciertos parámetros temporales a partir de propiedades geomorfológicas de la misma, con las que se relacionan mediante expresiones experimentales. La mayor parte de las técnicas basadas en el concepto del HU, como el HU adimensional y el HU triangular del SCS (USDA-SCS, 1985), el HU triangular de Témez (MOPU, 1987), etc., se incluyen dentro de la clasificación de HU sintéticos uniparamétricos, dado que su determinación se realiza mediante expresiones experimentales a partir de un único parámetro relacionado con propiedades geomorfológicas de la cuenca. El parámetro más comúnmente empleado es el tiempo de concentración (TC).

Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola de la Universidad Politécnica de Cartagena. Área de Ingeniería Agroforestal. Paseo Alfonso XIII, 48 30203 Cartagena (Murcia). victoriano.martinez@upct.es

Artículo recibido el 5 de septiembre de 2002, recibido en forma revisada el 21 de abril de 2005 y el 13 de diciembre de 2005 y aceptado para su publicación el 5 de marzo de 2006. 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.

Las técnicas más modernas para el tratamiento distribuido de la transferencia de lluvias netas a hidrogramas de escorrentía, basadas en la teoría del hidrograma unitario distribuido (Maidment, 1993), recurren al cálculo de tiempos de viaje desde cada punto hasta el desagüe de la cuenca. Estos tiempos de viaje generalmente siguen expresiones similares a las del TC, aunque se pueden encontrar propuestas más complejas como las definidas por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (DIHMA, 1994) o las desarrolladas por Francés *et al.* (1995).

En este trabajo se propone una metodología para determinar el TC siguiendo la formulación más actual del USDA-SCS, recogida en el manual TR-55 (USDA-SCS, 1986). La metodología se caracteriza por calcular el TC teniendo en cuenta los distintos tipos de flujo con que se puede presentar la escorrentía: flujo en ladera, flujo encauzado y flujo mixto, por lo que resulta especialmente recomendable para su aplicación en pequeñas cuencas, donde la importancia relativa de los tres tipos de flujo es significativa. Entre los modelos actuales más extendidos para el análisis hidrológico de pequeñas cuencas (AnnAGNPS, ANSWERS, CASC2D, DWSM, HSPF, KINEROS, MIKESHE, PRMS ó SWAT) los modelos AnnAGNPS y SWAT son los únicos que hacen un tratamiento de la escorrentía basado en la propuesta USDA-SCS TR-55. Las referencias relativas a estos modelos y una revisión muy interesante de sus fundamentos metodológicos pueden encontrarse en Borah y Bera (2003).

Tanto AnnAGNPS como SWAT disponen de herramientas para obtener los parámetros geomorfológicos necesarios para aplicar la metodología recogida en el manual TR-55 a partir de sistemas de información geográfica (módulo TOPAZ en AnnAGNPS y ArcView-SWAT para SWAT). Sin embargo, su metodología de aplicación difiere de la propuesta en este trabajo. Estos modelos emplean el SIG para realizar una división de la cuenca en laderas o subcuencas, extraen la información topográfica (longitud y pendiente media de las mismas) y aplican la metodología USDA-SCS TR-55, obteniendo los tiempos de viaje de la escorrentía en cada ladera o subcuenca. La metodología propuesta en este trabajo se basa en la división de la cuenca en celdas regulares y en la aplicación de las ecuaciones de tiempo de viaje propuestas en el manual TR-55, considerando las características propias de cada una de estas celdas:

posición en la ladera, tipo de flujo que se produce, pendiente local y coeficiente de rugosidad.

La metodología desarrollada permite obtener el tiempo de paso de la escorrentía por cada una de las celdas, que posteriormente se integra a lo largo de todos los posibles trayectos seguido por la escorrentía, obteniéndose los tiempos de viaje desde cada punto hasta el desagüe de la cuenca, por lo que además de permitir la determinación automática del TC, puede ser empleada para la obtención de hidrogramas unitarios distribuidos a partir de la cobertura de tiempos de viaje. Se presenta la aplicación de la metodología en la cuenca del arroyo de Valdelamasa, con una extensión aproximada de 17 km² y localizada en el norte de la Comunidad de Madrid.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA CUENCA

El TC es un parámetro hidrológico característico de cada cuenca hidrológica, cuya estimación es necesaria tanto para la determinación de caudales máximos de avenida mediante el método racional como para la síntesis de hidrogramas de avenida aplicando la teoría del HU (Chow *et al.*, 1988). Depende de la longitud máxima que debe recorrer la escorrentía hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere, en promedio, dentro de la misma. La velocidad de los flujos superficiales o libres en régimen turbulento viene dada por la ecuación de Manning:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

v representa la velocidad del flujo en m/s.

R_h representa el radio hidráulico en m (sección del cauce / perímetro mojado).

I representa la pendiente del cauce.

n representa el coeficiente de rugosidad de Manning (función de las características del cauce).

Como se observa la velocidad en flujos superficiales es función de la pendiente, de las características del cauce que determinan su rugosidad (material del lecho y vegetación existente) y del radio hidráulico, que es función de la forma del cauce y del calado de la corriente, que en último término depende de la intensidad de la lluvia. Sin embargo, a efectos prácticos, en los cálculos hidrológicos tradicionales (Kirpich, Témez, etc.)

suele considerarse que la velocidad de la escorrentía depende únicamente de la pendiente I . Bajo esta consideración, el TC depende en última instancia de la longitud del cauce principal de la cuenca y de su pendiente media, ambos parámetros geomorfológicos de la cuenca e independientes de otro tipo de factores relacionados con la precipitación, el suelo o la cubierta vegetal de la cuenca.

Los supuestos anteriores nos permiten trabajar con valores de TC constantes para cada cuenca, hipótesis que desde un punto de vista teórico parece discutible, pero que se basa en los datos registrados en pequeñas cuencas experimentales por Ramser (1927). Teóricamente, a mayores intensidades de precipitación le corresponderían mayores flujos circulantes en la cuenca y estos flujos requerirían mayores calados en los cauces. El aumento del calado en cauces naturales implica aumento en los radios hidráulicos y, consecuentemente, mayores velocidades en los flujos. Sin embargo, parece que hay una serie de efectos, englobados bajo el término anglosajón *runoff diffusion*, que compensarían los incrementos teóricos de la velocidad del flujo (Ponce, 1989). Entre estos efectos destacan los incrementos de la turbulencia correspondiente a los incrementos en la magnitud de los flujos y los efectos de laminación o almacenamiento en los cauces necesarios para conseguir los calados correspondientes a flujos mayores.

Existen diversas fórmulas empíricas que proporcionan el valor del TC en función de la longitud del cauce principal de la cuenca y de su pendiente media. En España la expresión más utilizada es la propuesta por Teméz, que es recogida en la publicación "Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales" (MOPU 1987) y en la Instrucción 5.2 IC "Drenaje Superficial" de la Dirección General de Carreteras (MOPU, 1990). A escala Internacional se encuentra notablemente extendida la expresión propuesta por Kirpich (1940).

Ante este planteamiento tradicional, el SCS de los EEUU, en el manual TR-55 (USDA SCS, 1986), propone una nueva metodología para el cálculo del TC, especialmente recomendado para pequeñas cuencas. Se basa en la diferenciación de los tipos de flujo por los que pasa la escorrentía generada en el punto más alejado hidráulicamente del desagüe de la cuenca, para posteriormente obtener el TC como suma del tiempo consumido en cada uno de los tramos. Para ello distingue tres tipos de flujo: flujo en ladera, flujo en canal y flujo

mixto. El SCS considera que el flujo en ladera se produce hasta los primeros 300 pies (≈ 100 m) de longitud de escorrentía y propone calcular su tiempo de viaje (T_v) mediante una aproximación a la solución del flujo en ladera basada en la ecuación de la onda cinemática, atribuida a Overton y Meadows (1976):

$$T_v(\text{segundos}) = 3600 \cdot \frac{0,09126 \cdot (n_l \cdot L)^{0,8}}{P_2^{0,5} \cdot I^{0,4}} \quad (2)$$

n_l representa el coeficiente de rugosidad de Manning para flujo en ladera (tabulado).

L representa la longitud de escorrentía en metros.

P_2 representa la máxima precipitación en mm durante 24 horas para periodo de retorno de 2 años.

I representa la pendiente del tramo.

Respecto al flujo encauzado, supone que se comienza a producir a partir de los puntos donde los encauzamientos son distinguibles en fotos aéreas o cuando aparecen representados por líneas azules en las cuadrículas topográficas del *United States Geological Survey*. Para calcular el tiempo de viaje se aplica la ecuación de Manning para flujo en canal:

$$T_v = \frac{n \cdot L}{R_h^{0,667} \cdot I^{0,5}} \quad (3)$$

n representa el coeficiente de rugosidad de Manning para flujo encauzado (tabulado).

L representa la longitud de escorrentía en metros.

R_h representa el radio hidráulico representativo del cauce principal en metros.

I representa la pendiente del tramo.

Por último, se considera que se produce flujo mixto en la parte del recorrido que no cumple las condiciones de flujo en ladera ni de flujo en canal. Para asignarles un tiempo de tránsito adopta nuevamente la ecuación de Manning para flujo en canal, pero aplica unos valores constantes para el R_h y para n de 0.4 pies (0,122 m) y 0,05 respectivamente.

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL TC CON SIG

Los algoritmos de análisis geomorfológicos normalmente incorporados en la mayor parte de los SIG comerciales se basan en el análisis de Modelos Digitales del Terreno (MDT). Estos algoritmos basan su funcionamiento en el estudio de la altitud de las celdas adyacentes a la celda objetivo

para determinar propiedades geomorfológicas como la pendiente o la orientación. A partir de estas características primarias y mediante algoritmos más complejos los SIG son capaces de obtener información geomorfológica de gran interés para múltiples aplicaciones.

A continuación se describe el procedimiento desarrollado para determinar el TC de forma automática siguiendo la metodología propuesta por el USDA SCS. Para referirse a las funciones empleadas se ha seguido la terminología propia del SIG ArcView 3.2 con la extensión *Spatial Analyst*, de la empresa *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*, por ser uno de los más extendidos a escala nacional e internacional. La mayor parte de los SIG actuales incorporan funciones similares a las aquí descritas, que pueden ser programadas en una rutina para automatizar su aplicación.

Metodología para aplicar la propuesta del USDA SCS

Para calcular el TC siguiendo la propuesta del USDA SCS es necesario asignar tiempos de paso a todas las celdas de la cuenca, teniendo en cuenta el tipo de flujo que se produce en cada una de ellas, para posteriormente calcular los tiempos de viaje totales como suma de los consumidos por la escorrentía en recorrer las trayectorias de máxima pendiente desde cada celda hasta el punto de desagüe. Para la aplicación de esta metodología se requiere el suministro de una serie de datos, utilizados para diferenciar los tipos de flujo por los que pasa la escorrentía generada en cualquier punto de la cuenca y poder aplicar las expresiones correspondientes a cada tipo de flujo. La metodología propuesta sigue los siguientes pasos:

1. Cálculo del tiempo de paso para flujo en ladera en todas las celdas de la cuenca. La expresión empleada requiere el conocimiento de la pendiente, la precipitación máxima en 24 h para un periodo de retorno de 2 años, la longitud de escorrentía y el coeficiente de rugosidad de Manning para flujo en ladera.

La pendiente en cada celda de la cuenca se calcula a partir del MDT mediante la aplicación de la función SLOPE. El MDT ha sido obtenido mediante digitalización de la información altimétrica de los mapas topográficos editados por la Comunidad de Madrid a escala 1:10.000, empleando un tamaño de celda de 10 m.

Para asignar el dato de precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 2 años se pueden utilizar datos existentes en estaciones próximas o recurrir a publicaciones como la de Castillo y Beltrán (1979) o la del Ministerio de Fomento (1996). Para la cuenca estudiada el valor asignado ha sido de 38 mm.

La longitud de escorrentía hasta la divisoria de aguas (figura 1), entendida como la máxima distancia recorrida por el flujo que pasa por una determinada celda, también se obtiene a partir del MDT mediante la aplicación de la función FLOWLENGTH con la opción UPSTREAM.

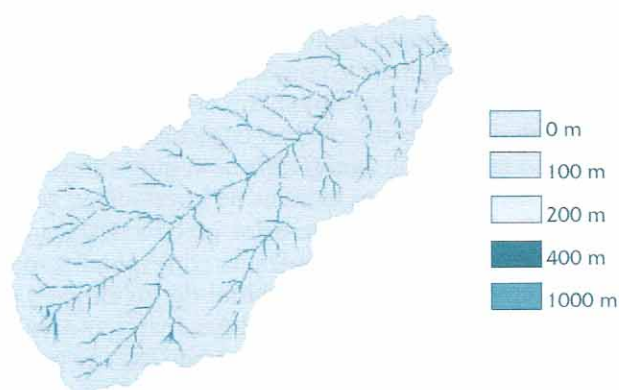


Figura 1. Cobertura de longitud de escorrentía.

El coeficiente de rugosidad de Manning para flujo en ladera se asigna siguiendo las propuestas de Engman (1986), recomendadas por el USDA SCS. Engman estudia múltiples situaciones de cubiertas naturales y de cultivos mediante el empleo de intensidades constantes de precipitación con simuladores de lluvia en pequeñas parcelas experimentales. Se ha hecho corresponder un coeficiente de rugosidad de Manning para flujo en ladera mediante la reclasificación de una cobertura de usos y aprovechamientos de la cuenca, según se recoge en la tabla 1. Para ello se ha partido de una cobertura de la cuenca realizada mediante fointerpretación de imágenes aéreas georreferenciadas con la clasificación de usos propuesta en la publicación "Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales" (MOPU, 1987) para el cálculo del número de curva (figura 2).

Tabla 1. Coeficientes de rugosidad para flujo en ladera.

Usos y aprovechamientos del suelo	n_i
Barbecho	0,05
Cultivos en hilera	0,06
Cereales de Invierno	0,17
Rotación de cultivos pobres	0,17
Rotación de cultivos densos	0,06
Pradera pobre	0,13
Pradera media	0,15
Pradera buena	0,24
Pradera muy buena	0,41
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	0,13
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal medio	0,25
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal bueno	0,4
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy clara	0,13
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) clara	0,25
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) media	0,4
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) espesa	0,6
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy espesa	0,8
Rocas permeables	0,02
Rocas impermeables	0,01

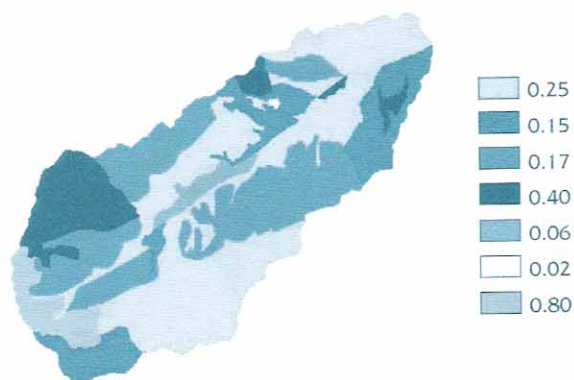


Figura 2. Cobertura de coeficientes de rugosidad n_i .

Conocidas todas las variables que intervienen en la ecuación 4 se aplica la misma a cada celda de la cuenca desde la ventana ANÁLISIS \Rightarrow MAP CALCULATION de ArcView. Se obtiene una cobertura con el tiempo que consumiría el flujo en ladera en alcanzar dicha celda. Si se aplica la misma expresión para una longitud de escorrentía inferior en 1 m a la real y se descuenta del valor anteriormente calculado, se obtiene el tiempo medio por unidad de longitud que tarda en ser transitada cada celda:

$$T_v(\text{segundos} / \text{m}) = \frac{328,5 \cdot (n_i \cdot L)^{0,8}}{P_2^{0,5} \cdot I^{0,4}} - \frac{328,5 \cdot (n_i \cdot (L-1))^{0,8}}{P_2^{0,5} \cdot I^{0,4}} \quad (4)$$

2. Cálculo de los tiempos de paso para flujo encauzado en todas las celdas de la cuenca mediante la aplicación de la fórmula de Manning. Como en el caso anterior, la información de pendientes se obtiene mediante la aplicación de la función SLOPE al MDT de la cuenca. El coeficiente de rugosidad de Manning para flujo encauzado representativo de la cuenca debe ser suministrado por el usuario en función de las características de los cauces. El valor de este coeficiente se puede obtener por observación directa en campo o utilizando alguna de las muchas tablas existentes, como la propuesta por Chow et al. (1988). Siguiendo esta tabla se ha adoptado un valor de 0,04, correspondiente a cursos naturales menores, limpios, curvados, con algunos pozos y bancos.

Para asignar un radio hidráulico en cada celda se han calculado los caudales de equilibrio que circularían por cada una de ellas al aplicar sobre la cuenca la intensidad de lluvia neta correspondiente a un periodo de retorno de 2 años. De esta manera las velocidades serán homogéneas con las del flujo en ladera en lo que a periodo de retorno se refiere. Para conseguirlo se ha calculado el caudal medio generado en cada celda para el periodo de retorno de 2 años, que es el resultado de multiplicar la intensidad media de lluvia efectiva por la superficie de la celda. A continuación se calcula el caudal que circula por cada celda en condiciones de equilibrio, es decir, la suma de todos los caudales medios generados en las celdas de la cuenca vertiente a cada punto (función FLOWACCUMULATION). Finalmente se ha obtenido el valor del calado y el radio hidráulico aplicando la ecuación de Manning y la de continuidad para los caudales de equilibrio en la sección considerada (triangular de taludes 2:1 por ser la más parecida a los cauces naturales de la cuenca) y con la pendiente correspondiente a cada celda. Con toda esta información se obtienen los tiempos de paso por unidad lineal para flujo encauzado aplicando la fórmula de Manning en cada celda para un canal con las características mencionadas y de longitud 1 m.

3. Cálculo de los tiempos de paso por unidad lineal para el flujo mixto en todas las celdas de la cuenca. Como en el caso anterior, se aplica la ecuación de Manning para flujo en canal, pero para unos valores constantes del radio

hidráulico y del coeficiente de rugosidad de 0.4 pies (0.122 m) y 0.05 respectivamente. Se obtiene una cobertura de tiempos de paso por unidad lineal para flujo mixto.

4. Clasificación de las distintas celdas de la cuenca en función del tipo de flujo que se produce en cada una de ellas. Para ello debe establecerse un límite de longitud de escorrentía para el flujo en ladera, que en nuestro caso se ha establecido en 100 m (valor recomendado por el USDA-SCS). También debe establecerse un límite para el flujo encauzado, que ha sido asignado a aquellas celdas con un área tributante superior a 1 km². Estos valores pueden ser modificados en función de las observaciones realizadas en campo, ya que vendrán marcados por la densidad de drenaje, que en último término depende tanto de la permeabilidad de los suelos como del régimen de precipitaciones característico de la zona. A las celdas que no cumplen ninguna de las dos condiciones anteriores se les asignará flujo mixto. En la figura 3 se muestran las celdas clasificadas por el tipo de flujo que se produce en ellas.

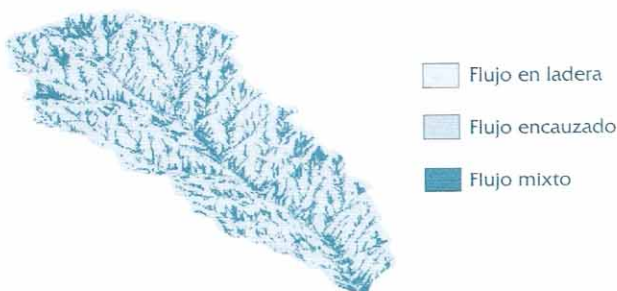


Figura 3. Cobertura de tipos de flujo

5. A continuación se asigna un tiempo de paso a cada celda, en función del tipo de flujo con que se haya clasificado. Para ello, mediante una expresión condicional se asigna el valor recogido en la cobertura de tiempos de paso correspondiente al tipo de flujo que se produce en cada celda, obteniéndose la cobertura final de tiempos de paso por unidad lineal sobre la cuenca (figura 4).

6. Cálculo de los tiempos de viaje como una suma de los tiempos de paso siguiendo las direcciones de flujo desde cada celda hasta el punto de desagüe multiplicado por la distancia recorrida en el tránsito por cada celda (Comando

FLOWLENGTH). Esta distancia será igual a la anchura de celda en caso de ser atravesada ortogonalmente o a la anchura de celda multiplicada por $\sqrt{2}$ si es atravesada según su diagonal. El resultado de aplicar esta función se muestra en la figura 5.

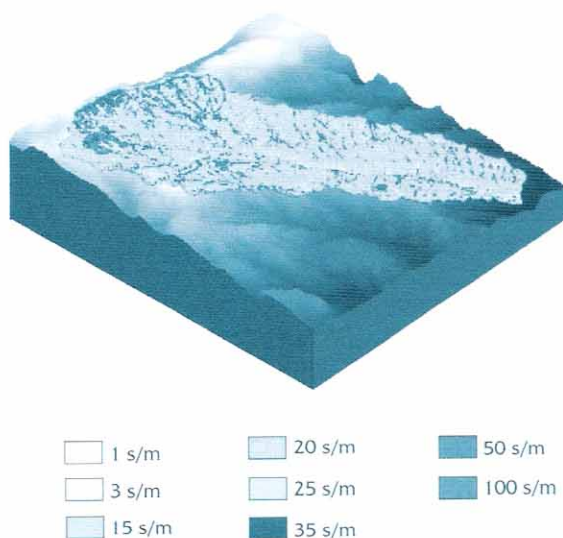


Figura 4. Tiempos de paso según las recomendaciones del USDA-SCS

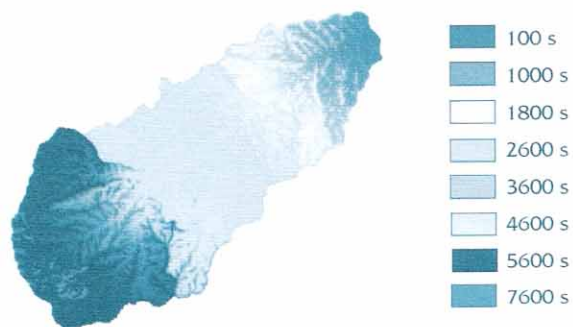


Figura 5. Tiempos de viaje según las recomendaciones del USDA SCS

Finalmente se consultan las variables estadísticas de la cobertura anterior y se selecciona el valor máximo, que será el correspondiente a la definición de TC para la cuenca (2,08 horas).

CONCLUSIONES

Una de las metodologías más extendidas y experimentadas para el cálculo de hidrogramas de avenida es la del HU. Para aplicar esta técnica en una cuenca resulta necesario determinar con exactitud el parámetro hidrológico TC. Este parámetro puede calcularse de forma automática

con SIG a partir del análisis geomorfológico de MDTs mediante expresiones empíricas como las de Témez o Kirpich.

Para la determinación del TC mediante la metodología propuesta por el SCS en el manual TR-55, especialmente recomendable en pequeñas cuencas, el análisis geomorfológico de MDT con SIG resulta de gran utilidad, aunque es necesario recopilar información adicional sobre la cuenca: precipitación máxima en 24 h para un periodo de retorno de 2 años, coeficientes de rugosidad de Manning para flujo en ladera, coeficiente de rugosidad de Manning para flujo encauzado y forma del cauce.

La metodología propuesta, además de calcular el TC de la cuenca, permite obtener una cobertura de tiempos de viaje. Esta cobertura puede ser empleada para trazar isocronas mediante una reclasificación de los tiempos en intervalos y obtener hidrogramas unitarios por dicha técnica. De igual modo puede ser empleada como cobertura de tiempos de viaje para aplicar la teoría de hidrograma unitario distribuido.

REFERENCIAS

- Borah, D.K. y Bera, M. (2003). Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of mathematical Bases. *Transaction of the ASAE* 46(6): 1553-1566.
- Castillo, E. y Beltrán, R. (1979). Precipitaciones Máximas en España. Monografía 21, ICONA. Ministerio de Agricultura.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 580 pp.
- DIHMA (1994). *Obtención de hidrogramas alternativos de los episodios de avenidas registrados en la cuenca del río Palancia*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.
- Engman, E.T. (1986). *Roughness coefficients for routing surface runoff*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112 (1) 39-53.
- Francés, F. y Benito, J. (1995). *La modelación distribuida con pocos parámetros de las crecidas*. *Ingeniería del Agua*, Vol. 2, nº4, pp 7-24.
- Kirpich, P.Z. (1940). *Time of concentration of small agricultural watersheds*. *Civil Engineering* 10 (3): 362-371
- Maidment, D.R. (1993). *GIS and hydrologic modelling*. Environmental Modelling with GIS, Oxford University Press, New York, Estados Unidos.
- Ministerio de Fomento (1999). *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*. Dirección general de Carreteras, Ministerio de Fomento, 28 pp.
- MOPU (1987). *Cálculo hidrometeorológicos de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU. Madrid.
- MOPU (1990). *Instrucción 5.2-IC "Drenaje Superficial"*. Dirección General de Carreteras. MOPU. Madrid.
- Overton, D.E. y Meadows, M.E. (1976). *Storm water modeling*. Academic Press, New York, EEUU.
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, EEUU.
- Ramser, C.E. (1927). *Run-off from small agricultural areas*. *Journal of Agricultural Research*, 34(9): 797-823
- Sherman, L.K. (1932). *Streamflow from rainfall by the unit-graph method*. *Engineering News-record*, 108 (7): 501-505.
- USDA-SCS (1985). *National Engineering Handbook, Section 4-Hydrology*. United States Government Printing Office, Washington D.C., Estados Unidos.
- USDA-SCS (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release nº 55, United States Government Printing Office, Washington D.C., EEUU.