CURSOS E CONGRESOS

ACTAS
DE LA IX REUNIÓN NACIONAL
DE GEOMORFOLOGÍA
Santiago de Compostela,
13-15 de septiembre de 2006

Geomorfología y territorio

EDICIÓN A CARGO DE
Augusto Pérez Alberti
Juan López Bedoya

UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA
publicacións

Geomorfología y territorio

Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología

Santiago de Compostela,
13-15 de septiembre de 2006

Edición a cargo de

Augusto Pérez Alberti
Juan López Bedoya

2006

Universidade de

Santiago de Compostela

GEOMORFOLOGÍA y territorio : Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Santiago de Compostela, 13-15 de septiembre de 2006 / edición a cargo de Augusto Pérez Alberti, Juan López Bedoya. – Santiago de Compostela : Universidade, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, 2006. – 1016 p. ; 24 cm. – (Cursos e Congresos da Universidade de Santiago de Compostela ; 171). – D.L.C.1980-2006. – ISBN 84-9750-641-3. ISBN 978-84-9750-641-0.

1. Xeomorfoloxía-Congresos. I. Pérez Alberti, Augusto, ed.lit. II. López Bedoya, Juan, ed lit. III. Universidade de Santiago de Compostela. Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, ed. IV.Serie

551.4(063)

© **Universidade de Santiago de Compostela, 2006**

Edita
Servizo de Publicacións e Intercambio Científico
Campus universitario sur
15782 Santiago de Compostela
www.usc.es/spubl

Maquetación e Impresión
RELLA S.L. Artes Gráficas
Avda. Castelao, 18 - baixo
Santiago de Compostela

Dep. Legal C-1980/2006
ISBN 84-9750-641-3 **ISBN** 978-84-9750-641-0

ESTIMACIÓN DE LA CARGA SÓLIDA EN AVENIDAS DE DERRUBIOS MEDIANTE MODELOS GEOMECÁNICOS, HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS COMBINADOS: VENERO CLARO (ÁVILA)

JOSÉ MARÍA BODOQUE DEL POZO*, ANDRÉS DÍEZ HERRERO, JAVIER DE PEDRAZA GILSANZ***, JOSÉ FRANCISCO MARTÍN DUQUE*** y FRANCISCO OLIVERA******

* Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Facultad de Ciencias del Medio Ambiente, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus de la Fábrica de Armas, Avda. Carlos III s/n, 45071 Toledo. josemaria.bodoque@uclm.es

** Área de Riesgos Geológicos, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente, Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. andres.diez@igme.es

*** Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Avda. José Antonio Nováis s/n, 28040 Madrid. javierp@geo.ucm.es; josefco@geo.ucm.es

**** Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas (USA). folivera@civil.tamu.edu

Resumen: La reconstrucción de los parámetros físicos (caudal, velocidad, precipitación causante, carga sólida…) de eventos de avenidas de derrubios (*debris flood*) acontecidos en el pasado, suele ser un proceso complejo. El uso combinado de modelos geomecánicos, hidrológicos e hidráulicos en las corrientes fluviales donde han tenido lugar estos eventos es una alternativa metodológica válida para su análisis. Con este objetivo, se ha establecido una densa red de instrumentación meteorológica (pluviómetros de registro continuo) e hidrológica (limnímetro de presión) en una cuenca torrencial de montaña ubicada en la Sierra de Gredos, donde tuvo lugar un gran evento de avenida de derrubios en el año 1997. A partir de la información suministrada por este instrumental en eventos de crecida ordinaria, y de información cartográfica soportada por un SIG, se ha elaborado y calibrado un modelo del funcionamiento hidrológico sobre la aplicación informática HEC-HMS. En paralelo se ha realizado un levantamiento topográfico detallado, usando estación total y receptor GPS diferencial, en varias secciones transversales del cauce donde se produjo resalto hidráulico y el flujo pasó por régimen crítico; y se han inferido los caudales totales

(sólidos+líquidos) que circularon por dichas secciones durante el último gran evento de avenida de derrubios. También se ha estimado la precipitación umbral mínima desencadenante mediante un modelo geo-mecánico empleando el concepto de ladera infinita. Introduciendo en el modelo hidrológico calibrado la precipitación umbral desencadenante, y por comparación los caudales totales estimados con métodos hidráulicos, se ha llegado a aproximar los órdenes de magnitud de la carga sólida transportada.
Palabras clave: avenida de derrubios; hidrología; carga sólida; Ávila; España.

Title: Combined geo-technical, hydrological and hydraulic methods for the reconstruction of debris flood events: Venero Claro (Ávila, Spain).

Abstract: The combined use of hydro-geotechnical and hydraulic models is a suitable method to simulate debris flood. To this end, a meteorological (rain gauges) and hydrological (water level logger) monitoring was established in a torrential watershed, where took place an important debris flood event in 1997. The information provided for this gauges, along with the implementation of a natural slope stability model, have made the evaluation of the triggering rainfall possible. Likewise, with this data the hydrological response of the watershed, as a result of the abovementioned event, was estimated by developing a precipitation-runoff model in HEC-HMS. On the other hand, the critical-depth method was applied in order to determine the peak discharge of the debris flood. Finally, the transport sediment load was defined by subtracting the peak discharges obtained after the critical-depth method and the precipitation-runoff model were developed.
Key words: debris flood; hydrology; sediment load; Ávila; Spain.

1. INTRODUCCIÓN

Los denominados flujos hiperconcentrados abarcan una amplia gama de fenómenos entre la circulación de corrientes torrenciales con escasa carga de sedimento transportada ("aguas claras"; Smart & Jaeggi, 1983), y las corrientes de derrubios (*debris flow*), en relación con los movimientos de ladera. Entre ambos extremos, Figuran las denominadas avenidas de derrubios (*debris flood*), como flujos torrenciales con alta carga de sedimento, pero a los que todavía se les pueden aplicar los principios de la dinámica fluvial (Aulitzky, 1982).

El análisis de las avenidas de derrubios se puede abordar desde dos aproximaciones metodológicas: directa, intentando estudiar el fenómeno mientras tiene lugar, midiendo parámetros físicos del mismo (velocidad, densidad, volumen de carga sólida, etc.), o sobre modelos a escala en laboratorio; e indirecta, mediante el estudio de fenómenos pasados y la aplicación de modelos y ecuaciones para reproducir su funcionamiento pasado y su potencial desencadenamiento futuro. Ante la dificultad de aplicar la aproximación directa, ya que son fenómenos temporalmente casi instantáneos, espacialmente casi aleatorios y muy difíciles de monitorizar, normalmente se estudian mediante modelos físico-matemáticos. Estos modelos y ecuaciones intentan calcular parámetros hidrológicos (caudales total, líquido y sólido) e hidráulicos (velocidad, profundidad, densidad...).

Sin embargo, muchas veces estos modelos, por separado, no aportan suficiente información, por lo que es necesario combinarlos o encadenarlos para reconstruir adecuadamente el fenómeno. Este es precisamente el objetivo del presente trabajo, utilizar de forma combinada modelos hidro-geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos para intentar analizar en profundidad las avenidas de derrubios que tienen lugar en una corriente torrencial ubicada en una zona montañosa de la península Ibérica (Sierra de Gredos, Sistema Central español). En concreto, se pretende estimar la precipitación umbral desencadenante de una avenida de derrubios ocurrida el día 18 de diciembre de 1997, el caudal punta total del flujo, y determinar el porcentaje del mismo que correspondía a carga sólida transportada.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL EVENTO

El arroyo Cabrera es una corriente fluvio-torrencial, afluente del río Alberche (cuenca del Tajo), formada por la confluencia de diversos arroyos, en la vertiente septentrional de la sierra del Valle (Sierra de Gredos, Sistema Central español).

La cuenca vertiente al arroyo tiene una extensión aproximada de 15.5 Km^2, presentando una forma subtriangular (Figura 1). El desnivel máximo dentro de la cuenca es de 1188 m en una longitud lineal de 5500 m, definiendo una pendiente media del 21.6%.

La temperatura media anual es de 14.6ºC; la media de las mínimas es de 6.3ºC (el mes más frío es enero); la media de las máximas equivale a 24.8ºC (el mes más caluroso es julio). La precipitación media anual es de 414 mm; el mes que registra mayor cantidad de precipitación es noviembre, con 52.59 mm de media; agosto es el mes en el que menos llueve, al registrar únicamente 9.50 mm.

El sustrato litológico son granitoides y formaciones superficiales de edad cuaternaria constituidos por aglomerados, gravas, arenas, y limos que cubren las laderas, fondos de valle y depresiones tipo nava (Díez, 2001). Los suelos son fundamentalmente entisoles (desarrollados sobre mantos de meteorización de los materiales graníticos), fluvisoles e inceptisoles. La vegetación está

Figura 1. Localización de la cuenca hidrográfica del arroyo Cabrera en el marco de la península Ibérica, dentro de la cuenca del río Alberche, y en la vertiente septentrional de la Sierra del Valle.

formada en un 43% por *Pinus pinaster*, un 40% por piorno serrano (*Cytisus oromediterraneus*), y en menor medida también aparecen *Quercus pyrenaica, Pinus sylvestris y Alnus glutinosa.*

El día 18 de diciembre de 1997, en torno a las 0.30 horas, tuvo lugar un evento torrencial repentino a lo largo del arroyo Cabrera. Con anterioridad, durante los meses de noviembre y diciembre de 1997, la precipitación acumulada en la vertiente septentrional de la sierra del Valle fue de 817.7 mm. La semana anterior al evento se habían producido precipitaciones en forma de nieve, por lo que la masa de suelo ya se presentaba en buena medida saturada (Díez, 2001).

Durante la noche de 18 de diciembre, el evento extremo de precipitación, desencadenó en el fondo de una vaguada de La Atalaya un movimiento gravitacional de tipo mixto, con deslizamiento en cabecera (generando una grieta de coronación). Paralelamente, se incorporaban los derrubios que tapizan las laderas y que eran movilizados por zapamiento. La gran masa de bloques (bolos graníticos) y material fino (arenas y limos de meteorización) fue ganando velocidad como resultado de la licuefacción del material al recibir los aportes de agua de los afluentes crecidos (Figura 2).

Figura 2. Lecho rocoso del canal del arroyo y manto de derrubios depositados por el evento de avenida del 18 de diciembre de 1997.

3. METODOLOGÍA

Con el fin de abordar los objetivos planteados, se implementaron dos aproximaciones metodológicas (hidro-geomecánica e hidráulica) que, a su vez, fueron complementadas con el desarrollo de un modelo hidrológico de precipitación- escorrentía (Figura 3).

El modelo hidro-geomecánico (Dietrich & Montgomery, 1998), permitió estimar la lluvia crítica umbral que desencadenó el evento objeto de estudio. Para ello se aplicó un análisis de estabilidad de laderas, basado en el concepto de ladera infinita (Skempton & DeLory, 1957). Los resultados que de él se obtuvieron, se integraron en un modelo hidrológico simplificado (Beven & Kirkby, 1979; O' Loughlin, 1986).

Para determinar el caudal punta que circuló por el arroyo Cabrera como resultado de la avenida de derrubios de 18 de diciembre de 1997, se utilizó el método del calado crítico (Chow, 1959; Jarret, 1987; O' Connor & Costa, 1993; Díez, 2001). Este método se basa en las características del flujo crítico (Chow, 1959), requiriendo de la selección previa

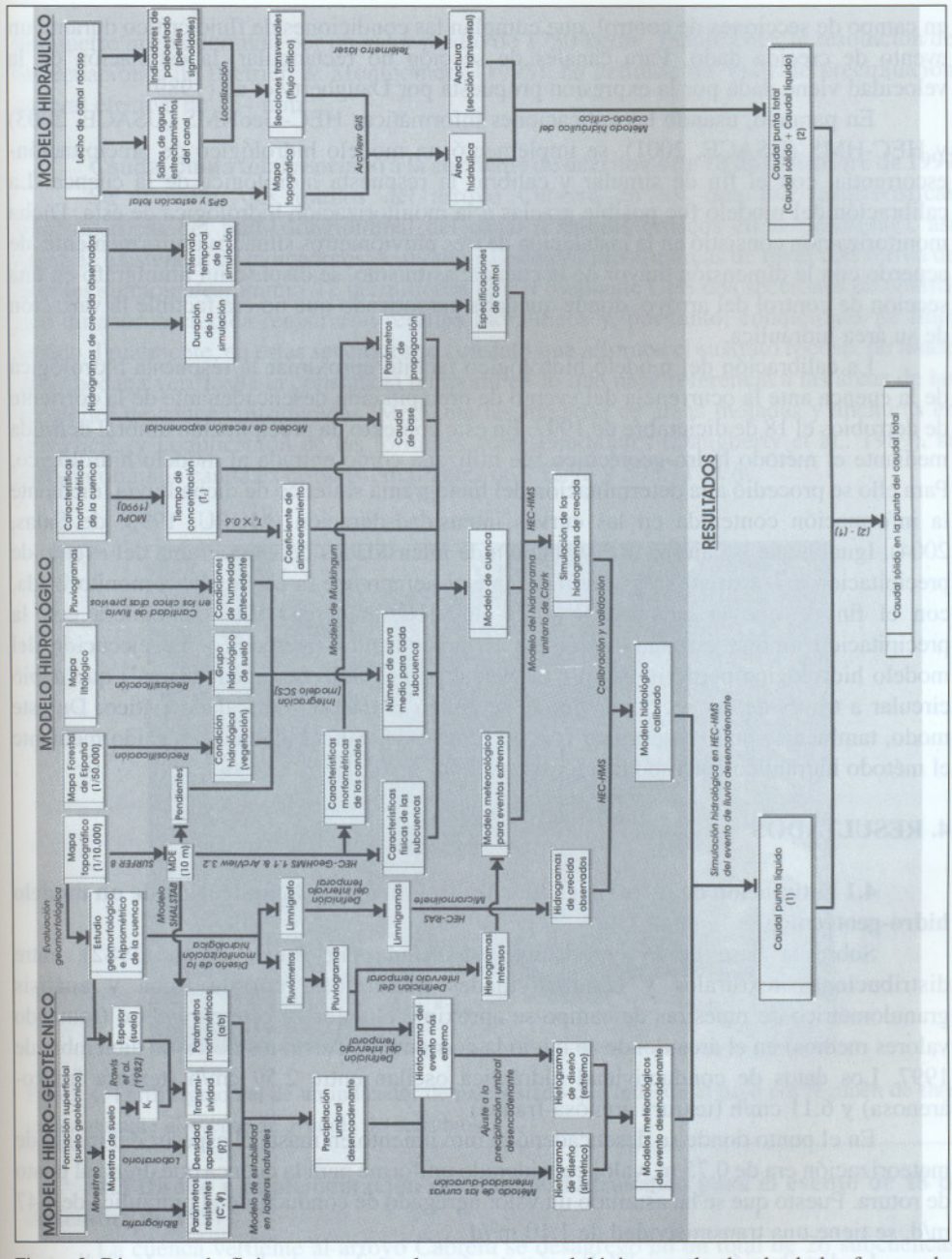

Figura 3. Diagrama de flujo que muestra el esquema metodológico empleado, desde las fuentes de datos a los resultados finales. En relación con el modelo hidro-geomecánico: C'= cohesión efectiva; f'= ángulo de fricción interna efectiva; rs= densidad aparente; a/b= donde a es el área contribuyente ladera arriba, y b es la longitud del contorno.

en campo de secciones de control, que cumplan las condiciones de flujo crítico durante un evento de crecida dado. Para canales de sección no rectangular, la estimación de la velocidad viene dada por la expresión propuesta por Daugherty et al. (1989).

En paralelo, usando las aplicaciones informáticas HEC-GeoHMS (USACE, 2003) y HEC-HMS (USACE, 2001), se implementó un modelo hidrológico de precipitación-escorrentía, con el fin de simular y calibrar la respuesta hidrológica de la cuenca. La calibración del modelo fue posible gracias a la monitorización hidrológica de ésta. Dicha monitorización consistió en la instalación de tres pluviómetros situados uniformemente, de acuerdo con la dimensión mayor de la cuenca; asimismo, se dispuso un limnígrafo en una sección de control del arroyo, donde quedaba garantizado que no era factible la variación de su área hidráulica.

La calibración del modelo hidrológico facilitó aproximar la respuesta hidrológica de la cuenca ante la ocurrencia del evento de precipitación desencadenante de la corriente de derrubios el 18 de diciembre de 1997. En este contexto, la precipitación umbral definida mediante el método hidro-geotécnico fue utilizada como entrada al modelo hidrológico. Para ello se procedió a la determinación del hietograma sintético de dicha lluvia, mediante la información contenida en las curvas intensidad-duración (MOPU, 1990; de Salas, 2004). Igualmente, se ajustó la distribución de intensidades del hietograma del evento de precipitación más extremo registrado durante el tiempo que la cuenca lleva monitorizada, con el fin de que la cantidad total de lluvia definida por éste coincidiera con la precipitación umbral estimada mediante el método hidro-geotécnico. La ejecución del modelo hidrológico permitió estimar el caudal punta (flujo de 'aguas claras') que debió circular a través de las secciones donde se aplicó el método del calado crítico. De este modo, también se pudo determinar qué porcentaje del caudal punta establecido mediante el método hidráulico correspondía a carga sólida.

4. RESULTADOS

4.1 Estimación de la lluvia crítica umbral mediante la aplicación de un modelo hidro-geotécnico

Sobre la base de la correlación establecida por Rawls et al. (1982), entre distribuciones texturales y conductividades hidráulicas, con la toma y análisis granulométrico de muestras de campo se aproximó el valor de este parámetro (tomando valores medios) en el área donde se inició la corriente de derrubios de 18 de diciembre de 1997. Los datos de conductividad hidráulica oscilan entre 2.59 cm/h (textura franco-arenosa) y 6.11 cm/h (textura arenosa-franca).

En el punto donde se desencadenó el movimiento en masa, el espesor del manto de meteorización era de 0.75 m, valor considerado uniforme para la cuenca que drena al punto de rotura. Puesto que se ha asumido un valor agregado de conductividad hidráulica de 1.47 m/d, se tiene una transmisividad de 1.10 m^2/d.

La distribución espacial del parámetro área contribuyente, fue estimada mediante la aplicación informática SHALSTAB (Dietrich & Montgomery, 1998). De este modo, se definió un área contribuyente para el punto donde se inicio la rotura igual a 547 m^2/m, siendo 28.4° la pendiente en el punto. En lo que hace referencia a la densidad aparente, este

parámetro queda definido por un valor medio de 1730 kg/m^3. Finalmente, la resolución de las ecuaciones de Dietrich & Montgomery (1998), ha definido un valor de precipitación umbral efectiva de 154 mm.

Caudal punta total asociado a la corriente de derrubios de 18 de diciembre de 1997

Se eligieron dos tramos del arroyo Cabrera en los que las características morfométricas del perfil longitudinal del canal (cambios bruscos en la pendiente), así como la existencia de indicadores de índole paleohidráulico (marcas de nivel con forma de perfiles sigmoidales; Figura 4), permitieron ubicar mediante GPS dos secciones de control que durante la crecida registraron resaltos hidráulicos y, por tanto, condiciones de flujo crítico. Igualmente, en estas secciones se constató que afloraba el sustrato rocoso, de modo que quedaba verificada la constancia temporal en lo que hace referencia a las áreas de las secciones de cauce consideradas. Mediante las medidas de áreas mojadas y anchuras en superficie, y la aplicación de las fórmulas correspondientes (Daugherty et al., 1989), se calcularon unos caudales críticos circulantes de 752.92 y 593.11 m^3/s.

Figura 4. Perfil sigmoidal de un indicador de paleoestado que muestra el paso por régimen de flujo crítico durante el evento de avenida de derrubios.

4.3 Diseño e implementación del modelo hidrológico para el evento de 18 de diciembre de 1997

La cuenca vertiente al arroyo Cabrera se desagregó en un total de 26 subcuencas, atendiendo a criterios morfométricos (básicamente pendientes), litológicos (presencia de mantos de alteración, coluviones, canchales…), hidrogeológicos (espesor relativo de masa de suelo), vegetación y usos del suelo (Figura 5).

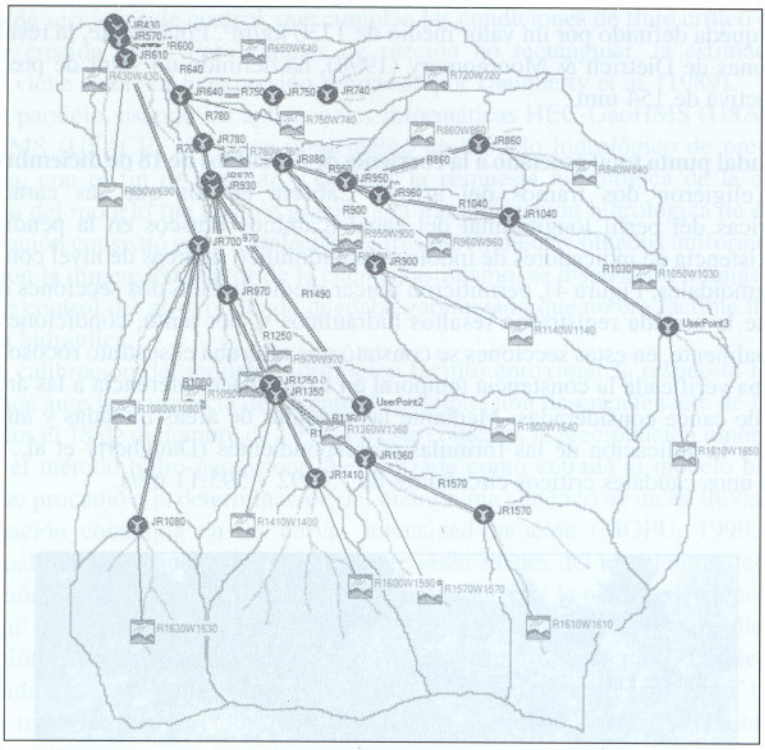

Figura 5. Modelo de cuenca elaborado en la aplicación HEC-HMS utilizando la aplicación HEC-GeoHMS.

Los resultados derivados de la implementación del modelo hidrológico y de su posterior calibración con el evento de 25 de octubre de 2005, permiten concluir que existe un ajuste razonable entre los hidrogramas observado y simulado (Figura 6), tanto en lo referente a su forma como al momento en que tienen lugar las puntas: caudales punta, 4.32 y 4.20 m^3/s; volúmenes totales de los hidrogramas, 370.20 y 365.50 km^3; y tiempos de punta, 16.20 y 17.10 h; respectivamente. Con el fin de optimizar los ajustes, durante el proceso de calibración se modificaron automáticamente en HEC-HMS los valores asociados a los parámetros: a) número de curva; b) abstracciones iniciales ó umbral de escorrentía; c) tiempo de concentración; d) coeficiente de almacenamiento; e) *k* y *x* de Muskingum.

Siguiendo el método de las curvas intensidad-duración, e introduciendo un valor de precipitación diaria desencadenante de 160.8 mm, I_1/I_d= 10 (Témez, 1987), duración 28 horas, e intervalo temporal 0.33 h (menor que 0,2 ¥ T_C), se obtienen los valores de precipitación correspondientes a cada intervalo de un hietograma sintético y supuesto simétrico, que define un valor de intensidad punta de 118.20 mm/h.

Por otro lado, se estimó el hietograma sintético (D_t= 0.166 horas) para la precipitación umbral desencadenante obtenida mediante el método hidro-geotécnico. Dicho hietograma, se definió sobre la base de la distribución temporal del evento

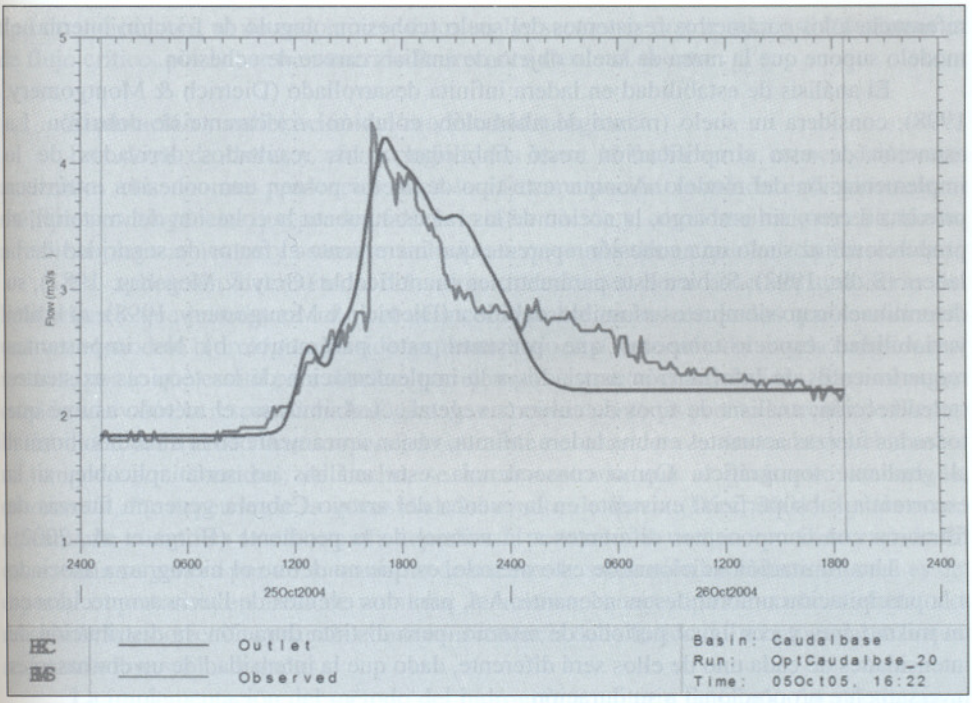

Figura 6. Comparación entre el hidrograma simulado y el observado para un evento de crecida ordinaria de calibración (25 de octubre de 2005).

acontecido entre el 18 y el 20 de octubre de 2004. La punta del hietograma resultante determina una intensidad horaria de 94 mm, mientras que la cantidad total de lluvia es de 234 mm.

El modelo de cuenca para las secciones de calado crítico establece una superficie de 4 km^2, habiendo sido desagregado en tres subcuencas. Los resultados de las dos simulaciones realizadas, con distribución de lluvia según hietograma patrón y mediante las curvas I-D, permiten una estimación de los caudales sólidos (en la punta de caudal total) de 663.46 y 640.65 m^3/s. Cifras que pueden considerarse en el mismo orden de magnitud, y por lo tanto una aproximación válida, y constituyen entre el 95.19 y el 98.58 % del caudal total.

5. DISCUSIÓN

Modelo hidro-geotécnico

El modelo hidrológico-geotécnico requiere para su aplicación del cumplimiento de una serie de hipótesis. Así, la intensidad de la lluvia es siempre inferior a la capacidad de infiltración que posee el suelo. Como resultado, la escorrentía generada en las laderas es siempre del tipo subsuperficial o hipodérmico; igualmente el modelo asume condiciones de estacionaridad para el régimen hidráulico de la escorrentía. Finalmente, en lo que hace

referencia a los parámetros resistentes del suelo (cohesión, ángulo de fricción interna) el modelo supone que la masa de suelo objeto de análisis carece de cohesión.

El análisis de estabilidad en ladera infinita desarrollado (Dietrich & Montgomery, 1998), considera un suelo (manto de alteración, coluvión.....) carente de cohesión. La asunción de esta simplificación restó fiabilidad a los resultados derivados de la implementación del modelo. Aunque este tipo de suelos poseen una cohesión intrínseca próxima a cero, sin embargo, la acción de las raíces aumenta la cohesión del material, al proporcionar al suelo una cohesión aparente que incrementa el factor de seguridad de la ladera (Sidle, 1992). Si bien este parámetro es cuantificable (Gray & Megahan, 1981), su determinación no siempre es asumible, debido a (Dietrich & Montgomery, 1998): a) la alta variabilidad espacio-temporal que presenta este parámetro; b) los importantes requerimientos de información asociados a la implementación de las técnicas existentes (teledetección, análisis de tipos de cubierta vegetal...). Asimismo, el método asume que todas las fuerzas actuantes en una ladera infinita, varían únicamente en la dirección normal al gradiente topográfico. Como consecuencia, este análisis no sería aplicable, si la escorrentía subsuperficial existente en la cuenca del arroyo Cabrera generara fuerzas de filtración con componentes diferentes a la normal de la pendiente (Borga et al., 2002).

Una limitación adicional de este método, es que no define el hietograma asociado a la precipitación umbral desencadenante. Así, para dos eventos de lluvia acontecidos en un mismo área y con igual periodo de retorno, pero distinta duración, la distribución de intensidades de cada uno de ellos será diferente, dado que la intensidad de un chubasco es inversamente proporcional a su duración.

Método hidráulico del calado-crítico

La determinación del caudal punta mediante el uso de técnicas paleohidráulicas, lleva asociada una serie de incertidumbres que están relacionadas con (Jarret & Malde, 1987): a) la elección de los coeficientes de rugosidad; b) la modificación de la geometría del canal; c) la representatividad de los indicadores de paleoestado utilizados, o niveles de agua alcanzados.

En canales de alta pendiente (>0,002 m/m) se dan secciones donde el flujo va a crítico (Jarret, 1987), tal como se constató en el arroyo Cabrera. Bajo esta circunstancia, puede obviarse la incertidumbre asociada a la selección de los coeficientes de Manning, dado que el caudal punta se puede determinar aplicando el método del calado-crítico, que únicamente depende de las características geométricas de la sección (Alcoverro et al., 1999). En lo que hace referencia a la segunda fuente de incertidumbre (modificación en la geometría del canal), ésta fue minimizada al considerarse únicamente secciones en las que el lecho es rocoso. Finalmente, de acuerdo con Baker et al. (1988), la altura máxima de lámina de agua inferida para un evento dado mediante indicadores de paleoestado, es inferior a la que en realidad define la onda de avenida. Como resultado, los caudales punta estimados para el evento de 18 de diciembre de 1997 posiblemente estén infravalorados. A este respecto, la consideración de marcas de aguas altas, entendiendo por tales los flotantes (restos acumulados de vegetación), o las líneas de barro en muros, puentes..., optimiza la aproximación del calado que debe darse cuando se alcanza el caudal punta para un evento dado. No obstante, para el caso que nos ocupa no fue posible hacer uso de este

tipo de indicadores, al no encontrarse éstos en las secciones donde se constató existencia de flujo crítico, por haber transcurrido varios años desde el evento.

Simulación y calibración del modelo hidrológico

Los datos de lluvia y aforos registrados hasta la fecha en la cuenca deben ser analizados con enorme prudencia, pues la instrumentación instalada está sometida a múltiples contingencias que pueden falsear la información y, como resultado de ello, llevar a realizar planteamientos y asumir conclusiones que nada tienen que ver con la realidad.

La aplicación del método del número de curva lleva asociada una serie de limitaciones, que introducen un nivel de incertidumbre en los resultados que se obtienen una vez el modelo hidrológico ha sido implementado. Así, este método simula condiciones medias, por lo que es útil para diseñar, por ejemplo, estructuras hidráulicas. Sin embargo, cuando se evalúa la respuesta hidrológica de una cuenca ante un evento extremo de lluvia, la fiabilidad del método disminuye, dado que éste no considera la duración del chubasco ni tampoco su intensidad; de hecho, se ha demostrado que el parámetro umbral de escorrentía, P_0, depende de la intensidad del evento de lluvia (Díez, 2001). Igualmente, únicamente cuantifica la escorrentía superficial, por tanto su uso no es válido cuando la escorrentía se genera por un mecanismo de exceso de saturación en laderas, el cual es de especial importancia en áreas de montaña. Asimismo, en este tipo de cuencas el método no simula la escorrentía generada como consecuencia de la fusión del manto nival, o la que se forma sobre suelos helados.

La implementación del método del hidrograma unitario de Clark, para determinar el hidrograma de crecida resultado de la ocurrencia de un evento de lluvia dado, lleva asociada una serie de incertidumbres relacionadas con las hipótesis asumidas por el modelo. Así, el método considera la interacción entre lluvia y escorrentía en una cuenca, considerando ésta como un sistema agregado y lineal. Igualmente, asume uniformidad en relación a cómo se distribuye la lluvia, así como que el hidrograma es único para una cuenca dada e invariante en el tiempo (Chow et al., 1988). Generalmente, en condiciones naturales dichas suposiciones no se satisfacen adecuadamente, lo que conlleva ciertos desajustes entre los hidrogramas simulado y observado que, sin embargo, a efectos prácticos suelen ser asumibles. En este sentido, la elevada desagregación a la que fue sometida la cuenca, se definieron 26 subcuencas para una cuenca de poco más de 15 Km^2, en buena medida queda justificada; téngase en cuenta la alta variabilidad espacio-temporal que presentan los eventos de lluvia convectiva u orográfica-convectiva en cuencas de montaña.

El proceso de calibración automática desarrollado, se ha visto dificultado por la actuación simultánea de varias circunstancias desfavorables. La primera y más evidente tiene que ver con la disponibilidad de un número estadísticamente significativo de eventos de lluvia, que hayan generado respuesta hidrológica en la cuenca. De resultas de este hecho, los valores asignados a cada uno de los parámetros, deben considerarse como una primera aproximación, pero en ningún caso debe hablarse de modelo hidrológico totalmente calibrado y mucho menos de validación del modelo. Por otro lado, la calibración automática del modelo requiere de ordenadores con una capacidad de procesado importante, dado que se trata de un proceso iterativo.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estimado la lluvia crítica umbral (154 mm), que desencadenó la avenida de derrubios de 18 de diciembre de 1997, en el arroyo Cabrera (Sierra de Gredos, Sistema Central español), habiéndose utilizado para tal fin un método de análisis de estabilidad basado en el concepto de ladera infinita, para después integrar los resultados obtenidos en un modelo hidrológico simplificado. Por otro lado, haciendo uso del método hidráulico del calado crítico, se determinó el caudal punta que circuló por dos secciones transversales al arroyo Cabrera (753 y 593 m^3/s), donde se constató mediante evidencias de campo, que las condiciones de flujo durante el evento estudiado fueron críticas. Seguidamente, gracias a la monitorización hidrológica diseñada para la cuenca del arroyo, se pudo implementar un modelo de precipitación-escorrentía con el fin de simular y calibrar la respuesta hidrológica de la cuenca. Precisamente la calibración del modelo, permitió aproximar el comportamiento hidrológico de la cuenca como resultado de la ocurrencia del evento de lluvia desencadenante. De este modo se pudo determinar qué porcentaje del caudal punta total correspondía a caudal de aguas claras, así como el correspondiente a carga sólida (entre el 95 y el 98 %). Con todo, la metodología implementada lleva asociada una serie de limitaciones que introducen elementos de incertidumbre en los resultados obtenidos.

Como conclusiones finales, destacar lo novedoso de la metodología implementada, así como que la monitorización hidrológica diseñada para la cuenca del arroyo Cabrera constituye un ejemplo único en el ámbito territorial del Sistema Central español.

AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones que han desembocado en este trabajo han sido parcialmente financiadas por los proyectos de investigación RISGREDOS (REN 2002-01361) del Plan Nacional de I+D, y GEORIADA (60/2005) de la Convocatoria I+D del IGME. Los autores quisieran agradecer su colaboración a: el Servicio Territorial de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, y en particular al agente medioambiental José Luis Galán; la Obra Social de Caja Ávila, y en particular a D. Florencio Villarejo; el Asocio de Ávila, el Ayuntamiento de Navaluenga y la Confederación Hidrográfica del Tajo (Ministerio de Medio Ambiente). Este trabajo forma parte de la memoria de la tesis doctoral del primero de los autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcoverro, J., Corominas, J., Gómez, M., 1999. The Barranco de Arás flood of 7 August 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain). Engineering Geology, 51, 237-255.

Aulitzky, H., 1982. Preliminary two-fold classification of torrents. Mitteil. der Forst. Bundesversuchsanstalt, Heft 144, 243-256.

Baker, V.R., Kochel R.C., Patton, P.C., (eds.), 1988. Flood Geomorphology. New York: John Wiley, 503p.

Beven, K.J., Kirkby M.J., 1979. A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, 24(1), 43-69.

Borga, M., Fontana, G.D., Cazorzi, F., 2002. Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasy-dynamic wetness index. Journal of Hydrology, 265, 56-71.

Chow, V.T., 1959. Open-channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill.

Daugherty, R.L., Franzini, J.B., Finnemore, E.J., 1989. Fluid mechanics with Engineering Applications. Singapore: McGraw Hill.

Dietrich, W.E., Montgomery, D.R., 1998. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement. Technical Report.

Díez, A., 2001. Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche. Modelos y S.I.G. para la gestión de riberas. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Gray, D.H., Megahan, W.F., 1981. Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith. Res. Pap., INT-271. Ogden, UT: Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture.

Jarret, R.D., 1987. Errors in slope-area computations of peak discharges in mountain streams. Journal of Hydrology, 96, 53-67.

Jarret, R.D., Malde, H.E., 1987. Paleodischarge of the late Pleistocene Bonneville flood, Snake River, Idaho, computed from new evidence. Geol. Soc. Am. Bull., 99, 127-134.

MOPU, 1990. Instrucción 5.2.-I.C., Drenaje superficial. Colección Textos de la DGC, 37. Madrid: Dirección General de Carreteras.

O'Connor, J.E., Costa, J.E., 1993. Geologic and hydrologic hazards in glacierized in Norh America resulting from 19th and 20th century global warming. Nat. Hazards, 8, 121-140.

O'Loughlin, E.M., 1986. Prediction of surface saturation zones on natural catchments by topographic analysis. Water Resour. Res., 22(5), 794-804.

Rawls W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, KE., 1982. Estimating of soil water properties. Transactions American Society of Agricultural Engineers, 25 (5), 1316-2320.

de Salas, L., 2004. Regionalización de leyes IDF para el uso de modelos hidro-meteorológicos de estimación de caudales. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Sidle, R.C., 1992. A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. Water Resour. Res., 28, 1897-1910.

Skempton A.W., DeLory F.A., 1957. Stability of natural slopes in London Clay. Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 2, 378–81.

Smart, G.M., Jaeggi, M.N.R., 1983. Sediment transport on Steep Slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Zürich: ETH Zürich.

Témez, J.R., 1987. Cálculo hidro-meteorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Madrid: Dirección General de Carreteras, MOPU.

US. Army Corps of Engineers (USACE), 2001. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual (Version 2.1). Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2003. Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS (Version 1.1). Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.

CURSOS E CONGRESOS
Nº 171

G.I.X.A.
Grupo de Investigacións Xeomorfolóxicas e Ambientais

Sociedad Española
de Geomorfología

XUNTA DE GALICIA
CONSELLERÍA DE MEDIO AMBIENTE
E DESENVOLVEMENTO SOSTIBLE
Dirección Xeral de Conservación da Natureza

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA