

PRIMERA APROXIMACIÓN AL CÁLCULO DE AVENIDAS EN LOS CAÑONES FLUVIOKÁRSTICOS DE LA SIERRA DE GUARA (HUESCA, ESPAÑA)

J. A. CUCHÍ¹
J. SETRINI²

RESUMEN.— Dentro de una aproximación indirecta para estudiar la morfología de cañones fluviokársticos se han calculado los parámetros hidrológicos básicos de las avenidas con un periodo de retorno de dos años en diversas cuencas del Parque Natural de la Sierra de Guara (Huesca, España). Los resultados, obtenidos en un encadenamiento de estimaciones, son cualitativamente aceptables para las subcuencas más sencillas. El método proporciona, además, información útil para la prevención de accidentes por avenidas repentinas.

ABSTRACT.— *A first approach to the calculation of floods in the fluvio-karstic canyons of Sierra de Guara (Huesca, Spain).* As an indirect approach to the study of the morphology of fluvio-karstic canyons of the Natural Park of Sierra de Guara, the basic hydrologic parameters of the floods with a return period of two years, are calculated. The results, from a link of estimates, shows acceptable results for the simplest subbasins. The method, also, shows useful information to prevent accidents by flash floods.

KEY WORDS.— Guara, fluvio-karst, hydrology, floods, canyons.

¹ Escuela Politécnica Superior de Huesca. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 HUESCA. cuchi@posta.unizar.es

² ELDORADO. Misiones. República Argentina.

INTRODUCCIÓN

El modelado fluviookárstico constituye uno de los aspectos fundamentales del Parque Natural de la Sierra y Cañones de Guara (LÓPEZ-MARTÍNEZ y FREIXES, 1989; CUCHÍ *et al.*, 1997). Por ese motivo, sus cañones poseen un gran atractivo deportivo (BIARGE y SALAMERO, 1991).

Se han realizado diversos estudios geomorfológicos sobre la zona, en especial el realizado por RODRÍGUEZ-VIDAL (1986). Sin embargo, subsisten diversas incógnitas sobre la génesis y evolución de los cañones. Por un lado, se constata una general ausencia de terrazas altas dentro de los estrechos. Por otro lado, las paredes de estos presentan numerosos abrigos, generalmente desprovistos de rellenos, a pesar de la amplia extensión de los canchales periglaciares. Tampoco se conoce el origen y edad de los abrigos y únicamente se dispone de datos arqueológicos en algunos de estos.

Por ello se están intentando diversos enfoques indirectos para avanzar en el conocimiento de las formas a diferente escala en los cañones. Uno de estos se centra en el estudio de los parámetros hidrológicos actuales e intenta su correlación con diversos rasgos geomorfológicos y botánicos. Presentan especial interés las avenidas, que corresponden a momentos de máxima energía fluvial, y que producen modificaciones de la morfología de los cauces. Además, este enfoque permite analizar el riesgo para la práctica del barranquismo. Varios accidentes mortales, en la zona del Parque, se han debido a avenidas que han arrastrado a deportistas que se encontraban en el cauce.

Existe, por lo tanto, un doble interés en estudiar las avenidas en los cañones fluviookársticos del Parque Natural de Guara. NANÍA y CUCHÍ (1995) realizaron unos tanteos para la cuenca alta del río Vero, situado en su extremo oriental. El presente trabajo constituye una primera aproximación al conjunto de los cañones de Guara con estimación de los caudales máximos y parámetros asociados en función de la duración de precipitaciones para un periodo de retorno de dos años. Este periodo hace factible realizar comprobaciones de campo dado que solo hay una estación de aforos utilizable para la zona de cañones, en el Vero, en Lecina.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROLÓGICO

La geología del área, estudiada recientemente por MILLÁN (1996), corresponde al frente de cabalgamiento del manto de corrimiento de Monte Perdi-

do sobre el valle del Ebro, zonificada en bandas subparalelas, de dirección este-oeste, complicado por anticlinales de eje norte-sur. El Keuper forma la base del cabalgamiento y núcleos de pliegues. Faltan Jurásico y Cretácico inferior. El Cretácico superior tiene poca potencia y es de constitución detrítica y caliza. La facies «Garum» es de tipo continental, formado por arcillas rojizas separadas por dos niveles calcáreos lacustres. El Eoceno medio (Formación. Guara) es de tipo calcáreo; alcanza en Gorgas Negras hasta un kilómetro de potencia y constituye el armazón de las sierras. Más modernas son las secuencias terrígenas marinas de las formaciones Arguis y Belsué, así como las areniscas del Monrepós, ya en el Oligoceno. De esta misma edad y del Mioceno son los materiales cabalgados del valle del Ebro, depositados en una serie de abanicos aluviales con graduación granodecreciente hacia el sur.

La hidrología de la zona se organiza en seis ríos principales y varios afluentes importantes subcuencas: Isuela, Flumen, Guatizalema, Alcanadre, Balcés-Isuala y Vero (Fig. 1). Afluentes de interés deportivo son los ríos Calcón, Formiga, Mascún y Fornocal. La mayoría de ellos tienen, al norte de las sierras, una cuenca superior relativamente importante, en los materiales impermeables de las formaciones Arguis, Belsué y Monrepós-Campodarbe donde algunos cauces, como el Guatizalema y el Flumen tienen cursos de tipo subsecuente. Por antecendencia y sobreimposición, por un proceso aún mal conocido, los cauces se abrieron paso hacia el sur a través de la barrera calcárea de la Formación Guara. Este paso, en ocasiones claramente a favor de fracturas, se traduce en profundos cañones con una morfología característica. Tras el paso de las barreras, los cauces siguen encajados en los materiales del Mioceno. Los conglomerados, por dureza y baja permeabilidad, dan enérgicos modelados malliformes con profundos cañones como las Palomeras del Flumen, estrechos de Balcés y Fornocal.

METODOLOGÍA

Se han definido diez cuencas hidrográficas entre los ríos Isuela y Vero, abarcando el conjunto de cañones de la sierra de Guara. Las más importantes se han subdividido en tramos, en función de la existencia de cañones. Se dedica cierto interés a la cuenca del Vero, donde se han delimitado las cuencas afluentes de Basender, Choca y Fornocal. Sus características físicas principales figuran en la tabla I. Las áreas delimitadas se han establecido según

las divisorias topográficas superficiales, sin tener en cuenta el efecto de la importante karstificación en áreas como el alto Vero (estrechos de Almazorre, barranco de Basender) y en el Alcanadre (Cupierlo, fuente de Mascún).

En el área de estudio solo existen cinco estaciones meteorológicas de las 73 que lista DEL VALLE (1996) para el Prepirineo central y occidental. La red SAIH (Sistema Avanzado de Información Hidrológica) de la Confederación Hidrográfica del Ebro, tiene instalados dos pluviógrafos en Arguis, cuenca del Isuela, y El Coscollar, en la cuenca alta del Vero. Se estima que en la zona alta de la sierra de Guara, en los llanos de Cupierlo, la precipitación anual puede alcanzar los 1.400 mm anuales. Las precipitaciones siguen un esquema de primaveras y otoños relativamente lluviosos separados por estiajes de verano e invierno. El total de precipitaciones en verano, de tipo convectivo, puede alcanzar, estadísticamente, hasta los 250 mm.

Tabla I. Datos físicos de diversas cuencas y subcuencas en el ámbito de la sierra de Guara. La primera columna corresponde con la figura 1. La segunda y tercera columnas presentan la cuenca de estudio y el punto inferior por donde se ha cerrado la cuenca. Las columnas 4 y 5 indican la cota más elevada, en las cercanías de la cabecera del cauce, y el punto por donde se ha cerrado la cuenca o subcuenca. En la última columna se calcula el desnivel entre ambos valores.

		Punto final	Área	Longitud	Alt. máx.	Alt. mín.	Delta H
			km ²	km	m s.n.m.	m s.n.m.	m
1	Isuela	Emb. Arguis	19,933	4,0	1.106	960	146
2	Flumen oeste	Emb. Belsué	26,450	11,6	1.605	900	705
3	Flumen este	Carruaca	10,020	7,8	1.382	900	482
4	Flumen	Salto de Roldán	88,875	22,3	1.605	700	905
5	Guatizalema	Emb. Vadiello	90,500	14,8	1.356	640	716
6	Calcón	Emb. Calcón	12,908	6,5	1.559	870	689
7	Formiga	Confl. Yara	20,650	7,1	1.780	700	1.080
8	Formiga	Gorgonchón	62,250	13,1	1.780	540	1.240
9	Alcanadre	Gorgas Negras	78,617	15,2	1.643	920	723
10	Mascún	Letosa	12,717	4,1	1.094	1.000	94
11	Mascún	Desembocadura	42,375	12,2	1.094	713	381
12	Alcanadre	Codera Naya	158,409	28,9	1.643	620	1.023
13	Balcés	Oscuros	59,050	21,5	1.368	700	668
14	Balcés	Pte. Alberuela	88,458	29,9	1.368	540	828
15	Vero	Aforo Lecina	89,583	21,0	1.200	660	540
16	Basender	Desembocadura	16,967	9,0	1.371	640	731
17	Choca	Desembocadura	10,092	7,7	1.402	620	782
18	Fornocal	Pte. Palomeras	8,717	5,0	944	620	324
19	Vero	Alquézar	133,658	26,3	1.200	480	720



Fig. 1. Ubicación de la zona estudiada, cuencas de trabajo, estaciones meteorológicas y emplazamiento de la estación de aforo de Lecina sobre el río Vero.

Ante la falta de datos y como primera aproximación se han construido una serie de precipitaciones sintéticas a partir del *Mapa de Máximas Precipitaciones* del Ministerio de Fomento (1998). A partir de este se estiman los parámetros Cv y P (coeficiente de variación y valor medio de la precipitación diaria máxima) para un punto situado en el centro de la cuenca en estudio. A partir de ellos se han determinado las precipitaciones e intensidades máximas en 24 horas, para el periodo de retorno de dos años. Dado que rara vez las lluvias duran 24 horas, especialmente durante las tormentas estivales, se han calculado las intensidades para periodos más cortos según MARTÍNEZ DE AZAGRA y NAVARRO (1996). La intensidad para 1 hora se obtiene multiplicado la intensidad diaria por 10,5, según el mapa de relaciones I_1/I_d de España. Para aguaceros de duración diferente se ha empleado la fórmula: $I(t) = 9,25 * I(1) * t^{-0,55}$. Todas las precipitaciones se han estimado en yetogramas tipo uniforme, ante la inexistencia de información sobre este aspecto.

Según el método del US Soil Conservation Service, la escorrentía derivada de una precipitación determinada es función del número de curva de la cuenca (CN). Este parámetro depende de diversos factores, como textura, uso del territorio, estado hidrológico y condiciones hidrológicas precedentes. Ante la inexistencia de trabajos previos de determinación del CN en las cuencas de Guara, se ha optado por calcular este parámetro a partir de una estimación visual del porcentaje superficial de la litología entre calizas, margas y areniscas más conglomerados. A cada una de estas litologías se le ha asignado un valor de CN, también de forma aproximada. Se ha considerado que las margas y las rocas detríticas son relativamente impermeables y que las calizas, son mucho más permeables a efectos de respuesta inmediata a las precipitaciones. Los datos conocidos en el manantial de Fuenmayor (VILLARROEL y CUCHÍ, 2002), con una distancia máxima de 4 km entre las zonas de recarga y descarga, muestran un desfase del orden de 8 horas entre lluvia y punta del caudal en este manantial, que es superior al tiempo punta de un hipotético hidrograma superficial. En este sentido, el drenaje diferido del karst restaría caudal punta, aunque aumentaría el volumen total drenado a medio plazo.

RESULTADOS

A partir de los parámetros físicos de la cuenca, las diferentes intensidades de lluvia y los números de curva, se han calculado los caudales punta mediante el programa ArHymo (MAZA *et al.*, 1993). Este calcula diversos parámetros hidrológicos: caudal punta (Q_{pu}), tiempo a la punta (T_{pu}) e infiltración umbral (I_a), por debajo de la cual no hay escorrentía.

Tabla II. Parámetros del hidrograma unitario de diversas cuencas de la sierra de Guara, a partir del programa ArHymo.

Cuenca	Subcuenca	Q_{pu} <i>m³/s</i>	T_{pu} <i>horas</i>	I_a <i>mm</i>
Isuela	<i>Emb. Arguis</i>	3,3	1,010	35,3
Flumen oeste	<i>Emb. Belsué</i>	3,7	0,997	18,8
Flumen este	<i>Carruaca</i>	1,9	0,711	23,9
Flumen	<i>Salto de Roldán</i>	7,9	1,779	46,9
Guatizalema	<i>Emb. Vadiello</i>	8,9	1,619	25,0
Calcón	<i>Emb. Calcón</i>	2,5	0,607	55,0
Formiga	<i>Confl. Yara</i>	3,8	0,611	64,7
Formiga	<i>Gorgonchón</i>	7,5	1,093	55,0
Alcanadre	<i>Gorgas Negras</i>	7,9	1,566	16,0
Mascún	<i>Letosa</i>	1,8	1,266	13,5
Mascún	<i>Desembocadura</i>	4,7	1,506	32,5
Alcanadre	<i>Codera Naya</i>	11,6	2,320	36,8
Balcés	<i>Oscuros</i>	5,5	1,765	33,9
Balcés	<i>Pte. Alberuela</i>	7,0	2,156	29,8
Vero	<i>Aforo Lecina</i>	7,5	2,152	33,9
Basender	<i>Desembocadura</i>	2,8	0,758	76,2
Choca	<i>Desembocadura</i>	2,0	0,584	76,2
Vero	<i>Alquézar</i>	9,9	2,420	46,9
Fornocal	<i>Pte. Palomeras</i>	1,8	0,640	31,1

En la tabla II se han resumido los datos de los hidrogramas unitarios para las diferentes cuencas estudiadas. Estos son típicos de cada cuenca y corresponden a la respuesta de una precipitación de 1 mm de lluvia eficaz y para una duración dada de lluvia. Se incluyen los valores umbrales de precipitación, por debajo de la cual no se produce escorrentía, al almacenarse el agua en el perfil del suelo.

Una reiterada utilización de ArHymo permite calcular los tiempos hasta la punta y los caudales máximos para una serie de precipitaciones en un

Tabla III. Caudales (Q_{pu}) en m^3 por segundo y tiempos punta (T_{pu}) en horas, obtenidos por el programa ArHymo como respuesta a precipitaciones de diferentes duraciones en varias cuencas de la sierra de Guara. Período de retorno dos años. Los números en la columna horizontal indican la duración (en minutos) de las precipitaciones. Los valores en blanco indican ausencia de escorrentía. Los valores de cero indican resultados con caudales punta por debajo de 10 litros por segundo o tiempos de respuesta por debajo de 0,1 horas.

Cuenca	Subcuenca	Q5	T5	Q10	T10	Q15	T15	Q20	T20	Q30	T30	Q45	T45	Q60	T60	Q120	T120	Q240	T240	Q360	T360	
		<i>m³/s horas</i>																				
Isuela	<i>Emb. Arguis</i>															0,0	0,00	1,3	4,64	4,4	6,46	
Flumen oeste	<i>Emb. Belsué</i>					0,0	0,0	1,0	1,33	2,0	1,6	3,0	1,83	7,4	2,59	15,0	4,39	20,5	6,18			
Flumen este	<i>Carruaca</i>									0,0	0,0	3,0	1,56	1,4	2,42	4,0	4,27	6,1	6,12			
Flumen	<i>Salto de Roldán</i>																0,0	0,0	1,6	7,56		
Guatizalema	<i>Emb. Yadiello</i>									0,0	0,0	1,0	2,5	5,2	3,24	19,9	4,86	37,0	6,80			
Calcón	<i>Emb. Calcón</i>																			0,0	0,0	
Formiga	<i>Confl. Yara</i>																			0,0	0,0	
Formiga	<i>Gorgonchón</i>																			0,0	0,0	
Alcanadre	<i>Gorgas Negras</i>					0,0	0,0	0,8	1,83	2,3	2,0	8,6	2,33	24,8	3,13	46,8	4,7	64,0	6,58			
Masciún	<i>Letosa</i>			0,0	0,0	1,42	0,2	1,50	0,8	1,67	1,4	1,75	3,5	2,00	8,0	2,79	11,9	4,56	14,1	6,33		
Masciún	<i>Desembocadura</i>													0,0	0,0	1,0	3,31	3,4	5,12	9,7	6,63	
Alcanadre	<i>Codera Naya</i>															0,0	0,00	3,1	6,03	16,0	7,42	
Balcés	<i>Oscuros</i>													0,0	0,0	0,0	3,53	3,1	5,29	10,4	7,06	
Balcés	<i>Pie. Alberuela</i>													0,0	0,0	8,0	3,88	8,2	5,61	20,6	7,33	
Vero	<i>Aforo Lecina</i>													0,0	0,0	0,0	3,87	4,1	5,59	14,4	7,32	
Basender	<i>Desembocadura</i>																			0,0	0,0	
Choca	<i>Desembocadura</i>																			0,0	0,0	
Vero	<i>Alquézar</i>																			0,0	0,0	
Fornocal	<i>Pie. Palomeras</i>													0,0	0,0	0,1	2,56	1,5	4,35	3,2	6,15	

rango desde 5 minutos hasta 6 horas. Los resultados se resumen en la tabla III. Los datos en blanco corresponden a situaciones donde no hay efecto de la lluvia sobre los caudales, al infiltrarse toda el agua en el suelo y no existir lluvia eficaz.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados se han obtenido mediante un encadenamiento de estimaciones utilizado habitualmente en ingeniería. Sin embargo, su utilización específica en los cañones fluviokársticos del Parque Natural de Guara tiene que ser considerada como una mera aproximación, por el momento sin validar. A pesar de ello, se pueden sacar algunas indicaciones de utilidad práctica.

Como todas las cuencas tienen un esquema similar, las estimaciones de las precipitaciones adoptan valores muy similares para todas ellas. De hecho se puede considerar un valor muy similar de cálculo para todas las cuencas. Esto permite la posibilidad de simplificar los cálculos para periodos de retorno más elevados. Por lo tanto, son los parámetros fisiográficos y geológicos los que condicionan la respuesta de cada cuenca al aplicar el programa ArHymo. Como ya se ha señalado, las áreas de algunas cuencas podrían modificarse considerando aportes subterráneos de tipo kárstico. No parece fácil, sin embargo, que, por el momento, puedan establecerse con detalle los límites de estas cuencas subterráneas.

Como se indica en la metodología, se han estimado las superficies ocupadas por las diferentes litologías. A partir de cartografías de detalle parece relativamente sencillo mejorar las relaciones porcentuales entre los diferentes tipos de rocas. Más complicado, salvo mediciones directas, será la definición de los valores de número de curva con precisión. Se observa, sin embargo, que el programa ArHymo es poco sensible a pequeñas variaciones del valor de CN.

Los resultados de la aplicación de este programa, a pesar de las limitaciones señaladas, presentan unos resultados que, en parte, son coherentes con la experiencia cualitativa. Así el programa indica qué cauces, como Mascún en Letosa y el Alcanadre en Gorgas Negras, tienen una respuesta

fuerte y relativamente rápida a las precipitaciones. Otros como el habitualmente seco Basender, y el Formiga, no tienen respuesta con lluvias de menos de cuatro horas de duración, para este periodo de retorno. El método muestra también cómo la incorporación de tramos de cañones calcáreos a las cabeceras impermeables, por ejemplo de Vero y Flumen, se traduce en una disminución de caudales punta como respuesta a la combinación ponderada de dos superficies con números de curvas diferentes. Desde un punto de vista hidráulico, el resultado indica que las avenidas se laminan parcialmente dentro de los cañones.

Evidentemente, es necesario el estudio específico de algunas cuencas concretas, a los efectos de estudiar en detalle la validez de los resultados obtenidos. En Isuela, Flumen, Guatizalema y Calcón, la existencia de embalses dificulta la validación. El Formiga tiene un trasvase a la vecina cuenca del Calcón, así que solo restan Alcanadre, Isuela, Vero y afluentes. El Alcanadre tiene unas amplias dimensiones y complicaciones geológicas que hacen difícil su estudio, así que por diversas razones quedan las cuencas de Mascún y del alto Vero y sus afluentes, especialmente Basender.

Por otro lado, este trabajo avanza en la estimación del riesgo por avenidas en la práctica de deportes de aventura en este tipo de cauces. Como se ha señalado en la introducción, se han producido varios accidentes, algunos mortales, como consecuencia de avenidas rápidas que han atrapado a barranquistas descendiendo por los cañones en tramos sin salida lateral. Dado el rápido desarrollo de las tormentas veraniegas, es frecuente que grupos numerosos de barranquistas hayan comenzado el descenso, sin posibilidad de retorno en muchos casos debido a la existencia de saltos. En estas circunstancias, el inicio de la lluvia supone para unos grupos un momento de pánico mientras que otros continúan con una indiferencia ignorante. Por ello parece interesante disponer de un método contrastado que permita, conociendo las características de la cuenca y de la lluvia, establecer criterios de actuación para las autoridades del Parque Natural, guías de barrancos y equipos de rescate.

CONCLUSIONES

Se ha realizado una primera aproximación, a modo de herramienta, para cuantificar los caudales máximos y parámetros asociado de avenidas ordi-

narias en los cañones de la sierra de Guara (Huesca, España). Los resultados obtenidos, en general, corresponden con observaciones cualitativas y van a servir de base para estudios más detallados de morfología en los cañones.

Paralelamente estas estimaciones permiten elaborar un método para analizar el riesgo por avenidas en los cañones.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo es una aportación al PICG 448 de la UNESCO. Uno de los autores (Julián Setrini) realizó una estancia en la Escuela Politécnica Superior de Huesca gracias a una beca del programa Intercampus, de la Agencia Española de Cooperación Internacional. Se agradece la colaboración y opiniones de Alaín Escartín, Alfredo Serreta, Enrique Salamero y Manuel Avellanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIARGE, F., y SALAMERO, E. (1991). *Huesca. Cañones y barrancos. Tomo 1. Sierras*. Huesca. 192 pp.
- CUCHÍ, J. A.; SALAMERO, E., y AVELLANAS, M. L. (1997). Aspectos geológicos del deporte del barranquismo en el Parque Natural de la Sierra y Cañones de Guara. *Tierra y Tecnología*, 17 y 18.
- DEL VALLE, J. (1996). *El clima del Prepirineo central y occidental aragonés y sus Somontanos*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza en Aragón, 5. 327 pp.
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J., y FREIXES, A. (1989). El karst en los Pirineos españoles. En DURÁN, J. J., y LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. (eds.). *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología. Mon. nº 4, 131-144.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A., y NAVARRO, J. (1996). *Hidrología Forestal. El ciclo hidrológico*. Universidad de Valladolid. 286 pp.
- MAZA, J.; FORNERO, L.; LITWIN, C., y FERNÁNDEZ, P. C. (1993). *ArHymo. Manual del usuario*. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica hídricas. Mendoza. Argentina. 36 pp., anejo A y un disquete.
- MILLÁN, H. (1996). *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores Aragonesas*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. 330 pp. + 2 mapas.

- MINISTERIO DE FOMENTO (1998). *Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España peninsular*. 1 CD.
- NANÍA, L., y CUCHÍ, J. A. (1995). Prevención de accidentes hidráulicos en barrancos. Aplicación al caso del río Vero (Alto Aragón, España). *Actas XII Jornadas de Medicina y Socorro en Montaña de la FEDME*. Barbastro. 10 pp.
- RODRÍGUEZ-VIDAL, J. (1986). *Geomorfología de las sierras exteriores oscenses y su piedemonte*. Colección de Estudios Altoaragoneses, 4. 172 pp. + 6 mapas.
- VILLARROEL, J. L., y CUCHÍ, J. A. (2002). Análisis de respuesta de Fuenmayor (San Julián de Banzo, Huesca). Primeros resultados. *Geogaceta*, 31: 121-124.