

PROCESOS, FACTORES Y CONSECUENCIAS DE LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS; TRABAJOS DESARROLLADOS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

Álvaro Gómez Gutiérrez, Susanne Schnabel y Francisco Lavado Contador

Área de Geografía Física.Universidad de Extremadura

RESUMEN

En este trabajo se presenta una completa revisión bibliográfica sobre algunos aspectos de la erosión por cárcavas dirigida a investigadores, docentes y alumnos predoctorales que pretenden profundizar en el tema. Se analizan los procesos de formación y desarrollo así como los factores que influyen y determinan la intensidad del acarcavamiento. También se evalúan las consecuencias del acarcavamiento *in situ*, sobre el medio y en las zonas de deposición. Finalmente, se presenta una recopilación de trabajos y tasas de erosión por cárcavas en la Península Ibérica.

Palabras clave: erosión por cárcavas, flujo concentrado, umbral geomorfológico, ciclos de erosión-agradación, factores extrínsecos y Península Ibérica.

ABSTRACT

A complete revision of some aspects of gully erosion is presented in this paper. The article is directed to researchers, teachers and PhD students who want to go into greater depth in this topic. The processes of initiation and development of gullies are analyzed as well as the factors influencing process intensity. In addition, the on-site and off-site consequences of gully erosion are evaluated. Finally, a summary of studies carried out in the Iberian Peninsula presenting gully erosion rates is included.

Key words: gully erosion, concentrated flow, geomorphological threshold, erosion-aggradation cycles, extrinsic factors, Iberian Peninsula.

Fecha de recepción: abril 2009.

Fecha de aceptación: diciembre 2010.

I. INTRODUCCIÓN

1. Definición de cárcava y tipologías

La erosión en cárcava consiste en el vaciado de las partículas del suelo o sustrato por un flujo concentrado que da lugar a estrechas incisiones, de mayor tamaño y profundidad que un reguero, y que generalmente llevan agua sólo durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones (Osterkamp, 2008). En la literatura se ha diferenciado tradicionalmente entre cárcavas efímeras y permanentes. Las cárcavas efímeras son aquellas que pueden ser eliminadas por los procedimientos habituales de laboreo. Es decir, aparecen ligadas a terrenos agrícolas, lo cual hace que presenten un umbral dimensional que se sitúa en torno a 0,5 m de profundidad. Las cárcavas efímeras presentan además una característica peculiar que las diferencia de los regueros, y es que suelen darse en la misma ubicación de forma repetida. Por otra parte, las cárcavas permanentes suponen estructuras que no pueden ser eliminadas mediante procedimientos convencionales de laboreo. Un caso particular de éstas, son las cárcavas discontinuas (Leopold y Miller, 1956; Heede, 1967). Se trata de canales con una sección identificable sólo en determinados tramos de su perfil longitudinal. Su morfología discontinua motiva que puedan presentar varias cabeceras a lo largo de su recorrido. La evolución y naturaleza de las cárcavas discontinuas no está del todo clara en la literatura. Se desconoce si una cárcava discontinua es el estado antecedente de una cárcava continua (Leopold *et al.*, 1964; Heede, 1967) o si por el contrario se trata de un canal estable con secciones definidas que van migrando aguas arriba y van siendo rellenadas aguas abajo (Reid, 1989). Una tipología particular de cárcava la conforman las cárcavas asociadas a márgenes, resaltos o bancales, más conocidas como *bank gullies* (Poesen y Hooke, 1997). Esta tipología se forma a partir de desniveles ocasionados por terrazas o márgenes de canales. En esta zona se produce una incisión que da lugar a una cabecera que va creciendo de forma más o menos perpendicular al desnivel. En la tabla 1 se muestran algunas de las clasificaciones de cárcavas desarrolladas en la literatura.

Tabla 1
CLASIFICACIONES DE CÁRCAVAS

Fuente	Criterio
Ireland <i>et al.</i> (1939)	Morfología de la cabecera
De Ploey (1973)	Morfología de la sección
Imeson y Kwaad (1980)	Morfología de la sección
Heede (1982)	Estructura de la red de drenaje
Ezechi y Okagbue (1989)	Génesis
Oostwoud Wijdenes (1991)	Morfología y génesis
Morgan (1997)	Posición topográfica
Soufi (2004)	Morfo-climático

II. PROCESOS DE ACARCAVAMIENTO

Una vez formada, una cárcava puede continuar creciendo y generando sedimentos aunque las causas que motivaron su aparición cesen (Valentin *et al.*, 2005). Por este motivo, hemos entendido lógico realizar una diferenciación entre los procesos que originan la aparición de cárcavas y aquellos que propician su desarrollo.

1. Procesos de aparición de cárcavas

La formación de una cárcava es un proceso gobernado por las características del flujo concentrado. Dicho proceso, es tratado generalmente como un fenómeno de umbral (Knapen *et al.*, 2007), es decir, el arranque de partículas del suelo se produce cuando el flujo supera su umbral de resistencia. Para expresar la intensidad a la que tiene lugar el proceso de arranque de partículas de suelo, en la literatura, se han presentado diversos indicadores hidráulicos. Entre los más simples, se encuentran la descarga total (Q) o la descarga unitaria (q) (Meyer *et al.*, 1975):

$$Q = vA ; q = \frac{Q}{w}$$

con v como la velocidad del flujo ($m s^{-1}$), A como el área de la sección de la cárcava (m^2) y w como la anchura de la cárcava (m).

El esfuerzo cortante del flujo (τ) también trata de reflejar la fuerza con la que éste incide sobre la superficie (Lyle y Smerdon, 1965) y por lo tanto la intensidad a la que se produce el arranque:

$$\tau = \rho g R S \quad \text{con} \quad R = \frac{A}{w_p} \quad \text{y} \quad w_p = w + 2d$$

donde ρ es la densidad del flujo ($kg m^{-3}$), g es la aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$), R es el radio hidráulico (m) y S es la pendiente del cauce ($m \cdot m^{-1}$). Mientras w_p es el perímetro de mojado (m) y d es la profundidad del flujo.

Otro parámetro utilizado con frecuencia para medir la fuerza que ejerce el flujo sobre el suelo es la potencia de la corriente (ω) (Bagnold, 1977) o la potencia total de la corriente (ω_T) (Moore y Burch, 1986):

$$\omega = \tau \omega ; \omega_T = \rho g Q S$$

De acuerdo con el concepto de umbral, la tasa a la que las partículas del suelo son arrancadas se encuentra relacionada con el valor que adoptan la descarga, el esfuerzo cortante y la

potencia de la corriente (Knapen *et al.*, 2007). Por tanto, se puede establecer un valor crítico de dichos parámetros para un suelo específico, a partir del cual tiene lugar el arranque de partículas de suelo (Q_{cr} , τ_{cr} y ω_{cr}). Por ejemplo, la tasa de erosión (τ) suele expresarse mediante la siguiente formulación (Arulanandan *et al.*, 1980):

$$\varepsilon = k(\tau - \tau_{cr})$$

donde k es el coeficiente de erosionabilidad del suelo y τ_{cr} es el esfuerzo cortante crítico que el flujo debe ejercer para arrancar una partícula de suelo.

Sin embargo, la energía del flujo no se emplea de forma exclusiva en el arranque de partículas, si no que es también utilizada para el transporte de las mismas. Por lo que la intensidad de arranque dependerá de la carga sedimentaria que el flujo transporte y de la energía disponible para el arranque de partículas (Foster y Meyer, 1972):

$$\frac{Dr}{Dc} + \frac{G}{Tc} = 1, \text{ despejando } Dr = Dc \cdot \left(1 - \frac{G}{Tc}\right)$$

donde Dr es la intensidad de arranque ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$), Dc es la capacidad de arranque ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$), G es la carga sedimentaria del flujo ($kg\ s^{-1}$) y Tc es la capacidad de transporte de sedimentos del flujo ($kg\ s^{-1}$).

Los parámetros presentados en las anteriores ecuaciones son utilizados como variables predictoras para la iniciación de cárcavas y suponen la segunda generación de modelos disponibles para la estimación del arranque de partículas por flujo concentrado (Knapen *et al.*, 2007). La tercera generación la representan los modelos que tratan de incorporar un componente estocástico en sus formulaciones (Sidorchuk, 2005) y que completan la evolución desde los modelos empíricos que supusieron la primera generación. Por tanto, la aparición de cárcavas como consecuencia de la circulación de flujo concentrado se relaciona con la superación de un umbral de tipo geomorfológico (Patton y Schumm, 1975), debido a una disminución en la resistencia de las fuerzas que mantienen unidas las partículas de suelo, a un incremento en la fuerza erosiva del flujo, o a ambos (Bocco, 1991). Este umbral puede ser extrínseco, bien de tipo climático (Huntington, 1914) o bien de tipo antropogénico (Dodge, 1902), o intrínseco e inherente al propio sistema de la cárcava y consecuencia de procesos geomorfológicos y sedimentológicos naturales dentro del canal (Patton y Schumm, 1975).

La formación de una cárcava por flujo superficial frecuentemente aparece ligada a un incremento en la escorrentía. Dicho incremento, puede deberse a varias causas: cambios en el uso del suelo, modificaciones en el área de drenaje motivadas por el hombre (Nyssen *et al.*, 2002), eventos de precipitación de características extremas, etc. Algunos trabajos han señalado la posibilidad de que una cárcava represente un estado evolutivo avanzado de un reguero (FAO, 1965), sin embargo varios autores señalan que su génesis suele ser mucho más compleja (Morgan, 1979). Otros investigadores han descrito la aparición de cárcavas por

la acción de flujo concentrado superficial sobre pequeñas depresiones del terreno (originadas como consecuencia de sobrepastoreo, incendios, etc.) que con el tiempo terminan conectándose para formar un cauce incipiente (Leopold *et al.*, 1964). El origen de algunos sistemas de cárcavas también puede estar relacionado con la circulación de flujo subsuperficial a través de túneles en el suelo, se trata del fenómeno conocido como erosión en túnel («*piping*» en inglés; Jones, 1981). Este proceso tiene lugar cuando se produce la erosión de un volumen de suelo como consecuencia de la circulación de agua de percolación a través de él, dando lugar a formas tubulares. Estas estructuras pueden formar verdaderas redes de drenaje subterráneas sobre las que va incidiendo el flujo. Cuando la estructura se torna insostenible, el tubo colapsa produciéndose el derrumbe de su parte superior y originando un escalón, que con la ayuda del flujo superficial se convierte en una incipiente cabecera. Harvey (1982b) también relacionó el colapso de túneles subterráneos con el desarrollo de sistemas de cárcavas. Sin embargo, no es necesario que se produzca el colapso del túnel para que se inicie la incisión y formación de una cárcava. El flujo subsuperficial puede favorecer procesos de eluviación, y éstos manifestarse en superficie como microdepresiones que combinadas con la acción de la escorrentía superficial pueden dar lugar a la aparición de una cárcava (Avni, 2004). La erosión por túneles se encuentra ligada a suelos con baja permeabilidad (arcillosos o limosos) pero que a su vez tienen una alta capacidad de infiltración, debido a la presencia de macroporos (Bryan y Yair, 1982). Son proclives las áreas que, teniendo elevados contenidos de arcilla y limo en sus suelos, experimentan prolongados períodos de sequía, que dan lugar a fracturas de desecación, y tormentas de elevada intensidad durante el período de sequía, que originan la circulación de flujo a través de dichas fracturas. También favorecen el desarrollo de la erosión por túneles los elevados gradientes hidráulicos así como la presencia de iones solubles, especialmente el Sodio (Bull y Kirkby, 1997). En ocasiones la génesis de una cárcava se relaciona con la existencia de cicatrices superficiales cuyo origen puede ser natural, como sucede en el caso de los deslizamientos de tierra (Vittorini, 1972), o puede ser antrópico, como en el caso de las cunetas de caminos y carreteras o las actividades de construcción en ambientes urbanos (Douglas y Pietroniro, 2003).

2. Evolución del acaravamiento

El proceso de desarrollo de una cárcava es extremadamente complejo. Dicha complejidad se debe en parte a la múltiple causalidad que generalmente subyace en la génesis del proceso. Existe la posibilidad de que el canal alcance un punto de equilibrio en su crecimiento y posteriormente se produzca una fase de agradación. Con anterioridad, hicimos referencia al trabajo de Leopold (1964) en el que se describe la iniciación de cárcavas a partir de pequeñas depresiones superficiales. Según Leopold (1964), el estadio siguiente de estas incipientes cabeceras es su desarrollo y conexión, formando un cauce acaravado que continuará creciendo hasta un momento determinado, en el que tiene lugar una fase de consolidación como cárcava estable. A partir de este momento, se produce la agradación del canal, la disminución de la pendiente de las márgenes y la o las cabeceras y la colonización de parte del canal por la vegetación. Posteriormente, la deposición originará un aumento de la pendiente del cauce, dando lugar a una nueva fase de acaravamiento. Una cárcava, puede pasar por sucesivos ciclos de erosión y agradación, como así defienden diversos

autores (Ireland *et al.*, 1939; Schumm y Lusby, 1963; Engelen, 1973). El número exacto de ciclos acaecidos no puede ser determinado a partir de un estudio sedimentológico, ya que si uno de los períodos de inestabilidad sufridos resulta en un excesivo ensanchamiento del canal, será capaz de eliminar las evidencias de los ciclos precedentes (Blong, 1970). La naturaleza cíclica de los procesos de acarcavamiento es un tema extremadamente complejo y todavía poco conocido. Esta complejidad es especial en el caso de los canales permanentes de tipo discontinuo. De hecho, algunos autores han asociado el concepto de discontinuidad con uno de los primeros estadios de desarrollo de una cárcava (Heede, 1967). Sin embargo, el modelo de crecimiento cíclico, combinado o no con el modelo discontinuo, no parece ser un predictor realista del crecimiento de la cárcava ya que no se puede esperar una tendencia natural a la estabilización bajo todas las condiciones ambientales (Bocco, 1991). Es decir, existe la posibilidad de que no se alcancen las condiciones de equilibrio y el acarcavamiento inicial se convierta en primer lugar en una red de drenaje acarcavada y en última instancia en un paisaje de *badlands*.

En Estados Unidos se han desarrollado numerosos trabajos que analizan la evolución de canales permanentes y discontinuos que se desarrollan sobre fondos de valle aluviales y que conducen flujos efímeros, denominados *arroyos* (por ejemplo Dodge, 1902; Antevs, 1952; Schumm y Hadley, 1957; Cooke y Reeves, 1976; Leopold, 1978; Bull, 1997; González, 2001). Bull (1997) diferenció estos canales de las cárcavas por su tamaño, que es mayor, por su forma atrincherada y por su persistencia en el tiempo, que es de al menos un siglo. Estos arroyos, además pueden ser de tipo discontinuo, presentando una o varias cabeceras a lo largo de su recorrido y con mecanismos de crecimiento similares a los de las cárcavas. Estas características, encajan perfectamente con las de las cárcavas permanentes de fondo de valle encontradas por Schnabel (1997) y Gómez Gutiérrez *et al.* (2006; 2009a; 2009b) en ambientes adherados del SO de España. De hecho, Osterkamp (2008) define el término *arroyo* como una cárcava o pequeño canal, generalmente localizado en zonas áridas y semiáridas del N de México o SO de EEUU, por el que circulan flujos efímeros sobre una sección aproximadamente trapezoidal. Pues bien, sobre la dinámica de los *arroyos* de tipo discontinuo, Bull (1997) comenta que el equilibrio entre la agradación y la erosión es breve, debido a la sensibilidad de estas formas a cambios climáticos o modificaciones antrópicas a corto plazo. Cooke y Reeves (1976) atribuyeron la aparición y desarrollo de *arroyos* en Arizona del Sur al posible incremento en el caudal en los fondos de los valles debido a cambios climáticos y en la vegetación, pero enfatizados con la concentración del drenaje a lo largo del valle, debido a la construcción de infraestructuras humanas. La dinámica de incisión dominante en algunos de estos cauces de tipo discontinuo y que conducen flujos efímeros en zonas semiáridas ha sido ampliamente tratada en la literatura, especialmente en el caso de los *arroyos* Estadounidenses (Gonzalez, 2001). Sin embargo, las causas de la existencia de episodios de incisión y deposición no siempre son identificadas de forma clara. La activación de los procesos de incisión ha sido generalmente atribuida a variaciones externas en las condiciones ambientales, como cambios u oscilaciones climáticas (Huntington, 1914; Bryan, 1928; Leopold, 1951; Antevs, 1952; Leopold *et al.*, 1966; Prosser, 1996; Noguera *et al.*, 2000a) y a cambios de uso del suelo o sistemas de explotación inadecuados (Dodge, 1902; Rich, 1911; Duce, 1918; Swift, 1926; Cooke y Reeves, 1976), especialmente sobrepastoreo (por ejemplo Zucca *et al.*, 2006) y la puesta en labor de tierras (por ejemplo Faulkner, 1995). Sin embargo,

otros autores han argumentado que las fases de incisión y relleno son consecuencia de variaciones dentro del propio cauce que responden a procesos naturales de tipo geomorfológico y sedimentológico (Thorntwaite *et al.*, 1942; Schumm y Hadley, 1957; Patton y Schumm, 1975; Schumm, 1977). Bull (1997), por ejemplo, afirma que la inestabilidad es intrínseca a estos canales, y viene dada por variaciones en el nivel de base que a su vez son consecuencia de la incisión o relleno de determinados tramos del cauce.

Graf (1977) planteó otra hipótesis sobre el desarrollo de las cárcavas mediante la adaptación de la «rate law» a la Geomorfología. Según Graf (1977) la tasa de crecimiento de una cárcava desciende exponencialmente con el tiempo como respuesta a una disminución de la escorrentía motivada por la reducción del área de drenaje que experimenta el canal, a medida que su cabecera avanza aguas arriba. Como consecuencia, las propiedades geométricas del canal tienden a un valor asintótico. Posteriormente, Nachtergaele *et al.* (2002) corroboraron esta tendencia asintótica en la evolución de la longitud y el área del canal. Sin embargo, detectaron un descenso en el volumen del canal a partir de un determinado momento, consecuencia de la agradación y revegetación del cauce. Según este trabajo, tras un breve período de equilibrio, comenzaría una fase de relleno que completa el ciclo. El planteamiento de Graf (1977), se basó en dos asunciones de gran importancia: *a*) las tasas de erosión están controladas de forma dominante por la escorrentía y, *b*) el área de drenaje ejerce una influencia preponderante sobre la magnitud de la escorrentía. Thomas *et al.* (2004) analizaron en una cárcava sobre depósitos de loess en Iowa el cumplimiento de estas dos hipótesis, concluyendo que el descenso de la tasa de crecimiento de la cárcava se correspondía efectivamente con un descenso en la escorrentía, pero que en este caso no se relacionaba con una disminución del área de drenaje. Es decir, la tendencia asintótica de las propiedades geométricas del canal no tiene que estar necesariamente ligada a un descenso en el área de drenaje.

3. Procesos de desarrollo de una cárcava

El crecimiento de una cárcava puede producirse a través de tres mecanismos principales; el crecimiento aguas arriba de su cabecera, el ensanchamiento del cauce y su profundización. Cuando el flujo salva el escarpe de la cabecera, se produce un continuo remolino sobre la base del mismo que da lugar a su socavación. El resultado es una pared con pendientes verticales. Bajo determinadas condiciones, de pendiente, humedad, etc., la parte superior del muro colapsa y se derrumba sobre el fondo del canal. Este material colapsado, puede ser evacuado inmediatamente tras el derrumbe si existe flujo en el canal y éste dispone de energía suficiente para transportarlo, o por el contrario, puede permanecer en el fondo del cauce a la espera de que se produzca un flujo con suficiente energía. Cuando el material de la base del escarpe es evacuado, comienza de nuevo la socavación de su base, produciéndose de esta forma, el avance aguas arriba de la cabecera. El derrumbe de los bordes de la cabecera se produce, principalmente por la energía asociada al agua. Bradford y Piest (1980) relacionaron la morfología de la cabecera y los derrumbes que en ella se producen con el nivel freático, las diferencias de humedad en el suelo y los flujos que tienen lugar en su interior. La cabecera puede representar una importante fuente de sedimentos. Oostwoud Wijdenes y Bryan (1994) analizaron la contribución de una cabecera a

la producción sedimentaria en una zona semi-árida en Kenya, concluyendo que la cabecera registró aproximadamente la misma cantidad de sedimentos que su área contribuyente.

Por otra parte, la importancia de la erosión sobre las márgenes aguas abajo de la cabecera también ha sido resaltada por algunos autores (por ejemplo: Piest *et al.*, 1975; Blong *et al.*, 1982; Bull y Kirkby, 1997). La erosión del canal se debe al ensanchamiento y profundización del cauce. El mecanismo de profundización está gobernado por las características del flujo que circula por el canal. Además, a la cantidad de material arrancado directamente del lecho por la acción del flujo concentrado, hay que añadir la abrasión que se produce si el flujo transporta carga de fondo. La acción directa del flujo también incide sobre la parte baja de las paredes, provocando incisión lateral. Esta actividad sobre la base del escarpe combinada con la humedad de las márgenes, los flujos de agua dentro del suelo y la fuerza gravitatoria son los responsables del colapso de las partes altas de las paredes. Las propiedades físicas del material que compone las márgenes, así como la geometría de las mismas son fundamentales en este proceso (Blong *et al.*, 1982). Simon *et al.* (2000) en un estudio en *Goodwin Creek* (Estados Unidos) relacionaron la erosión de las márgenes con la variabilidad en la presión del agua de los poros del suelo, causada a su vez por los diferentes flujos de agua dentro del mismo. La generación de presiones positivas del agua de los poros favorecidas por la filtración de agua a lo largo del perfil, resultaron en un descenso de la resistencia al esfuerzo cortante en las márgenes. Mientras, presiones negativas del agua de los poros provocaron un incremento en la resistencia de las márgenes. Según Simon *et al.* (2000) la inestabilidad de las márgenes se relaciona con: *a)* un incremento en el peso específico del suelo, *b)* un descenso o pérdida de la matriz de succión y por tanto una pérdida de la cohesión de la pared, *c)* la generación de presiones positivas del agua de los poros y por tanto una pérdida en la resistencia al esfuerzo cortante de la pared, *d)* erosión del material colapsado en la base de la pared y *e)* pérdida de la presión de confinamiento durante el flujo de recesión. Cuando los bloques colapsados permanecen al pie de la pared actúan como protectores del talud evitando la acción directa del flujo sobre el pie del muro. Según los estudios desarrollados por Simon *et al.* (2000) estos colapsos pueden ser erosionados por flujos de pequeña magnitud y relativamente frecuentes durante el invierno, manteniendo las márgenes con paredes verticales y propiciando largos períodos de retroceso con elevadas concentraciones sedimentarias en el flujo. El ensanchamiento de una cárcava debido al continuo colapso de sus márgenes puede representar el principal proceso de crecimiento del canal. Thomas *et al.* (2004), estimaron que el 70% del ensanchamiento observado en una cárcava de fondo de valle en Iowa se debía al colapso de sus márgenes. El proceso de ensanchamiento de las márgenes suele mostrar cierta estacionalidad, concentrándose durante los períodos prolongados de humedad en el suelo combinados con precipitaciones (Simon *et al.*, 2000). A lo largo del cauce, el proceso de ensanchamiento se combina con el ahondamiento del canal para ajustar la forma de la sección. Dicho ajuste se realiza dentro de unos estreñimientos adicionales impuestos por la composición del borde (Huang y Warner, 1995), la vegetación de las márgenes (Charlton *et al.*, 1978) y la pendiente del valle. La cohesión de las márgenes, no puede ser expresada como una simple función de alguna propiedad de los materiales que la componen, aunque se han realizado algunos intentos de relacionarla con la presencia de arcilla y limo (Schumm, 1971).

III. FACTORES QUE CONDICIONAN EL PROCESO DE ACARCAVAMIENTO

Los factores que condicionan el desarrollo e intensidad del proceso son muy diversos y en ocasiones se encuentran íntimamente relacionados entre sí. Poesen *et al.* (2003) definieron la pérdida de suelo debida al acaravamiento como una función multivariable, que expresaron de la siguiente forma: $E_c = f(G, S, U, C, T)$ donde E_c es la erosión por cárcava, G es el tipo de cárcava, S representa las propiedades del suelo y el sustrato, U el uso y manejo del mismo, C es el clima y T es la topografía.

El primero de los términos de la ecuación anterior refleja el tipo de cárcava. La segunda variable recoge las características del suelo y el sustrato (S). La cantidad de suelo erosionado en una determinada localización está íntimamente relacionada con las propiedades físico-químicas del suelo (Evans, 1993). Dichas propiedades pueden determinar los patrones espaciales y la densidad de desarrollo de redes de cárcavas (Bull y Kirkby, 1997). La separabilidad de los suelos, y por tanto, su disposición a ser erosionados, está controlada por la textura de los mismos, la estabilidad de sus agregados y su resistencia al esfuerzo cortante (Arulanandan *et al.*, 1975). La presencia de determinados elementos en la superficie del suelo como por ejemplo fragmentos rocosos resulta una protección frente a los procesos de acaravamiento (Poesen *et al.*, 1999). Por otra parte, el desarrollo de costras superficiales en regiones áridas o semi-áridas ha sido relacionado con una elevada producción de escorrentía y con procesos de acaravamiento (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2003a). Valentin *et al.* (1999) comprobaron como la presencia de costras superficiales provocó una disminución en la pendiente umbral necesaria para la iniciación de regueros. Sin embargo, su efecto sobre el acaravamiento puede resultar ambivalente, ya que también contribuye a aumentar la cohesión superficial del suelo y por tanto su resistencia al flujo.

La distribución vertical de diferentes capas u horizontes controla en gran medida el tamaño de la cárcava y más específicamente la profundidad y morfología de la sección de la misma (Ireland *et al.*, 1939; Poesen *et al.*, 2003). De este modo, la existencia de un horizonte argílico de acumulación de arcillas del tipo B_t puede desempeñar un papel fundamental en el desarrollo de la cárcava, impidiendo su profundización en el perfil de suelo. Otros horizontes del tipo *fragipans*, horizontes petrocálcicos o sustratos de roca madre no erosionable funcionan como límite a los procesos de acaravamiento. La presencia de horizontes subyacentes de baja permeabilidad puede favorecer el desarrollo de procesos de acaravamiento induciendo una presión positiva del agua de los poros en los horizontes superiores y disminuyendo la resistencia a la erosión de estos horizontes superficiales (Moore *et al.*, 1988). Otro aspecto importante que ha sido señalado en la literatura son las relaciones entre el suelo y el fluido que ocupa los poros. Así pues, la composición química del fluido puede generar modificaciones en las características de agregación del suelo (Sargunam *et al.*, 1973). En las arcillas, modificaciones del Na disuelto en relación con otros cationes básicos del agua de los poros pueden ayudar a dispersar las partículas de suelo (Sherard *et al.*, 1972).

El tercer factor (U) refleja el uso del suelo y la cubierta vegetal. Un aprovechamiento concreto, determina el comportamiento hidrológico del terreno sobre el que se extiende. En entornos agrícolas, cada forma de explotación da lugar a una cubierta vegetal específica. Esta capacidad de la vegetación para proteger el suelo es muy variable en función de su densidad y morfología (Rey *et al.*, 2004). El temprano trabajo de Rich (1911) ya denotó la

importancia que las modificaciones de la cubierta vegetal tenían en el desarrollo de *arroyos* en Nuevo México. Estudios más recientes, han abordado el impacto de un cambio gradual o repentino en el uso del suelo sobre los procesos de erosión por cárcavas bajo diversas condiciones ambientales (Poesen *et al.*, 2003). Así pues, Harvey (1996) habló de un desarrollo de cárcavas durante los siglos IX y X en el Reino Unido propiciado por un cambio en la cubierta vegetal inducido por el hombre. Del mismo modo, Bork *et al.* (1998) atribuyeron el crecimiento de grandes sistemas de cárcavas durante el siglo XIV en Europa central, a la elevada presión humana sobre el suelo junto con algunos eventos de precipitación de carácter extremo. Prosser y Winchester (1996) relacionaron el desarrollo de sistemas de cárcavas en Australia durante los últimos 200 años, con el proceso de colonización europeo y Kasai (2006) atribuyó a la deforestación excesiva llevada a cabo durante los últimos siglos en Nueva Zelanda, la aparición de mayores formas de erosión, entre ellas, grandes cárcavas. La agricultura del siglo XX y XXI también ha sido señalada como la responsable de la aparición y desarrollo de cárcavas en diversos ambientes. Chaplot *et al.* (2005) observaron en Laos que el cultivo en zonas de montaña propició el desarrollo de regueros y cárcavas, mientras en la Sierra de Lújar, al S de España, Faulkner (1995) responsabilizó a la expansión del cultivo de almendro del aumento en el número de cárcavas. En Extremadura (SO de España), Gómez-Gutiérrez *et al.* (2009a) constataron la existencia de una clara relación entre el área afectada por acarcavamiento y la superficie cultivada durante el período 1945-2006 en una pequeña cuenca adhesionada. En Italia, Zucca *et al.* (2006) observaron la existencia de un impacto muy significativo de las acciones agrícolas en la actividad y densidad de las cárcavas. Finalmente, en Nueva Zelanda, Parkner *et al.* (2006) comprobaron un aumento de la superficie ocupada por cárcavas debido al aclarado del bosque original durante el período 1939-2003. A otra escala, la vegetación también resulta determinante. La vegetación que se localiza en el propio cauce es un factor primordial, ya que influye sobre el flujo, normalmente decelerándolo y sobre la estabilidad de las márgenes. Los factores que controlan directamente el efecto de la vegetación sobre la erosión de las paredes del canal, son el tipo, la densidad, la edad y la salud de la vegetación junto con la estacionalidad (Thorne, 1990). Sin embargo, no sólo la extensión de la superficie de suelo destinada a cultivos ha sido señalada como la causante de la aparición y desarrollo de sistemas de cárcavas. En las zonas de pastoreo, el aumento de la carga ganadera ha propiciado la iniciación y avance de los procesos de erosión hídrica, y particularmente de los procesos de acarcavamiento, tal y como recogen las investigaciones de Webb y Hereford (2001), Podwojewski *et al.* (2002), Gómez *et al.* (2003), Nyssen *et al.* (2004) y Gómez Gutiérrez *et al.* (2009a).

El cuarto término (C) de la ecuación planteada por Poesen (2003) recoge los factores relacionados con el clima y que determinan la intensidad del acarcavamiento. La precipitación actúa como factor limitante para la erosión, tanto por exceso, motivando el desarrollo de una cobertura vegetal densa, como por defecto, siendo necesaria una cantidad mínima de precipitación para iniciar el arranque. La intensidad de las precipitaciones y su distribución a lo largo del año son determinantes. Los eventos extremos han sido relacionados con la aparición y desarrollo de cárcavas, tanto efímeras como permanentes (Poesen *et al.*, 1996; Poesen y Hooke, 1997; Schnabel *et al.*, 1999).

La distribución de las precipitaciones resulta también determinante. En la literatura existen algunos trabajos clásicos que así lo señalan. Destaca la temprana aportación de Leopold

et al. (1966) quienes pensaron que la activación y crecimiento de procesos erosivos en cauces de Nuevo México se correspondía con una degradación de la vegetación de los fondos de valle motivada por un incremento en la cantidad total de precipitación de los eventos. El trabajo posterior de Nogueras *et al.* (2000a) mostró como la reactivación de la erosión por cárcavas en la zona de *badlands* conocida como *El Cautivo* en el SE de España se correspondía con un descenso en la vegetación permanente de los fondos de valle, inducido por un incremento en la intensidad y duración de los períodos de sequía.

Por otra parte, existe muy poca información respecto al efecto del actual cambio climático global sobre el acaravamiento (Li *et al.*, 2004). Valentin *et al.* (2005) hablan en términos generales de un empeoramiento de la situación, tanto en las zonas donde se prevé un descenso en la cantidad anual de precipitación, como en aquellas donde el calentamiento global provoque un incremento de la frecuencia de ciclos de congelación y deshielo.

Por último, la topografía (*T*) también resulta determinante en los procesos de acaravamiento. Las características geométricas del terreno influyen directamente sobre la capacidad erosiva del flujo: la pendiente provoca la aceleración o deceleración del flujo y la concavidad o convexidad de la superficie favorece la concentración o dispersión del flujo. La topografía también determina el área vertiente hacia un punto y por tanto la cantidad de agua que recibe cada zona dentro de una cuenca. El efecto conjunto del área de drenaje, como sustituta del caudal, y de la pendiente, ha llevado al análisis de la iniciación y desarrollo de cárcavas como un fenómeno de umbral topográfico (Patton y Schumm, 1975).

IV. CONSECUENCIAS DE LOS PROCESOS DE ACARAVAMIENTO

In situ, se produce una degradación del suelo, debida a la pérdida del material y también tiene lugar una pérdida significativa de escorrentía a través de las paredes y el fondo de la cárcava, especialmente en ambientes áridos y semi-áridos (Esteves y Lapetite, 2003). El descenso de la humedad del suelo conduce a una disminución en la biomasa y en el potencial agrícola del fondo de valle (Avni, 2005). En la zona de los *Highlands* en Etiopía, Nyssen *et al.* (2004) observaron una importante expansión de la red de drenaje, una disminución de la humedad del suelo y consecuentemente una reducción de la producción agrícola. Moeyersons (2000) también comprobó una pérdida de humedad en el suelo, especialmente en la zona entre canales en grandes sistemas de cárcavas.

En cuanto a la producción de sedimentos, diversos estudios recientes, desarrollados en un amplio abanico de ambientes, hablan de elevadas contribuciones de la erosión por cárcavas a la producción total (Wasson *et al.*, 2002; Poesen *et al.*, 2003). Poesen *et al.* (2003) realizaron una recopilación de trabajos con datos sobre la contribución de la erosión por cárcavas a la producción sedimentaria, concluyendo que ésta representa entre el 10% y el 94% de la producción sedimentaria total originada por la erosión hídrica. Además, una cárcava o sistema de cárcavas puede desempeñar un papel de nexo entre las partes altas y las zonas bajas de una cuenca, transfiriendo escorrentía y sedimentos. El comportamiento hidrológico de las cuencas en las que se dan cárcavas puede además verse alterado, presentando menores tasas de flujo base y un registro más rápido del pico de caudal máximo durante las tormentas (Martineli Costa y Prado Bacellar, 2007). El aporte de una gran cantidad de sedimento al flujo, motivado por el desarrollo de procesos de acaravamiento puede provocar la contami-

nación del mismo, debido a la composición química y los elementos absorbidos que en ocasiones presentan los sedimentos, aumentando los niveles de *N* y *P* en el agua y favoreciendo su eutrofización. Este elevado aporte de sedimentos provoca una reducción en la capacidad de transporte de ríos y acequias aguas abajo, aumenta el riesgo de inundaciones, ciega canales de riego y acorta la vida útil de embalses y pantanos.

Respecto a los tratamientos de control de los procesos de acarcavamiento, existen muy diversas formas, materiales y estrategias, dependiendo de los recursos disponibles y de las características específicas de cada zona. Entre los más utilizados se encuentran el desvío de escorrentía de la cabecera, la transformación de las pendientes de la cabecera y márgenes, la revegetación de la cuenca y del propio canal, la instalación de diques, etc. La efectividad de estas medidas varía, aunque existen numerosas experiencias que muestran importantes descensos en la producción de sedimentos asociada a cárcavas tras la aplicación de tratamientos de control y conservación (Miller *et al.*, 1962).

V. LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

En la Península Ibérica, desde la década de los 90 se han desarrollado diversos trabajos sobre erosión por cárcavas. En la Tabla 2 se presenta una selección de ellos, incluyendo la pérdida de suelo que registraron o estimaron, así como una descripción de la zona y los métodos empleados para su registro. Se puede observar tanto la variabilidad de las pérdidas como la proliferación de mediciones a partir de diversas metodologías, desde agujas de erosión hasta técnicas fotogramétricas, pasando por mediciones de perfiles transversales con cintas y perfiladores.

Resulta muy difícil realizar una comparativa de los registros presentados en las publicaciones que se recogen en la Tabla 2, dada la diversidad de métodos, tipo de cárcava, características ambientales, etc. Además de las referencias presentadas en la Tabla 2, que muestran valores de erosión exclusivamente ocasionados por acarcavamiento, existen en España numerosos estudios desarrollados sobre ambientes de *Badlands* (por ejemplo: Harvey, 1982a; Wise *et al.*, 1982; Gutiérrez *et al.*, 1988; Calvo-Cases *et al.*, 1991; Benito *et al.*, 1992; Gutiérrez *et al.*, 1997; Sirvent *et al.*, 1997; Solé-Benet *et al.*, 1997; Bouma y Imeson, 2000; Faulkner *et al.*, 2000; Nogueras *et al.*, 2000b; Cantón *et al.*, 2001; Faulkner *et al.*, 2008; Lázaro *et al.*, 2008). Estas investigaciones recogen tasas de erosión registradas en paisajes acarcavados pero cuyo origen no es exclusivamente el acarcavamiento, si no también la reguercización y la erosión de la zona entre-regueros.

Durante los últimos años, la preocupación en España sobre la erosión por cárcavas ha sido creciente y como muestra, en 2008 se celebró en Pamplona el IV Congreso Internacional sobre erosión por cárcavas, fruto del cual resultó una interesantísima publicación que recopila los últimos avances realizados en dicho campo (Casalí y Giménez, 2007). Recientemente, la publicación de un doble monográfico de la revista *Cuadernos de Investigación Geográfica*, refrenda esta creciente inquietud y presenta los trabajos más importantes desarrollados en diferentes partes de España durante los últimos años: SE (Calvo Cases *et al.*, 2009; Cerdá y Bodí, 2009; Romero Díaz *et al.*, 2009; Solé Benet *et al.*, 2009), Pirineos (Alatorre y Beguería, 2009; López-Vicente y Navas, 2009; Nadal-Romero *et al.*, 2009; Regües *et al.*, 2009), Navarra (Casalí *et al.*, 2009; Desir y Marín, 2009), Cataluña (Gallart, 2009; Martínez-Casasnovas y Concepción Ramos, 2009) y Extremadura (Gómez Gutiérrez *et al.*, 2009b).

Tabla 2
PÉRDIDAS DE SUELO DEBIDAS A ACARCAVAMIENTO REGISTRADAS EN ESPAÑA

Referencia	Pérdida de suelo	Descripción
(Poesen <i>et al.</i> , 1996)	9,7 m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹ 3,2* m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹	— Volumen medio erosionado en Almería y en el Alentejo* (Portugal) sobre zonas de cultivo abandonadas dedicadas ahora al pastoreo y sobre zonas con rotación de cultivos de cereales respectivamente (1983-1993). Utilizaron fotografías aéreas y secciones transversales medias registradas en campo.
(Schnabel, 1997)	5,20 m ³ a ⁻¹	— Volumen medio erosionado en una cárcava permanente de fondo de valle en la provincia de Cáceres y bajo uso de dehesa. Medición de secciones transversales de forma periódica desde 1990 hasta 1993.
(Schnabel <i>et al.</i> , 1999)	39,05 m ³ a ⁻¹	— En similares condiciones al anterior registro pero para el período 1990-1997.
(Casalí <i>et al.</i> , 1999)	26,6 t ha ⁻¹	— Tasa estimada a partir de la medición de secciones transversales con un perfilador en cárcavas efímeras en Navarra durante 2 años.
(Oostwoud Wijdenes <i>et al.</i> , 2000)	4 m ³ a ⁻¹	— Volumen medio retraído para 46 cabeceras activas durante 2 años, calculado a partir de la medición en campo de la distancia del borde de la cabecera a varias estacas fijas y la profundidad media de la cabecera.
(Martínez-Casasnovas, 2003)	0,2 m a ⁻¹	— Retroceso de los muros de la cárcava estimado mediante la sustracción de MDEs generados a partir de fotografías aéreas para una zona de Cataluña durante el período 1957-1993.
(Martínez-Casasnovas <i>et al.</i> , 2003b)	0,016 g ha ⁻¹ a ⁻¹ 0,083 g ha ⁻¹ a ⁻¹	— Tasas estimadas para los períodos 1975-1995 y 1995-2002 mediante MDEs generados a partir de fotografías aéreas para una zona de grandes cárcavas en el NE de España.
(Valcárcel <i>et al.</i> , 2003)	2-5 m ³ ha ⁻¹	— Tasas estimadas para el período abril de 1997-marzo 1999 para cárcavas efímeras en A Coruña mediante métodos topográficos directamente en el campo.
(Vandekerckhove <i>et al.</i> , 2003)	17,4 m ³ a ⁻¹	— Retroceso medio de la cabecera para 12 cárcavas permanentes en el SE de España registrado utilizando fotografías aéreas y mediciones de campo para intervalos de entre 21 y 38 años.
(Ries y Marzolf, 2003)	3,18 m ²	— Retroceso de las paredes de una cárcava de grandes dimensiones en Zaragoza utilizando fotografías tomadas desde un zeppelin para un período de 34 meses.
(De Luna <i>et al.</i> , 2004)	0,21-1,71 m a ⁻¹	— Retroceso de cabeceras de cárcavas de grandes dimensiones en Granada, estimado mediante fotografías aéreas para el período 1956-1994.
(De Santisteban <i>et al.</i> , 2004)	0,20 a 11,50 kg m ⁻² a ⁻¹	— Tasas para la erosión en regueros y cárcavas bajo diferentes usos: cultivo de cereal, viñedo y zonas abandonadas. Las tasas fueron obtenidas a partir del registro de secciones transversales con un perfilador microtopográfico para 19 pequeñas cuencas durante un período de octubre de 1999 a septiembre de 2001.

(Campo <i>et al.</i> , 2007)	0,43 m ³ a ⁻¹ 1,18 m ³ a ⁻¹	— Volumen erosionado en la cabecera de varias cárcavas. Valores obtenidos mediante la sustracción de modelos TIN generados a partir de restitución fotogramétrica de pares estereoscópicos para el período 1967-2003.
(Gómez Gutiérrez <i>et al.</i> , 2009a)	5,20 m ² a ⁻¹	— Incremento en el área afectada por acarcavamiento para el período 1945-2006, estimado a partir de la medición sobre ortofotografías aéreas en una pequeña cuenca adhesionada en el SO de España.
(Gómez Gutiérrez <i>et al.</i> , 2009b)	4,17 m ³ a ⁻¹	— Volumen medio erosionado en una cárcava bajo explotación de dehesa en Extremadura para el período 2001-2007. Valor estimado a partir de la medición de secciones transversales con estación total láser.

VI. CONCLUSIONES

El acarcavamiento es un proceso complejo, relativamente frecuente y diverso (cárcavas efímeras, permanentes, asociadas a márgenes o taludes, discontinuas, etc.). Su génesis y desarrollo suelen ser complejos y en ocasiones representan la respuesta a actuaciones antrópicas. Las consecuencias negativas de dicho proceso son conocidas y no se limitan al punto en el que se produce la incisión, si no que se extienden al flujo y a las zonas de deposición. Pese a esto, algunos aspectos del proceso de acarcavamiento son todavía poco conocidos, especialmente, el futuro impacto del actual cambio climático global. En España, los primeros trabajos que abordan la temática datan de los años 80, aunque hay que esperar hasta los 90 para que se aporten tasas de pérdida de suelo debidas exclusivamente al desarrollo del canal. Durante los últimos años la actividad investigadora en torno a la temática en nuestro país se ha incrementado como respuesta a una creciente preocupación. En los próximos años, los investigadores deberán prever y prevenir sobre las consecuencias de las transformaciones climáticas y de uso del suelo en el proceso de acarcavamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- ALATORRE, L.C. AND BEGUERÍA, S. (2009): Identificación de zonas de erosión activa y áreas de riesgo mediante teledetección: un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el Pirineo Central Español. Cuadernos de Investigación Geográfica, XXXV(2): 171-194.
- ANTEVS, E. 1952. Arroyo cutting and filling. *Journal of Geology*, 60: 375-385.
- ARULANANDAN, K., GILLOGLEY, E. AND TULLY, R., 1980. Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils, Technical report GL-80-5. U.S. Army Engineers, Waterways Experimentation Station, Wicksburg.
- ARULANANDAN, K., LOGANATHAN, P. AND KORONE, R.B., 1975. Pore and eroding fluid influences on surface erosion of soil. *Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering*, 101: 51-66.

- AVNI, Y., 2004. Gully incision inducing ongoing desertification in the arid regions of the Middle East, examples from the Negev highlands, southern Israel. In: Y. Li, J. Poesen and C. Valentin (Editors), *Gully Erosion Under Global Change*. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu, China, pp. 143-172.
- AVNI, Y., 2005. Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. *Catena*, 63: 185-220.
- BAGNOLD, R.A., 1977. Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13(2): 303-312.
- BENITO, G., GUTIÉRREZ, M. AND SANCHO, C., 1992. Erosion rates in badland areas of the central Ebro Basin (NE-Spain). *Catena*, 19(3-4): 269-286.
- BLONG, R.J., 1970. The development of discontinuous gullies in a pumice catchment. *American Journal of Science*, 268: 369-383.
- BLONG, R.J., GRAHAM, O.P. AND VENESS, J.A., 1982. The role of sidewall processes in gully development: some NSW examples. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 381-385.
- BOCCO, G., 1991. Gully erosion: processes and models. *Progress in Physical Geography*, 15(4): 392-406.
- BORK, H.R., BORK, H., DALCHOW, C., FAUST, B., PIORR, H.-R. AND SCHATZ, T., 1998. *Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa*, Gotha, 328 pp.
- BOUMA, N.A. AND IMESON, A.C., 2000. Investigation of relationships between measured field indicators and erosion processes on badland surfaces at Petter, Spain. *Catena*, 40(2): 147-171.
- BRADFORD, J.M. AND PIEST, R.F., 1980. Erosional development of valley-bottom gullies in the Upper Midwestern United States. In: D. Coates and J.D. Vitek (Editors), *Thresholds in Geomorphology*. Allen & Unwin, London, pp. 75-101.
- BRYAN, K., 1928. Historic evidence of changes in the channel of Rio Puerco, a tributary of the Rio Grande in New Mexico. *Journal of Geology*, 36: 265-282.
- BRYAN, R.B. AND YAIR, A., 1982. Perspectives on studies of badland geomorphology. In: R.B. Bryan and A. Yair (Editors), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books, Norwich, pp. 1-12.
- BULL, L.J. AND KIRKBY, M.J., 1997. Gully processes and modelling. *Progress in Physical Geography*, 21(3): 354-374.
- BULL, W., 1997. Discontinuous ephemeral streams. *Geomorphology*, 19: 227-276.
- CALVO-CASES, A., HARVEY, A.M. AND PAYA-SERRANO, J., 1991. Process interactions and badland development in SE Spain. *Soil erosion studies in Spain*: 75-90.
- CALVO CASES, A., ALEXANDER, R.W., ARNAU-ROSALÉN, E., BEVAN, J., CANTÓN, Y., LÁZARO, R., PUIGDEFÁBREGRAS, J. AND SOLÉ BENET, A., 2009. Interacción de procesos geomórficos y distribución de componentes de la superficie del suelo en relación a la evolución de los abbrancamientos de Tabernas (Almería). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(1): 43-62.
- CAMPO, M.A., ÁLVAREZ-MOZOS, J., CASALÍ, J. AND GIMÉNEZ, R., 2007. Effect of topography on retreat rate of different gully headcuts in Bardenas Reales area (Navarre, Spain). In: J. Casalí and R. Giménez (Editors), *Progress in gully erosion research*. Public University of Navarra, Pamplona, pp. 24-25.

- CANTÓN, Y., DOMINGO, F., SOLÉ-BENET, A. AND PUIGDEFÁBREGAS, J., 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, 252(1-4): 65-84.
- CASALÍ, J. AND GIMÉNEZ, R., 2007. Progress on gully erosion research. Public University of Navarra, Pamplona, 141 pp.
- CASALÍ, J., GIMÉNEZ, R., DE SANTISTEBAN, L.M., CAMPO, M.A., ÁLVAREZ-MOZOS, J., GOÑI, M. AND GASTESI, R., 2009. Estado actual del conocimiento sobre la erosión por flujos concentrados en Navarra. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(1): 63-86.
- CASALÍ, J., LÓPEZ, J.J. AND GIRÁLDEZ, J.V., 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena*, 36: 65-84.
- CERDÁ, A. AND BODÍ, M.B., 2009. El proceso de infiltración en los badlands del Este de la Península Ibérica. Avances y retos. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(1): 7-42.
- COOKE, R.U. AND REEVES, R.W., 1976. Arroyos and environmental change in the American South-West. Clarendon Press, Oxford, 213 pp.
- CHAPLOT, V., COADOU LE BROZEC, E., SILVERA, N. AND VALENTIN, C., 2005. Spatial and temporal assessment of linear erosion in catchments under sloping lands of northern Laos. *Catena*, 63: 167-184.
- CHARLTON, F.G., BROWN, P.M. AND BENSON, R.W., 1978. The hydraulic geometry of some gravel rivers in Britain, *Hydraulics Research Station Report IT180*.
- DE LUNA, E., LAGUNA, A.M., POESEN, J. AND GIRÁLDEZ, J.V., 2004. Evolución de un sistema de cárcavas activas en el sureste español. *Ingeniería del agua*, 11: 65-73.
- DE PLOEY, J., 1973. Ruissellement diffus, ruinement et badlands dans le bassin de Kasserine (Tunisie steppiqua), *Livre jubilaire Solignac. Annales Mines et Géologie, Tunisie* 26: 583-593.
- DE SANTISTEBAN, L.M., CASALI, J. AND LÓPEZ, J.J., 2004. Assessing soil erosion rates in cultivated areas of Navarre (Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 487-506.
- DESIR, G. AND MARÍN, C., 2009. Caracterización de la erosión en áreas acarcavadas de la Fm. Tudela (Bárdenas Reales, Navarra). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 195-214.
- DODGE, R.E., 1902. Arroyo formation. *Science*, 15: 746.
- DOUGLAS, I. AND PIETRONIRO, A., 2003. Predicting road erosion rates in selectively logged tropical rain forests. In: D. de Boer, W. Froehlich and T. Mizuyama (Editors), *Proceedings of the International Symposium Erosion prediction in ungauged basins, integrating methods and techniques*. IAHS Press, Sapporo, Japan.
- DUCE, J.T., 1918. The effect of cattle on the erosion of canon bottoms. *Science*, 47: 450-452.
- ENGELN, G.B., 1973. Runoff processes and slope development in Badlands National Monument, South Dakota. *Journal of Hydrology*, 18: 55-79.
- ESTEVEZ, M. AND LAPETITE, J.M., 2003. A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena*, 50: 255-271.
- EVANS, R., 1993. Extent, frequency and rates of rilling of arable land in localities in England and Wales. In: S. Wicherek (Editor), *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Elsevier, Amsterdam, pp. 177-190.

- EZECHI, J.I. AND OKAGBUE, C.O., 1989. A genetic classification of gullies in Eastern Nigeria and its implications on control measures. *Journal of African Earth Sciences*, 9(3/4): 711-718.
- FAO, 1965. *Soil erosion by water. Some measures for its control on cultivated lands.*, Rome.
- FAULKNER, H., 1995. Gully erosion associated with the expansion of untterraced almond cultivation in the coastal Sierra de Lújar, S. Spain. *Land Degradation & Rehabilitation*, 9: 179-200.
- FAULKNER, H., SPIVEY, D. AND ALEXANDER, R., 2000. The role of some site geochemical processes in the development and stabilisation of three badland sites in Almeria, Southern Spain. *Geomorphology*, 35(1-2): 87-99.
- FAULKNER, H.P., ALEXANDER, R. AND ZUKOWSKYJ, P., 2008. Slope-channel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocatã n catchment badlands, Southeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(8): 1242-1260.
- FOSTER, G.R. AND MEYER, L.D., 1972. Transport of particles by shallow flow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 15(1): 99-102.
- GALLART, F., 2009. Algunos criterios topográficos para identificar el origen antrópico de cárcavas. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 215-222.
- GÓMEZ, B., BANBURY, K., MARDEN, M., TRUSTRUM, N.A., PEACOCK, D.H. AND HOSKIN, P.J., 2003. Gully erosion and sediment production, Te Weraroa Stream, New Zealand. *Water Resources Research*, 39(7).
- GÓMEZ GUTIÉRREZ, Á., SCHNABEL, S. AND LAGAR TIMÓN, D., 2006. Estudio del acaravamiento en explotaciones adhesionadas, Gestión ambiental y económica del ecosistema dehesa en la Península Ibérica. Junta de Extremadura, Mérida, pp. 73-80.
- GÓMEZ GUTIÉRREZ, Á., SCHNABEL, S. AND LAVADO CONTADOR, J.F., 2009a. Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation & Development*, 20: 535-550.
- GÓMEZ GUTIÉRREZ, Á., SCHNABEL, S. AND SANJOSÉ BLASCO, J.J., 2009b. Variación temporal de la erosión por cárcavas en los fondos de valle bajo explotación de dehesa. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 289-304.
- GONZÁLEZ, M.A., 2001. Recent formation of arroyos in the Little Missouri Badlands of southwestern North Dakota. *Geomorphology*, 38(1-2): 63-84.
- GRAF, W.L., 1977. The rate law in fluvial geomorphology. *American Journal of Science*, 277: 178-191.
- GUTIÉRREZ, M., BENITO, G. AND RODRÍGUEZ, J., 1988. Piping in badland areas of the middle Ebro Basin, Spain. *Catena Supplement*, 13: 49-60.
- GUTIÉRREZ, M., SANCHO, C., BENITO, G., SIRVENT, J. AND DESIR, G., 1997. Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain. *Geomorphology*, 20(3-4): 237-253.
- HARVEY, A., 1982a. The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain. *Badland geomorphology and piping*: 317-335.
- HARVEY, A.M., 1982b. The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain. In: R. Bryan and A. Yair (Editors), *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books, Norwich, pp. 408.

- HARVEY, A.M., 1996. Holocene hillslope gully systems in the Howgill Fells, Cumbria. In: M.G. Anderson and S.M. Brooks (Editors), *Advances in Hillslope Processes*, pp. 731–752.
- HEEDE, B.H., 1967. The fusion of discontinuous gullies: A case study. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 12: 42-50.
- HEEDE, B.H., 1982. Gully control: determining treatment priorities for gullies in a network. *Environmental Management*, 6(5): 441-451.
- HUANG, H.Q. AND WARNER, R.F., 1995. The multivariate controls of hydraulic geometry: a causal investigation in terms of boundary shear distribution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 115-130.
- HUNTINGTON, E., 1914. *The Climatic Factor as Illustrated in Arid America*. Carnegie Institute of Washington Publication 192, Washington, DC, 341 pp.
- IMESON, A.C. AND KWAAD, F.J.P.M., 1980. Gully types and gully prediction. *Geografisch Tijdschrift*, 14(5): 430-441.
- IRELAND, H.A., SHARPE, C.F.S. AND EARGLE, D.H., 1939. Principles of gully erosion in the piedmont of south Carolina. *Technical Bulletin of U.S. Dept. of Agriculture*, 63: 143.
- JONES, J.A.A., 1981. *The nature of soil piping: a review of research*, Research Monograph 3. Geo Books, Norwich; British Geomorphological Research Group, 301 pp.
- KASAI, M., 2006. Channel processes following land use changes in a degrading steep headwater stream in North Island, New Zealand. *Geomorphology*, 81: 421-439.
- KNAPEN, A., POESEN, J., GOVERS, G., GYSSELS, G. AND NACHTERGAELE, J., 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Sciences Reviews*, 80: 75-109.
- LÁZARO, R., CANTÓN, Y., SOLÉ-BENET, A., BEVAN, J., ALEXANDER, R., SANCHO, L.G. AND PUIGDEFÁBREGAS, J., 2008. The influence of competition between lichen colonization and erosion on the evolution of soil surfaces in the Tabernas badlands (SE Spain) and its landscape effects. *Geomorphology*, 102(2): 252-266.
- LEOPOLD, L.B., 1951. Rainfall frequency: An aspect of climatic variation. *Transactions of the American Geophysical Union*, 32: 347-357.
- LEOPOLD, L.B., 1978. El asunto del Arroyo. In: C. Emblenton (Editor), *Geomorphology*. Oxford University Press, London, pp. 25-49.
- LEOPOLD, L.B., EMMET, W.W. AND MYRICK, R.M., 1966. Channel hillslope processes in a semiarid area, New Mexico. *United States Geological Survey Professional Paper*, 282-A: 37 pag.
- LEOPOLD, L.B. AND MILLER, J.P., 1956. Ephemeral streams: hydraulic factors and their relation to the drainage net. *U.S. Geological Survey*, 282A: 37.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G. AND MILLER, J.P., 1964. *Fluvial processes in geomorphology*.
- LI, Y., POESEN, J. AND VALENTIN, C., 2004. *Gully erosion under global change*. Sichuan Science Technology Press, Chengu, China, 354 pp.
- LÓPEZ-VICENTE, M. AND NAVAS, A., 2009. Escorrentía y pérdida de suelo en cárcavas: modelización en un agrosistema del Pirineo oscense. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 239-262.

- LYLE, W.M. AND SMERDON, E.T., 1965. **Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils.** Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 8: 419-422.
- MARTINELLI COSTA, F. AND PRADO BACELLAR, L.A., 2007. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. *Catena*, 69: 230-238.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50: 293-308.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., ANTÓN-FERNÁNDEZ, C. AND RAMOS, M.C., 2003a. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high resolution digital elevation models and geographical information systems analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(5): 443-446.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. AND CONCEPCIÓN RAMOS, M., 2009. Erosión por cárcavas y barrancos en el área de viña del Alt Penedès-Anoia (NE España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 223-238.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., RAMOS, M.C. AND POESEN, J., 2003b. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*, 58: 305-321.
- MEYER, L.D., FOSTER, G.D. AND NIKOLOV, S., 1975. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 18: 905-911.
- MILLER, C.R., WOODBURN, R. AND TURNER, H.R., 1962. Upland gully sediment production. IASH Publication, 59: 83-104.
- MOEYERSONS, J., 2000. Desertification and man in Africa. *Bulletin of the Royal Academy of Overseas Science*, 46 (Bruselas): 151-170.
- MOORE, I.D. AND BURCH, G.J., 1986. Modeling erosion and deposition: topographic effects. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 29(6): 1624-1640.
- MOORE, I.D., BURCH, G.J. AND MACKENZIE, D.H., 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. Transactions of the ASAE, 32(4): 1098-1107.
- MORGAN, R.P.C., 1979. Soil erosion. Longman, New York.
- MORGAN, R.P.C., 1997. Erosión del suelo y conservación. Mundi-Prensa, Madrid, 343 pp.
- NACHTERGAELE, J., POESEN, J., OOSTWOUW WIJDENES, D. AND VANDEKERCKHOVE, L., 2002. Medium-term evolution of a gully developed in a loess derived soil. *Geomorphology*, 46: 223-239.
- NADAL-ROMERO, E., REGÜES, D., LATRON, J., LANA-RENAULT, N., SERRANO-MUELA, M.P. AND MARTÍ-BONO, C., 2009. Funcionamiento hidrológico de una pequeña cuenca de montaña con morfologías acarcavadas en el Pirineo Central. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(1): 119-140.
- NOGUERAS, P., BURJACHS, F., GALLART, F. AND PUIGDEFÁBREGAS, J., 2000a. Recent gully erosion in El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain). *Catena*, 40(2): 203-215.
- NOGUERAS, P., BURJACHS, F., GALLART, F. AND PUIGDEFÁBREGAS, J., 2000b. Recent gully erosion in the El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain). *Catena*, 40(2): 203-215.

- NYSSSEN, J., POESEN, J., MOEYERSONS, J., DECKERS, J., MITIKU, H. AND LANG, A., 2004. Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands: a state of the art. *Earth Science Reviews*, 64(3-4): 273-320.
- NYSSSEN, J., POESEN, J., MOEYERSONS, J., LUYTEN, E., VEYRET-PICOT, M., DECKERS, J., HAILE, M. AND GOVERS, G., 2002. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(12): 1267-1283.
- OOSTWOUW WIJDENES, D. AND BRYAN, R., 1991. Gully development on the Njemps Flats, Baringo, Kenya. *Catena Supplement*, 19: 71-90.
- OOSTWOUW WIJDENES, D. AND BRYAN, R., 1994. The significance of gully headcuts as a source of sediment on low-angle slopes at Baringo, Kenya, and initial control measures. *Advances in Geocology*, 27: 205-231.
- OOSTWOUW WIJDENES, D., POESEN, J., VANDEKERCKHOVE, L. AND GHESQUIERE, M., 2000. Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena*, 39: 147-167.
- OSTERKAMP, W.R., 2008. Annotated Definitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology, USGS Open file Report 2008-1217, Reston, Virginia.
- PARKNER, T., PAGE, M.J., MARUTAMI, T. AND TRUSTRUM, N.A., 2006. Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East coast, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2): 187-199.
- PATTON, P.C. AND SCHUMM, S.A., 1975. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology*, 3: 88-90.
- PIEST, R.F., BRADFORD, J.M. AND WYATT, G.M., 1975. Soil erosion and sediment transport from gullies. *Journal of Hydraulic Division of the American Society of Civil Engineers*, 101: 65-80.
- PODWOJEWSKI, P., POULENARD, J., ZAMBRANA, T. AND HOFSTEDÉ, R., 2002. Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the paramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18(1): 45-55.
- POESEN, J., DE LUNA, E., FRANCA, A., NACHTERGAELE, J. AND GOVERS, G., 1999. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *Catena*, 36: 315-329.
- POESEN, J. AND HOOKE, J.M., 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21(2): 157-199.
- POESEN, J., NACHTERGAELE, J., VERSTRAETEN, G. AND VALENTIN, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50: 91-133.
- POESEN, J., VANDAELE, K. AND VAN WESEMAEL, B., 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. *IAHS*, 236: 251-266.
- PROSSER, I.P., 1996. Thresholds of channel initiation in Historical Holocene Times, South-eastern Australia. In: M.G. Anderson and S.M. Brooks (Editors), *Advances in Hillslope Processes*. Wiley, Chichester, pp. 687-708.

- PROSSER, I.P. AND WINCHESTER, J., 1996. History and processes of gully initiation and development in eastern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 105: 91-109.
- REGÜES, D., NADAL-ROMERO, E., LATRON, J. AND MARTÍ-BONO, C., 2009. Producción y transporte de sedimento en cárcavas desarrolladas en la Depresión Interior Altoaragonesa (Cuenca de Araguás, Pirineo Central). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(2): 263-288.
- REID, L.M., 1989. Channel initiation by surface runoff in a grassland catchment, PhD thesis, University of Washington, Washington, 135 pp.
- REY, F., BALLAIS, J.L., MARRE, A. AND ROVÉRA, G., 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *C. R. Geoscience*, 336: 991-998.
- RICH, J.L., 1911. Recent stream trenching in the semi-arid portion of southwestern New Mexico, a result of removal of vegetation cover. *American Journal of Science*, 32: 237-245.
- RIES, J.B. AND MARZOLFF, I., 2003. Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp. *Catena*, 50: 309-328.
- ROMERO DÍAZ, A., MARÍN SANLEANDRO, P. AND SÁNCHEZ SORIANO, A., 2009. Procesos de piping en la región de Murcia (Sureste de España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(1): 87-118.
- SARGUNAM, A., RILEY, P., ARULANANDAN, K. AND KRONE, R.B., 1973. Physico-chemical factors in erosion of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 99(3): 555-558.
- SCHNABEL, S., 1997. Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (dehesas) in Extremadura, Spain. *Geoforma Ediciones, Logroño*, 167 pp.
- SCHNABEL, S., GÓMEZ AMELIA, D. AND CEBALLOS, A., 1999. Extreme events and gully erosion. In: IGU (Editor), *Proceedings of the International Seminar on Land Degradation and Desertification*, Lisbon, pp. 17-26.
- SCHUMM, S.A., 1971. Fluvial geomorphology: the historical perspective. In: H.W. Shen (Editor), *River mechanics*. CO: H.W. Shen, Fort Collins, pp. 4-1-4-30.
- SCHUMM, S.A., 1977. *The Fluvial System*. Wiley, New York, 338 pp.
- SCHUMM, S.A. AND HADLEY, R.F., 1957. Arroyos and the semiarid cycle of erosion. *American Journal of Science*, 255: 161-174.
- SCHUMM, S.A. AND LUSBY, G.C., 1963. Seasonal variations in infiltration capacity and runoff on hillslopes of western Colorado. *Journal of Geophysical Research*, 63: 3655-3666.
- SHERARD, J.L., RYKER, N.L. AND DECKER, R.S., 1972. Piping in earth dams of dispersive clay, Special Conference on the Performance of Earth and Earth Supported Structures. ASCE, pp. 150-161.
- SIDORCHUK, A., 2005. Stochastic components in the gully erosion modelling. *Catena*, 63: 299-317.
- SIMON, A., CURINI, A., DARBY, S.E. AND LANGENDOEN, E.J., 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35: 193-217.
- SIRVENT, J., DESIR, G., GUTIÉRREZ, M., SANCHO, C. AND BENITO, G., 1997. Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology*, 18(2): 61-75.

- SOLÉ-BENET, A., CALVO, A., CERDÁ, A., LÁZARO, R., PINI, R. AND BARBERO, J., 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31(1-2): 23-38.
- SOLÉ BENET, A., CANTÓN, Y., LÁZARO, R. AND PUIGDEFÁBREGAS, J., 2009. Meteorización y erosión en el Sub-desierto de Tabernas, Almería. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, XXXV(1): 141-163.
- SOUFI, M., 2004. Morpho-climatic classification of gullies in Fars province, southwest of I.R. Iran, International Soil Conservation Organisation Conference, Brisbane, pp. 4.
- SWIFT, T.T., 1926. Date of channel trenching in the southwest. *Science*, 63: 70-71.
- THOMAS, J.T., IVERSON, N.R., BURKART, M.R. AND KRAMER, L.A., 2004. Long term growth of a valley-bottom gully, western Iowa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 995-1009.
- THORNE, C.R., 1990. Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. In: J.B. Thornes (Editor), *Vegetation and Erosion*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 518.
- THORNTHWAITE, C.W., SHARPE, C.F.S. AND DOSCH, E.F., 1942. Climate and accelerated erosion in the arid and semi-arid Southwest, with special reference to the Polacca Wash drainage basin, United States Department of Agriculture Technical Bulletin 808, Arizona.
- VALCÁRCEL, M., TABOADA, M.T., PAZ, A. AND DAFONTE, J., 2003. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. *Catena*, 50: 199-216.
- VALENTIN, C., D'HERBÈS, J.M. AND POESEN, J., 1999. Soil and water components of vegetation patterning. *Catena*, 37: 1-24.
- VALENTIN, C., POESEN, J. AND YONG, L., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63: 132-153.
- VANDEKERCKHOVE, L., POESEN, J. AND GOVERS, G., 2003. Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. *Catena*, 50: 329-352.
- VITTORINI, S., 1972. The effect of soil erosion in an experimental station in the Pliocene clay of the Val d'Era (Tuscany) and its influence on the evolution of the slopes. *Acta Geographica Debrecina*, 10: 71-81.
- WASSON, R.J., CAITCHEON, G., MURRAY, A.S., MCCULLOCH, M. AND QUADE, J., 2002. Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of Lake Argyle, northwestern Australia. *Environmental Management*, 29(5): 634-646.
- WEBB, R.H. AND HEREFORD, R., 2001. Floods and geomorphic change in the southwestern United States: an historical perspective, Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nevada, USA, pp. 30-37.
- WISE, S.M., THORNES, J.B. AND GILMAN, A., 1982. How old are the badlands? A case study from south-east Spain. *Badland geomorphology and piping*: 259-277.
- ZUCCA, C., CANNU, A. and DELLA PERRUTA, R., 2006. Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agropastoral area in Sardinia (Italy). *Catena*, 68: 87-95.