

# **METODOLOGIAS PARA EL ESTUDIO DE LA HIDROLOGIA Y EROSION DE SUPERFICIES DEGRADADAS (BADLAND) A PARTIR DE LLUVIA SIMULADA**

**A. CERDA i BOLINCHES**

Fysisch Geographisch Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam.  
Nieuwe Prinsengracht, 130, 1018 VZ. Amsterdam. The Netherlands

**Resumen.** Se presentan los métodos empleados en el estudio de la hidrología y la pérdida de suelo en áreas degradadas, badlands. El uso de lluvia simulada permite conseguir resultados rápidos con experimentos repetidos siempre con las mismas características sobre una red de parcelas. La experiencia aconseja medir el caudal cada minuto y tomar como mínimo tres muestras para la determinación de la concentración de sedimentos de la escorrentía: una al inicio, otra al final, cuando la escorrentía es estable y una intermedia. Se deben restar de las muestras de escorrentía el volumen ocupado por los sedimentos, ya que en suelos con bajas capacidades de infiltración y altas tasas de erosión como los badlands se puede alterar la escorrentía real y los parámetros dependientes de ésta.

**Palabras clave:** Métodos, Lluvia-simulada, Suelos, Badlands, Hidrología, Erosión.

**Abstract.** The methods used to study the hydrology and soil losses of degraded soils (badland) are presented. The use of simulated rain help the researchers to find results with experiments repeat always with the same characteristics over a network of plots. We must be take all the samples of runoff, and at least three samples to determine the runoff sediment concentration: one at the beginning, one at the end, when the runoff is constant, and another one between both. We advise to subtract from the sample of runoff the volume of sediment, because in soils with low infiltration capacities and very high erosion rates, characteristics of degraded soils, can modify the real runoff, and the parameters dependent of runoff.

**Key words:** Methods, Simulated-rain, Soils, Badlands, Hydrology, Erosion.

## **1. Introducción**

### **1.1. El término y el origen de los badlands**

El término badland es usado en geomorfología para describir los espacios donde se ha producido una disección fluvial intensa y en los que la vegetación es inexistente o escasa. Estos paisajes tienen un origen fluvial, con densidades de drenaje muy altas, valles en forma de V y laderas cortas y escarpadas,

junto a superficies planas denominadas "pediments" (Bryan & Yair, 1982). A estas características se le une el bajo interés económico por la irregularidad de las superficies y por ser desiertos en miniatura (Campbell, 1982).

En el Estado Español, y especialmente en las Comunidades de la vertiente mediterránea junto a las del valle del Ebro, las superficies degradadas tanto por uso antrópico como por evolución natural son abundantes. A la larga historia de aprovechamiento agrícola, se une ahora el abandono de bancales y el aumento de los incendios forestales, lo que puede favorecer los procesos de desertización (Rubio, 1987). También es importante en este crecimiento de las superficies degradadas la abundancia de litologías blandas, las cuales una vez desprotegidas de la vegetación y de los horizontes orgánicos son fácilmente erosionadas, más aún en áreas donde las lluvias tienen altos índices de erosionabilidad y torrencialidad (Elías & Ruiz, 1977). Además, el clima, con reducidas e irregulares precipitaciones y altas tasas de evapotranspiración, propicia un escenario en el que los procesos erosivos, junto a los bajos niveles de regeneración edáfica son las características más destacadas del medio. En general, el suelo en el mediterráneo español está sometido a unos factores ambientales que favorecen su degradación (López-Bermúdez y Albadalejo, 1990).

Estos paisajes degradados o badlands, no son sólo típicos de la vertiente mediterránea española (Calvo & Harvey, 1989), también existen en otras áreas de la cuenca mediterránea: Israel (Yair *et al.*, 1980), Túnez (Berndtsson, 1988), Marruecos (Imeson, 1983), Italia (Vittorini, 1977; Alexander, 1982; Sdao *et al.*, 1984), o fuera de ella (Hodges & Bryan, 1982; Wells & Gutiérrez, 1982).

## 1.2. Los temas y los métodos

La existencia de esta problemática ambiental ha hecho surgir entre los investigadores grupos de trabajo que tienen como tema central de estudio los badlands, y en general las superficies degradadas. Revisiones sobre el tema se han llevado a cabo por diversos autores, tanto en el extranjero (Campbell, 1982), como en nuestro país (Clotet *et al.*, 1987), e incluso se han llevado a cabo publicaciones conjuntas de diversos trabajos (Bryan & Yair, 1982a).

Se han realizado estudios desde distintos puntos de vista: origen de las superficies de badlands (Wlase *et al.*, 1982), la evolución posterior (Harvey, 1982), el comportamiento hidrológico (Scoging, 1982), las tasas de erosión (Yair *et al.*, 1982), etc.

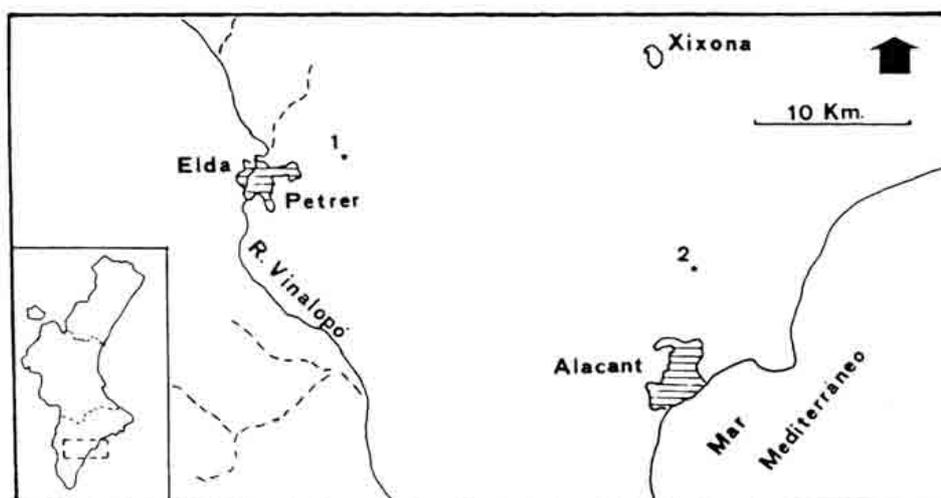


Figura 1. Mapa de localización. Petrer (1) y Monnegre (2)  
Location map. Petrer (1) and Monnegre (2)

Los métodos empleadas en el estudio de la dinámica de los badlands han sido diversas. Los perfiladores se han utilizado con gran éxito debido a que los cambios morfológicos en estos suelos se producen con rapidez (Campbell *et al.*, 1982; Benito *et al.*, 1991; Sancho *et al.*, 1991).

La descripción de las morfologías, generalmente a partir de fotografías, ha sido utilizado especialmente en el estudio de las variaciones temporales (Harvey & Calvo, 1991), mientras que las fotografías aéreas han facilitado el conocimiento de la evolución cuaternaria reciente (Yair *et al.*, 1982; Wells & Gutiérrez, 1982).

Otra técnica muy utilizada es la de las piquetas de erosión, las cuales normalmente nos dan una idea sobrevalorada de las pérdidas de suelo (Campbell, 1974), si bien la medición e interpretación de los resultados es muy sencilla.

El uso de parcelas de distintos tamaños, así como los aforadores y muestreadores de agua y sedimentos de cuencas y microcuencas han tenido poco éxito por el difícil mantenimiento en un medio donde las elevadas tasas de erosión y las duras condiciones ambientales han perjudicado el buen estado de las estaciones de muestreo.

En cambio, la lluvia simulada es la técnica que ha tenido mayor éxito en las áreas de badlands (Hodges & Bryan, 1982; Scoging, 1982; Parker & Schumm, 1982; Imeson *et al.*, 1982; Hodges, 1982; Campbell, 1987; Payá & Cerdá, 1992), si bien la metodología utilizada adolece de una clara falta de homogeneidad.

El objetivo de este trabajo es presentar las técnicas más adecuadas para el uso de lluvia simulada en parcelas de reducido tamaño (menores a 1 m<sup>2</sup>), y analizar mediante algunos ejemplos el comportamiento de la arroyada: agua y sedimentos, en estos ambientes degradados, badlands.

## 2. Area de estudio

La zona de estudio seleccionada para la aplicación de las técnicas utilizadas con la lluvia simulada se encuentra en el sur del País Valenciano, concretamente en el norte de la provincia de Alicante, en la vertiente meridional del Sistema Prebético (Fig. 1). Esta amplia área de estudio tiene dos zonas de trabajo: Petrer y Monnegre, las cuales están siendo estudiadas por un grupo de investigadores procedentes de cuatro centros de investigación: Universitat de València, University of Liverpool, Universiteit van Amsterdam y la Unidad de Desertificación (CSIC-València), dentro de un proyecto nacional que tiene como objetivo la "Modelización y Regeneración de badlands por procesos naturales" (BADLAND-I) y el estudio de la "Dinámica hidrogeomorfológica y colonización vegetal en las áreas de badlands" (DESERMA).

La cuenca experimental de Petrer tiene orientación E-W, forma parte de la rambla de los Molinos, afluente por la margen izquierda del río Vinalopó, y la litología predominante son margas Cretáceas del Senoniense (IGME, 1978a). La zona de estudio de Monnegre se encuentra en la margen derecha del río del mismo nombre, el cual ha favorecido el desarrollo de superficies degradadas al incidirse la red de drenaje sobre los materiales margosos del Cretáceo (Payà, 1991), los cuales junto a las arcillas del Keuper forman un conjunto diáfrico muy importante (IGME, 1978b).

La morfología de ambos espacios se caracteriza por un intenso acarcavamiento, lo que da lugar a un paisaje de Badlands (Calvo & Harvey, 1989), con laderas cortas, de fuerte pendiente y en las que dominan los surcos (rills), si bien tubificaciones o tubos (pipes) o morfologías mixtas surcos-tubos (rill-pipes) son importantes. En Petrer, en la base de las laderas encontramos superficies de transporte ("micropediments"), de baja pendiente y reducida rugosidad. En Monnegre estas morfologías son insignificantes debido a la fuerte incisión en los cauces.

En la zona de entre-surcos (inter-rill) nos encontramos con superficies encostradas y agrietadas, en la que los procesos de salpicadura y escorrentía difusa son dominantes.

La orientación contrastada de la cuenca de Petrer hace que la ladera sur y la parte baja de la ladera norte no presente vegetación, apareciendo esporádicamente durante la primavera algunas matas de *Moricandia arvensis*. En la parte media y alta de la ladera norte la vegetación está dominada por *Brachypodium retusum*, *Salsola ginstoides*, *Centaurea scariosa*, *Dorycnium pentaphyllum*, *Bupleurum frutescens*, *Fumana ericoides*, *Polygala calcarea*, etc. En el caso de Monnegre nos encontramos con una menor importancia de la exposición en el control de las geoformas como de las cubiertas vegetales, si bien estas últimas son similares en cuanto a composición florística y cobertura.

La menor incisión en los cauces de Petrer respecto a los de Monnegre se debe a la mayor lejanía de los cauces de órdenes altos, y a la existencia de campos cultivados en el fondo de los valles con fuertes muros que han evitado el desmantelamiento de los depósitos. La construcción de estos campos y el cultivo de ellos hasta finales de los años 70 es una de las razones de la degradación de las laderas, especialmente en las partes bajas (Rodríguez-Aizpeolea, 1992). Estos mismos campos de cultivo presentan en la actualidad

una fuerte incisión como consecuencia de su abandono, lo que a su vez ha favorecido una regeneración vegetal que ha dado lugar a una mayor diversidad florística que en las laderas. Además de las especies mencionadas anteriormente, aparecen otras como *Daphne gnidium*, *Orobanche*, *Inula viscosa*, *Dactyles glomerata*, *Foeniculum vulgare*, *Cistus albidus*, *Hypericium histrix*, *Coris ginestoides*, etc.

El clima en ambas zonas está caracterizado por una baja precipitación anual (350 mm) y por unas variaciones interanuales y estacionales muy marcadas. Otoño y primavera son las estaciones más húmedas, mientras que el verano se caracteriza por ser un periodo prolongado de ausencia de lluvia.

### 3. Lluvia simulada y metodologías paralelas

La metodología seguida para el estudio de la hidrología y erosión de los suelos con lluvia simulada está acompañada a su vez de otras técnicas y métodos paralelos.

El trabajo de campo se inicia con la realización de un croquis geomorfológico y la descripción de un perfil del suelo, a lo cual se acompaña un inventario florístico. Tras este trabajo de introducción general a la zona de estudio, se realiza una descripción de las características de la superficie del suelo, en la que se tienen en cuenta pedregosidad y posición de ésta en el suelo, encostramiento y su espesor, agrietamientos: tamaño de las grietas y polígonos formados por ellas.

Una segunda fase es la medición del porcentaje de cubierta de fragmentos de rocas, de vegetación, de hojarasca, etc., lo cual también se puede realizar más exactamente desde una fotografía del suelo. De la misma superficie se toman dos muestras: una en superficie (0-2 cm) y otra en profundidad (4-6 cm) para determinar la humedad, y otra para determinar la densidad del suelo (0-6 cm). En ocasiones la reducida profundidad del regolito no nos permite sino tomar esta última muestra a tan solo una profundidad de 2-3 cm.

El que todo el muestreo se centre en la parte superficial (0-6 cm) se debe a que estos suelos degradados, o simplemente regolito, tienen espesores muy reducidos. Además, procesos de producción de escorrentía en ellos afecta básicamente a las capas superficiales.

Dentro del trabajo de laboratorio o gabinete se realizan las siguientes mediciones. De las muestras de suelo tomadas a distintas profundidades se determinaba la humedad del suelo por gravimetría, además del contenido en materia orgánica (Walkley-Black), la textura (USDA), el carbonato cálcico (calcimetría de Bernard), y el color en seco (Munsell chart).

Sobre la superficie elegida, y de la que disponemos, además de las descripciones, una fotografía tomada previamente al experimento, se coloca una parcela de forma circular de 0,25 m<sup>2</sup>, aunque esto dependerá del tipo de simulador de lluvia y de las características del experimento. El siguiente paso es la colocación del simulador sobre la parcela y su puesta en funcionamiento.

Una vez iniciada la lluvia se miden los tiempos en los que se producen cambios en la superficie del suelo. En el caso de los badlands éstos suelen ser: encharcamiento (tp), inicio de la escorrentía en la superficie del suelo (te), cierre de grietas (tg), inicio de la escorrentía en los rills (tr), y existencia de escorrentía en el colector (tes), lo que supondrá la medición de ésta.

En todos los experimentos las mediciones del caudal se realiza cada 30 segundos mientras el caudal no alcance a la estabilidad. Cuando esto se produce, las muestras se empiezan a tomar cada minuto, si bien se puede mantener los intervalos de 30 segundos, aunque esto no aumenta la precisión significativamente. En los badlands, cuando se produce la estabilización, generalmente antes de 15-20 minutos, se debe dejar un tiempo prudencial de comprobación de esta tendencia (10 minutos), tras lo que procede a parar la precipitación (normalmente en el minuto 30). La escorrentía debe seguir midiéndose hasta que finalice, anotándose tanto el tiempo en el que sucede (tef) como el volumen de ésta.

Uno de los grandes problemas en este tipo de metodologías es la determinación de los tiempos en que suceden los cambios hidrológicos o morfológicos en/de las superficies. Para el encharcamiento (tp) se ha tomado como umbral el momento en el que el 40 % de la superficie encharcable lo está. El tiempo de escorrentía en superficie (te) y en rills (tr) se anota cuando se observa el movimiento del agua previamente encharcada, mientras que el tiempo de escorrentía en salida (tes) o el fin de ésta (tef) se determina cuando el intervalo de goteo en el colector es mayor a 3 segundos. Por lo que respecta al cierre de grietas (tcg) se determina el momento en el que empiezan a cerrarse, y cuando éstas están definitivamente cerradas.

Además, estas mediciones del tiempo, al conocer la precipitación, se pueden transformar en volúmenes necesarios para producir cambios en los suelos.

Una vez terminado el experimento se toma otra fotografía para poder comprobar los cambios morfológicos producidos por la precipitación y se procede a la medición del frente de humedad abriendo el suelo.

Durante la realización del experimento se debe evaluar la calidad de la precipitación con dos o más pluviómetros, si bien lo mejor e imprescindible es haber realizado un exhaustivo calibrado de las boquillas en laboratorio.

Las muestras de escorrentía deben ser medidas en su totalidad para poder abordar el estudio del hidrograma con fiabilidad, y de éstas alguna debe ser guardada para la medición de la concentración de sedimentos en el laboratorio. Si bien, lo más conveniente es que esta medición afecte a todas las muestras. Es aconsejable que como mínimo se tome una muestra al principio de la escorrentía, y una al final, cuando el caudal es estable, mientras que entre estas dos se debe tomar otra en los minutos en que la escorrentía inicia la estabilización. Con ésto se tendrá conocimiento de las tasas de erosión y concentración de sedimentos con cierta fiabilidad, aunque para conocer la tendencia de la concentración de sedimentos es necesario tomar más muestras.

También es conveniente medir la conductividad eléctrica de las muestras de escorrentía para conocer su nivel de salinidad. Para esta metodología consultar Navas (1988).

Para el tratamiento de la información es conveniente ajustar los datos reales de la escorrentía a ecuaciones que definan el proceso con claridad para poder obtener parámetros fiables. Un ejemplo puede ser la ecuación de Horton (1933):

$$i = f_c - (f_0 - f_c) e^{-\alpha t}$$

Donde:  $i$  = tasa de infiltración instantánea  
 $f_c$  = infiltración final o constante  
 $f_0$  = infiltración inicial  
 $t$  = tiempo  
 $\alpha$  = decaimiento exponencial de  $i$

En los suelos degradados la concentración de sedimentos es muy alta por lo que puede alterar los volúmenes reales de la escorrentía. Aquí se presentan dos posibilidades en el análisis de los datos: uso de los valores de la escorrentía (sin sedimentos), o bien de la arroyada (con sedimentos). Para las dos posibilidades se presentan los correspondientes resultados, tanto en las muestras individuales como en los ajustes de la ecuación de Horton, y en los parámetros hidrológicos y erosivos según las dos posibilidades. El volumen de los sedimentos se ha obtenido a partir del peso de los sedimentos obtenido en el laboratorio, atribuyéndole una densidad media de 2.6 gr cm<sup>3</sup> (Duchafour, 1975).

El simulador de lluvia utilizado es del tipo pulverizador (Hudson, 1982), y es una adaptación del modelo diseñado por Calvo *et al.*, (1988). Es similar en tamaño y funcionamiento a otros usados en medios semiáridos (Wilcox, 1986; Wood, 1987), y en zonas de badlands (Scoging & Thornes, 1980; Imeson, 1977; Gerits, 1991). Nuestro diseño ha sido utilizado por un grupo de investigadores durante los cinco últimos años con resultados satisfactorios, tanto en ambientes semiáridos (Alexander & Calvo, 1990; Sala & Calvo, 1990; Cerdà & Calvo, 1991; Payà y Cerdà, 1992), como en otros muy distintos (Ruiz-Flaño, 1992; Cerdà, 1993; Cerdà, 1994).

La lluvia simulada siempre se ha producido con agua desionizada debido a la importancia de la composición química en la generación de la escorrentía de este tipo de suelos (Imeson & Verstraten, 1988). La intensidad de la lluvia utilizada en esta investigación es de 55 mm h<sup>-1</sup>, la cual es la que mejor distribución de la lluvia presenta la boquilla estipulada por Cerdà (1993), y está de acuerdo con chaparrones con períodos de recurrencia entre 5 y 10 años para el País Valenciano.

#### 4. Resultados

Como ejemplo de la aplicación de las metodologías paralelas y del propio simulador de lluvia sobre superficies degradadas o badlands se presentan los resultados de cuatro experimentos: dos en Monnegre y dos en Petrer.

#### 4.1 Características de las superficies y los suelos

Todas las superficies presentadas se caracterizan por la inexistencia de cubierta vegetal, baja pedregosidad, y un fuerte encostramiento por procesos químicos y físicos (1-2 cm). En los casos presentados de Petrer (PR2802 y PR1504) las grietas forman dos polígonos diferentes: uno de 10-12 cm de diámetro, con grietas de 10-8 mm de grosor, y otro de 2-3 cm con grietas de 1 mm, siendo en PR1504 donde están más desarrolladas y visibles. En el caso presentado de Monnegre (MN1301 y MN1302) son dos experimentos realizados en épocas diferentes sobre el mismo suelo con una morfología de pop-corn (Hodges y Bryan, 1982) en el que los polígonos mayores (3-5 cm de diámetro) están formados por grietas de 5-6 mm de grosor. Los polígonos menores son incipientes y están formados sobre grietas menores de 1 mm. En MN1302 las grietas estaban mucho más marcadas y eran más profundas, con la presencia del segundo polígono formado en su totalidad.

Los colores blancos son los predominantes en las dos zonas de estudio (8/2 Y white), aunque también existen margas rojizas y grisáceas.

En general, todos los suelos presentan las mismas características: bajos contenidos en materia orgánica, texturas dominadas por el limo (franco arcillosa limoso o franco limoso), y elevados contenidos de carbonato cálcico (Tabla 1). Todas estas características explican una densidad aparente del suelo muy alta.

Las muestras de humedad indican contenidos mayores de agua en profundidad, si bien es imposible correlacionar los experimentos entre sí, ya que las pruebas fueron realizados en diferente estaciones, y por lo tanto la humedad previa es muy diferente para cada uno de ellos (tabla 4.2).

Tabla 1. Características de los suelos. Densidad aparente (gr cm<sup>3</sup>), humedad en superficie (h, 0-2 cm) y profundidad (h, 4-6 cm), materia orgánica, textura y carbonato cálcico (%)  
*Soil characteristics. Bulk density (gr cm<sup>3</sup>), surface (h, 0-2 cm) and subsurface moisture content (h, 4-6 cm), organic matter, grain size and calcium carbonate (%)*

Suelo	Densidad gr cm <sup>3</sup>	h(0-2) %	h(4-6) %	M. orgá. %	arena %	limo %	arcilla %	CaCO <sub>3</sub> %
PR2802	1.33	18.37	26.89	0.11	10.46	52.56	36.98	69.68
PR1504	1.40	9.51	10.37	0.15	8.65	58.40	32.95	68.93
MN1302	1.19	3.7	13.18	0.2	4.72	77.85	17.43	66.32
MN1301	1.19	6.9	7.14	0.2	4.72	77.85	17.43	66.32

#### 4.2. Respuesta hidrológica

Como se observa en la tabla 2, en estos suelos el encharcamiento se produce rápidamente, normalmente entre el primer y segundo minuto, aunque en el caso de MN1302 se demora hasta cinco minutos debido a la mayor sequedad superficial del suelo y al volumen de grietas. Tras el encharcamiento se produce rápidamente la escorrentía superficial debido a la falta de hojarasca, pedregosidad o vegetación que retenga el agua encharcada. Cuando existen los surcos (rills), caso de PR2802, la escorrentía se produce rápidamente en ellos, pero normalmente se produce con anterioridad el drenaje de la zona de entre-surcos (interrill). El siguiente estadio es la llegada de la escorrentía a la salida o colector (tes), lo cual en este tipo de superficies no se demora más de 2-3 minutos respecto al inicio de la escorrentía.

El cierre de las grietas normalmente se produce después del inicio de la escorrentía en la zona de entre-grietas, lo que supone que importantes volúmenes de la arroyada circulan por estas hendiduras como zonas de flujo preferente que son. La importancia de este proceso, infiltración o flujo preferente, puede explicar en parte el origen de los surcos (rills) y tubos (pipes).

Esta sincronización de los diferentes cambios morfológicos superficiales: encharcamiento, escorrentía superficial, en rills y en salida, después en rills, y finalmente cierre de grietas, es el proceso normal, si

bien en algunos casos se puede llegar al cierre de grietas antes que la aparición de escorrentía, o bien que la escorrentía se produzca en el surco antes que en la zona de entre-surcos.

La escorrentía finaliza normalmente entre 1 y 2 minutos después de la precipitación, aunque en ocasiones, en suelos con una fuerte pendiente (PR2802) la salida del agua se produce más rápidamente.

Tabla 2. Tiempo (minutos) de los cambios hidrológicos y morfológicos de las superficies ante la lluvia simulada. *tp*, tiempo de encharcamiento; *te*, tiempo de escorrentía en superficie; *tr*, tiempo de escorrentía en surcos (rills); *tg*, tiempo de cierre de grietas; *tes*, tiempo de escorrentía en salida; *tef*, tiempo de escorrentía final (desde el fin de la lluvia). (nr) superficie sin surcos

*Time (minutes) to the surface hydrological and morphological changes to the simulated rain. tp, time to ponding; te, time to surface runoff; tr, time to rill runoff; tg, time to cracks closed; tes time to spout runoff; tef, time to runoff end (from the rain end). (nr) Surface without rills*

PRUEBA	tp (min)	te (min)	tr (min)	tg (min)	tes (min)	tef (min)
PR2802	1.3	2.13	3.15	7	3.45	0.50
PR1504	1.2	1.5	nr	4.07	2	1
MN1302	5	5.37	nr	6.4	6	1.58
MN1301	1.05	1.15	nr	4.05	1.35	1.3

Tabla 3. Parámetros hidrológicos más importantes: *Esm*, Escorrentía media ( $\text{mm h}^{-1}$ ), *Ce*, coeficiente escorrentía y  $\alpha$ , *fc* y *fo* parámetros de la ecuación de Horton ( $\text{mm h}^{-1}$ ). (S) eliminado el volumen de sedimentos

*Main hydrology parameters: Esm, Average runoff ( $\text{mmh}^{-1}$ ), Ce, Runoff coefficient and  $\alpha$ , fc and fo, Horton equation parameters ( $\text{mm h}^{-1}$ ). (S) Without the sediment volume*

PRUEBA	Esm $\text{mm h}^{-1}$	Ce	$\alpha$ $\text{min}^{-1}$	fc $\text{mm h}^{-1}$	fo $\text{mm h}^{-1}$
PR2802	45.31	0.82	0.42	-0.29	237.08
PR2002S	44.56	0.81	0.42	0.31	237.14
PR1504	43.22	0.79	0.77	7.01	212.69
PR1504S	41.97	0.76	0.73	8.28	192.99
MN1302	26.94	0.51	0.25	14.24	181.78
MN1302S	26.17	0.49	0.26	15.64	188.71
MN1301	45.92	0.83	0.30	-0.86	94.08
MN1301S	45.00	0.82	0.31	0.32	93.80

Los suelos estudiados presentan unas escorrentías medias muy altas, a pesar de una duración de los experimentos relativamente corta (30 minutos). Todas, excepto MN1302 por su sequedad, presentan escorrentías medias mayores a  $40 \text{ mm h}^{-1}$ . Los coeficientes de escorrentía ratifican esta característica: altos volúmenes de agua exportados fuera del sistema (tabla 3).

Los ajustes de la ecuación de Horton muestran como a pesar de capacidades de infiltración iniciales (*fo*) altas, el volumen de infiltración estable o constante (*fc*) es muy bajo, y en ocasiones dan resultados cercanos a cero, o incluso negativos.

Los valores de  $\alpha$  (decaimiento exponencial de la capacidad de infiltración) muestran valores muy altos, lo que indica que se alcanza la infiltración constante o estable muy rápidamente (figuras 2, 3, 4 y 5).

Otros parámetros hidrológicos de gran interés son la tasa de escorrentía media (*Esm*) y el coeficiente de escorrentía (*Ce*) de cada experimento, los cuales son extraídos directamente de los datos reales (ver tabla 3).

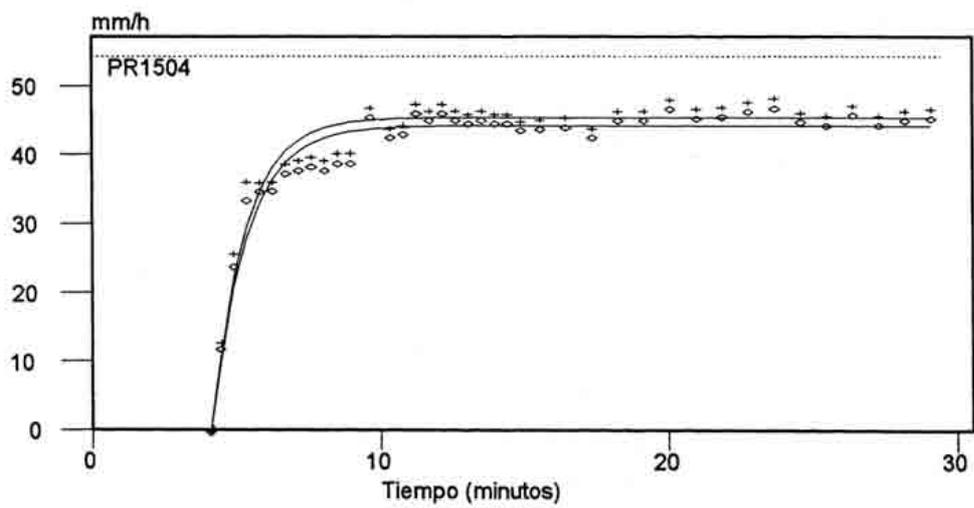
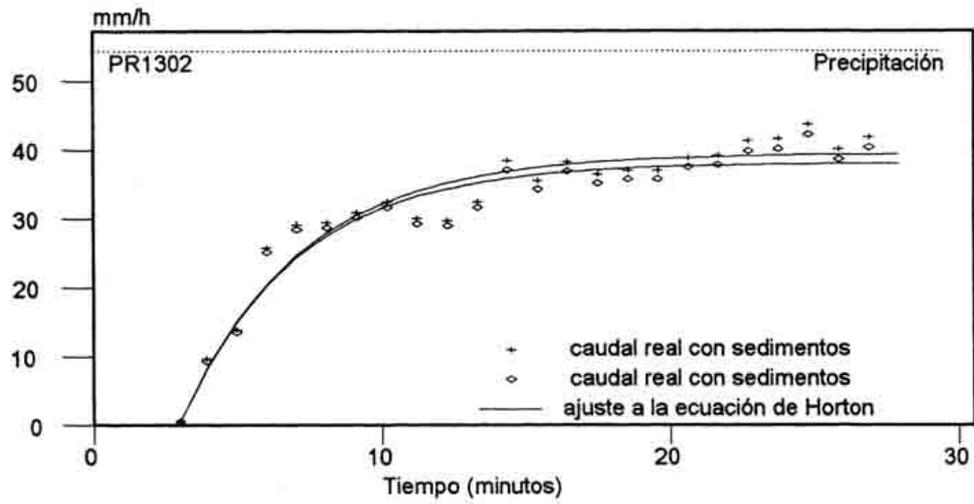


Figura 2 y 3. Hidrograma del experimento PR2802 y PR1504  
*Hydrograph (PR2802 and PR1504 experiment)*

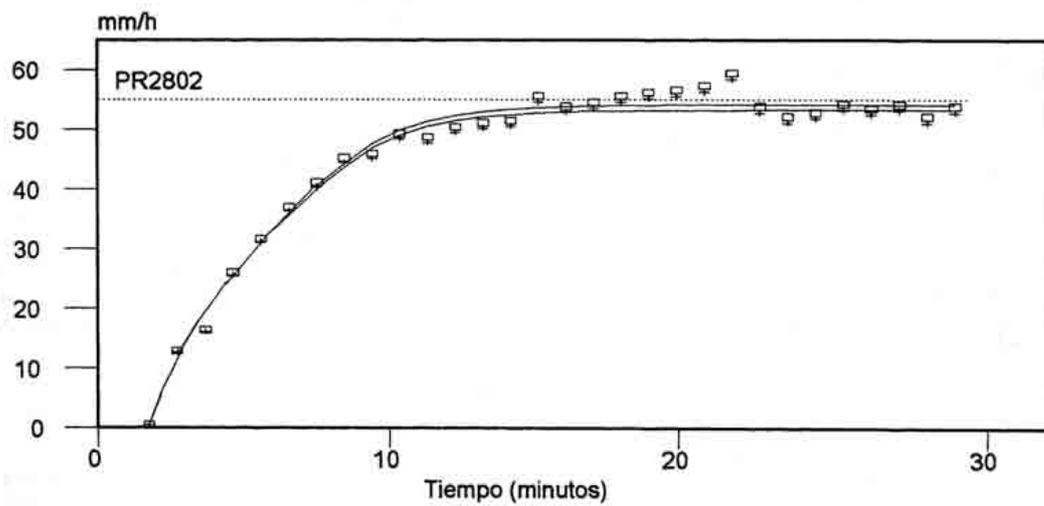
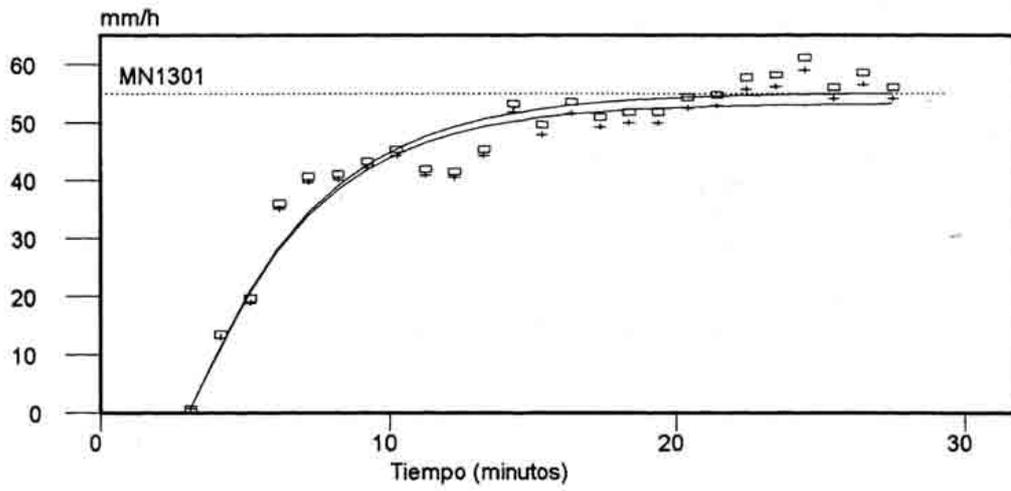


Figura 4 y 5. Hidrograma (experimento MN1302 y MN1301)  
*Hydrograph (MN1302 and MN1301 experiment)*

La sustracción del volumen de sedimentos del caudal (experimentos marcados con una S) nos muestra que los valores de la escorrentía media y los coeficientes de escorrentía se reduce en ocasiones de forma importante (ver el caso de PR1504S, tabla 3).

En el caso de los parámetros de la ecuación de Horton, los resultados no son unidireccionales en ninguno de ellos. Tanto  $f_c$ ,  $f_o$ , como  $\alpha$  unas veces presentan valores mayores con la eliminación de los sedimentos de los volúmenes de escorrentía, y otras menores.

#### 4.3 Pérdida de suelo.

Los suelos degradados se caracterizan tanto por los elevados volúmenes de escorrentía como por la gran cantidad de sedimentos que ésta transporta. En los casos aquí presentados encontramos concentraciones de sedimentos en la escorrentía mayores de  $50 \text{ g l}^{-1}$ , alcanzando los  $120 \text{ g l}^{-1}$  en PR1504. En este último experimento, tan elevada concentración de sedimentos se debe a que en parte de la parcela había sido alterada la costra superficial por acción antrópica.

El volumen de sedimentos exportados por estos suelos ha sido muy elevado a pesar de la corta duración del evento simulado y de la reducida superficie sobre la que se realiza el experimento (ver tabla 4).

Por lo que respecta a la erosión se observan tasas mayores a  $2 \text{ Kg m}^2 \text{ h}^{-1}$ , llegándose en algunos casos a más que duplicar esta cantidad.

Tabla 4. Pérdida de suelo.  $cs$ , Concentración de sedimentos ( $\text{g l}^{-1}$ ),  $sy$ , sedimentos de campo (gr) y  $er$ , erosión ( $\text{gr m}^2 \text{ h}^{-1}$ )  
*Soil loss.  $cs$ , Sediment concentration ( $\text{g l}^{-1}$ ),  $sy$ , sediment yield (gr) and  $er$ , erosion ( $\text{gr m}^2 \text{ h}^{-1}$ )*

PRUEBA	$cs$ ( $\text{g l}^{-1}$ )	$sy$ (gr)	$er$ ( $\text{gr m}^2 \text{ h}^{-1}$ )
PR2802	49.48	186.33	2241.81
PR2802S	49.48	183.25	2204.81
PR1504	120.03	572.79	5187.43
PR1504S	120.03	556.32	5038.30
MN1302	88.88	232.88	2394.52
MN1302S	88.88	226.20	2325.86
MN1301	56.68	244.95	2602.58
MN1301S	56.68	240.05	2550.45

La eliminación de los volúmenes de los sedimentos en la escorrentía (S) muestra alteraciones poco importantes, pero existentes, entre las dos posibilidades de análisis de la muestra. La tendencia al eliminar el volumen ocupado por los sedimentos del caudal es a reducir la tasa de erosión y sedimentos de campo, mientras que la concentración de sedimentos permanece inalterable debido a que este dato procede de la medición directa del volumen de sedimentos y agua por separado en el laboratorio.

## 5. Discusión

Las poco favorecedoras características de los suelos de los badlands para la infiltración (tabla 1), explican la rapidez con que se produce el encharcamiento, la escorrentía y el cierre de grietas (Tabla 2). Esto significa que con bajos volúmenes de precipitación se producen cambios importantes en la superficie del suelo. Por ejemplo, para el suelo de la parcela PR2802, con una intensidad de lluvia de  $55 \text{ mm h}^{-1}$ , son tan sólo necesarios 1.19 mm para producirse el encharcamiento, 1.95 mm para la escorrentía en superficie, 2.89 mm para que ésta se produzca en los surcos (rills), 3.16 mm en salida y 6.42 mm para que se cierren la grietas totalmente.

Este comportamiento explica el que los coeficientes de escorrentía y escorrentías medias sean muy altos, y que los parámetros de la ecuación de Horton muestren la baja infiltrabilidad de estos suelos.

El tratamiento de los datos de escorrentía sin el volumen de los sedimentos ha supuesto cambios en los resultados. Los parámetros coeficiente de escorrentía ( $C_e$ ) y escorrentía media ( $E_{sm}$ ) tienen un comportamiento unidireccional, ya que la no contabilización de estos volúmenes reduce sus valores.

Los parámetros de la ecuación de Horton tiene un comportamiento distinto según que caso. Ésto se debe a que la concentración de sedimentos varía a lo largo del experimento, con lo que el volumen sustraído de la escorrentía como volumen sólido puede ser mayor al principio o al final.

Esto se debe en parte a que con solo tres muestras no se consigue identificar una clara tendencia de la concentración de sedimentos en la escorrentía (Tabla 4), la cual si ha sido identificada en otros trabajos con mayor número de muestras como positiva (Gerits, 1991).

Es conveniente que cuando se quiera conseguir una gran fiabilidad del método se mida en todas las muestras de escorrentía (al menos cada uno ó dos minutos) la concentración de sedimentos, y de esta forma se conocerá tanto la tendencia de este parámetro como los volúmenes de agua y sedimentos exportados cada intervalo de tiempo.

Tabla 5. Cambios en la concentración de sedimentos de la escorrentía ( $g\ l^{-1}$ ) a lo largo de los experimentos.

*Runoff sediment concentration changes ( $g\ l^{-1}$ ) along the experiments*

MUESTRA	Inicial ( $g\ l^{-1}$ )	Intermedia ( $g\ l^{-1}$ )	Final ( $g\ l^{-1}$ )
PR2802	42.39	48.64	52.22
PR1504	191.51	92.35	76.24
MN1301	108.01	66.13	92.49
MN1302	53.58	55.39	61.26

En el caso de los experimentos con infiltración ligeramente negativa ( $-0,29$  y  $-0,86\ mm\ h^{-1}$ ) los ajustes con los nuevos datos (descontando los volúmenes de los sedimentos) se transforman en valores positivos, aunque insignificantes ( $1,31$  y  $0,32\ mm\ h^{-1}$ ). Otros autores han encontrado ajustes ligeramente negativos al medir la infiltración en suelos degradados, y para ello aconsejan igualarlos a cero (Berndtsson, 1988). En definitiva lo que nos confirma estos resultados es que la infiltrabilidad de los badlands en algunas superficies es cercana o igual a cero.

Con la nueva metodología, basada en la eliminación del volumen ocupado por lo sedimentos, hay una reducción de los sedimentos de campo y de las tasas de erosión, pero los cambios son insignificantes si los comparamos con el volumen total erosionado.

## 6. Conclusiones

Los suelos de los espacios degradados, y en este caso concreto de los badlands sobre margas Senonenses, se caracterizan por tener unas densidades aparentes altas, elevados contenidos en limos y en carbonato cálcico, junto a la inexistencia de materia orgánica. Estas características explican que el encharcamiento y la escorrentía se produzca con rapidez, incluso con reducidos volúmenes de precipitación. El volumen de agua exportado fuera del sistema es muy alto, en ocasiones superior al 80 %, mientras que las tasas de infiltración final estable son muy bajas (cercanas a cero).

En general, la pérdida de suelo es muy alta, lo que es debido tanto las elevadas tasas de escorrentía como la fuerte erosionabilidad de estos suelos.

El uso de la lluvia simulada se muestra como muy adecuada para el estudio de la hidrología y la erosión de estas superficies degradadas, tanto por los resultados como por la irregularidad de las precipitaciones naturales. Los simuladores de lluvia permiten conseguir resultados rápidos y de gran calidad con experimentos estandar repetidos sobre distintas superficies.

La experiencia aconseja tomar todas las muestras de escorrentía, y de éstas determinar en al menos tres la concentración de sedimentos: una al inicio, otra al final (escorrentía estable), y otra intermedia.

En los experimentos sobre suelos que produzcan escorrentías con elevadas concentraciones de sedimentos se debe restar de las muestras de escorrentía el volumen ocupado por los sedimentos para no alterar los parámetros hidrológicos y los erosivos.

En general, las diferencias entre un método y otro (eliminar o no el volumen de los sedimentos del hidrograma) son de alrededor del 1% del volumen escurrido en estos experimentos, lo que supone un alteración insignificante de los resultados. En cambio si el estudio se hace desde el punto de vista de la infiltración estas alteraciones pueden ser relevantes ya que incluso, como ocurría en dos de los casos estudiados, se pueden producir tasas de infiltración negativas provocadas por el volumen de sedimentos.

Aunque para conocer los valores medios de la concentración de los sedimentos tres muestras son suficientes, para determinar la tendencia temporal de esta variable es aconsejable tomar un número mayor, preferiblemente toda la escorrentía en muestras de un minuto.

### Agradecimientos

Agradezco la ayuda prestada durante el trabajo de campo por Mario Payà y su familia, Jorge Payà, Vicent Altur y Roser Ibáñez, así como la colaboración de Adolfo Calvo Cases y Rafael García Bartual en el diseño experimental y el tratamiento de la información. También quiero mostrar mi gratitud a F. López Bermúdez por la revisión de trabajo. Parte del soporte financiero ha sido aportado por la CICYT-PNICYDT con los proyectos NAT89-1072-C06-04 y AMB93-0844-C06-04.

### Referencias bibliográficas

- Alexander, D. (1982): Difference between "calanchi" and "biancane" badlands in Italy. En Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 71-88.
- Alexander, R.W. & Calvo, A. (1990): The influence of lichens on slope processes in some Spanish Badlands. In Thomes, J.B. (Ed.): *Vegetation and Erosion: Process and Environments*, 385-98.
- Benito, G., Gutiérrez, M. & Sancho, C. (1991): Erosion patterns in rill and interill areas in badlands zones of the middle Ebro basin (N.E-Spain). En SALA, M., Rubio, J.L. y García-Ruiz, J.M. (Eds.): *Soil Erosion Studies in Spain*, 41-54.
- Berndtsson, R. (1988): *Spatial hydrological processes in a water resources planning perspective. An investigation of rainfall and infiltration in Tunisia*. University of Lund. Report nº 1009, 315 p.
- Bryan, R. & Yair, A. (1982a): *Badland geomorphology and piping*. University Press, Cambridge, 409 p.
- Bryan, R. & Yair, A. (1982b): Perspectives on studies of badland geomorphology. En Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 1-12.
- Calvo, A., Gisbert, B., Palau, E. & Romero, M. (1988): Un simulador de lluvia de fácil construcción. En Gallart, F. and Sala, M. (Eds.): *Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos*, Sociedad Española de Geomorfología, Monografía 1, Barcelona, 6-16.
- Calvo, A.M. & Harvey, A.M. (1989): Distribution of badlands in Southeast Spain: Implications of climatic change. En Imeson, A.C. and De Groot, R.S. (Eds.): *Landscape-ecological Impact of Climatic Change*.
- Campbell, I.A. (1974): Erosion rates in the Steeple badlands, Alberta. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 21, 122-137.
- Campbell, I.A. (1982): Badland and Badland Gullies. En Thomas, D.S.G. (Ed.): *Arid Zone geomorphology*, 159-186.
- Campbell, I.A. (1987): Infiltration Characteristics of Badlands Surface and Storm Runoff. En Y.-F. Fok (Ed.) *Pre-Conference Proceedings of the International Conference on Infiltration Development and Application*, 251-261
- Cerdà, A. (1993): *La Infiltración en los Suelos del País Valenciano. Factores y Variaciones Espacio-Temporales*. Tesis Doctoral Inédita, Universitat de València, 357 p + apéndices.
- Cerdà, A. (1994): *Response to laboratory simulated rain of the eight ERMES project Israeli study areas (Judean Desert and Galilee Mountains) in winter conditions*. Dossier Preliminar, 25 p.
- Cerdà, A. & Calvo, A. (1991): Influencia del fuego en la escorrentía y la erosión (Serra Grossa, Valencia). *XII Congreso Nacional de Geografía*, Valencia, 23-27.
- Clotet, N., Gallart, F. & Sala, M. (1987): Los badlands: características, interés teórico, dinámica y tasas de erosión. *Notas de Geografía Física*, 15-16.

- Duchafour, P. (1975): *Manual de edafología*. Barcelona, Toray-Masson, s.a., 476 p.
- Elías Castillo, J. & Ruiz Beltrán, L. (1977): *Precipitaciones máximas en España*. Ministerio de Agricultura, Madrid, 545 p.
- Gerits, J.J.P. (1991): *Physico-chemical thresholds for sediment detachment, transport and deposition*. Tesis doctoral inedita. Universiteit van Amsterdam, 186 pp.
- Harvey, A.M. (1982): The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain. En Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 317-336.
- Harvey, A.M., & Calvo, A. (1991): Process interactions and rill development on badlands and gully slopes. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.* 83, 175-94.
- Hodges, W.K. (1982): Hydraulic characteristics of a badland pseudo-pediment slope system during simulated rain-storm experiments. En Bryan, R.B. y Yair, A. (Eds.): *Badland Geomorphology and Piping*, 127-152.
- Hodges, W.K. & Bryan, R.B. (1982): Runoff and Sediment Transport Dynamics in Canadian Badland Micro-Catchments. En Bryan, R.B. y Yair, A. (Eds.): *Badland Geomorphology and Piping*, 13-46.
- Horton, R.E. (1933): The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS Trans A.G.U.*, 14, 446-460.
- Hudson, N. (1982): *Conservación del suelo*. Ed. Reverte s.a., 335 pp.
- IGME (1978a): *Mapa Geológico de España*. (E:1/50.000). ELDA (Hoja 871).
- IGME (1978b): *Mapa Geológico de España*. (E:1/50.000). ALICANTE (Hoja 872).
- Imeson, A. C. (1977): A simple field-portable rainfall simulator for difficult terrain. *Earth Surface Processes*, 2, 431-36.
- Imeson, A.C. (1983): Studies of erosion the thresholds in semi-arid areas: field measurement of soil loss and infiltration in northern Marocco. *Catena Supplement* 4, 79-89.
- Imeson, A.C. & Verstraten, J.M. (1988). Rills on badland slopes: a physico-chemical controlled phenomenon. *Catena suppl.-Bd.*, 12, 139-53.
- Imeson, A.C., Kwaad, F.J.P.M. & Verstraten, J.M. (1982): The relationship of soil physical and chemical properties to the development of badlands in Morocco. En Bryan, R.B. y Yair, A. (Eds.): *Badland Geomorphology and Piping*, 47-70
- López-Bermúdez, F. & Albadalejo, J. (1990): Factores ambientales de la degradación del suelo en el área mediterránea. En Albadalejo, J., Stocking, M.A. y Diaz, E. (Eds.): *Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas*, 15-45.
- Navas, A. (1988): *La Participación de los Yesos en la Salinización de las Aguas Superficiales de la Cuenca del Ebro*. Tesis Doctoral inedita. Universidad de Zaragoza, 444 p.
- Parcker, R.S. & Schumm, S.A. (1982): Experimental study of drainage networks. En Bryan, R.B. y Yair, A. (Eds.): *Badland Geomorphology and Piping*, 153-168
- Payà, J. (1991): Fases de incisión y estabilización en la cuenca del río Monnegre (Alicante). *VIII Reunión Nacional sobre Cuaternario*, Valencia.
- Payà, J. & Cerdà A. (1992): Cambios morfológicos y respuesta a la lluvia simulada de tres superficies de Badland, Petrer, Alacant. En *Actas de la 2ª Reunión Nacional de Geomorfología*, 161-170.
- Rodríguez Aizpeolea, J. (1992): Un ejemplo de la influencia del uso y abandono de banales de fondo de canal en la evolución de Badlands (Petrer-Alacant). En *Actas de la 2ª Reunión Nacional de Geomorfología*, 211-220
- Rubio, J.L. (1987): Desertificación en la Comunidad Valenciana: antecedentes históricos y situación actual de la erosión. *Revista Valenciana d'Estudis Autònoms*, 7, 231-258.
- Ruiz Flaño, P. (1992): *La evolución geomorfológica de campos abandonados en áreas de Montaña: El ejemplo del valle de Aisa. Pirineo Aragones*. Tesis Doctoral inedita, Universidad de Zaragoza, 287 p.
- Sancho, C., Benito, G. & Gutiérrez, M. (1991): *Agujas de Erosión y Perfiladores Microtopográficos*. Cuadernos Técnicos de la S.E.G., nº 2, 28 p.
- Sala, M. & Calvo, A. (1990): Response of four different mediterranean vegetation types to runoff and erosion. En Thornes, J.B. (Ed.): *Vegetation and Erosion: Process and Environments*, 347-62.
- Scoging, H. (1982): Spatial variations in infiltration runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain. En Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 89-112.
- Scoging, H.M. & Thornes, J.B. (1980): Infiltration characteristics in a semiarid environment. *IAHS Publication*, 128, 159-168.
- Sdao, G.; Simone, A. & Vittorini, S. (1984): Osservazioni geomorfolochique su calanchi e biancane in Calabria. *Geogr. Fis. Diman. Quat.*, 10-16.

- Vittorini, S. (1977): Osservazioni sull'origine e sul ruolo di due forme di erosione nelle argille: calanchi e biancane. *Boll. della Società Geografica Italiana*, VI, 25-54.
- Wells, S.G. & Gutiérrez, A.A. (1982): Quaternary evolution of badlands in the south-eastern Colorado Plateau, USA. En Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 239-258.
- Wilcox, B.P., Wood, M.K., Tromble, J.T. & Ward, T.J. (1986): A hand-portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management*, 39 (4), 331-5.
- Wise, S.M., Goldberg, P. & Brimer, B. (1982): Long term denudation rates in the Zin-Havarim badlands, Northern Negev, Israel. En Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 259-278.
- Wood, M.K. (1987): Plot numbers required to determine infiltration rates and sediment production on rangelands in south central New Mexico. *Journal of Range Management*, 40 (3), 259-63.
- Yair, A., Goldberg, P. & Brimer, B. (1982): Long term denudation rates in the Zin-Havarim badlands, northern Negev, Israel. En Bryan, R. y Yair, A. (Eds.): *Badland geomorphology and piping*, 279-292.
- Yair, A., Lavee, H., Bryan, R.B. & Adar, E. (1980): Runoff and erosion processes and rates in the Zin Valley Badlands, northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 5, 205-225.