

Producción de sedimentos y tasas de erosión en suelos yesíferos del sector central de la depresión del Ebro

G. Desir

Departamento de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12. 50.009 Zaragoza.
E-mail: gdesir@posta.unizar.es

RESUMEN

El estudio se basa en el análisis de diez años de registro continuo de precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en dos Estaciones Experimentales para el estudio de la erosión hídrica instaladas sobre materiales yesíferos del sector central de la Depresión del Ebro. Los parámetros fundamentales que controlan la producción de sedimentos en éstas áreas son las características de la lluvia, la vegetación, la alta erodibilidad de sus suelos y la respuesta hidrológica del suelo. Se ha identificado un doble umbral de precipitación e intensidad que controla la producción de sedimentos, uno para los 20 mm de lluvia total y otro de intensidad máxima superior a 60 mm/h. Las tasas de erosión son bajas como consecuencia de la elevada permeabilidad de estos suelos y de las características de las variables climáticas. La mayor producción de sedimentos corresponde a las laderas con orientación sur.

Palabras clave: Depresión del Ebro, parcelas experimentales, suelos yesíferos, tasas de erosión, umbrales, variables climáticas.

Sediment yield and erosion rates on gypsiferous soils of the central Ebro Depression

ABSTRACT

This study is based on a 10 years record of precipitation, runoff and sediment yield taken at two Experimental Fields where studies of soil erosion are being carried out. These Fields are on Miocene gypsiferous materials of the central Ebro Depression. The main control parameter for sediment yield is rainfall characteristics, vegetation, high erodibility and the hydrological response of soils. Two different thresholds has been identified, one on 20 mm rainfall and other above 60 mm/h maximum intensity. Erosion rates are low due to the high soil permeability and the climatic variables of the area. The highest sediment yield always is on southern facing slopes.

Key words: climatic variables, Ebro Depression, erosion rates, experimental plots, gypsiferous soils, thresholds.

INTRODUCCIÓN

El principal proceso que determina el desarrollo evolutivo del modelado actual de las formaciones yesíferas miocenas del sector central de la Depresión del Ebro es la erosión y la denudación química en forma de solutos producida por la escorrentía (Desir *et al.*, 1992; 1995; Gutiérrez *et al.*, 1995; Desir, 2000; Marín *et al.*, 2000).

Los relieves yesíferos del sector central de la Depresión del Ebro se estructuran en un extenso macromodelado en *badlands*. Son materiales

altamente erosionables, lo que unido a unas condiciones climáticas semiáridas hacen presuponer elevadas tasas de erosión y grandes cantidades de material exportado por el río Ebro fuera de la Cuenca. Así, López Cadenas *et al.* (1987) mediante cálculos empíricos basados en la USLE, dan unas tasas de erosión para las series margo-yesíferas del sector central de la Depresión del Ebro de hasta 200 Tm/ha/año. Navas (1988) señala que la cantidad de sales exportadas fuera de la cuenca puede alcanzar valores de 81,7 Tm/ha/año. Por otro lado, Desir *et al.* (1992) mediante métodos dinámicos obtienen, en una

primera fase de estudio, tasas de hasta 35 Tm/ha/año. Posteriormente, estos mismos autores (Desir *et al.*, 1995) dan unas tasas de erosión ligeramente inferiores a 25 Tm/ha/año.

Para el análisis de la erosión en éstas áreas se cuenta con un registro de 10 años, en el que se han analizado la escorrentía y la producción de sedimentos en sendas Estaciones Experimentales. Los objetivos que se persiguen mediante este análisis es conocer cuáles son los factores que controlan la respuesta erosiva en éstas áreas.

ÁREA DE ESTUDIO

En el sector central de la Depresión del Ebro sobre materiales margo-yesíferos miocenos pertenecientes a la Fm. Zaragoza se han instalado dos Estaciones Experimentales para el estudio de la erosión hídrica en los términos municipales de La Puebla de Alfindén y de Mediana de Aragón. Las Estaciones Experimentales se encuentran situadas sobre materiales yesíferos miocenos de la Formación Zaragoza (Quirantes, 1978). El modelado del área es muy homogéneo, tratándose de colinas redondeadas, en ocasiones coronadas por depósitos de glaciares o terrazas, y orladas por una amplia red de valles de fondo plano (Ibáñez y Mensua, 1976; Zuidam, 1976). Los suelos desarrollados en el área son entisoles carentes de horizontes de diagnóstico de escaso desarrollo que a menudo dejan aflorar el sustrato rocoso del cual proceden. Estos aparecen colonizados por una vegetación de tipo xérica y halófila, bajo la cual se encuentran los epipedones de mayores potencias. Una característica importante es la variabilidad que presenta el modelado en función de la exposición, encontrándose las mayores diferencias entre las laderas norte y sur. Así, las primeras presentan menor pendiente y mayor cobertera vegetal y espesor del regolito que las segundas (Desir *et al.*, 1992 y 1995; Gutiérrez *et al.*, 1995).

El clima es mediterráneo continental con escasas e irregulares precipitaciones, 350 mm, que se reparten en dos máximos pluviométricos, primavera y otoño. La temperatura media es de 15°C, con un elevado déficit hídrico, principalmente debido a la elevada evapotranspiración potencial que se registra en el área, 760 mm.

METODOLOGÍA

Las Estaciones Experimentales para el estudio de la erosión hídrica en las que se ha llevado a cabo este estudio se encuentran situadas en ambos márgenes del río Ebro, en las proximidades de las localidades de La Puebla de Alfindén y Mediana de Aragón (Fig. 1). La Estación Experimental, denominada La Puebla de Alfindén, está situada dentro del término municipal de dicha localidad de la cual dista unos 3,5 km en dirección norte. A su vez, la Estación Experimental de Mediana de Aragón está situada a 2 km al sudoeste de esta localidad dentro de su término municipal. Cada Estación Experimental está constituida por dos Parcelas situadas en las laderas de solana y umbría de un mismo cerro, si bien en La Puebla de Alfindén se hallan en continuidad morfológica en un mismo cerro, en Mediana de Aragón equidistan unos 100 m entre sí. Las Parcelas son de escala decamétrica, de aproximadamente 4 x 12 m, delimitadas artificialmente mediante un murete de ladrillo revestido de cemento, introducidos hasta unos 10 cm de profundidad y valladas para evitar actos vandálicos. Las Parcelas de la Estación Experimental de La Puebla de Alfindén presentan una superficie de 53,84 m² la parcela norte y 53,81 m² en la sur y, una pendiente media es de 15 y 22°, respectivamente. En Mediana de Aragón la superficie de las Parcelas es de 66,27m² en la situada al norte con una pendiente media de 18° y 50,38 m² en la sur con 24°. Las restantes características físicas de ambas parcelas aparecen reflejadas en la Tabla 1.

Para conocer el registro climático se ha instalado en cada una de las Estaciones Experimentales una estación meteorológica. En ambos casos, la estación se halla situada en la parte culminante de la ladera, separada 2 m del vallado para evitar interferencias con el mismo, y a una altura de 1,5 m de altura del nivel del suelo. Esta se compone de un pluviógrafo de balancín Unidata 6506-A, cuyo registro mínimo es de 0,2 mm de precipitación. Por otro lado, también se han instalado dos sensores, temperatura y humedad relativa del aire, Unidata 6501-EU, que recogen información cada 15 segundos, almacenando el valor medio de los datos tomados cada 2 minutos. El equipo de almacenaje de datos, *datalogger* modelo

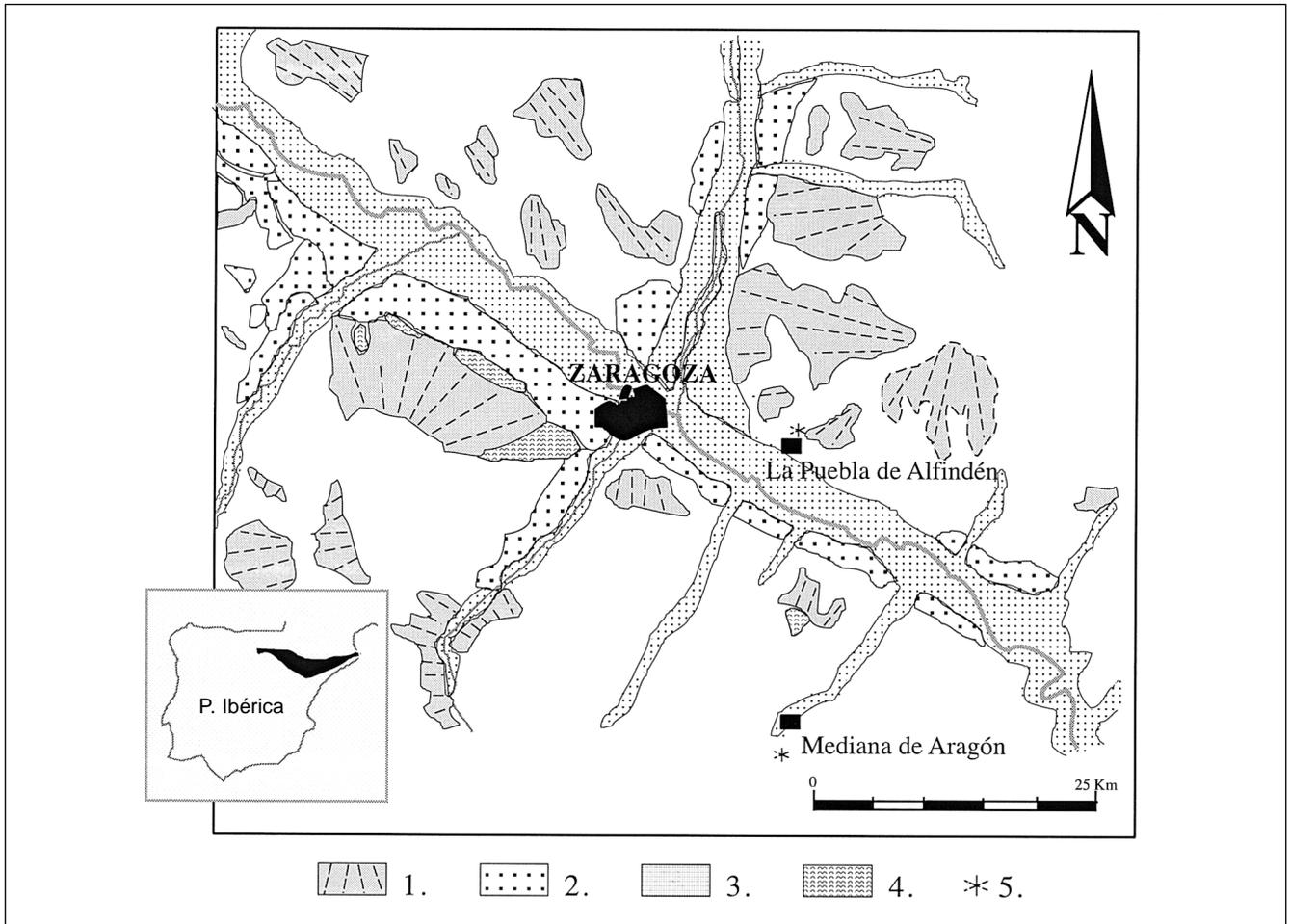


Fig. 1. Situación geográfica y esquema geomorfológico del área de estudio. 1. Glacis; 2. Terrazas; 3. Terraza actual y fondos de valles; 4. Zonas endorreicas; 5. Parcelas Experimentales

Fig. 1. Geographical situation and geomorphological scheme from the study area. 1. Pediments; 2. Terraces; 3. Floodplain and bottom valleys; 4. Endorreic areas; 5. Experimentals Fields

Unidata 7000 con 64 k de memoria RAM, permite en función de su configuración, el almacenamiento de datos correspondientes a una media de 18 días.

El estudio de la erosión hídrica se ha llevado a cabo mediante métodos dinámicos, instalando para ello un sistema de colectores y divisores a la salida de cada Parcela. El tren de tanques (Foto.1) consta de un tanque decantador, dos divisores tipo Geib modificados y un tanque colector (Albaladejo 1990, Desir *et al.*, 1992, 1995; Gutiérrez *et al.*, 1995; Sirvent *et al.*, 1993, 1996,

1997). El tanque decantador tiene una capacidad de 400 litros hasta el desborde al primer tanque divisor. En el interior del mismo, y a la entrada de la escorrentía se ha situado una cesta metálica perforada, con una luz de malla de 1 mm; que permite la separación de la fracción mayor a 1 mm del resto, facilitando la posterior homogeneización para la toma de muestras. Sobre ella, se ha colocado una bandeja de plástico de unos 5 litros de capacidad, que permite la recolección de la totalidad de la escorrentía de los eventos menores, los cuales de otro modo serían difíciles de medir y que representan un porcentaje ele-

	Estación Experimental La Puebla de Alfindén		Estación Experimental Mediana de Aragón	
	Parcela Norte (LPN)	Parcela Sur (LPS)	Parcela Norte (MDN)	Parcela Sur (MDS)
Superficie (m ²)	53,84	53,81	66,27	50,38
Pendiente (%)	15	22	18	24
Cobertera Vegetal (%)	70	30	65	35
Asociaciones Vegetales	<i>Rosmarineto-Linetum</i>		<i>Ononideto tridentatae</i>	
Materia Orgánica (%)	2,3	1,89	3,37	1,99
Líquenes (%)	16	25	20	35
Pedregosidad (%)	14	14	13	25

Tabla 1. Características de las Estaciones Experimentales de La Puebla de Alfindén (LP) y de Mediana de Aragón (MD) y de las Parcelas que la componen (Norte y Sur)

Table 1. Characteristics of the Experimental Fields of La Puebla de Alfindén (LP) and of Mediana de Aragón (MD) and of its Plots (North and South)

vado de la totalidad de los eventos con generación de escorrentía.

Cuando se produce el desbordamiento del tanque decantador, la escorrentía pasa al primer divisor, que divide la escorrentía en cinco partes iguales, pasando solamente una quinta parte al siguiente divisor. Este, al igual que el anterior, fracciona la escorrentía en cinco partes pasando en función de su configuración e instalación sólo 1/25 parte del total al último depósito. Este tanque, el colector, tiene una capacidad de 380 l hasta el desborde. La capacidad teórica de almacenaje total de todo el sistema es de aproximadamente de 10.000 l, unos 185 l/m², lo cual supone un evento para el área de estudio con un período de retorno superior a 100 años (Elías y Ruiz, 1979).

RESULTADOS

a) Precipitación

Para estudiar la pérdida de suelo se ha analizado, en primer lugar, las características climáticas del área y, en segundo, la producción de sedimentos recogida en las Parcelas durante un período de 10 años. Como ya se ha señalado las precipitaciones están fuertemente condicionadas por la distribución estacional de las lluvias. Estas se

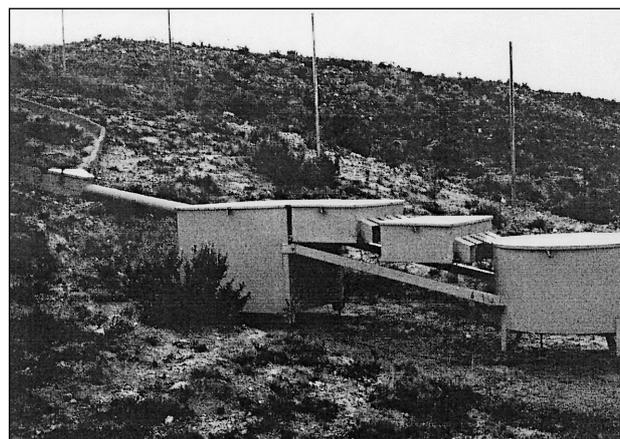


Foto 1. Vista lateral del tren de tanques y del sistema de emboque de la parcela perteneciente a la Parcela Experimental de La Puebla de Alfindén Norte

Photo 1. Lateral view of the tanks and dividers device and from the union with the Erosion Plot (La Puebla de Alfindén, North)

caracterizan por ser de pequeño volumen y elevada intensidad durante los máximos pluviométricos, mientras que en los interpluvios las lluvias son de menor intensidad pero de mayor volumen.

El análisis de la distribución de frecuencias de las variables climáticas muestra como en la Estación

Experimental de La Puebla de Alfindén un 18% de las precipitaciones registradas es inferior a 5 mm y sólo un 9% supera los 35 mm (Tabla 2). En la Estación Experimental de Mediana de Aragón estos porcentajes son similares; así, un 11,5% es inferior a 5 mm y sólo 3% supera los 35 mm. Por otro lado, cuando se analiza la distribución de frecuencias de la intensidad máxima (Tabla 2) muestra que un 58,3% es inferior a 20 mm/h en La Puebla de Alfindén mientras que en Mediana de Aragón este porcentaje se eleva hasta 87,4%. Los eventos que superan los 50 mm/h son muy pocos, 16% en La Puebla de Alfindén y 4% en Mediana de Aragón (Tabla 2). La intensidad máxima registrada en cada una de las Estaciones ha sido de 150 mm/h en La Puebla de Alfindén y de 120 mm/h en Mediana de Aragón. En La Puebla de Alfindén la precipitación media es de 14,3 mm, con una intensidad máxima de 27,3 mm/h y 8,5 mm/h de intensidad media. En Mediana de Aragón la precipitación media es de 14,9 mm con una intensidad máxima de 32,6 mm/h y 10,9 mm/h de intensidad media.

Las precipitaciones importantes de cara a la erosión hídrica son las correspondientes a los máximos pluviométricos, las cuales aún siendo las de menor cuantía son las que presentan mayores erosividades, superando los 100 Jm²mm. Un hecho importante a tener en cuenta es que los eventos con volúmenes inferiores a 10 mm no se consideran erosivos (Wischmeier y Smith, 1958;

Morgan, 1986), representando estos casi un 40% del total registrado en el área de estudio. Contrariamente a lo señalado por estos autores, se han registrado en el área eventos por debajo de 10 mm que presentan erosividades elevadas, así como también aparecen eventos con volúmenes de precipitación superiores a 50 mm que no llegan a generar sedimentos de manera significativa. La fórmula empleada para el cálculo de la erosividad ha sido la de Zanchi y Torri (1980) para las áreas mediterráneas. $E_c = 9.8 + 11.25 \log_{10} I$, en la cual se observa como la erosividad está directamente relacionada con la intensidad. Ello explica por qué eventos con grandes volúmenes de precipitación no llegan a alcanzar erosividades elevadas, puesto que la intensidad media y máxima es pequeña.

b) Sedimentos

En La Puebla de Alfindén la precipitación total registrada para todo el período de estudio ha sido de 2520 mm, de los cuales sólo 1892 mm, distribuidos en 132 eventos, generaron escorrentía y consecuentemente movilización de sedimentos. Así, el total de sedimentos producidos ha sido en la Parcela sur de 3552 gr/m² y de 2380 gr/m² en la Parcela norte. Sin embargo, de ellos 1829 gr/m² en la Parcela Norte y 1466 gr/m² en la Parcela sur corresponden a un solo evento, esto supone que un 56% y 62% del material exportado

PRECIPITACIÓN (mm)				INTENSIDAD (mm/h)			
Intervalo		Porcentaje LPA	Porcentaje MDA	Intervalo		Porcentaje LPA	Porcentaje MDA
0	5	18,2	11,5	0	5	0	8,4
5	10	42,4	37,9	5	10	27,3	67,3
10	15	65,1	57,9	10	15	52,3	87,4
15	20	79,5	74,7	15	20	58,3	93,7
20	25	84,8	83,1	20	25	67,4	94,7
25	30	88,6	91,6	25	30	67,4	94,7
30	35	91,6	96,9	30	35	68,9	95,8
35	40	93,9	97,9	35	40	79,5	95,8
40	45	95,4	98,9	40	45	81,8	96,8
45	50	97,7	98,9	45	50	84,1	96,8
	>50	100	100		>50	100	100

Tabla 2. Distribución de frecuencias de las variables climáticas en ambas Estaciones Experimentales

Table 2. Frequency distribution of climatic variables registered on each Experimental Field

lo ha sido en un solo evento. En Mediana de Aragón con una precipitación eficaz de 1414 mm se han recogido un total de 339 gr/m² en la Parcela norte y 608 gr/m² en la Parcela sur distribuidos en 95 eventos. El evento con mayor producción de sedimentos registrado es de 41,5 gr/m² en la Parcela norte y 58 gr/m² en la Parcela sur, lo que supone un 12,25 % y un 9,56 % del total respectivamente.

Las tasas de erosión anuales registradas en ambas Estaciones Experimentales son bajas estando directamente relacionadas con la precipitación (Fig. 2). En la Estación Experimental de La Puebla de Alfindén la producción de sedimentos superior a 10 gr/m², por encima de dicho valor se ha considerado que la producción de sedimentos es significativa, representa el 8,4% del total (Tabla 3) en la Parcela septentrional. Este porcentaje es mayor en la Parcela meridional donde la producción significativa alcanza el 11,36%. A diferencia con la anterior Estación Experimental, en Mediana de Aragón la producción de sedimentos es más baja. Así, en la Parcela norte el 79,5% de los eventos es inferior a 5 gr/m² (Tabla 3). Este porcentaje aumenta hasta 86,3% si se contabilizan todos los eventos que no han producido sedimentos de manera significativa, por debajo de 10 gr/m². En la Parcela sur sólo un 24% de los eventos ha generado sedimentos de manera significativa.

Por último, reseñar que la tasa de erosión media anual registrada en la Estación Experimental de La Puebla de Alfindén para todo el período de estudio desde su puesta en marcha es de 2,63 Tm/ha/año para la Parcela norte y de 3,44 Tm/ha/año para la Parcela sur, mientras que en Mediana de Aragón es de 0,67 Tm/ha/año para la parcela norte y de 1,99 Tm/ha/año para la parcela sur (Tabla 4).

En la Parcela norte de la Estación Experimental de La Puebla de Alfindén la pérdida de sedimentos alcanza un total de 3252,36 gr/m². Si se traducen a tasa de erosión por año se tiene que el valor medio ha sido de 2,84 Tm/ha/año, oscilando este valor entre el máximo de 19,54 Tm/ha/año registrado en 1991 y el mínimo de 0,016 Tm/ha/año registrado en 1998. Estas diferencias tan sustanciales entre el máximo valor registrado y los restantes, son debidas a dos eventos cuya precipitación alcanzó los 50 mm con intensidades máximas por encima de 100 mm/h. En la Parcela Experimental de La Puebla de Alfindén sur el valor medio de la tasa de erosión registrada es de 3,31 Tm/ha/año con un valor máximo de 24,83 Tm/ha/año y un mínimo de 0,025 Tm/ha/año 1999 (Tabla 4).

En la Estación Experimental de Mediana de Aragón las tasas de erosión son mucho menores que en la Estación anterior. En la Parcela norte el

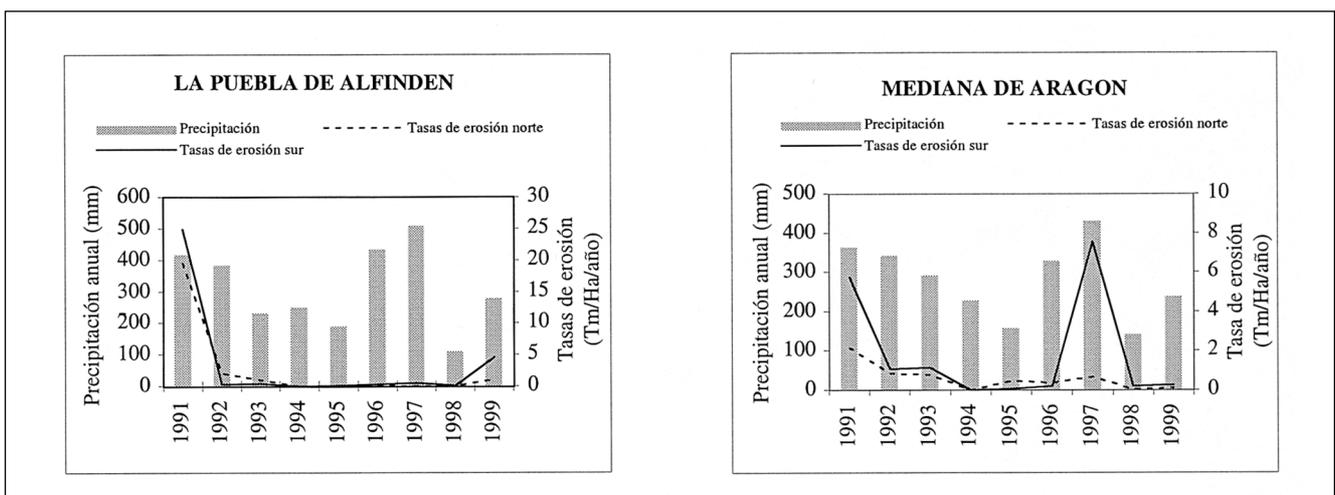


Fig. 2. Relación entre la precipitación media anual y las tasas de erosión registradas para todo el período de estudio

Fig. 2. Relationship between mean annual precipitation and erosion rates along the study period

LA PUEBLA DE ALFINDÉN				MEDIANA DE ARAGÓN			
De (≤)	A(<)	(%)LPN	(%)LPS	De (≤)	A(<)	(%)MDN	(%)MDS
0	10	91,66	88,63	0	10	86,36	75,90
10	20	1,51	0,75	10	20	6,81	9,63
20	30	0,75	0,75	20	30	3,40	4,81
30	40	0,75	1,51	30	40	2,27	6,02
40	50	0,75	0,75	40	50	1,13	1,20
50	100	3,03	3,79	50	100	0,00	2,41
100	250	0,00	1,52	100	250	0,00	0,00
250	500	0,75	1,52	250	500	0,00	0,00
	>500	0,75	0,75		>500	0,00	0,00
TOTAL		99,95	99,97	TOTAL		99,97	99,97

Tabla 3. Distribución de Frecuencias, en porcentaje, de los sedimentos recogidos en cada Parcela Experimental

Table 3. Frequency distribution, in percentage, for sediments registered on each Experimental Plot

evento de lluvia que generó más sedimentos superó los 40 mm de precipitación total y los 50 mm/h de intensidad máxima dando lugar a 41,56 gr/m². Las tasas de erosión registradas son pequeñas con un valor medio de pérdida por erosión de 0,66 Tm/ha/año. Las tasas de erosión anuales oscilan entre un máximo de 2,15 Tm/ha/año y un mínimo de 0,005 Tm/ha/año (Tabla 4). En la Parcela Experimental de Mediana de Aragón sur la producción de sedimentos es ligeramente superior al de la Parcela anterior, pero significativamente inferior a las obtenidas en la Estación Experimental de La Puebla de

Alfindén. La tasa media de erosión obtenida para este período de tiempo de seguimiento es 1,992 Tm/ha/año, con valores máximos de 5,72 Tm/ha/año y mínimos de 0,005 Tm/ha/año (Tabla 4).

c) Solutos

La exportación de sedimentos en éstas áreas se produce tanto en suspensión, como en forma de solutos. Para conocer éstos últimos se han analizado, de cada muestra de escorrentía recogida en

Año	LA PUEBLA DE ALFINDÉN		MEDIANA DE ARAGÓN	
	Precipitación (mm)	Tasas de erosión (Tm/ha/año) Norte Sur	Precipitación (mm)	Tasas de erosión (Tm/ha/año) Norte Sur
1991	416	19,54 24,83	363	2,15 5,72
1992	383	2,09 0,27	340	0,84 1,07
1993	230	0,95 0,37	290	0,78 1,14
1994	248	0,02 0,02	226	0,01 0,01
1995	188	0,04 0,06	157	0,48 0,05
1996	432	0,06 0,29	327	0,36 0,19
1997	509	0,03 0,57	430	0,69 7,54
1998	109	0,02 0,06	140	0,03 0,21
1999	277	0,99 4,55	237	0,11 0,27
Media	310	2,64 3,45	279	0,60 1,80

Tabla 4. Tasas de erosión registradas durante el período de estudio en ambas Estaciones Experimentales

Table 4. Erosion rates registered along the study period on each Experimental Field

campo los siguientes componentes: pH y Ca , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Mg^{2+} . De la composición química de la escorrentía se desprende que se trata de aguas saturadas en yeso pues los valores de conductividad eléctrica son siempre cercanos o superiores a 2,5 mS, valor al cual se alcanza la saturación en yeso. La composición química está básicamente formada por sulfatos y carbonatos cálcicos y magnésicos en menor medida. La presencia de sales solubles es muy baja reduciéndose a cloruros sódicos y potásicos en concentraciones muy pequeñas (Tabla 5).

Al igual que ocurre con la carga en suspensión, se tiene que la exportación de material en forma de solutos presenta una clara relación con el tiempo transcurrido entre eventos y con el volumen de escorrentía generado. La evolución temporal de la conductividad eléctrica y la escorrentía (Fig. 3) muestran como eventos de poca escorrentía presentan una elevada carga química por unidad de volumen, mientras que en los de escorrentía elevada la concentración química sería menor. Las conductividades mayores aparecen siempre cuando las escorrentías son pequeñas, aunque podemos tener eventos con escorrentías bajas en los que la conductividad también es baja. Por otro lado, las máximas escorrentías suelen coincidir con un descenso en los valores de la conductividad (Fig. 3). Si se representa la evolución temporal de la escorrentía y la conductividad eléctrica es posible observar como la mayor parte de los eventos con valores altos de conductividad coinciden con valores bajos de escorrentía y viceversa, teniendo en cuenta que no se mantiene la proporcionalidad en esta tendencia y que pueden existir eventos en los que

no se cumpla e incluso el comportamiento sea inverso.

Para conocer mejor y de manera más detallada el comportamiento y evolución de la carga química se han realizado varios ensayos con lluvia simulada, en los que se ha medido a intervalos de tiempo conocido, tanto el volumen de la escorrentía como la conductividad eléctrica. La evolución de la conductividad con la escorrentía muestra como ésta pasa de un valor máximo al inicio a una disminución gradual hasta que alcanza la estabilización, la cual está condicionada por la velocidad de disolución del yeso (Fig. 4). Del mismo modo puede observarse una pauta estacional de la conductividad, de manera que en primavera y verano dominan los eventos con conductividades altas mientras que en invierno y otoño la conductividad de la escorrentía disminuye de modo considerable. Esto se debe a la mayor evaporación del agua retenida en el sustrato durante los períodos cálidos, de modo que se produce un mayor depósito de sales en los niveles superiores del suelo, que posteriormente con el siguiente evento son fácilmente exportables. Por otro lado, cuanto mayor es el tiempo transcurrido entre eventos mayor es el material disponible para ser incorporado a la escorrentía o lavado a través de los macroporos del suelo.

d) Umbrales

a) Estación Experimental de La Puebla de Alfindén

Como se desprende de los resultados anteriores a producción de sedimentos en éstas áreas es

Parcela	pH	cE (mS/cm)	ANIONES				CATIONES				R.S. (gr/l)
			CO_3^{2-} (meq/l)	HCO_3^- (meq/l)	SO_4^{2-} (meq/l)	Cl^- (meq/l)	Ca^{2+} (meq/l)	Mg^{2+} (meq/l)	Na^+ (meq/l)	K^+ (meq/l)	
LPN	8,13	2,49	0,05	2,27	29,95	0,11	27,79	14,58	0,15	0,28	2,01
LPS	8,10	2,51	0,02	2,90	31,67	0,12	27,18	16,01	0,12	0,29	2,47
MDN	8,07	2,41	0,02	1,55	29,27	0,13	26,62	14,95	0,11	0,17	2,36
MDS	8,16	2,48	0,02	1,86	29,95	0,11	26,60	15,40	0,11	0,16	2,35

Tabla 5. Composición química media de la carga en solución de la escorrentía en cada una de las Parcelas Experimentales

Table 5. Mean chemical composition of the runoff solutional load on each Experimental Plot

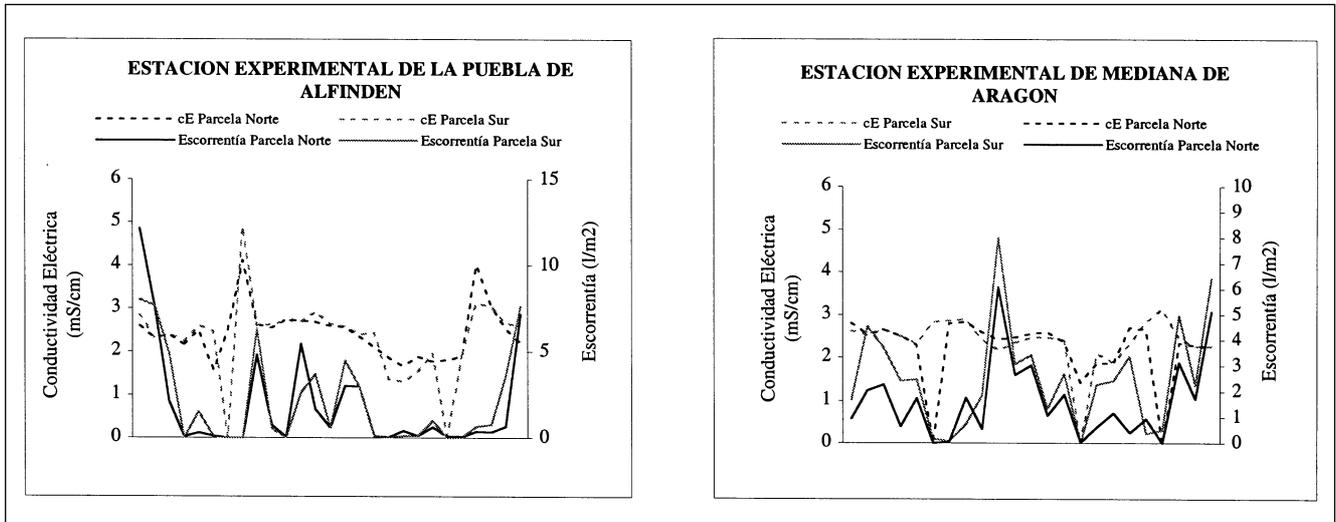


Fig. 3. Evolución de la carga química en función de la escorrençia total medida por evento

Fig. 3. Evolution of the chemical charge with runoff for any single event

baja y presenta una clara influencia de los parámetros climáticos. Las variables que marcan dicha pauta son el volumen y la intensidad de la precipitación, la duración y el tiempo transcurrido entre eventos. Del análisis de la respuesta de la producción de sedimentos y su comportamiento frente a las variables climáticas se observa una clara dependencia, que da lugar a la aparición de varios umbrales.

El registro de los sedimentos producidos en cada evento en la Parcela norte de la Estación Experimental de La Puebla de Alfindén muestra una clara relación con el tipo y volumen de la precipitación (Fig. 5). Se observa una distribución triangular de la nube de puntos. Así, para precipitaciones bajas, por debajo de los 10 mm, correspondientes a la mayor parte de los eventos, la producción de sedimentos es muy variable

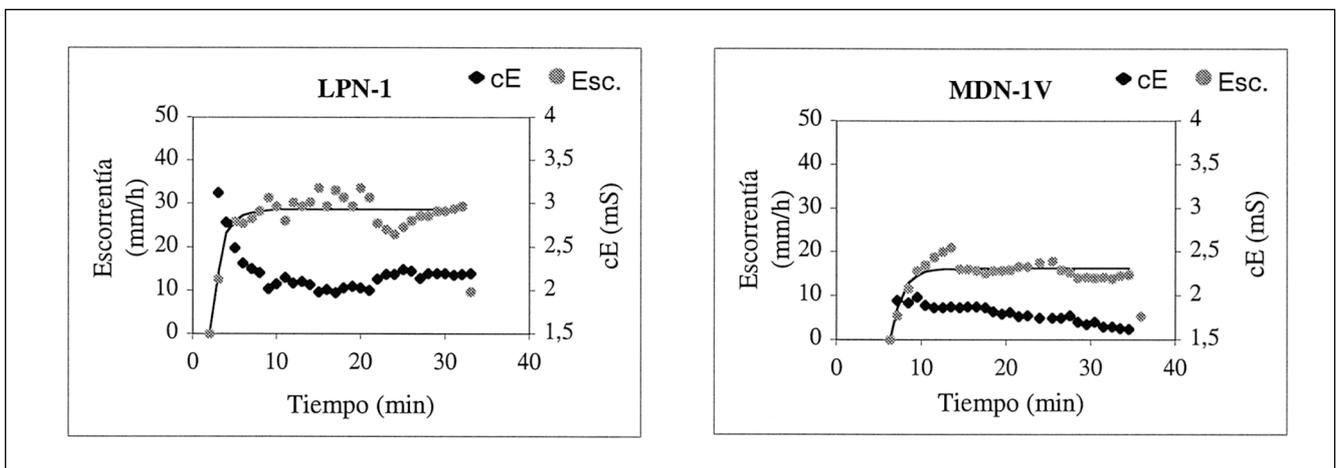


Fig. 4. Relación y evolución de la conductividad eléctrica con la escorrençia durante dos experimentos con lluvia simulada

Fig. 4. Relationship and evolution of the electrical conductivity with runoff during two rainfall simulation experiments

oscilando entre 0 y 20 gr/m². Esta cantidad de sedimentos puede superarse claramente a partir de los 20 mm, existiendo una disminución de esta variabilidad a medida que se incrementa la precipitación, pasando a ser de tipo exponencial cuando se superan los 30 mm. La comparación de los sedimentos producidos con las intensidades máxima indica también algunas tendencias de interés. Al igual que con la precipitación, es posible observar una relación entre la producción

de sedimentos y la intensidad máxima. A partir de los 25 mm/h de intensidad máxima aparecen eventos con una generación de sedimentos de manera significativa, alcanzando valores por encima de los 10 gr/m². Por debajo del valor anterior de intensidad, los eventos de lluvia apenas superan una producción de 1 gr/m², existiendo con frecuencia valores inapreciables. Por encima de los 60 mm/h de intensidad máxima se pueden superar los 1000 gr/m² de sedimentos. Un hecho

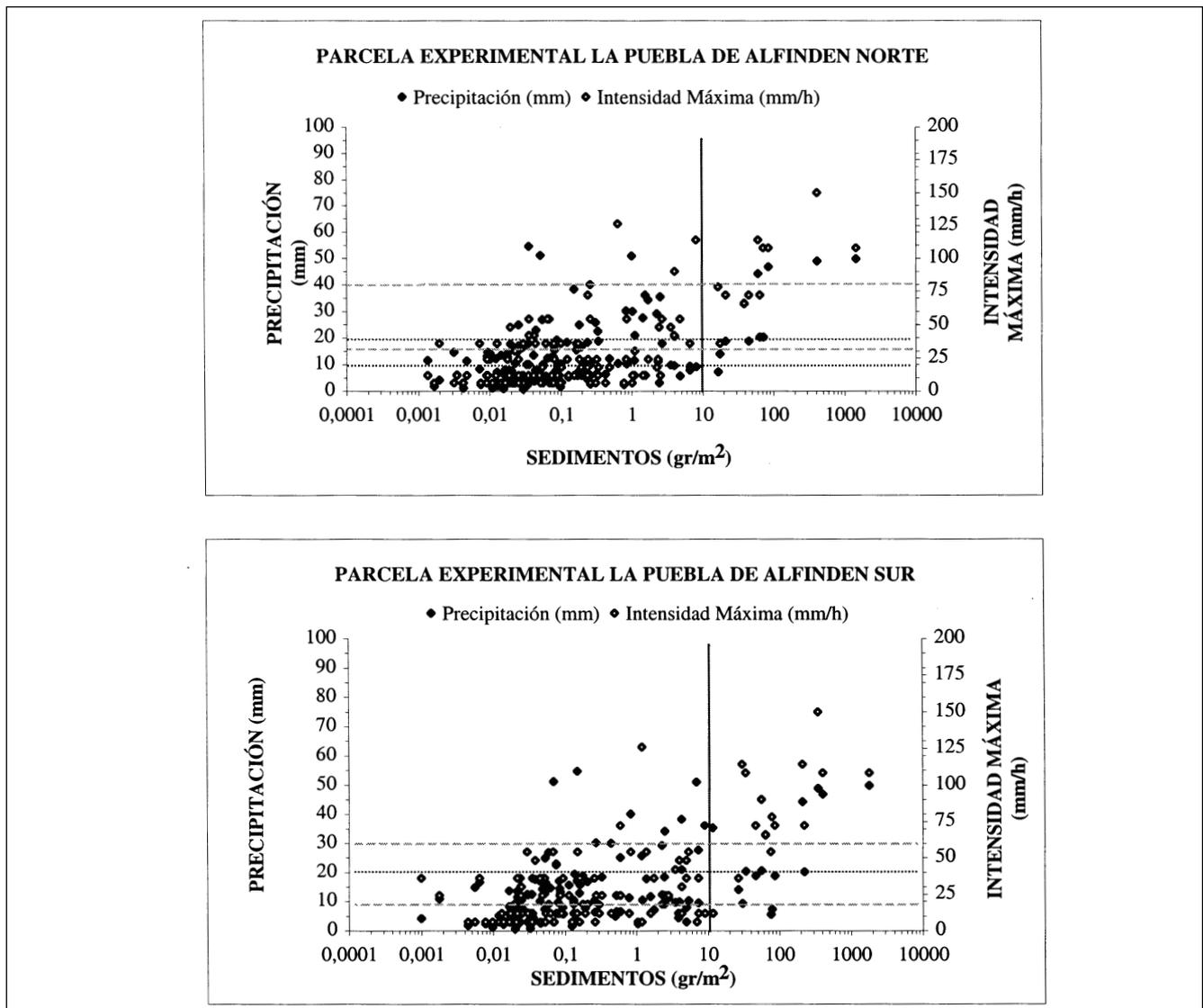


Fig. 5. Umbrales y distribución de la producción de sedimentos generada en función de la precipitación e intensidad máxima en la Estación Experimental de La Puebla de Alfindén. Umbral de precipitación. Umbral de Intensidad

Fig. 5. Thresholds and distribution of sediment yield in relation to rainfall and maximum intensity in the La Puebla de Alfinden Experimental Field. Precipitation threshold. Maximum Intensity threshold

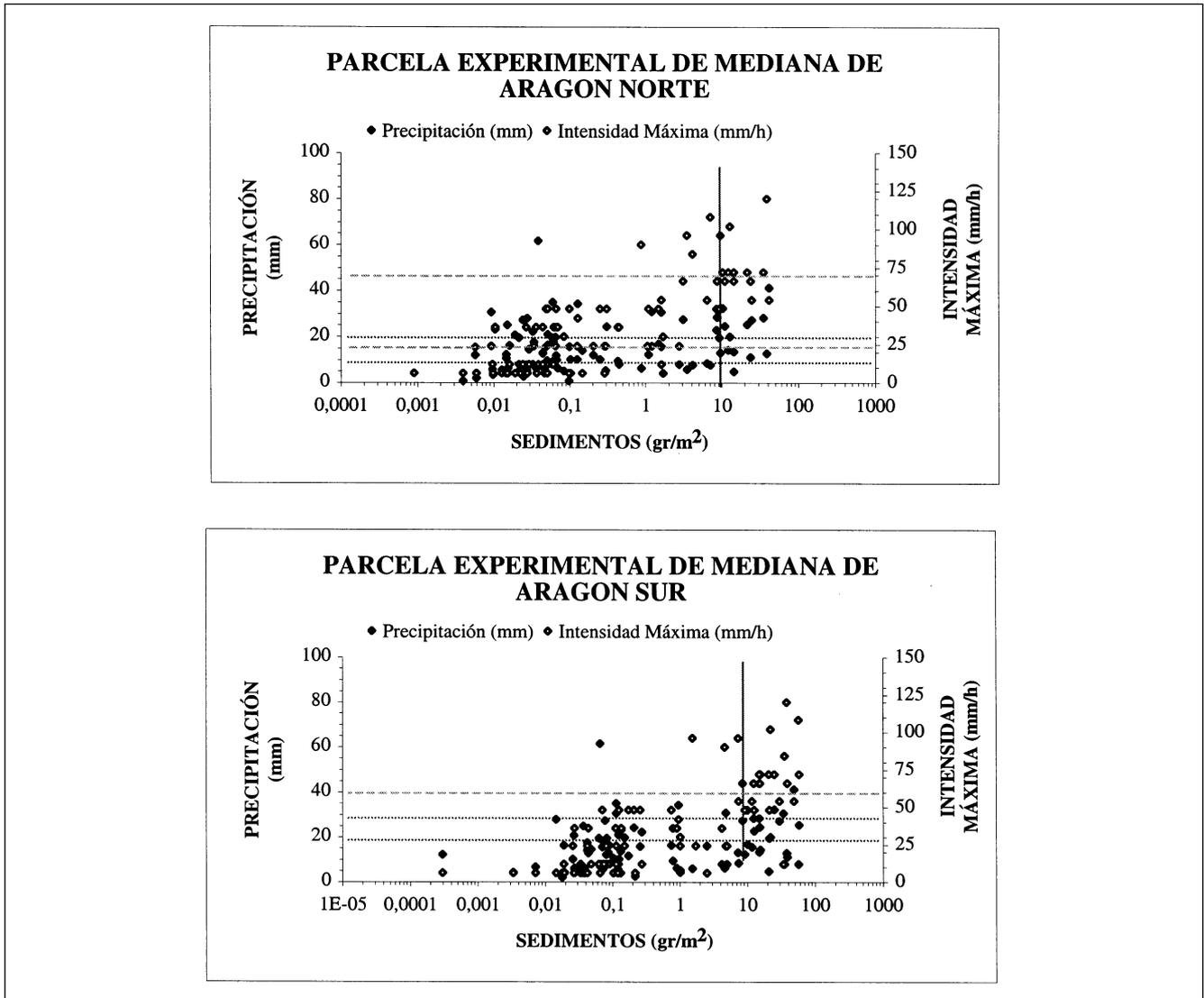


Fig. 6. Umbrales y distribución de la producción de sedimentos generada en función de la precipitación e intensidad máxima en la Estación Experimental de Mediana de Aragón. Umbral de precipitación. ----- Umbral de Intensidad

Fig. 6. Thresholds and distribution of sediment yield in relation to rainfall and maximum intensity in the Mediana de Aragón Experimental Field. Precipitation threshold. ----- Maximum Intensity threshold

destacable es la variabilidad en la producción de sedimentos para una misma precipitación total (Fig. 5), lo cual pone de manifiesto el papel de la intensidad máxima.

En la Parcela meridional de esta misma Estación Experimental la producción de sedimentos muestra también en su respuesta el control de las características de las lluvias registradas. Esta

relación es directa entre los sedimentos recogidos y la precipitación total y la intensidad máxima de la lluvia (Fig. 5). La mayor parte de los eventos que producen sedimentos de manera significativa se asocian a eventos que superan los 20 mm de precipitación. Sin embargo, pueden aparecer eventos sin producción de sedimentos significativa para precipitaciones de hasta 30 mm, cuando estos no superan los 60

mm/h de intensidad máxima. Esto se debe al papel de la intensidad en el proceso, dando lugar a la aparición de un doble umbral por debajo del cual no se producen pérdidas significativas. Por tanto, resulta necesario superar este doble umbral para que los eventos produzcan sedimentos de manera apreciable y significativa, siendo mucho más restrictiva la influencia de la intensidad de la precipitación que la cantidad total de la lluvia.

b) Parcela Experimental de Mediana de Aragón

En la Estación Experimental de Mediana de Aragón norte también aparece representada una relación entre la cantidad de sedimentos producidos y las características de la lluvia de cada uno de los eventos recogidos (Fig. 6). Así, en la Parcela septentrional la distribución de puntos indica una interdependencia mayor entre sedimentos e intensidad máxima que entre éstos y la precipitación total. Se observa, por un lado, que la producción de sedimentos es nula cuando la precipitación total es pequeña, por debajo de 10 mm y, por otro, que cuando tenemos una producción de sedimentos importante ésta es independiente de la precipitación total. Asimismo, cuando se relacionan intensidades máximas elevadas con producción de sedimentos se observa una relación directa (Fig. 6). Mientras que cuando se trata de eventos de producción de sedimentos

pequeña o nula, esta relación desaparece pasando a ser la precipitación el factor condicionante. El dominio de uno u otro se traduce en la existencia de dos umbrales, 10 mm de precipitación total y los 70 mm/h de intensidad máxima.

En la Parcela meridional mientras que los puntos correspondientes a la precipitación total presentan una distribución triangular, los correspondientes a la intensidad máxima dibujan una nube alargada (Fig. 6). En el primer caso se puede deducir que la producción de sedimentos es pequeña sólo si la precipitación total es baja y cuando la producción de sedimentos es alta se tienen precipitaciones totales altas o bajas. En el segundo caso los sedimentos producidos se incrementan a medida que lo hace la intensidad máxima de la lluvia de cada evento (Fig. 6). Por otro lado, se observa que para eventos con poca producción de sedimentos la precipitación total domina sobre la intensidad máxima, mientras que para eventos con cantidades importantes de sedimentos producidos domina la intensidad máxima sobre la precipitación total (Fig. 6). Por tanto, podemos considerar que para que se generen sedimentos de manera significativa, es necesario superar simultáneamente una precipitación total de 10 mm y una intensidad máxima de 50 mm/h.

En ambos casos son siempre las parcelas con orientación meridional las que dan mayores

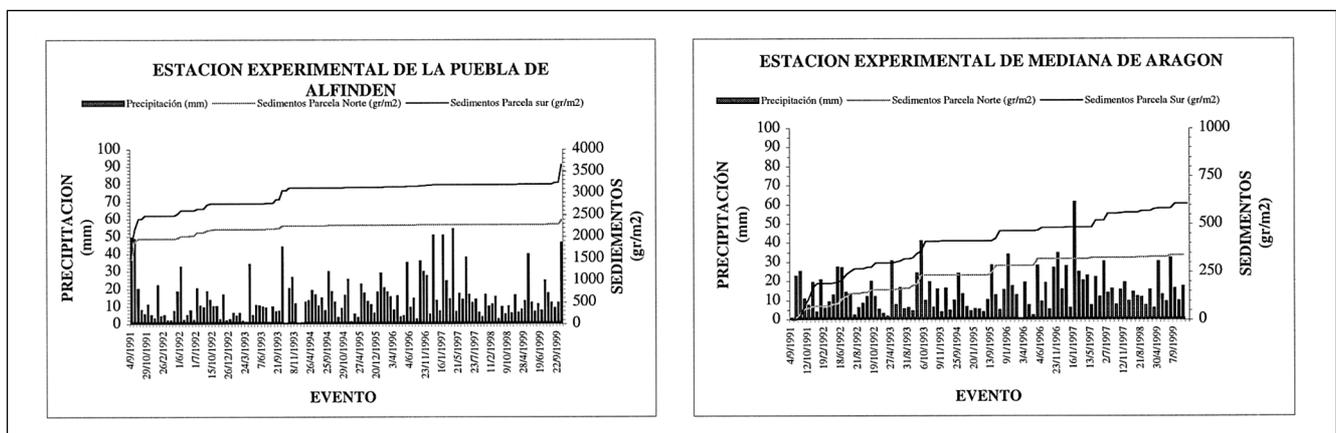


Fig. 7. Variación de la producción de sedimentos acumulada en relación con el tipo de precipitación y su comportamiento respecto a ésta

Fig. 7. Variation of the accumulated sediment yield in relation to precipitation and its behaviour in front of this

tasas de producción de sedimentos. Sin embargo, esta tendencia se invierte para eventos de baja intensidad y pequeños volúmenes de precipitación. En Mediana de Aragón son necesarios eventos de mayor magnitud e intensidad para generar igual volumen de sedimentos. Desde el punto de vista temporal la producción de sedimentos presenta un claro comportamiento estacional (Fig. 7) marcada por la distribución anual de las precipitaciones en dos máximos pluviométricos.

DISCUSIÓN

Las variables climáticas del área son el principal agente controlador de la erosión hídrica del área y de la producción de sedimentos. Del análisis de éstas se desprende que sólo un número pequeño de eventos, menos del 50%, generan sedimentos de un modo significativo. A esto hay que unir que las erosividades de los eventos registrados son pequeñas y sólo una mínima parte presenta erosividades lo suficientemente grandes para producir erosión. Estos últimos están asociados a los máximos pluviométricos que se localizan en primavera y otoño y se caracterizan por ser de carácter tormentoso con elevadas intensidades y generalmente bajos volúmenes. Wischmeier y Smith (1958) señalan que las tasas de erosión alcanzada en una tormenta individual varían con el producto de la energía por la intensidad máxima en 30 minutos. A este respecto, Thornes (1976), Imeson *et al.* (1982) e Imeson y Verstraten (1985) indican que en las zonas semiáridas el mayor trabajo erosivo lo realizan tormentas de corta duración y amplio período de recurrencia. Además de la alta erosividad de estos eventos, debe tenerse en cuenta que éstos se producen durante las épocas cálidas en las cuales la recarga del suelo es nula y las tasas de evapotranspiración elevadas, todo ello unido a que generalmente se trata de episodios aislados, lo que produce que la exportación de material sea muy alta (Imeson *et al.*, 1982; Imeson y Verstraten, 1985; Romero *et al.*, 1988).

También en relación con las variables climáticas se han encontrado en el área de estudio dos umbrales, uno de precipitación y otro de intensidad que controlan la respuesta erosiva. Algunos autores (Morgan, 1977; Richter y Negendank,

1977; Kirkby y Morgan, 1980; Van Asch y Epema, 1983) ya han descrito la presencia de varios umbrales en la respuesta erosiva. Así cuando la producción de sedimentos es prácticamente nula o inapreciable la precipitación presenta valores totales de lluvia muy variables pudiendo alcanzar los 30 mm. Sin embargo, los valores correspondientes a la intensidad máxima se sitúan siempre por debajo de los 50 mm/h. La mayor parte de los eventos que producen sedimentos de manera apreciable, superan los 20 mm de lluvia total y tienen una intensidad máxima superior a 60 mm/h. Por tanto, resulta necesario superar este doble umbral para que los eventos produzcan sedimentos de manera significativa, siendo mucho más restrictiva la influencia de la intensidad de la precipitación que la cantidad total de la lluvia. En Mediana de Aragón el umbral de precipitación desciende hasta los 10 mm de precipitación total.

Por otro lado, existe un efecto de umbral determinado por las propiedades del suelo que hace que sean las Parcelas con orientación sur aquellas que presentan mayores tasas de erosión. Rogers y Schumm (1991) encuentran una relación de tipo lineal y exponencial entre la producción de sedimentos y el porcentaje de cobertera. Francis y Thornes (1990) señalan además que ésta relación es tanto más marcada cuanto menor es el grado de cobertera vegetal. Sin embargo, esta afirmación no se cumple totalmente en el área de estudio. Así, cuando las intensidades son bajas y los volúmenes de precipitación pequeños, son siempre las Parcelas septentrionales, con porcentajes de vegetación superiores al 65%, las de mayor producción de sedimentos. Si se analizan ambas Estaciones Experimentales conjuntamente tenemos que las Parcelas con mayor producción de sedimentos son las Parcelas meridionales, y de entre ellas la Parcela sur de la Estación Experimental de La Puebla de Alfindén. Se deduce que las parcelas orientadas al Sur con menor desarrollo de la cobertera vegetal generan más sedimentos para una misma cantidad de precipitación. Este comportamiento es mucho más notable si se consideran sólo los eventos que superan los 10 gr/m² de sedimentos. En las zonas semiáridas donde la cubierta vegetal es inferior al 20-30%, la erosión está relacionada con el porcentaje de suelo desnudo, aumentando proporcionalmente con éste

(Branson y Owen, 1970). Asimismo, Evans (1980) y Copeland (1965) señalan que en suelos con una cubierta vegetal inferior al 70%, la escorrentía y la erosión aumentan rápidamente.

Los factores que determinan la pérdida de suelo, además de la intensidad y la duración de la lluvia, son la distribución del tamaño de las partículas y las propiedades relacionadas con ésta, como son la textura y la estructura superficial, la estabilidad de sus agregados y la forma de la pendiente. A este respecto Quansah (1981) afirma que cuando aumenta la pendiente, el porcentaje de contribución a la disgregación disminuye para el splash y aumenta para la escorrentía. Esto sugiere la existencia de un punto de inflexión que corresponde a un valor crítico de pendiente en el cual ambos procesos contribuyen de igual manera. Además de la pendiente un factor importante a tener en cuenta es la longitud de la ladera. Así, la cantidad de material movilizado será mayor cuanto mayor sea la pendiente y la longitud de la ladera (Poesen y Bryan, 1990). Por otro lado, Dunne y Leopold (1978) señalan que en ambientes semiáridos, donde el flujo hortoniano es frecuente, el efecto de la topografía sobre el mismo tiene escasa importancia. Se entiende que cuanto mayor es la pendiente, mayor es la generación de escorrentía y la producción de sedimentos, como consecuencia del incremento de la velocidad y el volumen del flujo (Morgan, 1986; Gabriels, 1999).

Los estudios realizados en éstas áreas (Desir *et al.*, 1992 y 1995; Gutiérrez *et al.*, 1995; Desir, 1993 y 2000) muestran la existencia de dos mecanismos de generación de escorrentía, los cuales a su vez controlan la producción de sedimentos. Un tipo responde al modelo hortoniano, muy frecuentes en los ambientes semiáridos (Dunne y Leopold, 1978), en el cual la escorrentía se produce cuando la intensidad de la lluvia supera la velocidad de infiltración (Chorley, 1978). Este tipo de flujo presenta una capacidad de carga y de transporte elevada, al tratarse de un flujo turbulento asociado a eventos de carácter tormentoso, y el cual puede presentar profundidades importantes. En el otro caso, la escorrentía se produce por la saturación de los horizontes superiores del suelo cuando por debajo aparecen niveles más impermeables (Bergsma, 1983). Wischmeier y Smith (1958) afirman que si una lluvia con baja intensidad dura el tiempo suficiente, la tasa de

infiltración será tan pequeña que al final se producirá escorrentía. Estos flujos serán de escasa entidad con la capacidad de carga limitada por la escasa profundidad del mismo. La exportación de material será principalmente en forma de solutos tanto a través de los macroporos del suelo como incorporados a la escorrentía. Scoging y Thornes (1980) encuentran para una determinada intensidad de lluvia que hay un período durante el cual no se produce escorrentía debido a que la superficie no está saturada y la infiltración está controlada por el flujo subsuperficial. La exportación de sedimentos en éstas áreas se produce tanto en forma de solutos, como en suspensión. Debe tenerse en cuenta que se trata de litologías altamente solubles, de modo que en la mayoría de los episodios cuya carga en suspensión es muy pequeña e incluso nula, ésta es la principal fuente de erosión. Otro factor muy importante a tener en cuenta es que la solubilidad del yeso se incrementa con la temperatura (Jackucs, 1977). Así será en las épocas estivales cuando mayor sea la carga química. Del análisis de simulación de lluvia se desprende que la carga química de la escorrentía es función de la disponibilidad del material para ser disuelto, de la presencia de sales solubles que puedan ser lavadas o bien del grado de saturación de la misma

CONCLUSIONES

El análisis de la producción de sedimentos en suelos yesíferos del centro de la Depresión del Ebro muestra la existencia de dos umbrales, los cuales junto con las características de las lluvias nos indica que el número de eventos con producción de sedimentos significativos es pequeño y estará principalmente ligado a los máximos pluviométricos, en los cuales las lluvias son principalmente de carácter tormentoso, con elevadas intensidades y ocasionalmente importantes volúmenes. Fuera de estos máximos, las lluvias, de tipo borrascoso con bajas intensidades y grandes volúmenes de precipitación que pueden extenderse a lo largo de varios días, sólo producen una remoción y preparación del material para ser exportado. Todo ello permite concluir que las tasas de erosión en éstas áreas son bajas, estando principalmente limitadas por las características de la lluvia.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se engloba dentro del marco del convenio RESEL entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Universidad de Zaragoza.

REFERENCIAS

- Albaladejo, J. 1990. Metodologías para la evaluación experimental de pérdida de suelo. *Erosión del Suelo en Condiciones Ambientales Mediterráneas. Seminarios y Encuentros*. Univ. Menéndez Pelayo, Valencia, 22 pp.
- Bergsma, E. 1983. Rainfall erosion surveys for conservation planning. *ITC Journal*, 166-174.
- Branson, F.A. y Owen, J.B. 1970. Plant cover, runoff and sediment yield relation shipes on Mancos Shale in western Colorado. *Water Resources Research*, 6, 783-790.
- Copeland, O.L. 1965. Land use and ecological factors in relation to sediment yields. *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, Agricultural Department from US. Washington, 72-84.
- Chorley, R.J. 1978. The hillslope hydrological cycle. En: Kirkby, M.J. (ed.) *Hillslope Hydrology*. Wiley. Chichester, 1-43.
- Desir, G. 1993. Erosion processes on gypsiferous slopes (Mediana de Aragón). En: Gutiérrez, M.; Sancho, C. y Benito, G. (eds.). *Second European Intensive Course on Applied Geomorphology: Arid Regions*. Zaragoza, 193-197.
- Desir, G. 2000. Variabilidad temporal de la escorrentía en suelos yesíferos de la Formación Zaragoza (Depresión del Ebro). Actas de la VI Reunión de Geomorfología Madrid. (En prensa).
- Desir, G.; Sirvent, J.; Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1992. Primeros datos sobre procesos y tasas de erosión en laderas yesíferas, sector central de la Depresión del Ebro. En: López Bermúdez, F.; Conesa García, C. y Romero Díaz, M.A. (eds.). *Estudios de Geomorfología en España*. II Reunión Nacional de Geomorfología, S.E.G., Murcia, 45-54.
- Desir, G.; Sirvent, J.; Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1995. Sediment yield from gypsiferous degraded areas in the middle Ebro Basin (NE, Spain): *Physics and Chemistry of the Earth*, 20, 385-393.
- Dunne, T. y Leopold, L.B. 1978. *Water in Environmental Planning*. Ed. W.H. Freeman and Company. New York, 818 pp.
- Elías, J. y Ruiz, L. 1979. *Precipitaciones Máximas en España*. Ministerio de Agricultura. Madrid, 545 pp.
- Evans, R. 1980. Mecanismos de la erosión hídrica y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista empírico En: Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C. (eds.). *Erosión de Suelos*. Limusa. Mexico, 141-163.
- Francis, C. F. y Thornes, J.B. 1990. Runoff hydrographs from three mediterranean vegetation cover types, En: Thornes, J.B. (ed.), *Vegetation and Erosion. Processes and Environments*. Willey. Chichester, 363-384.
- Gabriels, D. 1999 The effect of slope length on the amount and size distribution of eroded silt loam soils: short slope laboratory experiments on interrill erosion. *Geomorphology*, 28, 169-172.
- Gutiérrez, M.; Sancho, C.; Desir, G.; Sirvent, J.; Benito, G.; Calvo, C. 1995. *Erosión Hídrica en Terrenos Arcillosos y Yesíferos de la Depresión del Ebro*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Universidad de Zaragoza, 389 pp.
- Ibáñez, M.J. y Mensua, S. 1976. Contribución al estudio de vertientes en condiciones semiáridas. Tipos de vertientes sobre yesos en el valle del Ebro. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, 112, 381-394.
- Imeson, A.C. y Verstraten, J.M. 1985. The erodibility of highly calcareous soil material from Southern Spain. *Catena*, 12, 291-306.
- Imeson, A.C.; Kwaad, F.J.P.M. y 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*, GeoBooks. Norwich, 47-70.
- Jackucs, L. 1977. Dissolution of gypsum and rocks salt. En: Jackucs, L. (ed.). *Morphogenetics of Karst Regions*. Adam Hilger, 78-88.
- Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C. 1980. *Soil Erosion*. Willey. Chichester, 312 pp.
- López Cadenas, F.; Pérez-Soba, A.; Aguiló, J. Magister, M.; López, F.; Rabade, J.M.; Copano, C.; Roldán, M.; Gómez, J.; Navarro, J.; García, J.L. y García, A. 1987. *Mapas de estados erosivos. Cuenca Hidrográfica del Ebro*. ICONA, 87 pp.
- Marín, C.; Gutiérrez, F.; Gutiérrez, M. y Maldonado, C. 2000. Dolinas de subsidencia por disolución de evaporitas en la llanura de inundación del río Ebro aguas abajo de Zaragoza. Actas de VI Reunión Nacional de Geomorfología. (En prensa)
- Morgan, R.P.C. 1977. *Soil erosion in the United Kingdom: field studies in the Silsoe area*, Nat. Coll. Agric. Engng. Silsoe Occasional Paper, 4, 1973-1975.
- Morgan, R.P.C. 1986. Factors influencing erosion. En: Morgan, R.P.C. (ed.). *Soil Erosion and Conservation*. Longman. Essex, 40-62.
- Navas, A. 1988. *La participación de los yesos en la salinización de las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, 466 pp. Inédita.
- Poesen, J. y Bryan, R.B. 1990. Influence de la longueur de pente sur le ruissellement: rôle de la formation de rigoles et de crêtes de sédimentation. *Cashier ORSTOM, Série Pédologie*, 25, 71-80.
- Quansah, C. 1981. Rate of soil detachment by overland flow, with and without rain, and its relationship with discharge,

- slope steepness and soil type. En: Morgan, R.P.C. (ed.). *Soil Conservation: Problems and Prospects*. Wiley. Chichester, 406-423.
- Quirantes, J. 1978. *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de Los Monegros*. Inst. Fernando el Católico, C.S.I.C., Zaragoza, 200 pp.
- Ritcher, G. y Negendank, J.F.W. 1977. Soil erosion processes and their measurement in german area of the Moselle river. *Earth Surface Processes*, 2, 261-278.
- Rogers, R.D. y Schumm, S.A. 1991. The effect of sparse vegetative cover on erosion and sediment yield. *Journal of Hydrology*, 123, 19-24.
- Romero, M.A.; López, F.; Thornes, J.B.; Francis, C.F. y Fisher, G.C. 1988. Variability of overland flow erosion rates in a semi-arid mediterranean environment under matorral cover Murcia, Spain. *Catena Supplement*, 13, 1-11.
- Scoging, H. y Thornes, J.B. 1980. Infiltration characteristics in a semi-arid environment. *IAHS Publication*, 128, 159-168.
- Sirvent, J.; Desir, G.; Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1993. Datos preliminares de tasas de erosión hídrica en cárcavas del área experimental de Lanaja (Depresión del Ebro). *Boletín Geológico y Minero*, 104, 77-87.
- Sirvent, J.; Gutiérrez, M. y Desir, G. 1996. Erosión e hidrología de áreas acarcavadas. En: Lasanta, T. y García-Ruiz, J.M. (eds.). *Erosión y Recuperación de Tierras en Areas Marginales*. Instituto de Estudios Riojanos. Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza, 109-135.
- Sirvent, J.; Desir, G.; Gutiérrez, M.; Sancho, C. y Benito, G. 1997. Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology*, 18, 61-75.
- Thornes, J.B. 1976. *Semiarid erosional systems*. Geographical Papers. London School of Economics and political Science, 7, 79 pp.
- Van Asch, TH.W.J. y Epema, G.F. 1983. The power of detachment and the erosivity of low intensity rains. *Pedologie*, 33, 17-27.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions American Geophysical Union*, 39, 2, 285-291.
- Zanchi, C. y Torri, D. 1980. Evaluation of rainfall energy in Central Italy. En: De Boodt, M. y Gabriels, D. (eds.). *Assesment of Erosion*, Wiley. Chichester, 133-142.
- Zuidam, R.A. Van 1976. *Geomorphological Development of the Zaragoza Region, Spain*. Tesis Doctoral. Universidad Utrecht. ITC-Publication, 211pp.

Original recibido: Noviembre 2000.

Original aceptado: Marzo 2001.