

COMPARACIÓN ENTRE DISTINTAS TÉCNICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO. BARDENAS REALES (NAVARRA)

C. MARÍN, G. DESIR

Geomorfología. Departamento de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias.
C/ Pedro Cerbuna 12. 50009. Zaragoza. e-mail de contacto: cimarín@unizar.es.

Abstract. The study of erosion shows different values depend on the measuring method. In the studied areas, erosion rates have been measured using three different methods: erosion pins (81.0 t/ha.year in BD1 site and 79.1 t/ha.year in BD2); profilometer (118.5 t/ha.year in BD1 and 79.1 t/ha.year in BD2) and dynamic method (100 t/ha.year and 60.5 t/ha.year). Differences between these values shows the importance of select an appropriate technique, furthermore we must taking into account the intrinsic mistakes for each method and different lithologies in which our sites are placed.

Key words: erosion pins, profilometer techniques, dynamic methods, Bardenas Reales.

Resumen. La cuantificación de la erosión hídrica presenta distintos resultados en función de cual es el método usado. En la zona estudiada, las Bardenas Reales, se han calculado las tasas de erosión siguiendo tres metodologías distintas: agujas de erosión (81.0 t/ha/año en BD1 y 79.1 t/ha/año en BD2); perfilador microtopográfico (118.5 t/ha/año para BD1 y 79.1 t/ha/año en BD2) y métodos dinámicos (100.1 t/ha/año y 60.5 t/ha/año en BD2). La diferencia entre los valores obtenidos muestra la importancia de la técnica a elegir, además de tener en cuenta los errores intrínsecos de cada método y las diferencias litológicas entre las parcelas de estudio.

Palabras clave: agujas de erosión, perfilador microtopográfico, métodos dinámicos, Bardenas Reales.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la erosión hídrica puede enfocarse de distintas maneras, según sean los objetivos del trabajo y la escala a la que se va a realizar el mismo. Por ello, como primer paso se fijarán los objetivos que se quieren alcanzar y en función de ellos se seleccionarán las técnicas y métodos que mejor se

adecuen para lograrlos. Los resultados obtenidos pueden variar grandemente en función del método empleado (Yair *et al.*, 1980).

Existen dos metodologías distintas para medir la pérdida de suelo (De Ploey y Gabriels, 1980). Por una parte, están los denominados métodos volumétricos que analizan los efectos microtopográficos de la erosión como consecuencia del rebaja-

miento y la sedimentación expresados en unidades de volumen (De Ploey y Gabriels, 1980; Albaladejo, 1990; Sancho *et al.*, 1991). Por otro lado, están las técnicas que se engloban dentro de los métodos dinámicos. Éstos se basan en el control de la escorrenfía y sedimentos en un área conocida, de modo que permiten establecer y conocer directamente la pérdida de suelo en un área conocida (De Ploey y Gabriels, 1980; López-Bermúdez *et al.*, 1993).

La selección de uno u otro método para el estudio de la erosión en una misma zona conduce a la obtención de distintos valores de tasas de erosión como consecuencia de la sobreestimación que arrojan los métodos volumétricos frente a los dinámicos (De Ploey y Gabriels, 1980; Takei *et al.*, 1981; Rogowski *et al.*, 1985; Benito *et al.*, 1992; Sirvent *et al.*, 1993, 1997; Gutiérrez *et al.*, 1995).

El objetivo de este trabajo es establecer mediante el empleo de tres técnicas diferentes las tasas de erosión en un área de las Bardenas Reales (Navarra).

MATERIAL Y MÉTODOS

La zona de estudio se engloba en el sector centro-occidental de la Depresión del Ebro. Las Bardenas Reales constituyen una

depresión erosiva de 415 km² de extensión, formada por sedimentos de edad Miocena y Cuaternaria (Fig.1).

Los sedimentos terciarios, arcillas miocenas de la Formación Tudela (Castiella *et al.*, 1978), aparecen en los márgenes de la cuenca dando lugar a pendientes escarpadas con una alta densidad de reguerización. Las características de estas arcillas terciarias son similares a todas las que orlan el centro de la Depresión del Ebro. Así, son equiparables por ejemplo a las arcillas de la Formación Sariñena en la provincia de Huesca. Los depósitos cuaternarios, arcillas y limos holocenos procedentes del lavado de las arcillas circundantes, han sufrido una intensa erosión y el desarrollo de profundos *gullies* sobre ellos. Tanto en los materiales terciarios como en los cuaternarios se han realizado análisis físico-químicos del suelo y del regolito con el fin de conocer las características que en mayor o menor medida condicionan el desarrollo de los procesos de erosión.

El material terciario, donde se han diferenciado 5 niveles, es una secuencia de 320 mts de arcillas versicolores (rojo, gris, verde) con intercalaciones de calizas, arenas y yesos (Leránóz, 1993; Murelaga, 2000). Sedimentológicamente corresponden a facies distales de abanicos aluviales de ori-

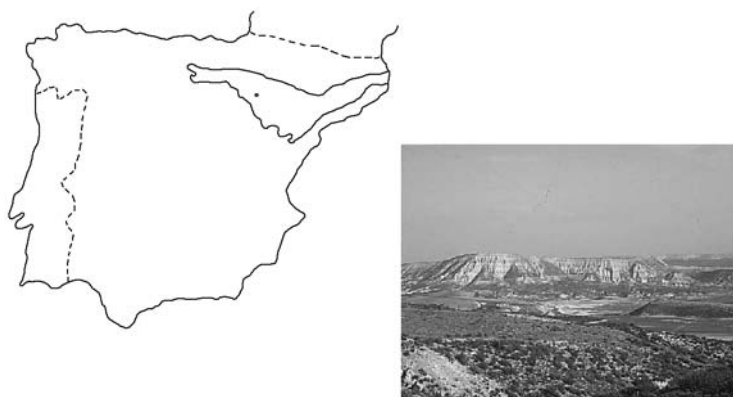


FIGURA 1: Localización geográfica de las Bardenas Reales.

TABLA 1: Resultado de los análisis realizados a los 5 niveles diferenciados en las arcillas terciarias.

	pH	cE (mS)	SO ₄ ²⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	SAR	ESP
R1	8.6	5.6	11.7	61.8	600.2	77.9	80.9	566.9	1.0	63.7	47.5
R2	8.5	5.0	14.7	86.9	594.8	85.3	64.1	618.1	0.9	71.5	50.4
R3	8.3	4.2	11.7	51.3	293.7	72.2	68.4	272.8	0.8	32.5	31.3
R4	8.5	4.0	22.5	86.2	406.2	73.8	70.5	402.8	0.9	47.4	40.1
R5	8.2	3.2	2.5	195.6	203.6	63.9	58.7	213.1	1.4	27.2	27.5

gen pirenaico de edad Mioceno inferior-medio (Solé, 1977). Presentan estructura masiva, pH alcalino y alta conductividad eléctrica (Gutiérrez *et al.*, 1995). En la tabla 1 vienen indicados los resultados de los análisis realizados. Tal como se muestra, los valores de SAR y ESP obtenidos señalan que estos niveles son susceptibles a desarrollar procesos de *piping*. Sin embargo éste no aparece ya que la alta pendiente que presentan los materiales (34°) inhibe la formación de *pipes* (Marín y Desir, 2004; Desir *et al.*, 2005).

Por otro lado, en las arcillas y limos holocenos se han diferenciado 3 niveles. Los análisis realizados a las muestras vienen reflejados en la tabla 2. Se trata de un material en el que aparecen dos niveles laminares (uno superior y otro inferior) entre los que se encuentra un nivel masivo intermedio. Presentan pH alcalino y alta conductividad eléctrica. Morfológicamente muestran gran desarrollo de *rills* y *pipes*. Estos sedimentos, al estar menos diagenizados, son más fácilmente erosionables y

sobre ellos se desarrollan profundos *gullies*, en algunos casos de hasta 12 kms de longitud y 10 mts de profundidad. Las dimensiones de los *pipes* que aparecen son variables, variando desde 10-15 cms de diámetro a varios metros. Es posible encontrar conductos de *inlet* y *outlet* en algunos *pipes* de pequeña entidad (Gutiérrez *et al.*, 1995).

La evolución de la cuenca es consecuencia tanto de la geología como del clima. Las Bardenas Reales se encuentran clasificadas como una zona semiárida de carácter mediterráneo, con temperatura media anual de 14.7°C y una precipitación media anual de 384 mm. Las lluvias son de carácter tormentoso y van generalmente acompañadas de fuertes vientos. Una de las características de los climas semiáridos es la marcada variabilidad en la precipitación. Esta variabilidad no es sólo interanual sino también estacional. Las lluvias se reparten de manera irregular a lo largo del año existiendo dos máximos pluviométricos, uno a finales de primavera y otro a comienzos de otoño. Las lluvias en estos períodos de tiempo son de

TABLA 2: Resultado de los análisis realizados a los 3 niveles holocenos.

	pH	cE (mS)	SO ₄ ²⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	SAR	ESP
C1	8.3	5.2	2.7	55.7	755.6	144.1	187.5	503.0	0.6	39.0	35.4
C2	8.3	5.6	19.6	68.3	771.2	195.3	165.6	537.1	0.6	39.9	36.0
C3	8.4	1.5	13.7	8	152.2	36.0	24.7	153.2	0.4	27.8	27.9

TABLA 3: Datos medios de la estación manual de Tudela, referidos a los años 1986-2004. (Tomados de www.cfnavarra.es).

Parámetro	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Precipitación media (P)	26.7	20.1	23.1	39.9	43.4	34.7	21.8	28.4	44.6	40.6	28.0	33.1	384.2
Días de lluvia (D)	8.0	6.0	7.0	9.0	8.0	5.0	4.0	5.0	7.0	10.0	9.0	9.0	87.0
Temperatura media de máximas (TMMA)	10.2	12.8	17.0	18.3	23.2	27.8	30.9	30.9	25.8	19.8	13.9	10.5	20.1
Temperatura media (TME)	6.2	7.9	11.3	12.8	17.2	21.2	24.0	24.1	19.9	15.1	9.8	6.8	14.7
Temperatura media de mínimas (TMMI)	2.2	3.0	5.6	7.4	11.2	14.6	17.1	17.3	14.1	10.4	5.8	3.2	9.3
Días de helada (DH)	9.0	6.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	7.0	25.0
Evapotranspiración potencial, índice de Thornthwaite (ETP)	12.0	18.0	37.0	50.0	87.0	122.0	147.0	138.0	91.0	54.0	24.0	13.0	793.0

tipo ciclonal (tormentoso), es decir, con una gran capacidad erosiva (Desir *et al.*, 2005) ya que se caracterizan por ser lluvias de alta intensidad.

Según los datos tomados por el Gobierno de Navarra en la estación meteorológica manual de Tudela (una de las localidades más próximas a la zona de estudio) que se muestran en la tabla 3, las Bardenas presentan una evapotranspiración potencial media (ETP) anual de 793 mm, un claro déficit hídrico que caracteriza los procesos de erosión de la zona y la ausencia de vegetación.

Esta zona de Bardenas Reales se denomina Bardenas Blanca debido a las eflorescencias salinas que aparecen que le confieren un característico color blanquecino. Otro rasgo distintivo de la Bardenas Blanca es la casi total ausencia de vegetación ya que se reconocen mayoritariamente romerales (*Rosmarinus officinalis*) como vegetación natural. Debido a la salinidad presente

en los suelos, en los últimos años está cobrando fuerza el cultivo del arroz en los márgenes de la depresión. Este cultivo ayuda a combatir la salinidad existente puesto que mantiene en disolución las sales (Desir *et al.*, 2005).

La metodología empleada para la medida de la erosión se puede dividir en dos grupos en función de la técnica usada para conocer las tasas de erosión. En primer lugar, y empleando métodos dinámicos, se obtuvieron las tasas de erosión a partir de parcelas experimentales de escala decamétrica dotadas de un sistema de tanques colectores y divisores. En segundo lugar, los métodos volumétricos utilizados fueron agujas de erosión y perfilador microtopográfico en las zonas colindantes a las parcelas.

Las parcelas instaladas para el estudio de la erosión hídrica se colocaron sobre ambos materiales constituyentes de la depresión de las Bardenas Reales. Así, la Parcela Experimental de Bardenas-1 (BD1)

se encuentra sobre los rellenos holocenos del Cuaternario, y la Parcela de Bardenas-2 (BD2) sobre las arcillas Terciarias. Cada Parcela Experimental cuenta con una batería de tanques colectores y divisores y una estación meteorológica de registro continuo. El sistema de tanques está constituido por un tanque decantador con capacidad 400 l., dos divisores tipo Geib y un tanque colector de 380 l. (Albaladejo, 1990; Desir *et al.*, 1992; 1995; Gutiérrez *et al.*, 1995; Desir, 2002).

La estación de BD1 tiene una superficie de 415 m², con orientación NE y una pendiente media de 9°. Dentro de ella, se ha seleccionado una.

microcuenca de 54.4 m² en la que se cuantifica la erosión hídrica mediante el sistema de tanques. Geomorfológicamente, presenta interfluvios alomados con una marcada reguerización sobre los que se reconocen procesos de *piping*. La Parcela Experimental de BD2 tiene una superficie total de 400 m², con una pendiente media de 34° y orientación O, con una ligera disposición en anfiteatro. En este caso, se ha seleccionado una microcuenca de 51.5 m² de superficie para cuantificar la erosión. Igual que en el caso anterior, está fuertemente

reguerizada con interfluvios alomados, en este caso sin procesos de *piping*.

Las agujas de erosión son un método ampliamente utilizado para conocer el rebajamiento superficial y la sedimentación en áreas de rill e interrill (Haigh, 1977; Sancho *et al.*, 1991; Schumm, 1956; 1967). Para conocer el rebajamiento superficial, se han instalado un total de 242 agujas de erosión en BD1 y 135 en BD2. Las agujas de erosión empleadas son varillas aceradas de hierro galvanizado con diámetros que oscilan entre 4 y 6 mm y una longitud de 40 a 60 cm en función de la resistencia a la penetración del material, y que han sido dispuestas formando una malla de 1 x 1 m. Es preciso no clavar las agujas totalmente, dejándolas sobresalir unos 3-5 cms con el fin de numerarlas y facilitar su reconocimiento. La toma de datos se realiza cada 6 meses, utilizando para ello una arandela metálica removible, que se coloca alrededor de la aguja en el momento de la medición, y con ayuda de un pie de rey que nos permite ajustar la medida con una precisión ± 0.5 mm (Sancho *et al.*, 1991).

El perfilador microtopográfico se ha empleado para evaluar las variaciones en microrrelieves (Haigh, 1978; Crouch, 1987; Benito *et al.*, 1991; 1992; Sirvent *et*

BARDENAS REALES Perfil BD18

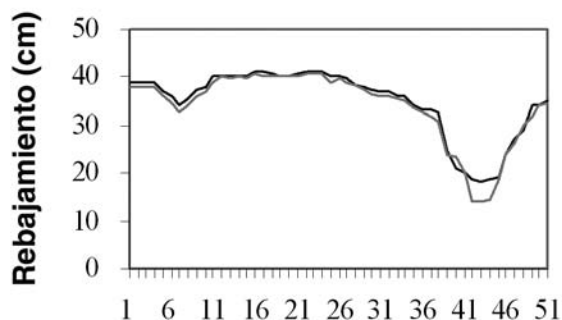


FIGURA 2: Comparación de dos medidas del mismo perfil.

al., 1993; Gutiérrez *et al.*, 1995). Se han instalado un total de 51 agujas para la toma de perfiles en BD1 y 37 en BD2. El perfilador microtopográfico usado (Sancho *et al.*, 1991) está constituido por un conjunto de varillas móviles verticales, 50 en total, separadas 2 cm entre sí, que dibujan la topografía del terreno. El perfilador se asienta sobre puntos fijos, de modo que se facilita la localización, repetición e interpretación de los mismos perfiles cada 6 meses. Para la obtención de los datos se realiza una fotografía del perfil y posteriormente se extraen los datos para su tratamiento informático (Benito, 1989; Sancho *et al.*, 1991). Para facilitar la lectura el perfilador ha sido dotado de un panel trasero con líneas fijas horizontales y paralelas separadas 2 cm entre sí. Tomando sucesivas medidas de un mismo perfil se pueden establecer las variaciones temporales sufridas y calcular mediante la integración de los perfiles y conociendo la densidad real del material, las tasas de erosión (Sancho *et al.*, 1991; Gutiérrez *et al.*, 1995). Así, se pueden determinar los cambios morfológicos de un área de rills (Fig.2) o bien del retroceso de la ladera cuando se analizan perfiles transversales (Fig.3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el uso de los métodos volumétricos se puede conocer cual es la distribución de los procesos erosivos en el área de estudio. En el período estudiado (Junio 93- Noviembre 93), el rebajamiento medio que se obtuvo con los datos aportados por las agujas de erosión fue de 5 mm en BD1 y 3 mm en BD2. La conversión de los valores obtenidos mediante el empleo de la densidad real del material sobre el que se encuentran instaladas las agujas permite calcular las tasas de erosión. Así, para BD1, con una densidad media de 2.05 g/cm^3 la tasa resultante es de 81.0 t/ha/año , mientras que en BD2 el rebajamiento de 3 mm equivale a 51.6 t/ha/año , con densidad media de 2.13 g/cm^3 .

Para el mismo lapso de tiempo, los datos con el perfilador microtopográfico reflejan un rebajamiento medio de 6.7 mm para BD1 y 5.4 mm para BD2, equivalentes a tasas de erosión de 118 t/ha/año y 79.1 t/ha/año respectivamente.

Los resultados obtenidos mediante los métodos dinámicos, Parcelas Experimentales, muestran unas tasas de erosión de 100.1 t/ha/año en BD1 y de 60.5 t/ha/año en BD2 (Tabla 4).

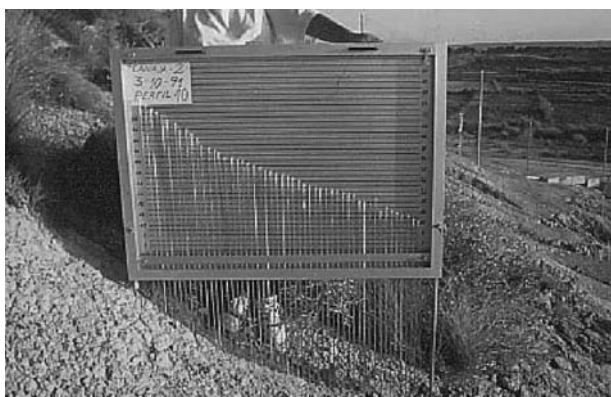


FIGURA 3: Perfil de ladera paralelo a la misma.

TABLA 4: Resultados de tasas de erosión, en t/ha.año, obtenidos para las Bardenas Reales durante el periodo Junio 93-Noviembre 93 con tres metodologías distintas.

	BD1	BD2
AGUJAS DE EROSIÓN	81.0	51.6
PERFILADOR MICROTOPOGRÁFICO	118.5	79.1
PARCELAS EXPERIMENTALES	100.1	60.5

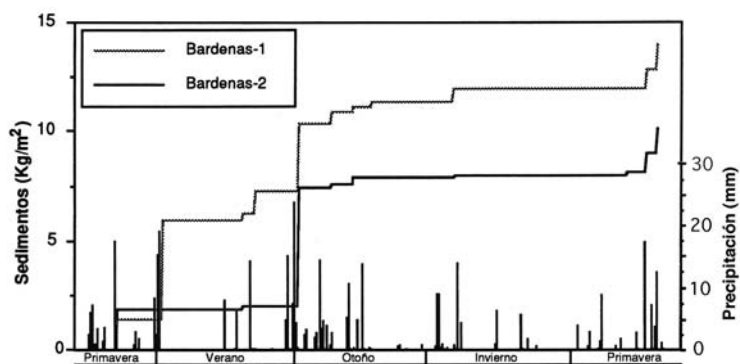


FIGURA 4: Sedimento total acumulado frente a los eventos de lluvia durante un año en las Bardenas.

En la figura 4 se han representado los eventos de lluvia producidos durante un año frente al total de sedimentos producidos en las Parcelas. En ella se puede observar como la producción de sedimentos está estrechamente relacionada con los eventos de finales de primavera y comienzos de otoño. Estos eventos son mayoritariamente de carácter tormentoso con elevadas intensidades que se concentran principalmente en los dos máximos interanuales, típicos de los climas semiáridos. Durante los mínimos pluviométricos, verano e invierno, los eventos son de larga duración e intensidades bajas por lo que la capacidad erosiva de los mismos es muy baja o nula al igual que la pérdida de sedimentos.

Desde el punto de vista de las tasas de erosión, independientemente del método empleado, volumétrico o dinámico, los valores son siempre mayores en BD1 que en BD2. Esta diferencia aparece reflejada de modo constante a lo largo de todo el perio-

do de registro, del que se disponen datos desde 1993 (Tabla 5).

Si se analizan los valores obtenidos mediante cada método y se comparan entre ellos, se observa como para el área estudiada, las Bardenas Reales, las tasas de erosión obtenidas con agujas, contrariamente a lo descrito por diversos autores (Millington, 1981; Takei *et al.*, 1981; Rogowski *et al.*, 1985), son menores que las medidas con los colectores y con el microperfilador topográfico (Fig.5). En este sentido solo Mtakwa *et al.* (1987) llegan a resultados similares. Esta disparidad en los resultados viene dada para las características intrínsecas del propio método, ya que el de las agujas presenta un error de ± 0.5 mm, equivalente a ± 13.2 t/ha/año suponiendo una densidad media para todos los suelos de 2.65 g/cm^3 (Marshall Y Holmes, 1988). Además, con las agujas no sólo se obtienen tasas de rebajamiento sino también de acreción. Por otra parte, con el perfilador

TABLA 5.- Valores de tasas de erosión registrados con métodos dinámicos en las Bardenas Reales a lo largo de 10 años.

	BARDENAS 1	BARDENAS 2
1993	136,918	89,508
1994	73,74	55,685
1995	78,598	25,204
1996	83,905	35,576
1997	10,69	21,89
1998	13,465	6,523
1999	147,955	32,633
2000	144,425	41,357
2001	8,278	1,703
2002	73,138	38,367
2003	31,274	15,496
2004	34,135	20,504
MEDIA	77,210	32,037

microtopográfico el error introducido es de ± 0.5 cm, es decir, ± 130 t/ha/año, suponiendo la misma densidad media anterior. En este caso la sobreestimación se aduce a la mayor concentración de la erosión en las zonas de rill, puesto que en general los transectos de los perfiles se sitúan de forma perpendicular a los rills.

Con las agujas de erosión además de conocer la evolución del microrrelieve podemos establecer tasas de formación de suelos. Al realizar la medida de las agujas cada 6 meses se puede reconocer que en un momento del año (periodo invernal) prácticamente no existe erosión sino acreción. En ese momento, el material está preparado

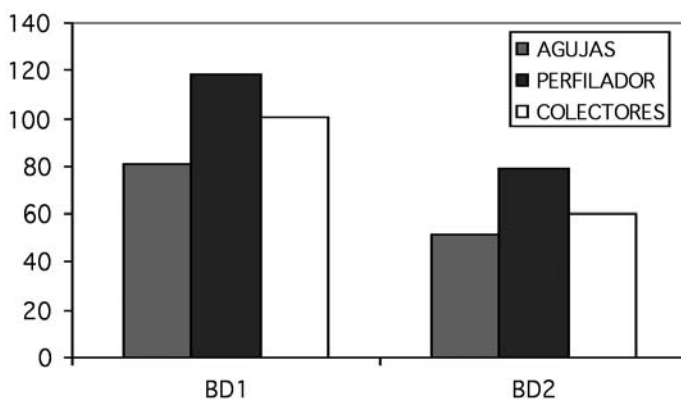


FIGURA 5: Gráfico comparativo mostrando los diferentes valores de tasas de erosión obtenidos con las tres metodologías usadas en BD1 Y BD2.

para ser movilizado en las primeras lluvias intensas de primavera. Conociendo los valores de las medidas podemos establecer qué cantidad de suelo se ha acumulado y posteriormente cuanta cantidad se ha erosionado. De este modo, es posible establecer tasas netas de formación de suelos. En este caso, sin embargo, la formación de suelo es prácticamente nula rasgo típico de suelos en zonas semiáridas.

Los análisis químicos confirman que las eflorescencias salinas presentes en los suelos de Bardenas tienen su origen en los propios materiales del sustrato. Además, señalan la probable existencia de procesos de *piping* ya que muestran altos valores de SAR y ESP, excepto en el material terciario donde las pendientes de las laderas inhiben el desarrollo de pipes.

Los altos valores de SAR y ESP obtenidos con los análisis indican, por un lado, que la sodicidad presente en los suelos impide el correcto crecimiento de los cultivos de ahí que el arroz esté aumentando su presencia en los límites de la depresión erosiva. Por otro lado, pone de manifiesto la probable aparición de pipes en los suelos holocenos. Como se ha señalado, en muchos casos estos pipes son de grandes dimensiones lo que sin duda supone un grave deterioro para el posible desarrollo de la agricultura en la Bardena Blanca.

El estudio de las tasas de erosión suponen no solo cuantificar los procesos de erosión si no también un conocimiento más general del medio en el que se llevan a cabo dichos estudios puesto que se hace necesario realizar análisis físico-químicos de los materiales.

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, cabe señalar la importancia de fijar unos objetivos concretos como paso previo a la elección del método a usar para el cálculo de las tasas de erosión. El uso de técnicas diferentes da

lugar a valores de erosión dispares.

En el caso concreto de las Bardenas, los menores valores de tasas de erosión se registran con las agujas, y los mayores con el perfilador microtopográfico, frente a los resultados que se obtienen con los métodos dinámicos.

Estos últimos se han considerado como los que mejor representan el proceso de erosión ya que las condiciones de medida reflejan mejor los procesos naturales, englobando tanto la erosión que tiene lugar en los rills como en la zona de interrill.

Por todo lo visto anteriormente, cabe señalar que si bien los métodos volumétricos son muy útiles para conocer las variaciones en el microrrelieve, no lo son para obtener datos de tasas de erosión, siendo los métodos dinámicos los más recomendables para este último caso.

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.
- Benito, G. (1989): Geomorfología de la Cuenca Baja del Río Gállego. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 764 pp. Inédita.
- _____; Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1991): Erosion patterns in rill and interrill area in badland zones of the middle Ebro Basin (NE-Spain). En: Sala, M.; Rubio, J.L. y García Ruiz, J.M. *Soil Erosion Studies in Spain*. Geoforma Ediciones, 41-54. Logroño.
- _____; Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1992): Erosion rates in badlands areas of the central Ebro Basin (NE-Spain). *Catena*, 19: 269-286.
- Castiella, J.; Solé, J. y Valle, J. (1978): Mapa Geológico de Navarra. E:

- 1:200.000. Cartografía geológica a partir de la investigación geológica de Navarra a escala 1: 25.000. Diputación Foral de Navarra. Serv. Geol. Dir de Obras Públicas.
- Crouch, R.J. (1987): The relationship of gully sidewall shape to sediment production. *Australian Jour. Soil Res*, 25: 531-539.
- De Ploey, J. y Gabriels, D. (1980): Experimental data on runoff generation. En: Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C. (Eds.). *Soil Erosion*. Wiley, 89-139. Chichester.
- Desir, G. (2001): Erosión hídrica de terrenos yesíferos en el sector central de la Depresión del Ebro. Cons. Sup. Prot. Nat. Serie Investigación, 15, Zaragoza. 326 pp.
- (2002): Hydrological response types of gypsiferous soils in a semiarid region during nine years of continuous record. *Hydrol. Proc*, 16: 2685-2700.
- , Sirvent, J., Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1992): Primeros datos sobre procesos y tasas de erosión en laderas sobre materiales yesíferos, 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*. Sociedad Española de Geomorfología, 45-54.
- , Sirvent, J.; Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1995): Sediment yield from gypsiferous degraded areas in the middle Ebro Basin (NE, Spain). *Phys. Chem. Earth*, 20: 385-393.
- , Marín, C. y Guerrero, J. (2005): Badlands and Talus Flatirons in the Bardenas Reales Region. Field Trip Guide. VI International Conference on Geomorphology. Zaragoza. 37 pp.
- Gutiérrez, M.; Sancho, C.; Desir, G.; Sirvent, J.; Benito, G. y 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. Zaragoza.
- Haigh, M.J. (1977): The use of erosion pins in the study of slope evolution. *British Geom. Res. Group. Tech. Bull.* 18, 31-49.
- (1978): Micro-rills and dissection cracks: some observations. *Zeits. für Geom.* 22: 457-461.
- Lerános, B. (1993): Geomorfología y Geología Ambiental de la Ribera de Navarra. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 521 pp. Inédita.
- López-Bermúdez, F.; García Ruiz, J.M.; Romero, M.A.; Ruiz, P.; Martínez, J. y Lasanta, T. (1993): Medidas de Flujos de Agua y Sedimentos en Parcelas Experimentales. Cuad. Téc. Soc. Esp. Geom. 6. Geoforma Ediciones. 38 pp. Logroño.
- Marín, C. y Desir, G. (2004): Influencia de las propiedades físico-químicas del regolito en los procesos de erosión. Bardenas Reales (Navarra). En: Benito, G. y Díez Herrero, A. (Eds.). *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología*. Sociedad Española de Geomorfología. Madrid, 543 pp.
- Marshall, T.J. y Holmes, J.W. (1988): *Soil Physics*. Cambridge University Press. Cambridge. 374 pp.
- Millington, A.C. (1981): Relationship between three scales of erosion measurement on two small basins in Sierra Leone. IAHS Publications, 133: 485-492.
- Mtakwa, P.W.; Lal, R. y Sharme, R.B. (1987): An evaluation of the Universal Soil Loss Equation and field techniques for assessing soil erosion in a tropical Alfisol in Western Nigeria. *Hydrol. Proc.* 1: 199-209.
- Murelaga, X. (2000): Estudio de las faunas de vertebrados del Mioceno Inferior de las Bardenas Reales y áreas colindantes

- (Cuenca del Ebro, Navarra). Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, 363 pp. Inédito.
- Rogowski, A.S.; Khanbilvardi, R.M. y DeAngelis, R.J. (1985): Estimating erosion on plot, field and watershed scales. En: Swaify, S.A.; Moldenhauer, W.C. y Lo, A. (Eds.). *Soil Erosion and Conservation*. Soil Cons. Soc. Am. Ankery. 149-166.
- Sancho, C.; Benito, G. y Gutiérrez, M. (1991): Agujas de Erosión y Perfiladores Microtopográficos. Cuad. Téc. Soc. Esp. Geom. nº2. Geoforma Ediciones. 28 pp. Logroño.
- Schumm, S.A. (1956): Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 73, 597-646.
- ____ (1967): Erosion measured by stakes. *Révue de Géomorphologie Dynamique*, 17, 161-162.
- 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). *Bol. Geol. Min.*, 104: 77-87.
- ____; 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.
- Solé, J. (1977): Mapa Geológico de España E. 1:50000. Hoja 282, Tudela. IGME. 2ª serie, 1ª edición, 18 p, 1 mapa. Madrid.
- Takei, A., Kobashi, D. y Fukushima, Y. (1981): Erosion and sediment transport measurement in a weathered granite mountain area. IAHS Publications, 133: 493-502.
- Yair, A.; Lavee, H.; Bryan, R.B. y Adar, E. (1980): Runoff and erosion processes and rates in the Zin valley Badlands, Northern Negev, Israel. *Earth Surf. Proc.*, 5: 205-225.