



## APLICACION DE LA TECNICA DE $^{137}\text{Cs}$ PARA EVALUAR LA EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO ABDELALI (NORTE DE MARRUECOS)

*Assesment of soil erosion by fallout  $^{137}\text{Cs}$  in the Abdelali basin (Rif of N Morocco)*

A. Faleh<sup>(1)</sup>, S. Bouhlassa<sup>(2)</sup>, A. Sadiki<sup>(3)</sup>, A. Navas<sup>(4)</sup>, y A. Aboutaher<sup>(2)</sup>

(1) *Département de Géographie, Faculté des Lettres Saïss Fès (Marruecos)*

(2) *Laboratoire de Radiochimie, Faculté des Sciences, Rabat (Marruecos)*

(3) *Département de Géologie, Faculté des Sciences, Fès (Marruecos)*

(4) *Departamento de Edafología, Estación Experimental de Aula Dei. CSIC Zaragoza (España)*

*Autor para correspondencia: Ana Navas anavas@eead.csic.es Fax: 976 716145*

**Resumen:** En el territorio del Rif del Norte de Marruecos, la erosión del suelo amenaza seriamente la sostenibilidad de agroecosistemas y paisajes. En este ambiente mediterráneo de marcado relieve, el clima semiárido de las zonas bajas y el predominio de margas y calizas sobre las que se desarrollan suelos eminentemente frágiles, determinan que el impacto antropogénico derivado del intenso uso del suelo junto con la deforestación sean los principales factores desencadenantes de la erosión del suelo. En este trabajo se utiliza el radiotrazador  $^{137}\text{Cs}$  para identificar las áreas fuente de sedimentos y cuantificar la pérdida de suelo en la cuenca del Abdelali, que reúne una diversidad fisiográfica representativa de este territorio del Rif. Se han muestreado suelos en diversos emplazamientos con distintos usos y pendientes. Las pérdidas del radioisótopo con respecto al inventario de referencia de la zona indican que los suelos cultivados son los más erosionados, y que la pérdida de suelo fértil es mayor en las más altas pendientes (42 t/ha/año). Por el contrario, en las zonas de matorral denso y bosque, por este orden, se registran condiciones mayores de estabilidad con mínima a nula erosión. La intensidad del movimiento del suelo se refleja en la acumulación de material que se registra al pie de las vertientes donde se ha medido ganancia de  $^{137}\text{Cs}$ , pero muy especialmente en el pequeño dique de retención cuya total colmatación se ha producido de forma extremadamente rápida tan sólo cinco años después de su construcción. La gravedad de la erosión en este territorio requiere implementar medidas de conservación y manejo sostenible del suelo.

**Palabras clave:**  $^{137}\text{Cs}$ , erosión, factores, Marruecos, Rif, usos del suelo.

**Abstract:** In the Rif, Northern Morocco, the severity of soil erosion threatens the sustainability of landscapes and agroecosystems. The climatic, lithologic and edaphic factors determine the fragility of this Mediterranean environment and the anthropic impact due to intensive soil use, grazing and deforestation are the main factors causing important soil losses. In the Abdelali catchment, fallout  $^{137}\text{Cs}$  is used to identify the main areas supplying sediment and to quantify soil erosion under different soil uses and slopes. The highest losses of  $^{137}\text{Cs}$ , compared to the reference inventory, are found in the steepest cultivated soils where erosion rates reach 42 t/ha/year, followed by matorral areas scarcely vegetated. More stable soil conditions and less erosion are found in more densely vegetated shrubs and forests. Soil movement in the catchment is very intense and particles accumulate at the lower part of the hillslopes, where  $^{137}\text{Cs}$  gain has been measured. The magnitude of erosion is reflected by the total siltation of the small dam at the catchment outlet, occurred shortly after it was build. The severity of soil erosion in the area requires to establish strategies for soil conservation.

**Keywords:**  $^{137}\text{Cs}$ , factors, Morocco, Rif, soil erosion, soil use.



A. Faleh, S. Bouhlassa, A. Sadiki, A. Navas y A. Aboutaher (2005). Aplicación de la técnica de  $^{137}\text{Cs}$  para evaluar la erosión en la cuenca del río Abdelali (norte de Marruecos). *Rev. C. & C.*, 19 (1-2), 15-22.

## 1. Introducción

El Rif es un territorio cuya extensión representa el 6% de la superficie de Marruecos, pero suministra hasta un total del 60% de los sedimentos producidos por la erosión hídrica (Heusch, 1970). La cuenca del río Abdelali, a semejanza del resto de la región rifeña, afronta una erosión intensa debido a la conjunción de factores favorables tales como el predominio de rocas fácilmente alterables, la intensidad de las precipitaciones y la degradación de la cubierta vegetal. Además de estos factores naturales, la intervención del hombre en este medio vulnerable acentúa su fragilidad por la deforestación y el cultivo de tierras en fuertes pendientes. Esta erosión acelerada tiene efectos negativos sobre la dinámica de los sistemas naturales. Entre estos impactos pueden señalarse los cambios en la distribución temporal de los recursos de agua superficial y el empeoramiento de su calidad. En Marruecos la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua por la colmatación de los embalses se calcula en 75 millones de m<sup>3</sup> anuales (Lahlou, 1994). Según Halim (2000), esta cantidad es equivalente a la que se utiliza para el regadío de unas 7000 ha. Por otra parte la disminución de fertilidad en suelos degradados, y la consiguiente necesidad de reemplazar el nitrógeno, potasio y fósforo perdidos por erosión ha sido estimada por Merzouk (1989) en 70 euros/ha anuales en el Rif occidental. Todo ello conduce a la disminución de productividad y a la desvalorización de las tierras agrícolas.

En esta región, el embalse de Mohammed V, registra las mayores tasas de colmatación de Marruecos, ya que su capacidad inicial en 1967 se ha reducido de 730 Hm<sup>3</sup> a 490 Hm<sup>3</sup> en tan sólo 27 años. Con objeto de disminuir su aterramiento, a principios de los años 90 se construyó un conjunto de pequeños diques de retención en los afluentes del río Moulouya. Se trataba además de dotar a la población de recursos hídricos suficientes para cubrir las necesidades domésticas, ganaderas y de regadío. Asimismo, se pensó que estos pequeños diques de retención serían una fuente suplementaria de agua que favorecería el desarrollo socioeconómico en el medio rural, sin embargo, su rápida colmatación ha frenado el esperado desarrollo.

La mayoría de estos diques se han colmatado de sedimentos en poco más de cinco años después de

su puesta en servicio. El dique de la cuenca del río Abdelali se construyó en 1991 y su colmatación total se produjo en 1997. Este rápido relleno, se ha debido no sólo a la inadecuada selección de sus emplazamientos sino también a la desproporción entre el tamaño de las cuencas de drenaje y el volumen de los diques. Otro factor ha sido la errónea predicción de las tasas de relleno que se han basado únicamente en valores teóricos de transporte sólido calculados a partir de fórmulas empíricas. Para la cuenca del río Abdelali, las tasas de relleno anual estimadas fueron de 1400 m<sup>3</sup>, con lo que se calculó que su colmatación total se produciría en 32 años. Sin embargo, los resultados de un estudio batimétrico posterior (Faleh, 2004) han evidenciado este error de cálculo al estimar una tasa de relleno anual de 6653 m<sup>3</sup> y un volumen total de sedimentos acumulados en el dique de 51000 m<sup>3</sup>.

Dada la importante pérdida de suelo y sus negativos efectos ambientales en la región, se ha procedido a aplicar la técnica de <sup>137</sup>Cs en la cuenca del río Abdelali con la finalidad de cuantificar la erosión hídrica, identificar las áreas fuentes de sedimentos y evaluar las variaciones espaciales en las tasas de erosión. Son varios los autores que han demostrado la aplicabilidad y la fiabilidad de este radioisótopo para trazar la distribución del suelo en diversos ambientes a nivel mundial (Ritchie *et al.*, 1974; Walling *et al.*, 1986; Martz y de Jong 1987; Loughran *et al.*, 1990; Navas y Walling, 1992; Quine *et al.*, 1994; Bouhlassa *et al.*, 2000).

En ambientes mediterráneos, Navas y Machín (1991), Navas (2002) y Navas *et al.*, (2004), han constatado la importancia del uso del suelo y de la pendiente como factores principales de la erosión y especialmente en medios semiáridos como los del centro de la cuenca del Ebro en el Noreste de la península Ibérica. El objetivo de este trabajo es evaluar si estos factores son igualmente importantes en la cuenca marroquí que presenta semejanzas climáticas y edáficas. Por tanto, se trata de estimar si en la cuenca del río Abdelali, el grado de alteración antrópica por el cultivo y la deforestación se corresponde con el grado de erosión. Para ello se ha realizado un muestreo de distintas áreas de la cuenca en función de parámetros de uso de suelo y pendiente, en las que se han medido los inventarios de <sup>137</sup>Cs y se han comparado con el de referencia para determinar los distintos grados de erosión existentes en la cuenca.

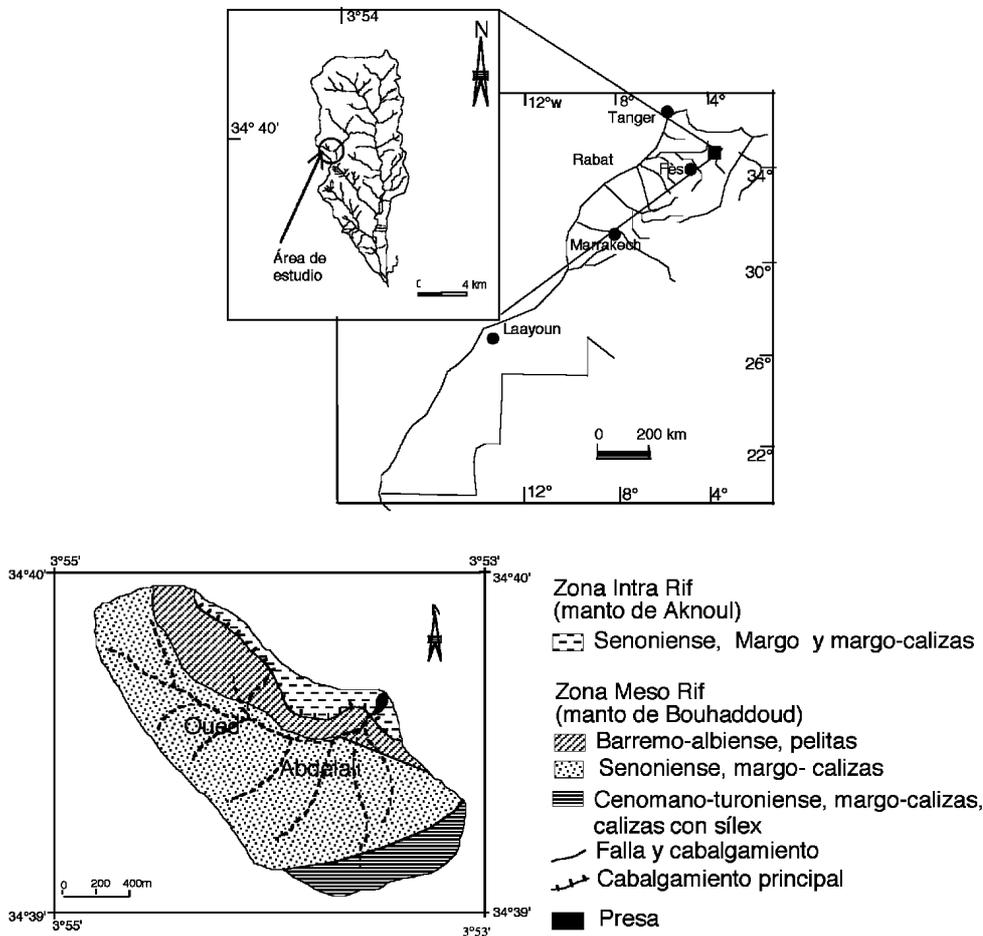


Figura 1. Localización del área de estudio en el Rif del Norte de Marruecos y mapa geológico de la cuenca del Abdelali (Leblanc, 1975).  
 Figure 1. Study area in the Rif of Northern Morocco and geological map of the Abdelali catchment (Leblanc, 1975).

## 2. Área de estudio

La cuenca del río Abdelali se sitúa en la parte meridional del Rif oriental a 60 km al norte de la ciudad de Taza. Su extensión superficial es de 206.5 ha (Figura 1). El paisaje se caracteriza por un relieve muy accidentado, la diferencia de altitud entre las cumbres y los fondos de valle alcanza en ocasiones los 300 m. La mayoría de las pendientes supera el 35%, lo que confiere a este relieve montañoso un aspecto notablemente abrupto en esta parte del Alto Msoun.

En la cuenca del río Abdelali afloran dos mantos de corrimiento, por un lado el de Aknoul que corresponde al territorio intrarrifeño y, por otro, el

manto de Bouhaddoud que pertenece al mesorrifeño (Figura 1). El manto de Aknoul, situado en la parte noreste está formado esencialmente por margas y margocalizas del Cretácico Superior (Leblanc, 1979). El manto de Bouhaddoud cubre la práctica totalidad de la cuenca y sus materiales son margo-calizas cretácicas. En el contacto entre estos dos mantos afloran formaciones triásicas que contienen yesos y margas rojas (Leblanc, 1979).

La zona de estudio se sitúa en el piso bioclimático semiárido superior de variante fresca. La precipitación media registrada en las estaciones de Aknoul es de 471 mm. La vegetación natural se compone de bosques naturales y reforestados y de matorrales. Las principales especies presentes son

*Pinus halepensis*, *Tertraclinis Articulata* y *Quercus Rotundifolia*. Estas formaciones forestales se encuentran en un estado muy degradado debido a la intensa presión antropogénica, fundamentalmente por las talas excesivas. Los suelos agrícolas se explotan, generalmente, en cultivos anuales o en barbecho, siendo los cereales (trigo y cebada) los más importantes.

### 3. Materiales y métodos

Para determinar el impacto de la ocupación de los suelos y la pendiente sobre la erosión y limitar la influencia de otros factores responsables de la misma, se ha seleccionado la cuenca del río Abdelali en la que la pluviometría y la agresividad de las precipitaciones es aproximadamente la misma. Asimismo, como se puede observar en el mapa geológico realizado (Figura 1), la litología de margas y margocalizas es relativamente homogénea.

Se ha elaborado un mapa de usos del suelo que ha sido la base para la selección de sitios de muestreo en la que se han considerado los diferentes tipos de suelo y su distribución en las distintas clases de pendiente. En cada área de uso de suelo se han tomado muestras en diferentes pendientes. Las áreas muestreadas corresponden a sitios representativos de cultivos de cereales, matorral y bosque (Figura 2).

El muestreo se ha realizado con un muestreador de 6 cm de diámetro y hasta una profundidad de 35 cm. Las muestras se han secado a 50° C y tamizado para separar la fracción inferior a 2 mm. Esta fracción se analiza por espectrometría de rayos gamma para medir el contenido de  $^{137}\text{Cs}$ . La estimación de la tasa de erosión se realiza tras comparar el inventario de  $^{137}\text{Cs}$  medido en el sitio con el de referencia obtenido en un sitio estable previamente seleccionado. La pérdida del radioisótopo se relaciona con la de suelo mediante modelos de calibración. Los modelos son cada vez más complejos y diversos, desde el sencillo modelo proporcional, modelos de balance de masas en los que se consideran procesos de redistribución del  $^{137}\text{Cs}$  (Walling y He, 1999; Bouhlassa *et al.*, 2000) o modelos de perfil de actividad especialmente desarrollados para su aplicación en suelos pedregosos de ambientes mediterráneos (Soto y Navas, 2004).

El modelo empírico seleccionado para la cuantificación de la pérdida de suelo es el proporcional simple que tiene en cuenta tres criterios esenciales: el factor tiempo, la densidad y la profundidad del arado. Este modelo viene definido por la siguiente ecuación:

$$Y = 10.B.D.X/100.T$$

Donde: Y: la pérdida de suelo en t/ha/año  
B: el espesor de cultivo (m)  
D: la densidad de suelo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
T: el tiempo en años transcurrido desde el depósito de  $^{137}\text{Cs}$  (1963)  
X: la pérdida o ganancia de  $^{137}\text{Cs}$  (%)

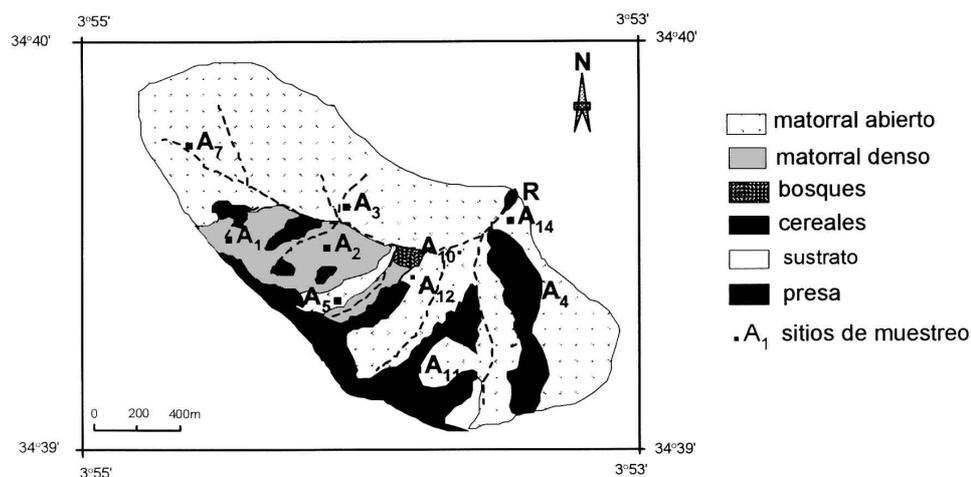


Figura 2. Mapa de usos del suelo (Faleh, 2004) y localización de puntos de muestreo en la cuenca del Abdelali.  
Figure 2. Map of land uses (Faleh, 2004) and sampling sites in the Abdelali catchment.

#### 4. Inventarios de referencia, de erosión y acumulación

Para la selección del sitio de referencia se han tenido en cuenta las recomendaciones de Pennock y Appleby (2002), tales como proximidad al sitio de estudio, altitud similar, lugar estable sin erosión o depósito desde 1963, de suave pendiente y con cobertera vegetal densa. Estas características son a menudo difíciles de conjugar en un mismo emplazamiento, particularmente en zonas de elevada densidad de población generalmente caracterizadas por un uso intenso de la tierra.

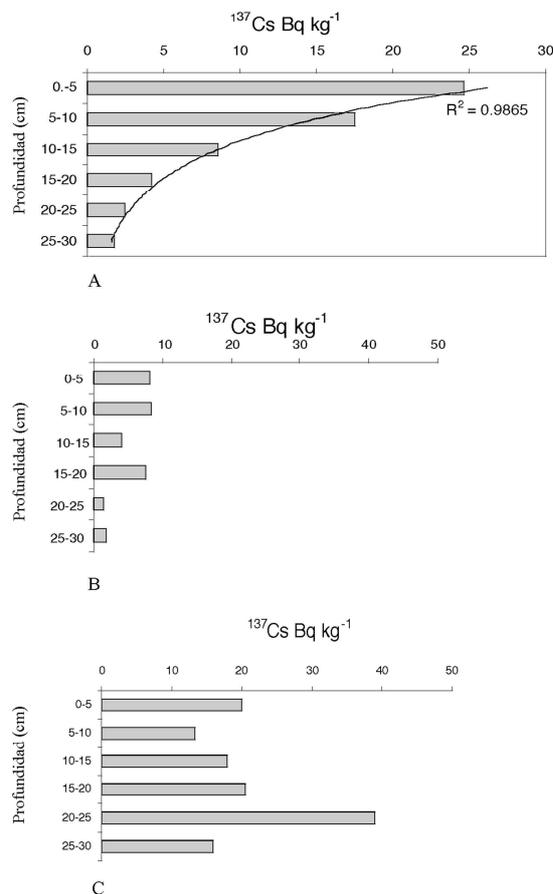


Figura 3. Perfil de  $^{137}\text{Cs}$  en el sitio de referencia de la cuenca (A). Distribución en profundidad de las actividades de  $^{137}\text{Cs}$  en perfiles tipo de erosión (B) y de acumulación (C).  
Figure 3. Reference inventory of  $^{137}\text{Cs}$  for the study area (A). Depth distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in eroding profiles (B) and aggrading profiles (C).

En la cuenca del Abdelali, donde predominan las coberteras de matorral y bosque junto con zonas de pastoreo, se ha seleccionado un sitio de referencia que reúne al máximo los criterios anteriores. El perfil testigo se ubica en una zona de matorral denso alejado de las poblaciones rurales y sin ningún tipo de actividad antropogénica ya que se trata de un entorno natural protegido.

La distribución del perfil de  $^{137}\text{Cs}$  en el suelo correspondiente al sitio de referencia A12 muestra una variación exponencial en profundidad. Como se puede observar en la Figura 3, el  $^{137}\text{Cs}$  se concentra mayoritariamente en el horizonte superficial del suelo lo que refleja su estabilidad morfodinámica. En los primeros cinco cm, la concentración del radioisótopo es de  $24.6 \text{ Bq kg}^{-1}$ , disminuye a  $17.5 \text{ Bq kg}^{-1}$  en la profundidad de 5-10 cm, y no supera los  $2 \text{ Bq kg}^{-1}$  en el horizonte más profundo (Figura 3 A).

Se constata por tanto que el 71% del  $^{137}\text{Cs}$  se concentra en los primeros 15 cm y el 29% restante corresponde a los horizontes profundos entre 15-30 cm. Esta distribución del radioisótopo en el sitio de referencia se explica por la concentración de  $^{137}\text{Cs}$  en los horizontes superficiales del suelo fuertemente fijado por las arcillas y su escasa migración hacia los horizontes más profundos a partir de los primeros depósitos de  $^{137}\text{Cs}$ .

Los sitios de erosión se caracterizan por presentar concentraciones bajas de  $^{137}\text{Cs}$  y una distribución no uniforme en la profundidad del suelo (Figura 3 B), mientras que en los sitios de acumulación se observa un enriquecimiento en  $^{137}\text{Cs}$  en todos los niveles (Figura 3 C).

#### 5. Redistribución del suelo en la cuenca

La comparación de los inventarios de los perfiles muestreados con los de referencia ha permitido identificar los sitios de erosión y depósito (Tabla 1). Las medidas de  $^{137}\text{Cs}$  han servido para cuantificar la media de las tasas de erosión y depósito entre 1963 (máximo del depósito de  $^{137}\text{Cs}$ ) y 2001 que es el año en que se realizó el muestreo.

Como se puede observar en la Tabla 1, los perfiles de  $^{137}\text{Cs}$  en la cuenca del Abdelali presentan inventarios diversos. Los perfiles A1, A3, A5 y A11 tienen actividades acumuladas similares a la del sustrato con valores comprendidos entre  $88.1$  y

Tabla 1. Pérdida y acumulación medias en suelos de la cuenca del Abdelali.  
Table 1.

Intensidad de la erosión	Perfiles	Inventario mBq cm <sup>-2</sup>	% Pérdida -ganancia de <sup>137</sup> Cs	Pérdida -acumulación de suelo (t/ha/ año)
Fuerte	A11	88.1	-76.2	-41.8
	A5	88.5	-76.1	-34.4
	A3	135.7	-63.3	-27.5
	A1	165.5	-55.3	-23.6
Débil	A4	190.3	-50.01	-15.9
	A7	211.5	-42.9	-13.5
	A2	222.6	-39.9	-12.5
	A10	287.6	-22.3	-6.1
Sitio de referencia	A12	370.2		
Zonas de Acumulación	A14	435.4	17.6	8.43
	R	578.8	56.3	28.8

165.5 mBq cm<sup>-2</sup> lo que significa que se ha producido la ablación total de los horizontes superficiales de suelo ricos en <sup>137</sup>Cs.

Los perfiles A2, A4, A7 y A10 presentan actividades más elevadas (190.3 y 286.5 mBq cm<sup>-2</sup>) que representan una ablación parcial de los horizontes superficiales.

Los perfiles A14 y R que corresponden respectivamente a materiales coluviales de la parte baja de la cuenca y en el pequeño dique de retención presentan unos inventarios elevados (435.4 y 578.8 mBq cm<sup>-2</sup>) y superiores a los valores registrados en el sitio de referencia lo que indica que ambos perfiles corresponden a zonas de depósito.

Los porcentajes de pérdida de <sup>137</sup>Cs varían entre 22% y 76% lo que corresponde a una pérdida de suelo anual que oscila entre 6.1 y 41.8 t/ha en los

sitios erosionados. En las áreas de depósito la ganancia de <sup>137</sup>Cs varía entre 18% y 56%.

En la cuenca del Abdelali, las pérdidas de suelo cuantificadas mediante el <sup>137</sup>Cs, se relacionan con el uso del suelo y la inclinación de la pendiente (Figura 4). En función del uso del suelo se observa que los cultivos de cereales registran las pérdidas máximas, entre 15 y 41 t/ha/año. Los matorrales claros y muy claros muestran valores medios de erosión que oscilan de 13.5 a 34.4 t/ha/año, mientras que los matorrales densos presentan menores tasas de erosión, comprendidas entre 12.5 y 23.6 t/ha/año. Los bosques presentan características predominantes de estabilidad de forma que el movimiento de partículas es prácticamente inexistente. Estas son zonas que presentan niveles del radioisótopo similares a los medidos en el sitio de referencia de la cuenca.

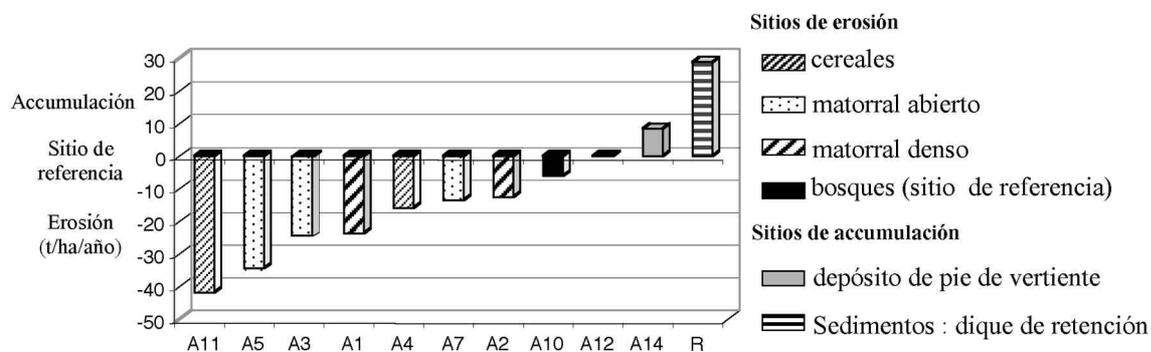


Figura 4. Pérdida y acumulación de suelo en función de los usos del suelo en la cuenca del Abdelali.  
Figure 4. Soil gain and losses in function of the land uses in the Abdelali catchment.

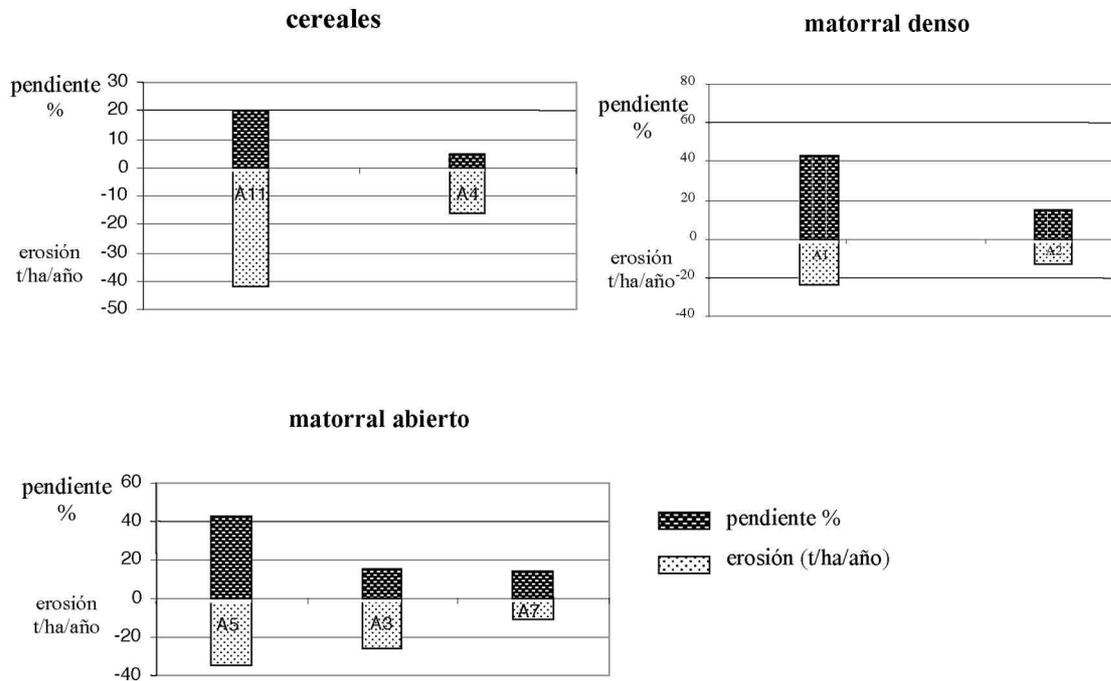


Figura 5. Distribución de la erosión según los distintos usos de suelo y pendientes en la cuenca del Abdelali.  
 Figure 5. Distribution of erosion rates in function of land use and slope in the Abdelali catchment.

Dentro de cada tipo de utilización de suelo, las pérdidas varían en función de la pendiente (Figura 5). Así en las áreas con cultivo de cereal, las menores pérdidas (15 t/ha/año) se registran en pendientes del 5%, mientras que las mayores pérdidas (41 t/ha/año) ocurren en pendientes más elevadas, de alrededor del 20%. En las zonas con vegetación de matorral claro, las pérdidas varían de 13.5 t/ha/año en pendientes del 15% hasta 34.4 t/ha/año en pendientes del 43%. En los matorrales densos, las pérdidas son inferiores y oscilan entre 12.5 t/ha/año en pendientes del 15% hasta 23.6 t/ha/año en pendientes del 42%.

## 6. Conclusiones

Los resultados de la aplicación de la técnica radiométrica del  $^{137}\text{Cs}$  para cuantificar la erosión en la cuenca del Abdelali confirman la importante contribución que esta técnica representa para el estudio de la redistribución de las partículas de suelo. A la vez, ha sido posible determinar la importancia rela-

tiva del efecto del uso del suelo y de la inclinación de la pendiente. Mediante la utilización de un modelo proporcional se han localizado las áreas de erosión y depósito lo que ha permitido establecer las tasas de erosión y valorar el impacto de la acción antropogénica en este frágil ambiente.

La pérdida media anual de suelo cuantificada, en torno a 28 t/ha, es muy elevada y más aún en los cultivos de cereales, donde supera las 40 t/ha/año, mientras que es prácticamente inexistente en los bosques densos. En los diferentes usos del suelo se constata un aumento de las pérdidas de suelo conforme aumenta la inclinación de la pendiente.

La gravedad de la erosión del suelo en la zona estudiada y las afecciones sobre la rápida colmatación de diques de retención y embalses suponen una seria amenaza a la sostenibilidad de los agroecosistemas rifeños. La necesaria intervención para minimizar estos efectos adversos debe partir de una identificación previa de las áreas de mayor fragilidad en las que promover en primera instancia medidas de conservación del suelo así como prácticas de manejo adecuadas.

## Agradecimientos

Este ha sido realizado en el marco de un proyecto de investigación conjunto (2003MA0019) entre el CSIC y el CRPST.

## Referencias

- Bouhlassa, S., Moukhchane, M. & Aiachi, A. (2000): Estimates of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using  $^{137}\text{Cs}$  technique and calibration models. *Acta Geológica Hispánica*, 35, 3-4, 239-249.
- Faleh, A. (2004): Evaluation qualitative et quantitative et modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans les bassins versants de l'oued Aknoul et Merkat. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Mohamed I, Oujda 368 pp.
- Halim, D. (2000): Les stratégies et méthodes traditionnelles et modernes de lutte anti-érosives. *Actes de la journée Scientifiques "Conservation des Sols et Aménagement des bassins versants au Maroc"*.
- Heusch, B. (1970): L'érosion du Préfif, une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Préfif occidentale. *Annales de la Recherche Forestière du Maroc*. S.R.F. Rabat 1970, Tome 12, 9-176.
- Lahlou, A. (1994): *Envasement des barrages au Maroc*. Ed. Wallada, Casablanca, 286 pp.
- Leblanc, D. (1975): *Etude géologique dans le Rif oriental au nord de Taza*. Thèse, Toulouse, 293 pp.
- Loughran, R.J., Campbell, B.L. & Elliot, G.L. (1990): The calculation of net soil loss using Caesium-137. In: *Soil erosion n Agricultural Land* (Boardman, J., Foster, I.D.L. & Dearing, J.A., eds.), Wiley and Sons, Chichester, 119-125.
- Martz, L.W. & De Jong, E. (1987): Using cesium-137 to assess the variability of net soil erosion and its association with topography in a Canadian prairie landscape. *Catena*, 14, 439-451.
- Merzouk, A. (1989): L'érosion des sols déprécie leur productivité. *ATTABIA*, n° 56. *Revue des Naturalistes*, Rabat, 10 pp.
- Navas, A. (2002): Erosion features in Mediterranean landscapes assessed by fallout  $^{137}\text{Cs}$ . *Nucleus*, 32, 31-37.
- Navas, A. & Machín, J. (1991): A preliminary research on the use of cesium 137 to investigate soil erosion in the semiarid landscape of the central Ebro river valley. In: *Soil Erosion Studies in Spain* (Sala, M., Rubio, L. & García, J.M., eds). Geoforma Ediciones, 191-202. Logroño.
- Navas, A. & Walling, D.E. (1992): Using caesium-137 to assess sediment movement in a semiarid upland environment in Spain. In: Walling, D.E., Davies, T.R. & Hasholt, B. (eds.). *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, IAHS N.° 209, 129-138. Wallingford.
- Navas, A., Machín, J. & Soto, J. (2005): Assessing soil erosion in a Pyrenean mountain catchment using GIS and fallout  $^{137}\text{Cs}$ . *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105: 493-506.
- Pennock, D.J. & Appleby, P.G. (2002): Site selection and sampling design. In: *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*, 15-40. IAEA.
- Quine, T.A., Navas, A., Walling, D.E., & Machín, J. (1994): Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Las Bardenas in the central Ebro river basin, Spain. *Land Degradation & Rehabilitation*, 5, 41-55.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R. & Gill, A.C. (1974): Fallout Cs-137 in the soils and sediments of three small watersheds. *Ecology*, 55: 887-890.
- Soto, J. & Navas, A. (2004): A model of  $^{137}\text{Cs}$  activity profile for soil erosion studies in uncultivated soils of Mediterranean environments. *Journal of Arid Environments*, 59: 719-730.
- Walling, D.E., Bradley, S.B. & Wilkinson, C.J. (1986): A caesium-137 budget approach to the investigation of sediment delivery from a small agricultural drainage basin in Devon, UK. *IAHS N.° 159*, 423-435.
- Walling, D.E. & He, Q. (1999): Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality*, 28, 611-622.

Recibido 23 de junio de 2004

Aceptado 14 de febrero 2005