

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA: APLICACIÓN A LOS TALUDES DE INFRAESTRUCTURAS VIARIAS EN PALENCIA (ESPAÑA).

1- M. A. JONTE; 2- J. NAVARRO; 3- R. SAN MARTÍN

1- Los Pinos, 15. 1º Izda. 33211. Gijón Asturias. e-mail: canastur@foros.

2 y 3- Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. E.T.S.I.A. Palencia. Avda. de Madrid, 44. 34004. Palencia.

RESUMEN

La erosión del suelo en taludes de infraestructuras viarias ocasiona graves perjuicios económicos y sociales. Los métodos de estimación de la erosión hídrica son útiles herramientas en la gestión de este tipo de superficies, ya que permiten predecir la erosión futura y así, diseñar las medidas adecuadas de control de la erosión. Sin embargo, al estar concebidos en su mayoría para operar sobre superficies agrícolas y forestales, son escasos los trabajos en los que se utilicen para aproximarse a la erosión hídrica sobre taludes de infraestructuras viarias.

En este trabajo se ofrece el análisis pormenorizado de la aplicación de 6 modelos de estimación de la erosión hídrica (USLE (WISCHMEIER & SMITH (1978)), RUSLE (1989), WEPP (1998), SLEMSA (HUDSON, 1992), MORGAN et al., MEGAHAN et al.(1992)) a los taludes del enlace ferroviario de Palencia-Magaz y la comparación de los resultados obtenidos con la tasa real de erosión medida mediante dos parcelas de clavos. Sólo dos de los modelos han podido ser aplicados con el rigor suficiente, siendo las predicciones efectuadas superiores al valor de la erosión medida en campo. El trabajo pone de manifiesto la necesidad de extender las experiencias en el tiempo y contrastar otros modelos que se adapten mejor a este tipo de superficies en España.

PALABRAS CLAVE: erosión del suelo, taludes, modelos, clavos de erosión, España.

SUMMARY

Soil erosion in railroad cuts causes severe economical and social damages. Water erosion prediction models are useful tools in the management of these surfaces, because they allow to predict future erosion, and thus to design the adequate erosion control practices. However, most of them aren't thought to be applicated to railroad cuts. This article analyses six water erosion prediction models applied to railroad cuts of the Palencia-Magaz by-pass, and compares the results obtained with the rate of erosion measured with stakes. Only two of the studied models have been applied with the necessary rigour. Results obtained make manifest the necessary of new validation experiences and the research and development of new models adapted to these critical areas in Spain.

KEYWORDS: soil erosion, railroad cuts, models, stakes, Spain.

INTRODUCCIÓN.

La erosión del suelo en taludes de infraestructuras viarias constituye un serio problema económico, técnico y ambiental. (CARR & BALLARD, 1980; NAVARRO et al., 1998). En consecuencia muchos países dedican importantes recursos económicos para corregir o atenuar los efectos negativos de la erosión.

A pesar de la gravedad del problema, no existe una idea clara de cómo atacarlo, siendo sin duda un importante inconveniente la ausencia de información fiable que supere lo anecdótico. Las pocas referencias existentes están referidas en su mayoría a grandes infraestructuras, olvidando en parte la gran cantidad de superficie expuesta en las mucho más numerosas infraestructuras de menor rango (carreteras secundarias, caminos rurales,...) (HARGETT et al., 1982; MASSIE & BUBENZER; 1974). Estas carencias son evidentes en España en donde los proyectos de investigación que indaguen acerca de la erosión en estas superficies, acercándose a la magnitud del problema en las diferentes Comunidades, profundizando en el conocimiento de los parámetros que

intervienen, y comprobando la utilidad real de los modelos de predicción de la erosión para su uso por los técnicos encargados de su recuperación ambiental, brillan por su ausencia.

Esta comunicación muestra los resultados obtenidos en una experiencia desarrollada en los taludes del enlace ferroviario de Palencia-Magaz, sobre el que se instalaron sendas parcelas con clavos de erosión y se aplicaron varios modelos de predicción de la erosión a las mismas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El enlace ferroviario de Palencia-Magaz es una importante estructura de comunicación ferroviaria en la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Construida a finales de los años 80, intensos procesos erosivos acaecidos en el verano de 1997 obligaron a ejecutar un reperfilado de los taludes de desmorte, los cuales pueden considerarse como de reciente construcción.

La sección de la traza estudiada se asienta sobre terrenos del cuaternario (ITGE, 1997), caracterizándose los suelos por su delgadez, su naturaleza franco limosa y su bajo contenido en materia orgánica (0,30%). La longitud de los taludes de desmorte es de 8,70 m, la pendiente del 80 %, su exposición N-30°NE y la cubierta vegetal es prácticamente nula. La precipitación media en la zona es de 488,3 mm y la temperatura media anual de 12,3 °C.

Para la puesta en marcha de la experiencia en mayo de 1998 se instalaron sobre uno de los taludes de desmorte del enlace ferroviario dos parcelas sin bordes con 18 clavos de erosión de acero (16 mm Ø; 45 cm longitud) colocados sobre una malla rectangular formada por seis filas y tres columnas, distanciadas 1 y 2 m respectivamente.

El control de la variación en el nivel del terreno fue realizado con el medidor diseñado por NAVARRO & FERNANDEZ (1996). Este sencillo dispositivo permite, por un lado, alejar las mediciones del clavo, evitando algunos errores usuales en este tipo de experiencias como consecuencia de la interferencia del clavo en los flujos normales de escorrentía en la parcela. Por otro lado, al alejar la medición del clavo se hace factible tomar dos puntos de muestreo en cada clavo, uno a cada lado según curvas de nivel, permitiendo así obtener para el caso comentado 72 puntos de muestreo. La primera medición se realizó en junio de 1998 y la segunda en febrero de 1999.

Paralelamente, se escogieron seis modelos de predicción de la erosión hídrica de entre los más comúnmente citados en la bibliografía y se planteó su aplicación a los desmontes en previa toma de parámetros referidos tanto a las parcelas como al área general de estudio (textura del suelo, precipitación, pendiente, etc.). Los modelos escogidos fueron: RUSLE 2.3 (1989); USLE (WISCHMEIER & SMITH, 1978); WEPP 98.4 (1998); SLEMSA (HUDSON, 1992); MORGAN, MORGAN & FINNEY (HUDSON, 1992), y MEGAHAN et al. (1992).

RESULTADOS

Las tablas 1 y 2 muestran la variación en el nivel del terreno como consecuencia de la diferencia entre la medida efectuada en febrero de 1999 y en junio de 1998. Todos los datos se expresan en centímetros. 1I y 1D muestran los valores de los rebajamientos en el lado izquierdo y en el lado derecho de cada uno de los clavos de erosión.

TABLA 1: Rebajamiento observado en la Parcela 1.

Rebajamiento	1 I	1 D	2 I	2 D	3 I	3 D
FILA 1	0,20	-0,65	1,95	-0,60	-2,70	1,70
FILA 2	-1,05	2,30	2,10	1,30	0,50	2,70
FILA 3	2,10	2,45	1,05	0,70	0,35	3,80
FILA 4	1,20	1,30	4,90	3,90	1,90	4,10
FILA 5	-1,20	3,35	-0,70	-3,10	-0,70	3,50
FILA 6	-9,50	-2,80	-9,15	-0,40	-3,90	-1,55

TABLA 2: Rebajamiento observado en la Parcela 2.

Rebajamiento	1 I	1 D	2 I	2 D	3 I	3 D
FILA 1	-1,15	0,10	-0,40	3,55	0,30	1,25
FILA 2	0,20	-3,05	1,25	1,15	-0,80	1,60
FILA 3	1,40	2,75	2,40	1,20	1,85	1,85
FILA 4	3,00	2,60	-0,35	3,20	-1,75	2,20
FILA 5	1,25	7,90	3,50	0,85	-4,70	0,25
FILA 6	-7,75	-5,40	-9,75	-9,15	-8,90	-8,70

Valores positivos indican pérdida de suelo y valores negativos incrementos. La validez de los datos tomados fue confirmada mediante el análisis estadístico con el programa SAS, siempre con un $\alpha=0,05$. El modelo ajustado respondía a la siguiente expresión:

$$A_{ijkl} = \mu + P_i + C_{j(i)} + F_{k(i)} + L_1 + P_{i1} + FL_{k1(i)} + \zeta_{ijkl(n)} \quad \text{donde}$$

- A_{ijkl} = rebajamiento del terreno (cm)
- μ = efecto de la media general.
- P_i = factor parcela.
- $C_{j(i)}$ = factor columna dentro de cada parcela (tres columnas cada 2 m por parcela).
- $F_{k(i)}$ = factor fila dentro de cada parcela (seis filas cada 1 m por parcela).
- L_1 = factor lado (dos lecturas en cada clavo de erosión).
- P_{i1} = interacción entre los factores parcela y lado.
- $FL_{k1(i)}$ = interacción entre los factores fila y lado dentro de cada parcela.
- $\zeta_{ijkl(n)}$ = error experimental.

En el análisis estadístico se utilizaron los procedimientos GLM y UNIVARIATE del programa informático SAS, permitiendo verificar para los residuales las hipótesis de normalidad, independencia, variabilidad constante y media cero. El modelo obtenido resultó altamente significativo ($Pr>F=0,0001$). Por tanto, existían diferencias estadísticamente significativas entre las erosiones medias medidas debidas a las diferentes variables del modelo.

El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,9229, por tanto el 92,29 % de la variabilidad existente estaba asociada a las variables introducidas en el análisis. La erosión media resultante fue de 0,22 cm. Este descenso, considerando una densidad aparente del regolito superficial de 1,39 t/m³, se convertía en una pérdida media de suelo de 30,58 t/ha.

El análisis de la suma de cuadrados parciales en este modelo no balanceado, mostraba que sólo dos de las variables del modelo eran estadísticamente significativas: las filas y los lados. Así, se ha encontrado que las erosiones medias entre los dos lados considerados son significativamente diferentes, arrojando una diferencia media de 1,644 cm. Más que el valor cuantitativo, lo realmente llamativo estriba en el aspecto cualitativo de la diferencia; ya que mientras en un lado se produce rebajamiento en el otro predomina la acumulación. El error sistemático en la lectura quedó descartado mediante una segunda medición en campo que corroboró las diferencias observadas. Por tanto, las variaciones encontradas hay que explicarlas en función de la propia heterogeneidad del proceso erosivo (formación de costras, inclinación en el plano de las parcelas, etc.), siendo la variabilidad reflejada con el medidor empleado mucho mayor que si se hiciera una única medición sobre el clavo.

En el caso del factor fila, su análisis mostró como las filas 1 a 5 de ambas parcelas tenían un comportamiento distinto que las filas 6. Mientras que en las filas 1 a 5 (parte superior del talud) se producía un rebajamiento insignificante o una erosión nula, en la fila 6 la situación pasaba a ser de

acumulación de material. Para la comparación de las medias de erosión estimadas por el modelo, se empleó el test de rango múltiple de Tukey-Kramer con un $\alpha=0,05$. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos (** = valores significativos).

TABLA3 : Resultados del test de Tukey-Kramer.

Parcela	Fila	L.I.C. cm 95%	Erosión Media	L.S.C. cm 95%	H ₀ : Media = 0 Pr > T
Parcela 1	1	-1,592	-0,017	1,559	0,9831
	2	0,299	1,308	2,317	0,0122**
	3	0,701	1,742	2,782	0,0016**
	4	1,421	2,883	4,346	0,0003**
	5	-2,009	0,192	2,393	0,8615
	6	-6,506	-4,550	-2,593	0,0001**
Parcela 2	1	-0,499	0,608	1,715	0,2741
	2	-1,550	0,058	1,667	0,9421
	3	1,369	1,908	2,447	0,0001**
	4	0,032	1,483	2,935	0,0454**
	5	-1,989	1,508	5,005	0,3894
	6	-9,603	-8,275	-6,947	0,0001**

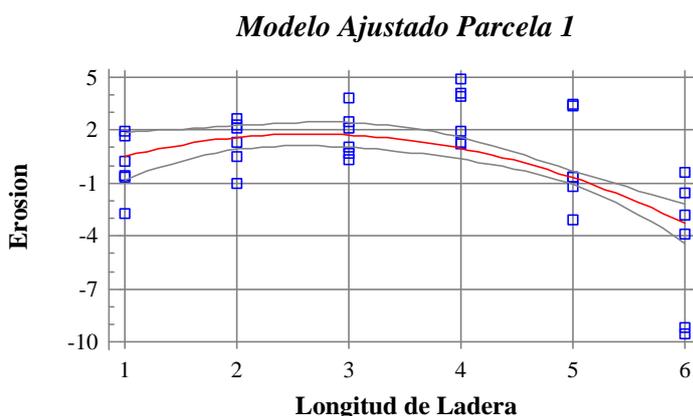
El análisis del factor lado permitía hacer una estimación de la tendencia erosiva dentro de cada parcela utilizando el programa STATGRAPHICS y considerando que las filas representan la longitud de ladera en la que están los diferentes puntos de medida, hipótesis que resulta aceptable por cuanto la primera fila se encuentra a 1 m de la cabecera, y las siguientes a intervalos de 1 m por debajo de la anterior. Así, para la parcela 1 se obtuvo la relación:

$$A = -1,44946 + 2,42381 \times \lambda - 0,454904 \times \lambda^2 \quad \text{donde}$$

A = pérdida de suelo en cm y λ = longitud desde la cabecera del talud.

La ecuación muestra ($R^2=60,49\%$) la tendencia previamente apuntada (gráfico 1)

GRÁFICO 1 : Modelo cuadrático ajustado en la Parcela 1.



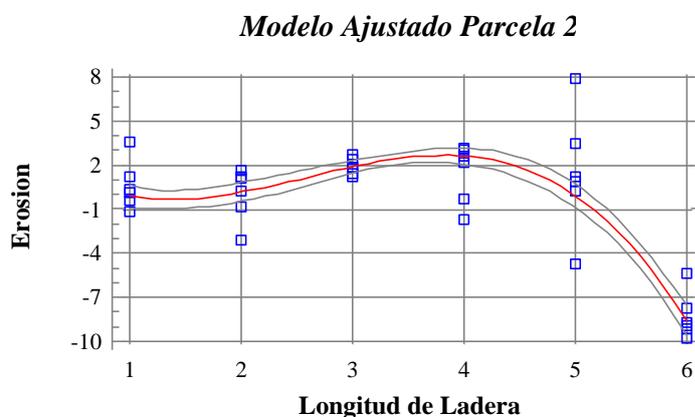
En la parcela 2 se ajustó un modelo de mayor grado, con el fin de conseguir que los residuales cumplieren las hipótesis anteriormente señaladas. Así, la ecuación ajustada fue:

$$A = 3,50141 - 6,36469 \times \lambda + 3,15731 \times \lambda^2 - 0,405255 \times \lambda^3$$

donde λ y A tienen el mismo significado que en la ecuación anterior.

Este modelo explica el 92,34 % de la variabilidad de la erosión. El término elevado al cubo refleja la fuerte variación en la tendencia erosiva a partir de la fila 5 (gráfico 2).

GRÁFICO2: Modelo cúbico ajustado en la Parcela 2.



En cuanto a la aplicación de los modelos de estimación de la erosión hídrica, sólo dos de los seis modelos estudiados pudieron ser aplicados con unas mínimas garantías; la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo y el modelo de MEGAHAN, MONSEN & WILSON (1992).

La USLE arrojó una tasa de erosión predicha de 608,76 t/ha⁻¹xaño (444,36 t/ha⁻¹ en el periodo de estudio utilizando el R proporcional). Con el modelo de MEGAHAN, MONSEN & WILSON se obtuvo una tasa de pérdida de suelo para el periodo de estudio de 55,74 t/ha⁻¹, utilizando un valor de R específicamente calculado para el periodo observado.

DISCUSIÓN

El modelo generado a través del programa SAS ha probado ser altamente significativo ($R^2=0,9229$), sugiriendo una correcta selección de las variables a considerar.

Las diferencias encontradas en el factor lado pueden ser atribuidas a la evolución irregular de las costras superficiales en las filas superiores, y a la formación de conos de sedimentación en la parte inferior de los taludes. La combinación de las condiciones de helada y humedad parece jugar un importante papel en estos procesos.

El análisis del factor fila ha revelado que en las dos parcelas, las cinco primeras filas mostraban un comportamiento erosivo similar, que puede sintetizarse en la existencia de un rebajamiento nulo o mínimo. Por otro lado, a partir de la fila 6 la presencia de los conos de sedimentación condiciona el que estas filas tengan un comportamiento netamente ganador. Estas diferencias están justificadas por la desaparición desigual de las costras superficiales y por la acumulación de material en el fondo de los taludes. En las filas más próximas a la cabecera del talud, el proceso erosivo está probablemente marcado por la existencia de erosión por salpicadura y pequeños deslizamientos en masa de los sedimentos superficiales motivados por las vibraciones y torbellinos de viento provocados por el paso de los convoyes ferroviarios, la presencia de nieve, o la acción de la fauna (principalmente pequeñas aves). A medida que se desciende a lo largo del talud hacia las filas inferiores, un nuevo factor se une a los anteriores, la escorrentía superficial, de acuerdo con las teorías de Horton.

La heterogeneidad encontrada refleja la gran complejidad de los procesos erosivos, incluso cuando sólo se pretende una valoración cuantitativa de la erosión. En este sentido, es preciso recordar la influencia de los factores climáticos y del tiempo (edad de las superficies).

El análisis de las tendencias erosivas constituye una atractiva herramienta, debido a la posibilidad potencial de hacer predicciones acerca de la evolución futura de los taludes. Sin embargo,

la gran limitación temporal del estudio reduce notablemente la credibilidad de tales estimaciones puesto. Incluso si las condiciones climáticas permaneciesen iguales, otros factores estarían cambiando, como por ejemplo la propia edad de los taludes, factor que influye en la evolución de las costras superficiales y los conos de deyección.

En cualquier caso, la tasa de erosión medida alcanza un valor más que suficiente como para considerar la situación como seria y preocupante, dado que su equivalencia en unidades de peso/área está claramente por encima de los valores usuales de pérdida tolerable de suelo, si bien para este tipo de superficies no parece adecuado aplicar el mismo baremo que para superficies agrícolas y forestales, ya que los efectos negativos de la erosión no se perciben tan directamente ni acostumbran a tener un impacto social tan grave.

A falta de valoraciones ambientales más complejas (impacto sobre las aguas, pérdida de valor paisajístico..), una primera aproximación al concepto de pérdida tolerable de suelo puede establecerse a través del balance entre el costo de recuperación ambiental (costo de las actuaciones que contribuirían a mitigar la gravedad de los fenómenos erosivos), y el costo de mantenimiento de las infraestructuras (limpieza de viales, interrupciones del tráfico, etc.). Así, la tasa de erosión tolerable se establecería en el punto en el que los costos de mantenimiento superasen el costo de la recuperación ambiental.

Con respecto a los resultados obtenidos con el uso de los modelos de estimación de la erosión hídrica, es preciso enfatizar previamente que ninguno de ellos ha sido previamente validado en el área de estudio. No resulta extraño entonces que hayan surgido diversos problemas a la hora de intentar aplicar los mismos al área de estudio con un mínimo de rigor.

Así, los modelos RUSLE (2.3) (RENARD et al., 1994) y WEPP (98.4) no han podido ser aplicados debido a que ambos trabajan con pendientes máximas del 60%, y no existe información adecuada en el área de estudio respecto a las variables climáticas a introducir. En el caso del modelo SLEMSA los obstáculos se han encontrado también en el cálculo de los parámetros climáticos. En concreto, se obtiene un valor negativo para la energía estacionaria de la lluvia al aplicar la expresión propuesta por MORGAN (1974), resultando inaceptable.

El modelo de MORGAN, MORGAN & FINNEY es un modelo fácil de aplicar, a pesar de precisar de la introducción de quince parámetros en sus seis funciones de cálculo. Sin embargo, no se ha podido aplicar al no existir información acerca del valor del índice de deslizamiento del suelo (K) para suelos con texturas similares a la del área de estudio.

Finalmente, la USLE y el modelo de MEGAHAN, MONSEN & WILSON han podido ser aplicados con éxito. En el caso de la USLE, uno de los mayores inconvenientes se encuentra en que el modelo no está diseñado para predecir la erosión potencial en un año concreto (WISCHMEIER, 1976). Al haberse forzado este axioma podría pensarse que el modelo no es aplicable al área de estudio, ya que la erosión estimada es varias veces superior a la erosión medida. Sin embargo, es necesario recordar que el modelo no computa datos absolutos, y que la dinámica erosiva puesta de manifiesto en los taludes, con la formación de grandes conos de deyección en los tramos inferiores, puede estar enmascarando la situación real, que sólo se pondrá de manifiesto cuando se produzca un fenómeno tormentoso de magnitud suficiente como para arrastrar ese material acumulado. Hechas estas consideraciones, la gravedad del problema erosivo en el enlace ferroviario de Palencia-Magaz es perfectamente reflejada por la ecuación. Otra sombra de duda que se yergue sobre la utilidad de la USLE se encuentra en la incertidumbre existente acerca de la adaptación del factor R a las condiciones mediterráneas (NAVARRO et al., 1998; PUIGDEFABREGAS, 1992).

El modelo de MEGAHAN, MONSEN & WILSON (1992) tiene la ventaja de estar específicamente pensado para su utilización en taludes de infraestructuras viarias y partir de una herramienta que reúne bastantes consensos como es la USLE, constituyendo un buen ejemplo de adaptación de un modelo más o menos genérico a un área concreta. El modelo permite estimar la tasa

de erosión en un periodo anual (o menor), y en este sentido resulta muy interesante para los gestores del suelo implicados en la recuperación de estas áreas. Sin embargo, es preciso recordar que el modelo no está validado en el área de estudio, siendo muy diferentes las condiciones pedológicas del área de validación a las del enlace ferroviario de Palencia-Magaz. A pesar de esto, la tasa de erosión predicha por el modelo está más cercana a la tasa de erosión medida que en el caso de la USLE. Esto no debe interpretarse como que aquel modelo es mejor que la USLE, hasta que no se acometan nuevas experiencias.

CONCLUSIONES

El estudio ha mostrado la gravedad de los procesos erosivos en los taludes del enlace ferroviario de Palencia Magaz, tal y como lo demuestran tanto las mediciones realizadas en campo, como la aplicación de los modelos de estimación de la erosión hídrica.

El medidor de erosión de NAVARRO & FERNANDEZ (1996), ha demostrado ser una útil herramienta para la valoración de la erosión en estas áreas, evitando los errores derivados de la interferencia de los clavos de erosión en los procesos de erosión y transporte del suelo.

En relación con los modelos de estimación de la erosión hídrica, lo cierto es que ninguno de ellos está validado en el área de estudio. Tan sólo dos de ellos han podido ser aplicados con ciertas garantías, y también varios interrogantes: la USLE y el modelo de MEGAHAN, MONSEN & WILSON (1992). Las predicciones obtenidas con estos modelos difieren de la erosión real medida, pero en términos cualitativos, muestran la gravedad del problema, y esto, desde el punto de vista de la recuperación ambiental puede ser suficiente.

Resulta obvia la ausencia de una herramienta práctica de valoración de la erosión en España. Los modelos muy complejos son indeseables, puesto que raramente pueden ser aplicados. Son necesarias más experiencias para alcanzar a validar, o adaptar, algunos de los modelos existentes a las condiciones Peninsulares.

BIBLIOGRAFÍA

- CARR, W. W. & BALLARD, T. M. 1980. Hydroseeding forest roadsides in British Columbia for erosion control. *Journal of Soil and Water Conservation*, pp 33- 35.
- HARGETT, D. L.; PHILIPS, J. A. & KLEISS, H. J. 1982. Soil variability and fertility considerations affecting establishment of erosion control vegetation on Piedmont roadcuts. *Journal of Soil and Water Conservation*, pp 229-233.
- HUDSON, N. 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. F.A.O.. Rome. 139 pp.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. 1997. *Mapa geológico de España*. Baltanás, hoja 312, 80 pp.
- MASSIE, L.R. & BUBENZER, G.D. 1974. Improving roadbank erosion control. *Journal of soil and water conservation*. pp. 176-178.
- MEGAHAN, W. F.; MONSEN, S. B.; WILSON, M. D. 1992. Erosion control practices applied to granitic roadfills for forest roads in Idaho: cost effectiveness evaluation. *Land Degradation & Rehabilitation*, vol. 3.
- NAVARRO, J. & FERNÁNDEZ DE VILLARÁN, R. 1996. *Medida de la erosión en taludes por medio de clavos de erosión*. (Ined.).
- NAVARRO, J.; SAN MARTIN, R.; FERNÁNDEZ DE VILLARÁN, R. & JONTE, M. A. 1998. *Estudio comparativo de métodos de restauración en laderas y taludes altamente degradados*. (Ined.).
- PUIGDEFÁBREGAS, J. 1992. Datos climáticos, in *Metodologías de estudio de los procesos de erosión hídrica del suelo en España*. Cuadernos da área de Ciencias Agrarias. Seminario do Estudos Galegos, pp 21-22.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; YODER, D. C.; McCOOL, D. K. 1994. RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future. *J.S. W. Conservation*, vol 49 (3).
- R.U.S.L.E.® 1989. Version 2.3. ARS & SCS. West Lafayette. Indiana & Tucson. Arizona.

- WEPP.1998. Version 98400. National Soil Erosion Research Laboratory. USA.
- WISCHMEIER, W. H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, pp 5-9.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture. *Agriculture Handbook N° 537*. 58 pp.