

americanos, siendo destacable el caso de los suelos arcillosos por su gran abundancia en el territorio estudiado.

Algunas consideraciones finales sobre la erodibilidad de los suelos.

Resulta evidente, a la luz de los resultados obtenidos, la variación de los valores de la erodibilidad de los suelos estudiados con respecto a los asignados a suelos situados en el lugar donde se originó la ecuación universal de pérdida de suelos. Este hecho corrobora la idea de la necesidad de establecer parcelas-piloto para el estudio del comportamiento real de los suelos propios de zonas mediterráneas sometidos a condiciones de erosividad natural. Es preciso validar en campo este factor de erodibilidad intrínseca, ya que, si esto no se hace, se corre el riesgo de utilizar datos absolutamente teóricos, que, podrían distanciarse bastante de la realidad. No obstante, la tónica general de los resultados obtenidos es lo suficientemente consistente y acorde con las manifestaciones externas de la erosión en las tierras estudiadas, como para que puedan ser utilizadas como un precioso indicador de la susceptibilidad a la erosión por la energía cinética de la lluvia. Un elemento de confusión, difícilmente soslayable al hacer uso de informaciones que, en origen, difieren de los factores que definen la erodibilidad, se plantea al utilizar análisis texturales que no concuerdan con los empleados por WISCHMEIER (1.965). En este sentido, sólo un cambio en la adopción de análisis textural o un replanteamiento de la formulación de este factor K en función de los resultados que se obtuviesen de parcelas piloto solucionaría dicho problema.

Finalmente, es necesario mencionar que, aunque en este estudio se ha introducido un factor de corrección para contemplar la mayor o menor abundancia de pedregosidad en los suelos analizados, la fórmula de WISCHMEIER no la contemplaba y, por consiguiente, la indudable influencia de los elementos gruesos en la erodibilidad queda reflejada de un modo muy relativo. Esto pone nuevamente en evidencia la necesidad de establecer parcelas piloto en las que calibrar los suelos de latitudes mediterráneas.

c) Definición de factores fisiográficos. (Factor LS).

Longitud y gradiente de la pendiente son los factores fisiográficos que WISCHMEIER encontró altamente relacionados con las pérdidas de suelos. Aunque este autor planteó la formulación de ambos factores por separado, posteriormente se establecieron como un factor topográfico único, conocido como LS. La longitud de la pendiente fue definida como la distancia desde el punto de origen del flujo del agua sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye suficientemente como para que se produzca la sedimentación de partículas en suspensión o hasta el punto en que se introduce la escorrentía en un canal definido, bien sea éste perteneciente a la red hidrográfica o a un canal artificial. El gradiente de la pendiente se define como un segmento de pendiente expresado como un porcentaje.

No obstante, antes que estos factores fuesen parametrizados para ser empleados en la U.S.L.E., fueron diversos los autores que analizaron la influencia de la pendiente y la longitud de la pendiente en la pérdida de suelos. Así, ZING (1.940) planteó una relación que definía las pérdidas de suelo en función del gradiente de la pendiente y de un exponente (S^n , donde $n = 1.49$). Para MUSGRAVE (1.947) el coeficiente era menor ($n = 1.35$). WISCHMEIER (1.958) en

sus experimentos de campo encontró ajustada a las pérdidas de parcelas piloto con gradiente del 9% la ecuación:

$$E = 0.43 + 0.30S + 0.043 S^2$$

$$6,613$$

donde E es la pérdida de suelo y S la pendiente en porcentaje. Será a partir de esta ecuación que se desarrolle su introducción en la U.S.L.E. En ella, los trabajos de campo se realizaron sobre parcelas piloto de 22.13 metros, quedando establecida la influencia de la longitud de la pendiente como:

$$L = \frac{X^m}{22.13}$$

donde:

L = factor longitud de la pendiente.

X = longitud de la pendiente en metros.

^m = exponente cuyos valores oscilan:

0.5	sí la pendiente	> 5%
0.4	"	" < 5% > 3%
0.3	"	" < 3% > 1%
0.2	"	" < 1%

Ambos factores serían presentados conjuntamente bajo la forma:

$$LS = \frac{X^m}{22.13} (0.065 + 0.045S + 0.0065 S^2)$$

donde todos los términos han sido ya definidos y que sirve para establecer una buena aproximación a la influencia de ambos factores en la pérdida de suelos. Resultado de su aplicación es el gráfico que suele ser utilizado para obtener directamente los valores de este factor conjunto (**Figura 12**).

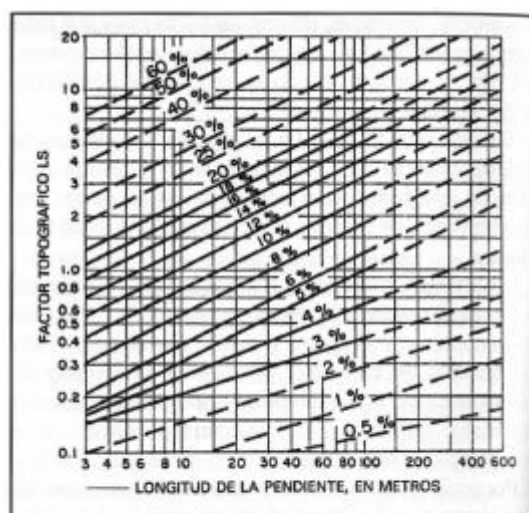


Figura 12.- Factor de longitud y grado de pendiente, LS, para usarse con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Sin embargo, el proceso de desarrollo de éste factor siguió adelante, ya que la formulación planteada sólo consideraba pendientes aisladas y uniformes, cuando no es esto lo normal. Era preciso establecer un procedimiento para evaluar perfiles complejos de pendiente. En este sentido serían primero los estudios de ONSTAD et alia (1.967) y, posteriormente, de FOSTER Y WISCHMEIER (1.974) los que proporcionaron un procedimiento metodológico adecuado para medir los efectos del factor LS en pendientes complejas. Dicho método se fundamenta en la división en segmentos uniformes de pendiente y tipo de suelo de la superficie a evaluar, aplicando seguidamente una serie de fórmulas, cuya complejidad de exposición hace que remitamos a los estudios originales de sus autores, puesto que, como expondremos seguidamente, este factor sólo ha sido evaluado por nosotros sobre perfiles de suelo puntuales, los cuales no se corresponden con perfiles complejos de pendiente.

La gran dificultad de medición de este factor sobre superficies amplias en las que se prodigan gran cantidad de perfiles complejos y de cambios de longitud ha hecho que algunos autores establezcan procedimientos prácticos para la obtención rápida de este factor utilizando documentos cartográficos (MINTEGUI et al, 1.983). El de uso más frecuente es empleado para evaluar pérdidas en cuencas hidrográficas. Consiste en calcular, inicialmente, el factor LS en varias zonas tipo, por integración de los valores puntuales obtenidos en los vértices de una malla rectangular, midiendo directamente los parámetros L y S sobre cartografía a escala 1/10.000. Seguidamente, y apoyándose en la correlación establecida por WILLIAMS y BERNDT (1.976)* entre la densidad de la red de drenaje, la longitud y la pendiente media, se efectúa un análisis de regresión de los anteriores valores a escala 1/10.000, sobre densidad de la red y pendiente media a escala 1/50.000. Finalmente, se extrapolan los resultados a todas las cuencas homogéneas empleando las ecuaciones de regresión obtenidas.

Aplicación a la zona de estudio.

Numerosos trabajos efectuados en España por especialistas en correcciones de cuencas hidrográficas han utilizado de un modo quizá excesivamente directo, el método de evaluación de WILLIAMS y BERNDT mencionado más arriba. En algunos de estos trabajos se llega a mencionar incluso: "... cuando la correlación existente entre ambas sea poco significativa pueden establecerse varias regresiones teniendo en cuenta otros aspectos, como características climáticas..." hecho que, evidentemente, está forzando la realidad para llegar a unos resultados que, en principio, no parecen apoyar lo buscado. Esto puede ser así debido a que, como en numerosas ocasiones hemos mencionado, se carece de las debidas constataciones de campo. Se podría llegar incluso a plantear que dichos métodos no son extrapolables a las condiciones ambientales existentes en zonas mediterráneas, ya que el único estudio al que hemos tenido acceso que plantea las relaciones suelo-relieve-red hidrográfica, en una zona del norte de la provincia de Córdoba (TORRENT et alia, 1.983), no encuentra correlaciones significativas entre la longitud de las laderas y ninguno de los parámetros vinculados a la red hidrográfica. Este hecho, y el que según los últimos estudios (NEBOIT, 1.983) no parece tan evidente la relación de la longitud de la pendiente con las pérdidas de suelo, ha hecho que en este estudio tomemos algunas medidas para mantener constante la importancia del factor longitud de la pendiente. Es decir, se ha partido de la base de comparar los resultados para zonas en las que

* Estos autores establecieron que la longitud de los cursos superficiales de drenaje es equivalente al promedio de la longitud de la pendiente. Así L fue definida por la ecuación: $L = 0.5 DA/LCH$, donde DA es área de la cuenca estudiada y LCH es la longitud total de los ríos que drenan dicha cuenca.

hipotéticamente mantenemos la longitud de la pendiente en 22.13 metros, que es el valor de las parcelas piloto utilizadas por WISCHMEIER, con lo cual el factor L queda como una constante de valor 1. Como ya hemos mencionado, existen varias razones para optar por mantener como una constante dicho factor, destacando:

- a) la aplicación de nuestro estudio sobre perfiles de suelo sin representación espacial inicialmente.
- b) una vez efectuada la cartografía de unidades geomorfoedáficas en la que los suelos estudiados se distribuyen, la incertidumbre de los resultados que se derivasen de la aplicación del método de WILLIAMS y BERNDT*, excesivamente complicado de utilizar por otra parte.
- c) la reciente puesta en cuestión de la relación entre pérdida de suelos y longitud de la pendiente (NEBOIT, 1.983).

Por otra parte, el factor gradiente de pendiente ha sido mantenido como se planteó en la fórmula original, ya que el mismo no se ve influenciado por otros tipos de condicionantes que no sean la existencia de perfiles complejos de pendiente, hecho que, por la extensión abarcada por este estudio sería impensable abordar espacialmente. En este sentido se ha empleado la fórmula mencionada en páginas anteriores siendo conscientes de que sólo es utilizable en pendientes aisladas y uniformes.

La excesiva complejidad de los procedimientos a utilizar para medir la longitud de la pendiente y lo incierto de los resultados a obtener, así como la escasa relación que algunos autores asignan a este factor, limitaron, pues, los esfuerzos a la obtención del factor gradiente de la pendiente.

El gradiente de la pendiente aparece, por una parte, directamente vinculado a cada perfil de suelo estudiado, como un dato más de la descripción del perfil. En este sentido, como ya se indicó, cada suelo ha sido analizado según su ángulo de pendiente, medida en campo, y también, según diversas hipótesis de ángulo de pendiente para cada suelo (3%, 7%, 15%) lo cual, a pesar de recoger situaciones imposibles (por ejemplo pendientes de 15% para suelos de vega) sí puede ser un indicador de gran utilidad para la mayor parte de los perfiles. Los resultados obtenidos al manejar estas hipótesis serán descritos cuando se analicen las pérdidas de suelo evaluadas por aplicación global de la U.S.L.E.

Por otra parte, también se ha hecho ya mención anteriormente al modo con que se ha generado el mapa de pendientes de Andalucía a E: 1/400.000, cuyos resultados referidos al Valle Central del Guadalquivir aparecen en el **Mapa 4**. Dicho mapa ha servido para evaluar cartográficamente el riesgo de erosión actual y potencial, la susceptibilidad a la erosión y como una variable fundamental a la hora de generar los sistemas de tierras y las unidades del mapa geomorfoedáfico. En la descripción de los sistemas de tierras se ha utilizado la pendiente, por lo

* Hay que hacer notar que, si bien este método suele ser muy utilizado en estudios que plantean la corrección de cuencas hidrográficas, la misma definición del factor longitud de pendiente de la U.S.L.E. parece entrar en contradicción con este método, ya que como L se considera distancia desde un punto origen del flujo hasta la introducción del flujo en un canal, mientras el método de WILLIAMS y BERNDT deduce la longitud a través de la red de drenaje.

que aquí sólo haremos mención a las peculiaridades más destacadas que, a nivel general, presentan los territorios estudiados, comparándolos con los datos que referidos a toda Andalucía aparecen en DE LA ROSA, D. y MOREIRA, J.M., 1.987.

Si consideramos la aptitud de las tierras para ser usadas agrícolamente, empleando criterios de topografía y en atención a los grados establecidos de un modo genérico, observamos cómo, comparativamente, las provincias de Sevilla y Córdoba son las que presentan una mayor proporción de terrenos con elevada potencialidad agrícola y, teóricamente menor riesgo a la erosión (pendiente < 7%).

La **Tabla 53**, que recoge datos evaluados a partir del mapa general de pendientes, muestra claramente el predominio de las tierras de óptima potencialidad en éstas dos provincias, a las que les siguen Cádiz y Huelva. Nuevamente aparece la dicotomía entre las provincias occidentales y orientales. Estas últimas ofrecen un panorama muy homogéneo en cuanto a las tierras con pendientes inferiores al 7%. De todas las provincias sólo Sevilla (68,1% de su superficie), Córdoba (53,8%) y Cádiz (43,5%), superan la media regional (40%), mientras Huelva se acerca a ella (36,5%). En el territorio aquí estudiado sólo Jaén baja de esa media regional.

Tabla 53.- Cuantificación de superficies de pendiente a nivel provincial.

Clases de pendiente (%)	Almería		Cádiz		Córdoba		Granada		Huelva		Jaén		Málaga		Sevilla		Total regional	
	10³Ha.	%	10³Ha.	%	10³Ha.	%	10³Ha.	%	10³Ha.	%	10³Ha.	%	10³Ha.	%	10³Ha.	%	10³Ha.	%
< 7	225	25,6	321	43,5	737	53,8	349	27,8	368	36,5	365	27,1	178	24,5	953	68,1	3496	40,1
7-15	281	32,1	169	23,0	296	21,5	277	22,1	295	29,3	355	26,3	164	22,6	244	17,4	2081	23,8
15-30	161	18,4	128	17,3	211	15,4	254	20,2	196	19,4	257	19,0	113	15,5	129	9,2	1449	16,6
>30	210	23,9	120	16,2	128	9,3	274	29,9	149	14,8	373	27,5	272	37,4	74	5,3	1700	19,5

* Estimación realizada mediante planimetría e integración de las unidades representadas en el Mapa de Pendientes, escala 1/400.000.

Las tierras con pendientes entre un 7% y un 15%, de aptitud agrícola buena según este parámetro, suponen en el conjunto de Andalucía un 23,8%, situándose, la mayor parte de ellas, en la provincia de Almería (32,1% de su territorio) y la menor parte en Sevilla (17,4%), presentando el resto de provincias unos porcentajes de superficie muy similares entre sí, oscilando entre el 26,3% de Jaén y el 21,5% de Córdoba. No obstante, es preciso señalar que la suma de tierras, por este criterio de diagnóstico, de óptima y buena capacidad agrológica suponen un 85,5% del territorio provincial de Sevilla, el 75,3% del de Córdoba y el 53,4% de Jaén, frente al 63,9 % de media para el conjunto de Andalucía. Quedan, así, perfectamente caracterizadas estas provincias por la elevada proporción de tierras aptas (por el relieve) para la agricultura. No obstante, es conveniente recordar que muchas de estas tierras presentan elevada erodibilidad y características edáficas no adecuadas.

Las tierras con pendientes entre un 15 - 30%, que suelen ser caracterizadas como de utilización marginal para la agricultura, ocupan un 16,6% de Andalucía, siendo Granada la provincia con mayor superficie de esta clase (19,4%), mientras Sevilla sólo ofrece un 15,5 de sus tierras con esta calificación. De las tres provincias que ocupan el valle central del Guadalquivir, Jaén (con un 19%) y Córdoba (con un 15,4%) se caracterizan por disponer de extensiones importantes de tierras de capacidad marginal con elevado riesgo de erosión.

Finalmente, las tierras de nula capacidad agrícola y muy elevado riesgo de erosión en función de un relieve superior, en su pendiente, al 30%, representan un 19,5% de Andalucía, ocupando amplias superficies de las provincias de Málaga (37,4%), Granada (29,9%); Jaén (27,5%) y Almería (23,9%). Son relativamente frecuentes en Cádiz (16,2%) y Huelva (14,8%), mientras apenas existen en Córdoba (9,3%) y Sevilla (5,3%).

En resumen, el mapa de pendientes evidencia la clara vocación agrícola, en función del relieve, de las tierras de Sevilla y Córdoba y muestra la elevada proporción de tierras marginales y de aptitud nula que aparecen en Jaén. De aquí que el problema de la erosión pueda ser muy grave en las dos primeras provincias, no ya por el volumen que alcance, sino por la calidad de las tierras a las que puede afectar. En el caso de Jaén la gran proporción de tierras con elevada pendiente dará lugar a una acentuación de los procesos vinculados con la erosión hídrica, como vimos al contemplar los mapas de susceptibilidad a la erosión y riesgos de erosión actual.

Por lo que se refiere a la distribución de la pendiente en los distintos sistemas de tierras que componen el Valle Central del Guadalquivir hemos de destacar algunos hechos.

Es evidente la existencia de las tres grandes unidades macroestructurales que definen el territorio analizado, destacando Sierra Morena y las Sierras Subbéticas por la extraordinaria variabilidad de las pendientes que en ellas se han cartografiado, y el Valle Bético por la homogeneidad de las mismas.

Los sistemas de Marismas se caracterizan por presentar los menores niveles de pendiente, al igual que las Vegas y llanuras de inundación, donde, normalmente, no se sobrepasa el 2%.

Las terrazas y otras coberteras detríticas ofrecen un panorama más variado. Las terrazas bajas del Guadalquivir no superan el 2% de pendiente. Las medias y altas aparecen con pendientes dominantes entre el 2 y 7%. Las coberteras de Osuna-Estepa-Puente Genil, así como las del sureste de Jaén y los arenales y cabezos al norte de las marismas quedan cartografiados con pendientes entre el 2 y 7%.

Los sistemas de tierras campiñesas, muestran unas pendientes variables, El Aljarafe y el Campo sevillano presentan un predominio de pendientes entre un 2 y 7%, aunque también existen zonas entre 7 y 15%. La "Vega" de Carmona es el Sistema de campiñas con menor pendiente (< 2%), hecho que vuelve a repetirse en las Campiñas occidentales, si bien con abundancia de suelos con pendiente entre el 2 y 7 %. Estas pendientes aumentan en el resto de tierras de Campiña, tanto en dirección norte-sur, como oeste-este. Así en las Campiñas con margas triásicas domina la clase 7-15%, al igual que en las Campiñas central baja y oriental y en las zonas de Condado-Guarromán. La Campiña central alta da paso a tierras con pendientes entre 15 y 30%, si bien es más frecuente la clase 7-15%.

Las tierras ubicadas en morfologías tabulares quedan representadas con pendientes acordes con estos relieves. En los Alcores dominan pendientes entre 2-7%, aunque no está ausente la clase 7-15%. En la Loma es la clase 7-15% la más representada, con algunas zonas de pendiente entre 2 y 7%. En la Cuesta de Jaén las pendientes son de 7-15%, con zonas entre un 15 y 30%.

En los sistemas de tierras vinculados a Sierra Morena pueden distinguirse, igualmente, varios sectores homogéneos. Las zonas con menores pendientes se presentan en el sistema de Pedroches Occidental (2-7%), el sistema de Penillanuras y Rañas (2-7% y 7-15%), Pedroches oriental (2-7% y 7-15%), Escalón de Villanueva-Hornachuelos (7-15%) y Valle del Viar. Las zonas con pendientes dominantes entre 7-15% y cierta abundancia de la clase 15-30% se extienden, fundamentalmente, por el Piédemonte de Sierra Morena y el Escalón de Linares. Esta última clase es representativa de los sistemas del Escalón de Santa Elena, en Jaén, y del Batolito

Pedroso-Castillo de las Guardas y Escalón de Constantina-Cerro Muriano, en Sevilla y Córdoba. La clase de pendiente entre 30 y 45% sólo es dominante en el Escalón de la Meseta, en Jaén y en parte del Escalón Constantina-Cerro Muriano.

Los sistemas de tierras, relacionados con las formas estructurales y kársticas subbéticas son los que presentan mayores pendientes. No obstante, la Sierra Sur de Sevilla, en su primer nivel ofrece, pendientes poco acentuadas (7-15%). Pero el segundo nivel da paso al predominio de tierras con pendientes entre 15-30% y de 30-45%. En el corredor del Tranco de Beas y en los Pasillos de margas triásicas impera la clase 15-30%. Finalmente, en los sistemas de Cazorla, Segura y las Villas y los Macizos calizos subbéticos, son casi exclusivas las clases de pendiente cartografiadas más acentuadas (30-45% y > 45%).

d) La cubierta vegetal. (Factor C).

La mayor erosión posible se produce en aquellos suelos que carecen de cubierta vegetal y que han sido arados impidiendo, así, cualquier efecto de reducción de la fuerza erosiva de la lluvia. La energía de las gotas es absorbida directamente por el suelo, en el que se forma una película superficial que facilita el que el agua corra sobre él con rapidez, dando lugar al comienzo de los procesos de arrastre.

La importancia de la erosión dependerá, en gran parte, del uso a que haya sido sometido un suelo, de modo que, aún estando en barbecho desnudo, el cultivo anterior y el laboreo efectuado condicionará la mayor o menor importancia de los procesos erosivos.

Ya se ha mencionado que el resultado que se obtiene al aplicar la U.S.L.E. está en directa relación con las condiciones básicas que se plantearon en las pruebas experimentales utilizadas por sus autores. El valor fundamental para la ecuación es la pérdida media anual de suelo en un barbecho continuo. Para condiciones reales este valor queda cuantitativamente recogido por el producto de los factores de erosividad, erodibilidad, grado y longitud de la pendiente. No obstante, los usos del suelo son extraordinariamente variados, de modo que las pérdidas de suelo son menores siempre que exista algún tipo de cubierta vegetal. Para su utilización en la U.S.L.E., el factor de uso y ordenación, denominado C, es la relación esperada entre la pérdida correspondiente de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas, y la pérdida correspondiente del suelo en barbecho continuo, suponiendo similares, en ambos casos, el resto de factores condicionantes de la erosión.

Para algunos autores (HUDSON, 1.982)", este factor es, sin duda, el más complicado, ya que existen infinitos modos diferentes de cultivar una cosecha". Sin embargo, también es cierto que es el que puede ser evaluado con mayor detalle, ya que han sido establecidas numerosas pruebas experimentales que permiten conocer la influencia de diversos tipos de cubierta vegetal y de manejo. Efectivamente, ya vimos en su momento cómo distintos autores han utilizado el factor cubierta vegetal en modos muy diversos que oscilaban, desde la consideración de cultivos o cubiertas tipo genéricas de una región, hasta el máximo nivel de análisis alcanzado por los experimentos de WISCHMEIER y sus colaboradores.

Hay que tener en cuenta que en los sistemas antiguos de predicción de la erosión se utilizaban factores de cubierta vegetal únicos, obtenidos como promedio anual de las situaciones más comunes en la región analizada y no considerándose, consiguientemente, situaciones intermedias. No obstante, a lo largo del ciclo de los cultivos y cubiertas vegetales en general, se