

INFLUENCIA DEL PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA SEPARAR EL EFECTO DE LA TOPOGRAFÍA SOBRE EL CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE RUGOSIDAD A PARTIR DE PERFILES DE MICRORRELIEVE

Lado Liñares, Marcos

Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira. 15071 A Coruña

SUMMARY

Influence of procedure for removing topography effect to calculate roughness indices from microrelief profiles.

Soil surface roughness is an important factor in preventing soil erosion. A rougher microrelief leads to a higher depressional storage, delaying runoff generation. Characterization of roughness is made with indices calculated from height measurements of soil surface. This indices are calculated after removing slope and tillage effects. The purpose of this investigation is to provide a comparison of two different methods for handling trend due to topography that may be present in original data: fitting a linear surface, and using the best fitting surface, that may be linear, parabolic or cubic. Four roughness indices were calculated: tortuosity (T), random roughness (RR), limiting difference (LD) and limiting slope (LS) from 137 microrelief measurements made under a wide range of conditions, and with a number of points varying from 702 to 2212. Results show that RR is

the most sensible index to changes in trend removal method. T values have no significant variations. Although LD and LS show little variations, they have a variable behavior that may be due to inherent problems in their calculation.

Key words: Microrelief, roughness indices, pinmeter, trend removal.

RESUMEN

La rugosidad de la superficie del suelo es un importante factor para prevenir la erosión del suelo. Un microrrelieve bien desarrollado favorece la retención de agua en microdepresiones, retardando la generación de escorrentía. Su caracterización se realiza mediante índices calculados a partir de datos puntuales de altura de la superficie del suelo. Estos índices se calculan tras eliminar el efecto de la topografía y el laboreo. En este trabajo se comparan dos métodos para filtrar el efecto de la topografía que puede aparecer en los datos originales: el ajuste de una superficie lineal, y el uso de la superficie que proporciona el mejor ajuste, que puede ser lineal, parabólica o cúbica. Se calcularon cuatro índices de rugosidad: Tortuosidad (T), rugosidad aleatoria (RR), diferencia límite (LD) y pendiente límite (LS) a partir de 137 medidas de la superficie del suelo cubriendo un amplio rango de condiciones, y con un número de puntos que varía entre 702 y 2212. Los resultados muestran que RR es el índice más sensible al cambio en el método de filtrado. Los valores de T prácticamente no sufren variaciones. Aunque LD y LS muestran pequeñas diferencias, poseen un comportamiento variable que puede ser debido a problemas inherentes en su cálculo.

Palabras clave: Microrrelieve, índices de rugosidad, asperímetro, filtrado de tendencia.

INTRODUCCIÓN

El microrrelieve del suelo es un factor importante que interviene en la formación de escorrentía, principalmente en terrenos de cultivo. Las microdepressiones de la superficie actúan como almacén temporal del exceso de agua cuando la intensidad de la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo, retardando de esta forma la formación de escorrentía (DEXTER, 1977; MOORE and LARSON, 1979; MITCHELL and JONES, 1976). Además, la presencia de un microrrelieve bien desarrollado en la superficie del suelo retarda la formación de una costra superficial que disminuya la capacidad de infiltración (HELMING *et al.*, 1992).

Estas razones han provocado que en los últimos años aumente el interés por conocer diversos aspectos relacionados con el microrrelieve, como su evolución con la precipitación o su relación con las propiedades físicas del suelo (LERSCH *et al.*, 1987; PAZ y TABOADA, 1996; VIDAL VÁZQUEZ, 1998). Las aproximaciones más recientes relacionan el microrrelieve con la geometría fractal (VIVAS MIRANDA y PAZ GONZÁLEZ, 1998) y con parámetros deducidos del álgebra de Bool (BERTUZZI *et al.*, 1995). Además, su inclusión en los modelos de erosión ha hecho necesario el desarrollo de índices cuantitativos que explicaran su magnitud y su relación con la retención temporal de agua en microdepressiones. Estos índices se calculan a partir de datos puntuales de altura de la superficie del suelo.

Uno de los primeros índices cuantitativos utilizados fue propuesto por KUIPERS (1957). ALLMARAS *et al.* (1966) definieron un índice llamado rugosidad aleatoria (RR) como el error estándar de los logaritmos de las alturas tras retirar el efecto del laboreo y la topografía. Posteriormente, CURRENCY and LOVELY (1970) definieron la rugosidad aleatoria como la desviación estándar de los residuos, sin la transformación logarítmica de los datos:

$$RR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}{N}} \quad (1)$$

donde Z_i = altura en cada punto.

\bar{Z} = media de las alturas.

N = número de puntos.

Estos índices son puramente estadísticos, y son incapaces de explicar en términos físicos la rugosidad. Por ello, otros autores desarrollaron índices capaces de explicar la distribución de las medidas de altura en términos físicos. Entre ellos destacan los índices pendiente límite (LS) y diferencia límite (LD) propuestos por LINDEN and VAN DOREN (1986). Estos autores parten del cálculo del semivariograma de primer orden de los datos de altura para sucesivas distancias:

$$DZ_h = \sum_{i=1}^n \frac{|Z_i - Z_{i+h}|}{n} \quad (2)$$

donde: Z_i = altura en cada punto.

Z_{i+h} = altura en un punto situado a una distancia h de Z_i .

n = número de datos.

Tras retirar la orientación del microrrelieve debida al laboreo y a la pendiente de la superficie medida, Linden y Van Doren hallan una relación lineal entre las inversas de la distancia y la diferencia media de alturas:

$$\frac{1}{DZ_h} = a + b \frac{1}{DX_h} \quad (3)$$

La distancia máxima de comparación de los valores del semivariograma de primer orden se limita a 20 cm, que constituye el rango en que la regresión entre las inversas de la diferencia de alturas y la distancia es mayor (LINDEN and VAN DOREN, 1986). Los parámetros a y b se calculan mediante análisis de regresión y a partir de ellos se definen los índices diferencia límite (LD) y pendiente límite (LS) como:

$$LD = \frac{1}{a} \quad \text{y} \quad LS = \frac{1}{b} \quad (4)$$

LD proporciona información acerca de las características del microrrelieve a grandes distancias, y a medida que ésta aumenta, su valor es similar a la desviación típica de

los valores de altura. Por su parte, LS caracteriza la rugosidad a cortas distancias, y su valor se aproxima a la relación DZ/DX cuando DX tiende a 0.

BOIFFIN (1984) definió un índice llamado tortuosidad para transectos longitudinales, que viene dado por la expresión:

$$T = \frac{L}{L_0} \quad (5)$$

donde T = tortuosidad

L = longitud del perfil

L_0 = longitud de la proyección horizontal del perfil

Todos estos índices utilizados para la cuantificación de la rugosidad parten del supuesto de que ésta está formada por dos componentes: por un lado, parte de las diferencias de altura entre dos puntos se debe a la topografía y las operaciones de laboreo, que es lo que se denomina rugosidad orientada, y otra parte es debida a los elementos estructurales del suelo, constituyendo lo que se llama rugosidad aleatoria (BERTUZZI *et al.*, 1990). La cuantificación de la rugosidad se hace a partir de la rugosidad aleatoria, por lo que una buena caracterización del microrrelieve deberá partir de una separación adecuada de ambas componentes. El método más usado para este fin es el ajuste lineal por mínimos cuadrados de una línea recta a cada perfil (BERTUZZI *et al.*, 1990).

El objetivo del presente trabajo es comparar dos métodos de filtrado del efecto de la topografía y su influencia en el cálculo de los índices de rugosidad más comunes.

MATERIAL Y MÉTODOS

En el presente trabajo se realizó un total de 137 medidas de rugosidad superficial repartidas en cuatro zonas diferentes (LADO LIÑARES *et al.*, 1998): el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (Abegondo-A Coruña), la explotación agropecuaria El Abelar (Abegondo-A Coruña), la casa grande de Lóngora (Oleiros-A Coruña), y dos parcelas de cultivo situadas en la parroquia de Liñares (Culleredo-A Coruña). El período de estudio comprendió desde marzo de 1997 hasta abril de 1998. Las experiencias se realizaron cubriendo un amplio espectro de condiciones tanto de laboreo y cultivo como de evolución de la superficie del suelo que fueron agrupadas en tres categorías: superfi-

cies cultivadas, superficies de pradera, y superficies sometidas a laboreo primario. Del total de medidas, 62 correspondieron a superficies sometidas a laboreo primario, 17 a superficies de pradera, y 58 se realizaron en superficies de cultivo. El número total de puntos muestreados en cada medida varió entre 702 y 2212 en función del número de perfiles y el número de puntos por perfil empleados.

Para la realización de las medidas se empleó un asperímetro, que permite la toma de un número variable de datos puntuales de altura con una separación de 2 cm a lo largo de un perfil, y que ya fue descrito ampliamente en un trabajo previo (LADO y TABOADA, 1998). Un esquema del asperímetro se puede ver en la figura 1.

El diseño de muestreo consiste en redes bidimensionales formadas por perfiles paralelos separados entre sí por distancias regulares. El número de perfiles que se tomaron en cada medida comenzó siendo de 14 perfiles espaciados por 10 cm, pero posteriormente se amplió a 28 perfiles separados por 5 cm. Las principales características del sistema empleado en el muestreo se pueden observar en la tabla 1.

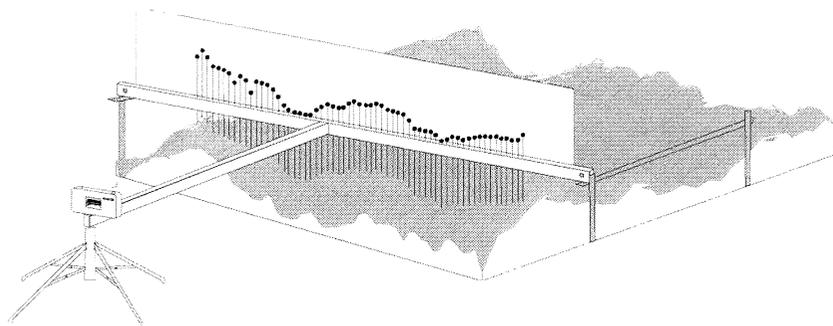


Figura 1. Esquema del asperímetro utilizado en este trabajo.

Para la separación del efecto de la topografía se ajustaron a las superficies originales otras superficies basadas en funciones matemáticas empleando el método de mínimos cuadrados, y se consideró que la rugosidad aleatoria estaba formada por los residuos resultantes de la diferencia entre ambas. En primer lugar se utilizó una superficie lineal para todas las medidas, considerando que el efecto de la topografía era puramente lineal, mediante la expresión:

Lineal:

$$m(x, y) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3xy \tag{6}$$

Sin embargo, la posible existencia de fenómenos de naturaleza local en la evolución del microrrelieve puede provocar que la componente de la topografía no sea puramente lineal, por lo que a continuación se filtró cada superficie original con la expresión matemática que mejor se ajustó en cada caso. Estas superficies empleadas para el filtrado de los datos originales fueron lineales (orden 1), parabólicas (orden 2) o cúbicas (orden 3):

Parabólica:

$$m(x, y) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4y^2 + A_5xy \tag{7}$$

Cúbica:

$$m(x, y) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4y^2 + A_5xy + A_6x^3 + A_7y^3 + A_8x^2y + A_9xy^2 \tag{8}$$

Con los datos residuales, se calcularon los siguientes índices de rugosidad:

- Rugosidad aleatoria (RR), siguiendo el criterio de CURRENCE and LOVELY (1970).
- Pendiente límite (LS) y diferencia límite (LD), propuestos por LINDEN and VAN DOREN (1986).
- Tortuosidad (T) propuesto por BOIFFIN (1984).

Característica	Dimensión o número
Dimensiones de la tabla	207 x 45 cm
Dimensiones de la barra sobre la que se sitúan las agujas	222 x 6 cm
Longitud de las agujas	40,5 cm
Distancia entre agujas	2 cm
Rango de altura máximo caracterizable	34,5 cm
Nº de agujas por perfil	68-76
Distancia mínima entre perfiles	2,5 cm
Distancia máxima entre perfiles	135 cm
Distancia de la cámara a las agujas	222 cm

Tabla 1. Principales características del asperímetro utilizado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran los valores de los índices de rugosidad calculados a partir de los residuos resultantes tras efectuar el filtrado de los datos originales. En primer lugar, se ha ajustado una superficie lineal que represente la pendiente de la parcela y, a continuación, se ha ajustado la función lineal, parabólica o cúbica que proporciona el mejor ajuste.

El tipo de función que mejor se ajustó a las superficies para efectuar el filtrado fue el cúbico, que aparece en 91 ocasiones, seguido del lineal, que aparece en 36 casos, y el parabólico, que tan solo aparece en 10 casos. El hecho de que sea la función de tipo cúbico la que aparece con mayor frecuencia puede estar relacionado con algún factor de evolución del relieve de naturaleza local, y no solo se debe a la pendiente media de la parcela (VIDAL VÁZQUEZ, 1998). Por ello, para asegurar que solamente se considera el efecto de la pendiente, es conveniente realizar el filtrado de los datos originales ajustando a todas las superficies una función lineal, definida por la pendiente media de la superficie experimental.

En la figura 2 se observa un ejemplo con los valores medios de los perfiles de una superficie, y su desviación estándar, a la que se le ha ajustado una superficie lineal y otra cúbica. A continuación se han calculado los residuos resultantes de la diferencia entre los datos originales y la superficie ajustada. En ambos casos, el efecto que provoca el filtrado es un descenso de la variabilidad de los datos, pero este descenso es mayor al filtrar la superficie cúbica que la lineal.

Este ejemplo coincide con la tendencia general de los datos, ya que realizar el filtrado con el mejor ajuste conlleva un descenso en la variabilidad estadística de los residuos en comparación con aquellos obtenidos tras efectuar el filtrado con una superficie lineal, como queda confirmado por los resultados obtenidos con el índice RR, que representa la variabilidad estadística de los datos. En la figura 3 se aprecia que el valor de este índice obtenido tras emplear la superficie que mejor se ajusta en ningún caso es superior al calculado tras utilizar una superficie lineal para el filtrado (los puntos nunca aparecen por encima de la recta 1:1).

En la figura 4 se puede ver el resultado obtenido para el índice diferencia límite. Aunque este índice presenta grandes similitudes con el anterior (BOIFFIN, 1990; LADO LIÑARES *et al.*, 1998), su comportamiento al cambiar el tipo de filtrado es diferente. La dispersión en torno a la recta 1:1 es menor que la que presenta la rugosidad aleatoria. Además, existen superficies en las que el valor del índice es mayor calculado a partir de los

residuos resultantes de filtrar la mejor superficie que a partir de un filtrado lineal, mientras que en la rugosidad aleatoria no era así. Esto en principio no era esperado, ya que este índice indica la magnitud de la rugosidad a grandes distancias, que debe disminuir si disminuye la variabilidad de los datos (como indica el descenso de la rugosidad aleatoria). Este comportamiento puede ser debido a la complejidad del cálculo de este índice, ya que pueden crearse artificios durante el cálculo del semivariograma de primer orden o al realizar el ajuste por mínimos cuadrados de la regresión para obtener el valor de LD.

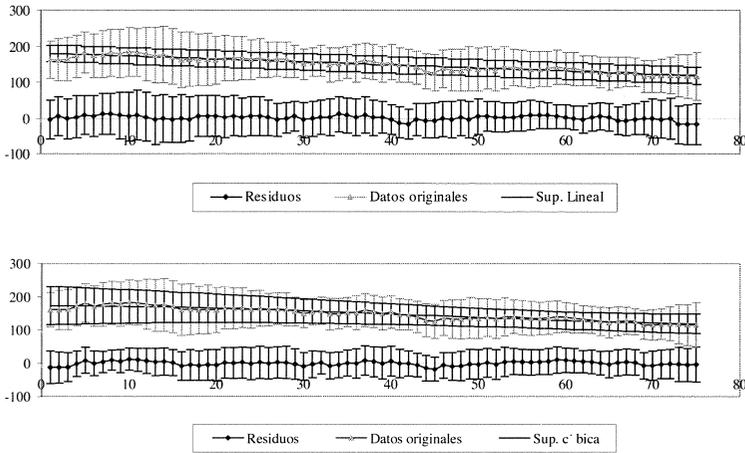


Figura 2. Ejemplo de valores medios de los perfiles de una superficie a la que se ha filtrado una superficie lineal y una cúbica.

	T	LD	LS	RR
Sup. Cultivada	1	0,992	0,985	0,849
Pradera	1	0,978	0,987	0,535
Lab. Primario	1	0,996	0,998	0,979
Total	1	0,998	0,994	0,981

Tabla 2. Coeficientes de correlación de los índices calculados tras el filtrado con una superficie lineal y con el mejor ajuste.

En el caso del índice pendiente límite (fig. 5), la utilización del mejor ajuste tampoco supone un cambio demasiado acentuado en su valor. Los puntos aparecen agrupados en torno a la recta 1:1, siendo poco significativa la dispersión. El tratamiento que muestra las mayores diferencias entre índices es el cultivo. En este caso, como ocurre con la diferencia límite, algunas superficies presentan valores más altos al filtrar la pendiente y otras al filtrar la función que mejor se ajusta. Como en el caso anterior, este comportamiento puede deberse a la introducción de artificios durante el cálculo.

La tortuosidad es el índice que sufre menores variaciones al cambiar el filtrado de los datos, como puede observarse en la figura 3. Los puntos aparecen sobre la recta 1:1, lo que indica que su valor no varía al utilizar uno u otro procedimiento de filtrado.

En la tabla 2 se pueden ver los coeficientes de correlación de los índices calculados tras los dos tipos de filtrado. Las mejores correlaciones las presenta la tortuosidad (1 en todos los tipos de superficie), lo que viene a confirmar su baja sensibilidad al cambio en el tipo de superficie empleada en el filtrado.

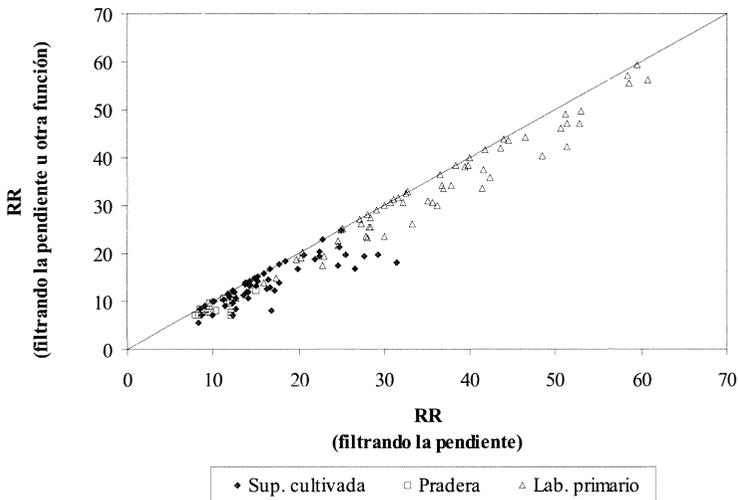


Figura 3. Relación entre la rugosidad aleatoria (en mm) calculada a partir de los residuos ajustando una superficie lineal y ajustando la mejor superficie.

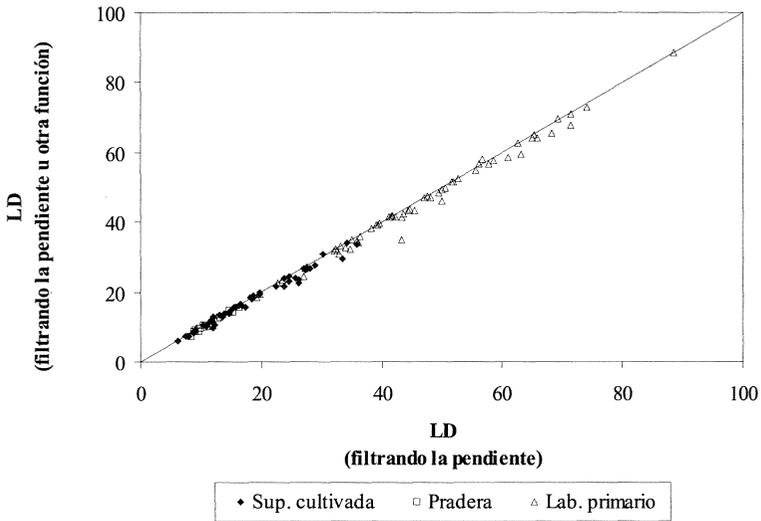


Figura 4. Relación entre la diferencia límite (en mm) calculada a partir de los residuos ajustando una superficie lineal y ajustando la mejor superficie.

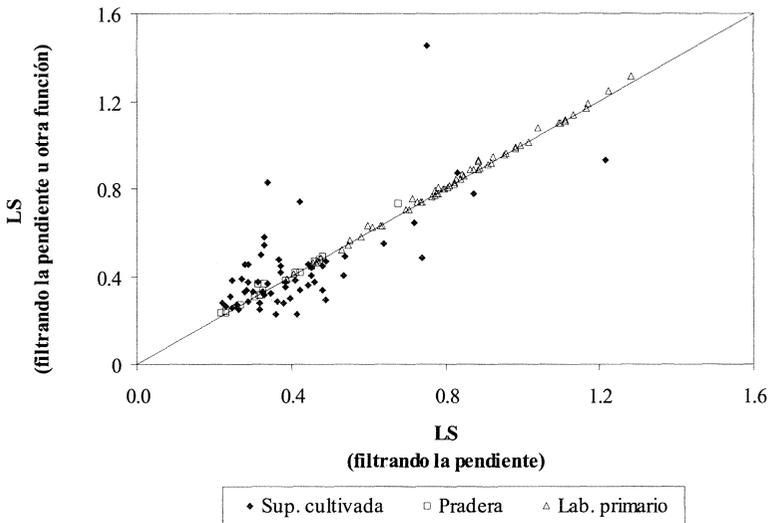


Figura 5. Relación entre la pendiente límite calculada a partir de los residuos ajustando una superficie lineal y ajustando la mejor superficie.

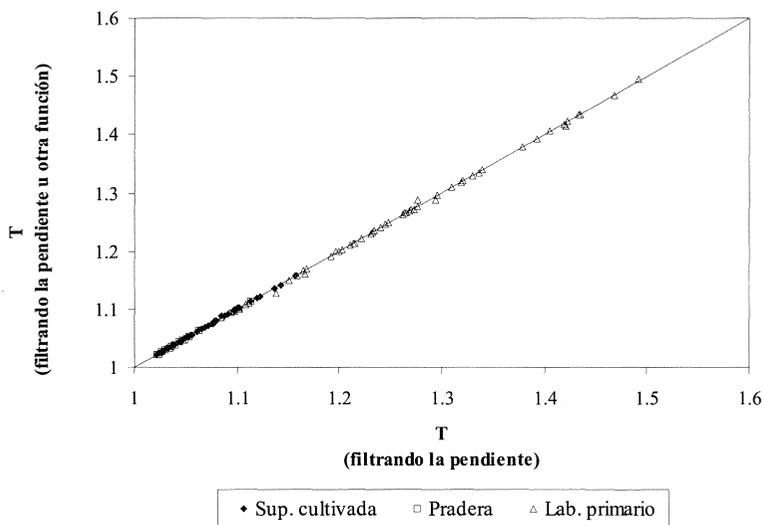


Figura 6. Relación entre la tortuosidad calculada a partir de los residuos ajustando una superficie lineal y ajustando la mejor superficie.

LD y LS presentan buenas correlaciones, mientras que RR es el índice que muestra una mayor sensibilidad al cambio en el método de filtrado empleado. La dispersión que se observa en la figura 3 se confirma con los bajos coeficientes de correlación obtenidos, sobre todo en superficies de cultivo y pradera y especialmente en estas últimas (0,535).

		T	LD	LS	RR
Sup. Cultivada	Media	0,00	3,06	-3,26	13,70
	Std.	0,08	4,69	6,21	13,53
Pradera	Media	0,01	3,96	-3,59	14,91
	Std.	0,02	4,45	4,53	10,80
Lab. Primario	Media	0,03	2,13	-1,10	7,29
	Std.	0,19	3,13	1,53	6,76

Tabla 3. Media y desviación estándar de los porcentajes de las diferencias en el valor de los índices respecto a su valor tras filtrar una superficie lineal.

En la tabla 3 se observa la media y la desviación típica de las diferencias entre los valores de cada índice calculado por ambos métodos. Estas diferencias se expresan como porcentaje con respecto al valor obtenido tras realizar el filtrado con una superficie lineal. Los resultados muestran que todos los índices muestran una tendencia media al descenso de su valor al emplear el mejor ajuste, excepto LS, cuya tendencia media es el aumento de su valor. La rugosidad aleatoria, RR, sufre diferencias muy importantes en su valor al cambiar el método de filtrado, llegando a ser las diferencias medias del 14,91% en el caso de superficies de pradera y 13,70% en superficies cultivadas. La tortuosidad muestra unas diferencias muy pequeñas en todos los tipos de superficie muestreadas (0% en superficies cultivadas, 0,01% en superficies de pradera y 0,03% en superficies sometidas a laboreo primario), por lo que se demuestra que su valor no se ve afectado por cambios en el filtrado utilizado. La diferencia límite y la pendiente límite sufren variaciones pequeñas, no superiores al 4%, de lo que se deduce que son índices bastante estables frente al cambio en el tipo de filtrado.

CONCLUSIONES

El filtrado utilizando las superficies que proporcionan un mejor ajuste provoca un mayor descenso de la variabilidad estadística de los datos de altura que el ajuste de superficies lineales, como demuestran los menores valores de RR.

Sin embargo, la gran variabilidad que existe entre las superficies de orden mayor que 1 impide la generalización del tipo de superficie a emplear, e incluso puede generar artificios en el cálculo de algunos índices, como LD y LS. Por ello, para realizar un estudio de un gran número de superficies en distintos estados y poder comparar los resultados de estos índices es recomendable la utilización de superficies lineales para el filtrado, ya que son mucho más homogéneas.

La tortuosidad presenta la mejor correlación entre los valores calculados por los dos métodos, y las diferencias al emplear uno u otro método de filtrado son poco importantes.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo fue financiado por la Unión Europea, proyecto FAIR 1-CT95-0458.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLMARAS, R. R., BRUWELL, R. E., LARSON, W. E. and HOLT, R. F. (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conserv. Res. Rep.*, 7. 22 pp.
- BERTUZZI, P., RAUWS, G. and COURAULT, D. (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil Tillage Res.*, 17: 89 - 99.
- BERTUZZI, P., GARCÍA-SÁNCHEZ, L., CHADOEUF, J., GUERIF, J., GOULARD, M. and MONESTIEZ, P. (1995). Modelling surface roughness by a Boolean approach. *European J. of Soil Sci.*, 46: 215 - 220.
- BOIFFIN, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse docteur-ingénieur, Paris INA-PG. 320 pp. + annexes.
- CURRENCE, H. D. and LOVELY, W. G. (1970). The analysis of soil surface roughness. *Trans. ASAE*, 13: 710 - 714.
- DEXTER, A. R. (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *J. of Terramech.*, 14 (1): 11 - 22.
- HELMING, K., JESCHKE, W. and STORL, J. (1992). Surface reconstruction and change detection for agricultural purposes by close range photogrammetry. *Int. Arch. of Phot. and Rem. Sens.*, 29 (B5): 610-617.
- KUIPERS, H., (1957). A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agric. Sci.*, 5: 255 - 262.
- LADO LIÑARES, M., TABOADA CASTRO, M^a M. y DIÉGUEZ VILLAR, A. (1998). Relación entre índices de rugosidad: tortuosidad, pendiente límite, distancia límite y rugosidad aleatoria. *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, 23: 151 - 164.
- LADO LIÑARES, M. y TABOADA CASTRO, M^a M. (1998). Medida de la rugosidad del suelo en terrenos de cultivo. En: *V Reunión Nacional de Geomorfología, editado por Gómez Ortiz, A. y Salvador Franch, F.* Barcelona. 731-734.
- LERSCH, G. A., WHISLER, F. D. and RÖMKENS, M. J. M. (1987). Soil surface roughness as influenced by selected soil physical properties. *Soil Tillage Res.*, 10: 197-212.
- LINDEN, D. R. and Van DOREN J., D. M. (1986). Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1550 - 1565.

- MITCHELL, J. K. and JONES Jr., B. A., (1976). Micro-relief surface depression storage: analysis of models to describe the depth-storage function. *AWRA Water Resources Bull.*, 12: 1205 - 1222.
- MOORE, I. D. and LARSON C. L. (1979). Estimating micro-relief surface storage from point data. *Trans. ASAE*, 10478: 1073 - 1077.
- PAZ GONZALEZ, A. y TABOADA CASTRO, M. T. (1996). Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. En: *IV Reunión de Geomorfología*, editado por Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J. Sociedad Española de Geomorfología. O Castro (La Coruña). 829 - 841.
- RÖMKENS, M. J. M. and WANG, J. Y. (1986). The effect of tillage on surface roughness. *Trans. ASAE*, 29: 429 - 433.
- RÖMKENS, M. J. M. and WANG, J. Y. (1987). Soil roughness changes from rainfall. *Trans. ASAE*, 30: 101 - 107.
- VIDAL VÁZQUEZ, E. (1998). *Análisis del microrrelieve y la retención temporal de agua en suelos de pradera*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. A Coruña. 94 pp.
- VIVAS MIRANDA, J. G., y PAZ GONZÁLEZ, A. (1998). Influencia de las características iniciales de la superficie y la precipitación en la dimensión fractal del microrrelieve del suelo. *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, 23: 121 - 136.