

Índices de rugosidad y estimación del almacenamiento temporal de agua en un terreno de cultivo

Roughness indices and estimation of temporal depressional storage in a cropped land

VIDAL VÁZQUEZ, E. y TABOADA CASTRO, M^a. M.

ABSTRACT

Soil surface roughness is considered an important parameter which affects hydraulic properties of the soil surface. The evaluation of maximum water depressional storage (MDS), i.e. the absolute volume of water which can be stored at a rough surface before water runoff starts, will improve the results of overland flow modelling at a catchment scale. An amount of 25 roughness measurements in a cropped land were measured from December 1998 to May 1999 after mouldboard plough. A pinmeter was used for elevation measurements using a 2 cm x 2 cm grid on ca. 1.80 m² plots. Four roughness indices: random roughness, limiting elevation, limiting slope and tortuosity were calculated. Subsequently the temporary water retention was estimated. MDS showed a great variability ranging from 1.76 l/m² to 20.36 l/m².

Key words: microrelief, pinmeter, roughness indices, depressional storage.

VIDAL VÁZQUEZ, E. y TABOADA CASTRO, M^a. M. Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira, 15071, A Coruña.

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo debida al impacto del agua de lluvia es un problema agrícola y ecológico ya que parte de los suelos fértiles se pueden perder por escorrentía llevándose consigo tanto nutrientes como pesticidas. Para poder determinar las causas de la erosión es esencial un conocimiento detallado de los procesos erosivos.

El microrrelieve del suelo juega un importante papel en la formación de la configuración de la superficie. Se han llevado a cabo muchos estudios para analizar la influencia del microrrelieve en la erosión y se ha demostrado que la rugosidad superficial es una característica importante del suelo que afecta a las propiedades hidrológicas del mismo. De acuerdo con DEXTER (1977), el microrrelieve de la superficie del suelo permite caracterizar adecuadamente la estructura de la misma, siendo además un factor importante en relación con la erosión hídrica, debido a la formación de microdepresiones en las que se acumula temporalmente el agua de lluvia. Otros estudios más recientes han demostrado la existencia de relación entre la rugosidad superficial y la infiltración de agua en el suelo (HELMING *et al.*, 1992). Por lo tanto, la capacidad de almacenamiento temporal de agua es un parámetro que puede ser utilizado en conservación de suelos. Esto es debido al hecho de que una superficie rugosa presenta una alta capacidad de retención de agua lo que origina un incremento en la infiltración y una reducción de la escorrentía y de la erosión hídrica. Además mediante el estudio del volumen máximo de agua que puede ser alma-

cenado antes del inicio de la escorrentía podemos obtener resultados acerca de la modelización del flujo superficial a escala de cuenca.

El almacenamiento de agua en la superficie del suelo se tiene en cuenta en diversos modelos de erosión como LISEM (DE ROO *et al.*, 1996) o EUROSEM (MORGAN *et al.*, 1993). Es difícil cuantificar la erosión que produce el agua en el suelo por lo que suele ser estimada a partir de diversos índices de rugosidad. De ellos los más utilizados son la rugosidad aleatoria, RR (ALLMARAS *et al.*, 1966 y CURRENCE y LOVELY, 1970), diferencia límite, LD (LINDEN y VAN DOREN, 1986), pendiente límite, LS (LINDEN y VAN DOREN, 1986) y tortuosidad, T (BOIFFIN, 1984).

Para estimar el almacenamiento máximo de agua en las microdepresiones se usó un Sistema de Información Geográfica llamado PCRaster (VAN DEURSEN y WESSELING, 1992) ligeramente modificado.

Los objetivos de este trabajo son, por una parte la presentación de los resultados de los índices de rugosidad obtenidos en una secuencia de evolución de la superficie y por otra la estimación del almacenamiento máximo de agua en las microdepresiones del suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

En el presente estudio se realizaron un total de 25 medidas de rugosidad superficial en una parcela de cultivo situada en la parroquia de Liñares (Culleredo – A Coruña). El período de toma de datos en el

campo comprendió desde diciembre de 1998 hasta mayo de 1999, previo al sembrado de maíz. Las medidas se realizaron cubriendo diversas condiciones de evolución de la superficie del suelo. Estos datos se tomaron utilizando un asperímetro o rugosímetro de agujas que nos permite obtener datos puntuales de altura a lo largo de un perfil con una separación de 2 cm (LADO LIÑARES y TABOADA CASTRO, 1998). De esta forma se obtienen redes de muestreo bidimensionales formadas por perfiles paralelos separados entre sí por distancias regulares. En este caso la red de muestreo utilizada fue de 134 cm x 134 cm con un paso de medida de 2 cm x 2 cm. En cada medida se registraron 68 perfiles con 68 puntos por lo que el número total de puntos por medida fue 4624. Cabe señalar que las medidas se realizaron tomando todos los perfiles paralelos a la dirección del laboreo.

Previo al cálculo de los índices se filtró la tendencia de los datos separando las componentes orientada (debida al laboreo y la pendiente) y aleatoria (relativa a la distribución de los agregados) de la rugosidad. Para obtener la rugosidad aleatoria se realizó el filtrado de los datos usando tres tipos distintos de retirada de tendencia: eligiendo una superficie lineal, usando el método propuesto por CURRENCE y LOVELY (1970) y finalmente usando el método propuesto por RÖMKENS y WANG (1986).

Los índices de rugosidad calculados fueron los siguientes:

Rugosidad aleatoria, RR (ALLMARAS *et al.*, 1966 y CURRENCE y LOVELY,

1970), fue calculada como la desviación estándar de los datos de altura

$$RR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n}}$$

donde: z_i = altura en cada punto.
 \bar{z} = media de las alturas.
 n = número de puntos.

Diferencia límite (LD) y pendiente límite (LS) (LINDEN y VAN DOREN, 1986). Estos dos índices se basan en el cálculo del semivariograma de primer orden de los datos de altura

$$\Delta Z_h = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - Z_{i+h}|}{n}$$

donde:
 Z_i = altura en cada punto.
 Z_{i+b} = altura en un punto situado a una distancia b de Z_i .
 n = número de datos.

El semivariograma de primer orden es el gráfico de ΔZ_b en función de b . Puede ser aproximado por un modelo lineal, definido por:

$$\frac{1}{\Delta Z_h} = a + b \frac{1}{h}$$

donde a y b son parámetros que se calculan mediante análisis de regresión. A partir de ellos se definen los índices diferencia límite, LD y pendiente límite, LS como

$$LD = 1/a \text{ y } LS = 1/b$$

LD proporciona información sobre las características del microrrelieve a grandes distancias. Por su parte LS se usa para caracterizar la rugosidad a distancias cortas. Estos índices proporcionan información sobre la organización espacial del microrrelieve, poseen sentido físico y buena sensibilidad a variaciones en la rugosidad.

Índice de tortuosidad, T: se ha empleado el índice propuesto por BOIFFIN (1984). Se define como

$$T = \frac{L_1}{L_0}$$

donde L_1 = longitud del perfil.

L_0 = longitud de la proyección horizontal del perfil.

Una vez calculados los índices de rugosidad se creó un modelo de elevación digital (MED) de cada superficie medida. Posteriormente se estimó el almacenamiento máximo de agua en el suelo usando un algoritmo incluido en el PCRaster (VAN DEURSEN y WESSELING, 1992) llamado LDDOUT. Esta opción crea una red de drenaje hacia el exterior en el modelo de elevación digital. Su inconveniente es que, de este modo, las microdepressiones situadas en el borde permanecen totalmente vacías. Para solucionar este problema diversos autores entre los que se encuentran KAMPHORST *et al.* (1999) sugieren una solución basada en el hecho de que el microrrelieve medido experi-

mentalmente presenta una continuidad que puede ser descrita como una imagen especular de sí mismo. El MED obtenido experimentalmente es copiado ocho veces como su imagen en el espejo. A continuación la opción LDDOUT rellena las depresiones del nuevo MED que es nueve veces mayor que la superficie experimental. De este modo se rellenan todas las microdepressiones del MED original. Posteriormente prescindiendo de las ocho imágenes especulares copiadas y trabajando con la imagen situada en la posición central, se obtiene el almacenamiento máximo restando la superficie original a la superficie total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se pueden observar los resultados estadísticos de los cuatro índices de rugosidad calculados.

LD es el índice que presenta un rango mayor con todos los tipos de retirada de tendencia, seguido de RR, LS y T.

En lo referente a los valores medios hay que destacar que el índice LD posee la media más elevada cuando se efectúa la retirada de tendencia con cualquiera de los métodos usados y su valor es menor que el de RR en el caso de los datos originales.

Por lo que respecta a los distintos tipos de retirada de tendencia se aprecia que estos proporcionan resultados homogéneos para todos los índices: así el mayor valor de cada índice se obtiene con los datos originales, seguido de los datos una vez retirada la tendencia lineal, posteriormente usando el método de CURRENCE y LOVELY (1970) y finalmente el de RÖMKENS y WANG (1986). Estos dos últimos méto-

dos varían su comportamiento en el caso de LS y T donde se obtiene un mayor valor de estos índices con el método propuesto por CURRENCE y LOVELY.

Los coeficientes de variación muestran que todos los índices presentan una

variabilidad que se puede considerar de tipo medio (12.28% - 28.48%) excepto la totuosidad, T que posee un coeficiente de variación bajo (en torno al 4%). LD es el índice que presenta mayor variabilidad seguido de RR, LS y T.

		MEDIA	STD	CV (%)	RANGO	MÍN	MÁX
RR (mm)	Originales	51.83	6.37	12.28	28.89	33.88	62.77
	Sólo pendiente	33.82	6.92	20.46	28.99	21.99	50.99
	Currence	24.40	6.71	27.48	29.28	9.27	38.55
	Römkens	24.29	6.04	24.85	27.88	9.28	37.16
LD (mm)	Originales	43.24	8.71	20.15	38.29	28.04	66.33
	Sólo pendiente	39.68	9.36	23.59	39.59	24.06	63.65
	Currence	32.43	9.23	28.48	44.84	10.67	55.51
	Römkens	31.47	8.51	27.03	40.34	10.66	51.00
LS	Originales	0.75	0.15	19.77	0.52	0.51	1.03
	Sólo pendiente	0.77	0.14	18.70	0.51	0.53	1.03
	Currence	0.68	0.13	18.50	0.48	0.50	0.98
	Römkens	0.76	0.12	15.55	0.42	0.56	0.98
T	Originales	1.21	0.05	4.11	0.16	1.12	1.28
	Sólo pendiente	1.21	0.05	4.17	0.16	1.12	1.28
	Currence	1.16	0.05	4.40	0.19	1.07	1.26
	Römkens	1.19	0.06	4.81	0.22	1.06	1.28

Tabla 1. Datos estadísticos de los índices de rugosidad calculados.

Los coeficientes de correlación entre los distintos índices calculados para dos tipos de retirada de tendencia (según CURREN-

CE y LOVELY y según RÖMKENS y WANG) se muestran en la tabla 2.

CURRENCE	RR	LD	LS	T
RR	1			
LD	0.97	1		
LS	0.54	0.49	1	
T	0.83	0.82	0.89	1

RÖMKENS	RR	LD	LS	T
RR	1			
LD	0.97	1		
LS	0.39	0.38	1	
T	0.82	0.85	0.68	1

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre los índices de rugosidad para dos tipos de retirada de tendencia: según CURRENCE y LOVELY (1970) y según RÖMKENS y WANG (1986).

De acuerdo con los resultados de la tabla 2 se aprecia que existe una correlación significativa entre todos los índices de rugosidad para $p < 0,05$. La mejor correlación se presenta entre rugosidad aleatoria, RR y diferencia límite, LD ya que poseen un coeficiente de correlación elevado ($R^2 = 0,97$) para los dos tipos de retirada de tendencia. El resultado obtenido coincide con el encontrado por otros autores (BERTUZZI *et al.*, 1990, LADO LIÑARES *et al.*, 1998). Esto puede deber-

se al hecho de que ambos índices caracterizan el microrrelieve a grandes distancias (LINDEN y VAN DOREN, 1986). También existe una fuerte correlación entre pendiente límite, LS y tortuosidad, T ($R^2 = 0,89$ retirando la tendencia según CURRENCE y $R^2 = 0,68$ al retirarla según RÖMKENS). De nuevo puede asociarse este hecho a la existencia de ciertas similitudes entre ambos índices (BERTUZZI *et al.*, 1990).

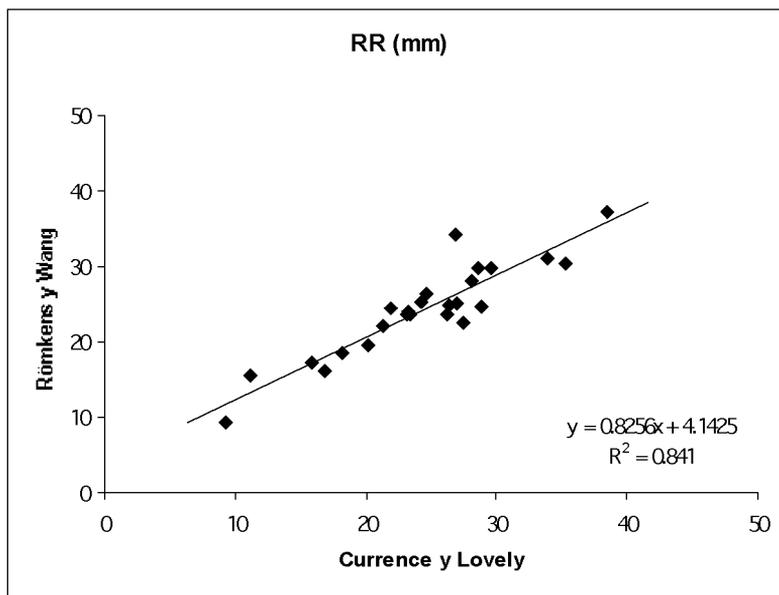


Figura 1. Relación entre la rugosidad aleatoria calculada una vez retirada la tendencia según Currence y Lovely y la calculada después de retirar la tendencia según Römken y Wang.

La figura 1 muestra la relación existente entre la rugosidad aleatoria, RR calculada después de retirar la tendencia según CURRENCE y la calculada una vez retirada la tendencia según RÖMKENS. Se puede observar que existe una gran correla-

ción entre ambos tipos de retirada de tendencia ($R^2 = 0,84$, para $p < 0,05$). Este hecho también aparece reflejado en la tabla 1 donde se aprecian valores medios similares de RR para los dos tipos de retirada de tendencia (24.4 mm retirando la tendencia

según CURRENCE y 24.29 mm al hacerlo según RÖMKENS). También se aprecian valores próximos en el rango (29.28 y

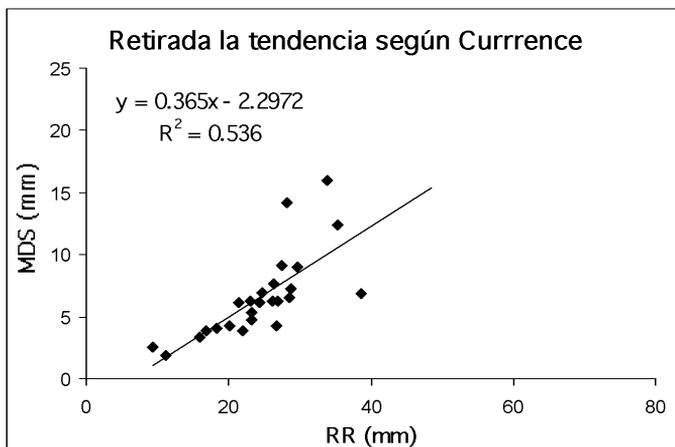
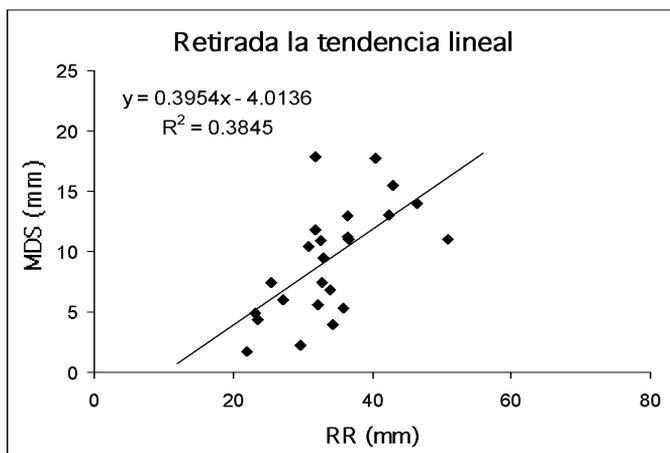
27.88), desviación típica (6.71 y 6.04) y en el coeficiente de variación (27.48 y 24.85).

	ORIGINALES	TEND. LINEAL	CURRENCE	RÖMKENS
nombre	2cm x 2 cm	2cm x 2 cm	2 cm x 2 cm	2 cm x 2 cm
L1712A._MP	6.73	7.50	1.92	2.19
L1712B._MP	1.77	1.76	2.54	2.52
L2112A._MP	10.24	10.99	6.80	13.93
L2112B._MP	9.22	13.96	15.98	10.50
L2212A._MP	6.47	6.88	7.24	5.60
L81A._MP	10.47	15.47	9.15	5.59
L111A._MP	8.30	17.90	6.99	6.31
L111B._MP	10.88	17.79	12.39	6.08
L121A._MP	6.43	9.45	7.61	5.72
L121B._MP	6.17	11.84	5.40	7.25
L201A._MP	8.72	11.23	6.50	6.19
L201B._MP	9.49	12.94	6.30	7.93
L211A._MP	13.50	10.96	4.73	5.73
L211B._MP	20.36	13.01	4.30	7.38
L251A._MP	6.95	5.34	3.83	3.78
L281A._MP	3.26	5.99	3.38	4.07
L23A._MP	6.81	7.46	6.16	8.65
L23B._MP	5.57	5.66	4.27	5.98
L233A._MP	5.44	2.22	6.11	6.63
L233B._MP	1.92	4.88	3.91	4.47
L74A._MP	7.90	3.94	6.24	6.50
L94A._MP	4.59	4.43	4.02	5.87
L245A._MP	9.01	10.92	14.14	6.70
L245B._MP	11.44	11.06	9.05	8.99
L245C._MP	6.54	10.44	6.26	8.30
Media	7.93	9.36	6.61	6.52
Desv. Estándar	3.78	4.41	3.34	2.40
Coef. Var. (%)	47.62	47.14	50.58	36.88
Rango	18.60	16.13	14.06	11.74
Mínimo	1.77	1.76	1.92	2.19
Máximo	20.36	17.90	15.98	13.93

Tabla 3. Valores del almacenamiento máximo en microdepresiones (l/m^2) en las superficies objeto de estudio.

En la tabla 3 se muestran los valores del volumen estimado máximo de agua (MDS) en l/m^2 que puede ser retenido en las microdepressiones de las superficies estudiadas. Se aprecia que la retirada de tendencia lineal proporciona el mayor valor de MDS con una media de $9.36 l/m^2$, mientras que los datos originales proporcionan un valor ligeramente inferior de MDS ($7.93 l/m^2$) lo que se debe de atribuir al

efecto de la pendiente que disminuye el volumen de agua almacenada en las microdepressiones. Por otra parte, los valores de retención obtenidos después de retirar la tendencia según CURRENCE y luego de hacerlo según RÖMKENS proporcionan los valores más bajos de MDS y además son bastante similares ($6.61 l/m^2$ retirando la tendencia según CURRENCE y $6.52 l/m^2$ retirando la tendencia según RÖMKENS).



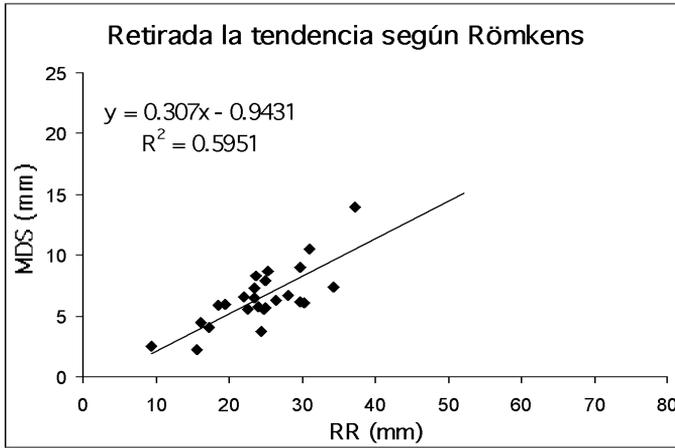


Figura 2. Comparación entre la rugosidad aleatoria, RR y el almacenamiento en microdepresiones, MDS con los datos una vez retirada la tendencia según los tres métodos utilizados.

Se comparó la rugosidad aleatoria, RR con el almacenamiento en microdepresiones, MDS (figura 2). En los gráficos podemos apreciar la existencia de una correlación de tipo positivo entre RR y MDS. Se observa que al retirar la tendencia lineal obtenemos un valor de R^2 igual a 0.38; retirando la tendencia según CURRENCE se observa una menor dispersión de los datos ($R^2 = 0.53$) y retirando la tendencia según RÖMKENS se obtiene la mayor correlación ($R^2 = 0.59$).

CONCLUSIONES

La rugosidad aleatoria de una superficie agrícola que evolucionó bajo la lluvia después de un tratamiento con arado de vertedera osciló entre 9.28 mm y 37.16 mm para los datos una vez retirada la tendencia según RÖMKENS y entre 9.27 mm y 38.55 mm después de retirar la tendencia según CURRENCE. Con ambos tipos de retirada de tendencia se obtienen valores similares de RR.

Algo parecido sucedió con LD, sin embargo la amplitud de variación es ligeramente mayor que con RR por lo que parece un índice más sensible para caracterizar el microrrelieve.

Se pudo comprobar que existe una correlación importante entre todos los índices especialmente entre RR y LD ($R^2 = 0.97$) por un lado y entre LS y T por otro ($R^2 = 0.89$ para los datos con retirada de tendencia según CURRENCE y $R^2 = 0.68$ cuando se retira la tendencia según RÖMKENS). Los índices LS y T se consideran menos sensibles para describir la amplia gama de variabilidad temporal y espacial.

La retención de agua en microdepresiones osciló entre 1.76 l/m² y 20.36 l/m² y presentó una correlación positiva con la rugosidad aleatoria, RR.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Proyecto de la Unión Europea FAIR1/CT95/0458.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; LARSON, W.E. and HOLT, R.F., (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conservation Research Report 7: 1-14*.
- BERTUZZI, P.; RAUWS, G. and COURAULT, D., (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 17: 8-99.
- BOIFFIN, J., (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse docteur-ingénieur, Paris INA-PG. 320 pp.
- CURRENCE, H.D. and LOVELY, W.G., (1970). The analysis of soil surface roughness. *Transactions of the of the American Society of Agricultural Engineering*. pp. 710-714.
- DE ROO, A.P.J.; WESSELING, C.G.; and RITSEMA, C.J., (1996). LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological Processes* 10: 1107-1117.
- DEXTER, A.R., (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *Journal of Terramechanics*, 1977, Vol. 14, nº1, pp. 11-22.
- HELMING, K.; JESCHKE, W. and STORL, J., (1992). Surface reconstruction and change detection for agricultural purposes by close range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 29 (B5): 610-617.
- KAMPHORST, E.C.; JETTEN, V.; GUÉRIE, J.; PITKÄNEN, B.V.; IVERSEN, J.T. and PAZ, A., (1999). How to predict maximum water storage in depressions from soils roughness measurements. (*In prence*).
- LADO LIÑARES, M. y TABOADA CASTRO, M^a.M., (1998). Medida de la rugosidad del suelo en terrenos de cultivo. V *Reunión Nacional de Geomorfología*. Eds. Gómez Ortiz, A. y Salvador Franch F. Barcelona. pp.: 731-734.
- LADO LIÑARES, M.; TABOADA CASTRO, M^a.M. and DIEGUEZ VILLAR, A., (1998). Relación entre índices de rugosidad: tortuosidad, pendiente límite, distancia límite y rugosidad aleatoria. *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe. A Coruña*. 1998. Vol. 23, pp. 151-164.
- LINDEN, D.R. and Van DOREN Jr.D.M., (1986). Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Science of America Journal*, 50: 1560-1565.
- MORGAN, R.P.C.; QUINTON, J.N. and RICKSON, R.J., (1993). EUROSEM: A User Guide. *Silsoe College*. 84 pp.
- ONSTAD, C.A., (1984). Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 27: 729-732.
- RÖMKENS, M.J.M. and WANG, J.Y., (1986). Effect of tillage on surface roughness. *American Society of Agricultural Engineering*, Vol. 29, pp.429-433.
- VAN DEURSEN, W.P. and WESSELING, C.G., (1992). PC-Raster hand-leiding. *Department of Physical Geography. University of Utrecht*. 313 pp.
- VIDAL VÁZQUEZ, E. (1998). Análisis del microrrelieve y la retención temporal de agua en suelos de pradera. *Memoria de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña*. 94 pp.
- WAGNER, L.E. and YIMING YU. (1991). Digitization of profile meter photographs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*. 34: 412-416.