

Descripción de la evolución del microrrelieve en función de la precipitación acumulativa mediante cuatro índices

Description of micro relief evolution as a function of cumulative rainfall using four indices

VIDAL VÁZQUEZ, E.¹; PAZ GONZÁLEZ, A.² & MARIA, I.C.DE³

Abstract

Soil surface microtopography data sets were obtained for six different tillage practices, three primary treatments (moldboard plow, harrow, chisel plow) and three additional treatments consisting of two successive tillage operation (moldboard plow + disk, harrow + disk, chisel plow + disk). The study was conducted in Campinas (São Paulo, Brazil) on a bare soil, classified as Rhodic Ferralsol, (FAO). After initial characterization of soil surface roughness, soil microrelief was measured in three additional dates with increasing quantities of natural rain. On each study date two replicated plots were selected for each tillage practice and measurement date given a total of 48 data sets. Regression equations of four different roughness indices (RR= random roughness, LD= limiting difference, LS= limiting slope and T= tortuosity) versus cumulative rainfall were calculated, using lineal, quadratic and exponential functions. Irrespective of the used roughness index, a steep decrease of soil microrelief during the first stages of soil surface evolution was observed. In most of the tillage treatments RR and LD showed highest correlation coefficients with cumulative rainfall, but this rule could not be generalized. Also, the best fitted algorithm, lineal, quadratic or exponential depended on the treatment. In most of the study cases correlation coefficients were higher when using the square root of the cumulative rainfall than simple the cumulative rainfall. The microrelief decay by the action of cumulative rainfall was more important in the group of 24 treatments with primary tillage than in the remaining 24 treatments with two successive tillage operations.

Key words: microrelief, roughness indices, accumulative rainfall.

(1) Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidade de Santiago de C ompostela. Campus Universitario s/n. 27002 Lugo.

(2) Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. Campus de A Zapateira s/n. 15071 A Coruña.

(3) Centro de Solos e Recursos Agroambientais. Instituto Agronómico de Campinas. Av. Barão de Itapura 1481, Caixa Postal 28,13001-970 Campinas-SP, Brasil.

INTRODUCCIÓN

Las labores agrícolas previas a la siembra de un cultivo modifican las características del suelo, afectando a algunas propiedades físicas del mismo como la capacidad de infiltración, resistencia mecánica, porosidad y rugosidad superficial. Además, el laboreo del suelo proporciona un adecuado lecho de siembra, facilita el crecimiento de las plantas y ayuda a controlar las malas hierbas.

El microrrelieve de la superficie del suelo está sometido a cambios bruscos originados por las operaciones agrícolas, en particular por el laboreo primario, de modo que siempre que se pasa un apero se modifican las condiciones de rugosidad; además, las características de la microtopografía están sujetas a una evolución más lenta como consecuencia del desmoronamiento progresivo inducido por la energía cinética de la precipitación. El impacto de las gotas de lluvia erosiona las unidades estructurales, agregados y terrones, y produce fragmentos que se depositan en las depresiones del microrrelieve. Durante la formación de la costra superficial el excedente del agua de lluvia tiende a disminuir la rugosidad ya que provoca la erosión de los agregados y terrones; sin embargo, tras lluvias intensas o prolongadas se produce una incisión en la superficie y se forman surcos que pueden provocar el aumento de la rugosidad.

Los estudios sobre evolución del microrrelieve en función de la precipitación han estado motivados por el interés en llevar a cabo una descripción de la rugosidad de la superficie en términos deterministas que hiciese posible la utilización posterior de la misma en el estudio de los procesos de escorrentía y erosión y en la simulación dinámica de los mismos (VIDAL VÁZQUEZ, 2002).

Por ello, el efecto de la precipitación sobre la microtopografía, en general, ha sido estudiado a partir de experiencias de campo y de laboratorio estableciendo relaciones entre la rugosidad evaluada con diferentes índices y la energía cinética y/o la cantidad acumulativa de la lluvia aplicada a la superficie del suelo (MITCHELL & JONES, 1976, 1978; DEXTER, 1977; COGO *et al.*, 1983; ZOBECK & ONSTAD, 1987; BERTUZZI *et al.*, 1990; HUANG & BRADFORD, 1992; LADO LIÑARES, 1999 y GOVERS *et al.*, 2000).

El objetivo de este trabajo es estudiar la evolu-

ción de cuatro índices de rugosidad en función de la precipitación y evaluar distintos tipos de dependencia a partir de ajustes de tipo lineal, exponencial y cuadrático.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este trabajo se efectuaron un total de 48 medidas de rugosidad superficial en una parcela de cultivo situada en el Núcleo Experimental del Instituto Agronómico de Campinas - São Paulo, Brasil. El suelo está desarrollado sobre materiales de naturaleza basáltica y de textura arcillosa y se incluye dentro del grupo de los ferralsoles de acuerdo con la clasificación de la FAO. El periodo de la toma de datos en el campo comprendió desde septiembre hasta noviembre de 2000 (VIDAL VÁZQUEZ, 2002).

Se crearon, en la parcela experimental, distintos niveles de rugosidad utilizando diferentes aperos. Se efectuaron ocho medidas de rugosidad para cada uno de los seis tipos de laboreo o tratamientos diferentes: grade de disco, arado de disco, arado escarificador, grade de disco + grade niveladora, arado de disco + grade niveladora y arado escarificador + grade niveladora.

En la parcela se llevaron a cabo medidas de rugosidad secuenciales para distintos estadios de degradación con el objetivo de caracterizar la evolución del microrrelieve en función de la precipitación.

Para la obtención de los datos de altura de la superficie del suelo se empleó un rugosímetro de agujas junto con una técnica fotogramétrica que se basa en la mayor o menor distancia existente entre el extremo de cada aguja y una línea de referencia. El registro de los datos se efectuó mediante la toma de fotografías de los sucesivos perfiles y su tratamiento posterior mediante análisis de imagen. La red de muestreo utilizada fue de 135 x 135 cm con 55 perfiles por medida y una separación entre perfiles de 2,5 cm.

Previo al cálculo de los índices de microrrelieve se llevó a cabo una corrección o transformación de los datos originales de altura para eliminar el efecto de la pendiente de la parcela y las marcas del laboreo. Para ello se utilizó un método no determinista (CURRENCE & LOVELY, 1970) que consiste en restar a cada dato puntual de altura el efecto de la

columna y la fila en la que se encuentra según la siguiente expresión:

$$h'_{ij} = h_{ij} - (\bar{h}_{.j} - \bar{h}_{..}) - (\bar{h}_{i.} - \bar{h}_{..}) + (\bar{h}_{..})$$

donde

b'_{ij} = valor corregido del punto perteneciente a la fila i y la columna j

b_{ij} = valor original del punto perteneciente a la fila i y la columna j

$\bar{h}_{.j}$ = media de los valores de todos los puntos de la columna j

$\bar{h}_{i.}$ = media de los valores de todos los puntos de la fila i

$\bar{h}_{..}$ = media de todos los puntos de la superficie

Posteriormente se calcularon los siguientes índices de rugosidad:

Rugosidad aleatoria, RR (ALLMARAS *et al.*, 1966; CURRENCE & LOVELY, 1970). Es el índice de rugosidad más frecuentemente utilizado. Se define como la desviación estándar de los datos de altura de acuerdo con la siguiente expresión:

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

donde

Z_i = altura en cada punto

\bar{Z} = media de las alturas

N = número de puntos

El índice RR describe solamente el rango en la componente vertical de la rugosidad, es decir, la distribución de alturas, pero no proporciona una interpretación en términos físicos de la distribución espacial de las medidas de altura.

Diferencia límite, LD, y pendiente límite, LS, (LINDEN & VAN DOREN, 1986). Estos dos índices parten de una aproximación geoestadística y tienen en cuenta la organización espacial de la rugosidad. Se basan en el cálculo del semivariograma de primer orden de los datos de altura:

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

donde

Z_i = altura medida en cada punto

Z_{i+h} = alturas en puntos adyacentes separados por h

n = número de pares de datos que se comparan entre sí

El semivariograma de primer orden se ajusta a una función hiperbólica de acuerdo con la siguiente expresión:

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

donde

ΔZ_h = diferencia media en valor absoluto de los datos puntuales de altura

ΔX_h = espaciado horizontal entre puntos

$a; b$ = parámetros del ajuste

Los parámetros a y b , calculados mediante análisis de regresión, permiten definir los índices diferencia límite (LD) y pendiente límite (LS) como:

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

Estos índices proporcionan información acerca de la organización espacial del microrrelieve, poseen significado físico y buena sensibilidad a variaciones en la rugosidad.

Índice de tortuosidad, T: se define como la relación entre la longitud real del perfil (L_r) y la longitud de su proyección en el plano horizontal (L_0) (BOIFFIN, 1984). Se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

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

La mayor parte de los estudios de evolución se refieren a la rugosidad aleatoria, RR, siendo menos frecuente el análisis de la degradación del microrrelieve en base a otros índices.

Para relacionar el nivel de rugosidad, evaluado mediante los diferentes índices anteriormente descritos, con la precipitación acumulativa, se usaron técnicas de regresión simple en las que la variable independiente es la precipitación acumulativa o la raíz cuadrada de la misma, y la variable dependiente son los diversos índices de rugosidad calculados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La serie de datos de rugosidad de este trabajo se obtuvo en una sola parcela, lo que permite analizar la evolución de los índices de rugosidad en función de distintos tipos de laboreo para condiciones homogéneas de suelo y precipitación. En cada uno de los seis tipos de laboreo estudiados se midieron cuatro estadios de evolución y durante cada fecha de medida se efectuaron dos repeticiones para cada tratamiento.

En primer lugar cabe destacar la existencia de diferencias en cuando a las características microtopográficas entre las dos superficies medidas en una misma fecha. Esta importante variabilidad entre pares de superficies que representan un mismo estadio de evolución se debe a la heterogeneidad de las características de rugosidad entre las áreas en las que se llevan a cabo las medidas. Por tanto se comprueba que, en general, el laboreo del suelo determina unas condiciones de microrrelieve muy variables a la escala de estudio de este trabajo (1,35 x 1,35 m). Por otra parte hay que destacar que el hecho de utilizar un método destructivo impide efectuar las medidas de rugosidad de los sucesivos estadios evolutivos en la misma posición por lo que las diferencias de microrrelieve entre áreas de medida vecinas se enmascaran, en parte, debido a la variabilidad espacial de la rugosidad.

Como ejemplo de la evolución del microrrelieve, en la figura 1 se representa la evolución de la diferencia límite, LD, en función de la precipitación para diferentes tratamientos. Se comprueba que la cinética de evolución tiende a ser más rápida durante los primeros estadios y cuando se utilizan índices como LS y T se aprecia todavía con más claridad el rápido desmoronamiento del microrrelieve durante

los primeros estadios de evolución. (VIDAL VÁZQUEZ, 2002).

En la tabla 1 se presentan los resultados del análisis de regresión entre índices de rugosidad y precipitación acumulativa. Los cálculos se efectuaron para cuatro índices diferentes, seis tipos de laboreo y dos modelos de ajuste, lineal y exponencial, ambos frente a la precipitación absoluta. Se eligieron estos dos tipos de ajuste por ser los más frecuentemente usados en la bibliografía.

Los resultados de la tabla 1 ponen de manifiesto una amplia gama de valores de los coeficientes de determinación entre los distintos índices y la precipitación. Las diferencias entre los coeficientes de determinación que se presentan en la tabla 1 dependen de cada uno de los índices pero también del tipo de laboreo, apreciándose, en general, un buen paralelismo entre los resultados del ajuste lineal y del ajuste exponencial. Si se parte de ocho datos, la relación entre un índice determinado y la precipitación acumulativa será significativa ($p > 0,95$) para un valor de coeficiente de determinación $r^2 > 0,63$; en consecuencia, muchos de los ajustes de tipo lineal y exponencial que se presentan en la tabla 1 no son significativos ($p > 0,95$).

En general, la rugosidad aleatoria, RR, y la pendiente límite, LD, son los índices que presentan coeficientes de determinación más elevados con la precipitación aunque se aprecian excepciones en algunos tratamientos como se discute posteriormente. Por el contrario, la pendiente límite, LS, es el índice que presenta correlaciones más débiles con la precipitación aunque también se aprecian excepciones en algún tratamiento. La tortuosidad, T, posee una gama de coeficientes de determinación que pueden ser muy diferentes.

Los coeficientes de determinación de la rugosidad aleatoria, RR, que se observan en la tabla 1, son siempre superiores a 0,51 excepto en el caso de laboreo con escarificador en donde el valor de r^2 no supera 0,18; paralelamente, los coeficientes de determinación de LD, superan siempre 0,62 excepto también tras laboreo con escarificador. Por el contrario, los coeficientes de determinación entre la pendiente límite, LS, y la precipitación son inferiores a 0,4 tras laboreo con grade y con escarificador y están comprendidos entre 0,4 y 0,63 tras laboreo con arado y grade + niveladora.

Los cálculos de las rectas de regresión entre

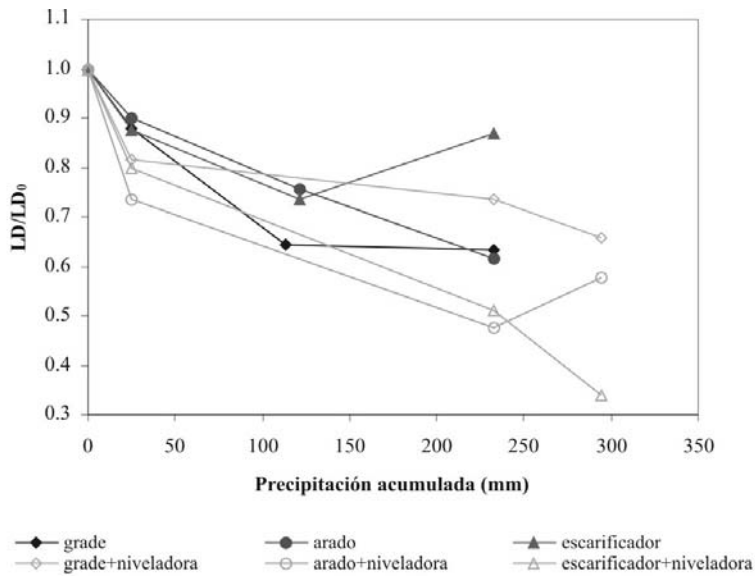


Fig. 1. Evolución del índice diferencia límite (LD) versus precipitación acumulada para seis tipos de laboreo.

valores de los índices RR, LD, LS y T y la precipitación acumulativa se repitieron teniendo en cuenta, esta vez, los datos medios para cada periodo de medida ($n=4$) en lugar de los 8 datos totales obtenidos para cada laboreo. Este segundo análisis de regresión se llevó a cabo para cuatro tipos de ajuste diferentes: lineal, cuadrático, exponencial frente a la precipitación absoluta y exponencial frente a la raíz cuadrada de la precipitación.

Los parámetros calculados por regresión y los coeficientes de determinación para el ajuste lineal y cuadrático se presentan en la tabla 2 y para los ajustes exponenciales (frente a p o frente a la raíz de p) se pueden apreciar en la tabla 3.

En primer lugar, comparando los ajustes lineales y exponenciales de la tabla 1 ($n=8$) con los de las tablas 2 y 3, se comprueba que, como cabe esperar, al tomar datos medios por fechas, en vez de los correspondientes a superficies individuales, los coeficientes de determinación aumentan siempre, si bien la magnitud de dicho incremento puede ser muy variable. Aunque los coeficientes de determinación sean superiores al tomar cuatro datos, hay que tener en cuenta que para determinar los límites de significación interviene tanto el valor absoluto del coeficiente de determinación r^2 como el número de

datos; en este sentido, en general, el nivel de significación de los coeficientes de determinación para distintos tipos de ajuste es inferior si se consideran los datos medios ($n=4$) que los de superficies individuales ($n=8$).

De los resultados presentados en las tablas 2 y 3 se infiere que los tipos de ajuste que presentan mayor precisión son el exponencial frente a la raíz cuadrada de la precipitación y el polinómico de orden 2. En efecto, teniendo en cuenta las 24 rectas de regresión obtenidas para cuatro índices y seis tratamientos diferentes, se pone de manifiesto que los coeficientes de determinación son, en 12 casos, más elevados para el ajuste exponencial en función de , en 11 casos para el ajuste polinómico de orden 2 y sólo en un caso para el ajuste exponencial en función de la precipitación acumulada, p .

En la mayor parte de los tratamientos y tipos de ajuste considerados, los coeficientes de determinación de la rugosidad aleatoria, RR, y la diferencia límite, LD, son más elevados que los obtenidos para los restantes índices; una excepción la constituye el laboreo con escarificador, para el que los ajustes lineal y exponencial presentan coeficientes de determinación débiles para todos los índices; en este caso, al ajustar para RR y LD un polinomio de

Tipo de laboreo	Índice	Ajuste lineal	r ²	Ajuste exponencial	r ²
grade	RR	$y = -0,0272x + 16,188$	0,730	$y = 16,1920e^{-0,0021x}$	0,734
	LD	$y = -0,0295x + 17,966$	0,633	$y = 17,9070e^{-0,0020x}$	0,624
	LS	$y = -0,0003x + 0,088$	0,342	$y = 0,0749e^{-0,0034x}$	0,326
	T	$y = -0,0004x + 1,119$	0,471	$y = 1,1800e^{-0,0004x}$	0,476
arado	RR	$y = -0,0318x + 20,999$	0,782	$y = 20,9490e^{-0,0018x}$	0,801
	LD	$y = -0,0401x + 24,761$	0,884	$y = 24,8670e^{-0,0020x}$	0,903
	LS	$y = -0,0004x + 0,105$	0,444	$y = 0,0917e^{-0,0048x}$	0,568
	T	$y = -0,0007x + 1,186$	0,554	$y = 1,1841e^{-0,0006x}$	0,571
escarificador	RR	$y = -0,0056x + 10,219$	0,172	$y = 10,1250e^{-0,0005x}$	0,164
	LD	$y = -0,0062x + 11,507$	0,136	$y = 11,4600e^{-0,0006x}$	0,156
	LS	$y = -0,0004x + 0,114$	0,297	$y = 0,0836e^{-0,0038x}$	0,250
	T	$y = -0,0002x + 1,081$	0,313	$y = 1,0811e^{-0,0002x}$	0,311
grade + niveladora	RR	$y = -0,0108x + 11,236$	0,612	$y = 11,2250e^{-0,0012x}$	0,594
	LD	$y = -0,0113x + 11,783$	0,660	$y = 11,7280e^{-0,0011x}$	0,690
	LS	$y = -0,0002x + 0,092$	0,433	$y = 0,0761e^{-0,0035x}$	0,507
	T	$y = -0,0002x + 1,071$	0,490	$y = 1,0714e^{-0,0002x}$	0,496
arado + niveladora	RR	$y = -0,0168x + 12,924$	0,519	$y = 12,7060e^{-0,0016x}$	0,533
	LD	$y = -0,0205x + 13,739$	0,674	$y = 13,5680e^{-0,0019x}$	0,682
	LS	$y = -0,0004x + 0,135$	0,368	$y = 0,1053e^{-0,0050x}$	0,636
	T	$y = -0,0003x + 1,107$	0,559	$y = 1,1059e^{-0,0003x}$	0,573
escarif + niveladora	RR	$y = -0,0202x + 11,768$	0,685	$y = 11,7890e^{-0,0025x}$	0,648
	LD	$y = -0,0254x + 12,186$	0,841	$y = 12,3020e^{-0,0032x}$	0,861
	LS	$y = -0,0002x + 0,082$	0,530	$y = 0,0700e^{-0,0034x}$	0,630
	T	$y = -0,0002x + 1,075$	0,652	$y = 1,0753e^{-0,0002x}$	0,665

Tabla 1. Ecuaciones de regresión entre índices de rugosidad y precipitación acumulativa admitiendo modelos de evolución lineal y exponencial para seis tipos de laboreo (datos de superficies individuales, n=8).

orden 2 se obtienen coeficientes de determinación más elevados. Cuando la rugosidad inicial se crea mediante arado + niveladora las correlaciones de RR y LD con la precipitación son también poco importantes excepto cuando se ajusta un polinomio de orden 2.

Cuando se consideran los dos tipos de ajuste exponencial utilizados, los coeficientes de determinación son más elevados si se utiliza como variable dependiente la raíz cuadrada de la precipitación acumulativa en 22 de los 24 casos estudiados. Si la varia-

ble dependiente es la precipitación el coeficiente de determinación oscila entre 0,190 y 0,971 y si lo es la raíz cuadrada de la misma la gama de variación va de 0,428 a 0,997. Por tanto, la raíz cuadrada de p proporciona mejores ajustes.

Del análisis de las rectas de regresión se deduce que no se encontró un tipo de ajuste que pueda ser considerado superior a los restantes para un índice determinado. Esto puede ser atribuido a las diferencias acerca de la precisión del ajuste de un cierto índice para distintos tratamientos. El análisis de la

Tipo de laboreo	Índice	Ajuste lineal	r ²	Ajuste polinomial de orden 2	r ²
grade	RR	y= -0,0017x+0,993	0,887	y= 8 10 ⁻⁶ x ² -0,0036x+1,033	0,965
	LD	y= -0,0015x+0,930	0,786	y= 1 10 ⁻⁵ x ² -0,0046x+0,993	0,998
	LS	y= -0,0019x+0,661	0,345	y= 3 10 ⁻⁵ x ² -0,0097x+0,821	0,708
	T	y= -0,0003x+0,957	0,485	y= 5 10 ⁻⁶ x ² -0,0014x+0,980	0,832
arado	RR	y= -0,0014x+0,943	0,871	y= 9 10 ⁻⁶ x ² -0,0035x+0,984	0,990
	LD	y= -0,0016x+0,966	0,971	y= 3 10 ⁻⁶ x ² -0,0023x+0,982	0,987
	LS	y= -0,0023x+0,676	0,460	y= 3 10 ⁻⁵ x ² -0,0082x+0,798	0,654
	T	y= -0,0005x+0,940	0,564	y= 5 10 ⁻⁶ x ² -0,0017x+0,962	0,733
escarificador	RR	y= -0,0005x+0,884	0,211	y= 1 10 ⁻⁵ x ² -0,0033x+0,939	0,681
	LD	y= -0,0005x+0,915	0,229	y= 1 10 ⁻⁵ x ² -0,0039x+0,983	0,975
	LS	y= -0,0021x+0,605	0,310	y= 3 10 ⁻⁵ x ² -0,0089x+0,740	0,533
	T	y= -0,0002x+0,964	0,316	y= 3 10 ⁻⁶ x ² -0,0008x+0,976	0,524
grade + niveladora	RR	y= -0,0009x+0,970	0,961	y= 3 10 ⁻⁶ x ² -0,0019x+0,984	0,987
	LD	y= -0,0009x+0,923	0,791	y= 3 10 ⁻⁶ x ² -0,0016x+0,938	0,805
	LS	y= -0,0017x+0,665	0,442	y= 2 10 ⁻⁵ x ² -0,0072x+0,741	0,554
	T	y= -0,0002x+0,973	0,521	y= 1 10 ⁻⁶ x ² -0,0005x+0,978	0,590
arado + niveladora	RR	y= -0,0011x+0,858	0,595	y= 2 10 ⁻⁵ x ² -0,006x+0,926	0,885
	LD	y= -0,0013x+0,878	0,721	y= 2 10 ⁻⁵ x ² -0,0058x+0,940	0,934
	LS	y= -0,002x+0,660	0,513	y= 2 10 ⁻⁵ x ² -0,0081x+0,744	0,632
	T	y= -0,0003x+0,961	0,610	y= 3 10 ⁻⁶ x ² -0,0011x+0,972	0,730
escarif.+niveladora	RR	y= -0,0016x+0,946	0,952	y= 7 10 ⁻⁶ x ² -0,0037x+0,974	0,989
	LD	y= -0,0019x+0,929	0,947	y= 6 10 ⁻⁷ x ² -0,0021x+0,931	0,947
	LS	y= -0,0017x+0,722	0,536	y= 2 10 ⁻⁵ x ² -0,0061x+0,783	0,623
	T	y= -0,0002x+0,977	0,715	y= 1 10 ⁻⁶ x ² -0,0005x+0,982	0,764

Tabla 2. Ecuaciones de regresión entre índices de rugosidad y precipitación acumulativa admitiendo modelos de evolución lineal y polinomial de segundo orden para seis tipos de laboreo (datos medios de cada fecha, n=4).

relación entre distintos índices de rugosidad y la energía cinética acumulativa, (ELTZ & NORTON, 1997), puso de manifiesto que la rugosidad aleatoria, RR, se ajustaba mejor a un polinomio de orden 2 mientras que la tortuosidad, T, lo hacía a una función exponencial. Por otra parte, se encontró (ZOBECK & ONSTAD, 1987) una relación exponencial entre rugosidad aleatoria, RR, y precipitación acumulativa.

Dada la diversidad de resultados obtenidos para los diferentes tratamientos individuales también se

llevó a cabo el análisis de regresión para los dos tipos de funciones que previamente resultaron más precisas: polinómicas de orden 2 y exponenciales frente a , partiendo ahora de dos niveles iniciales de rugosidad obtenidos con y sin pase adicional de niveladora; de este modo, el número de datos disponible de cada uno de los índices estudiado para la regresión con la precipitación es de 12. Estos resultados se presentan en la tabla 4.

Si se tienen en cuenta niveles de rugosidad creados por laboreo primario frente a los de aquellos

Tipo de laboreo	Índice	Ajuste exponencial (p)	r ²	Ajuste exponencial (\sqrt{p})	r ²
grade	RR	$y = 0,995e^{-0,0021x}$	0,906	$y = 1,056e^{-0,0324x}$	0,898
	LD	$y = 0,926e^{-0,0019x}$	0,801	$y = 0,999e^{-0,0332x}$	0,929
	LS	$y = 0,558e^{-0,0034x}$	0,329	$y = 0,713e^{-0,0721x}$	0,603
	T	$y = 0,956e^{-0,0004x}$	0,490	$y = 0,977e^{-0,007x}$	0,755
arado	RR	$y = 0,943e^{-0,0018x}$	0,898	$y = 1,003e^{-0,0296x}$	0,985
	LD	$y = 0,972e^{-0,002x}$	0,988	$y = 1,027e^{-0,0313x}$	0,970
	LS	$y = 0,590e^{-0,0048x}$	0,574	$y = 0,752e^{-0,0892x}$	0,796
	T	$y = 0,938e^{-0,0006x}$	0,581	$y = 0,966e^{-0,011x}$	0,807
escarificador	RR	$y = 0,870e^{-0,0005x}$	0,196	$y = 0,919e^{-0,0126x}$	0,443
	LD	$y = 0,909e^{-0,0005x}$	0,209	$y = 0,951e^{-0,0124x}$	0,428
	LS	$y = 0,440e^{-0,0037x}$	0,248	$y = 0,583e^{-0,081x}$	0,474
	T	$y = 0,963e^{-0,0002x}$	0,315	$y = 0,976e^{-0,0041x}$	0,552
grade + niveladora	RR	$y = 0,971e^{-0,0011x}$	0,971	$y = 1,006e^{-0,0203x}$	0,997
	LD	$y = 0,921e^{-0,0011x}$	0,825	$y = 0,961e^{-0,0208x}$	0,916
	LS	$y = 0,551e^{-0,0035x}$	0,509	$y = 0,6721e^{-0,0735x}$	0,680
	T	$y = 0,973e^{-0,0002x}$	0,525	$y = 0,982e^{-0,0034x}$	0,696
arado + niveladora	RR	$y = 0,842e^{-0,0015x}$	0,604	$y = 0,911e^{-0,0311x}$	0,765
	LD	$y = 0,867e^{-0,0019x}$	0,734	$y = 0,940e^{-0,0361x}$	0,863
	LS	$y = 0,546e^{-0,0052x}$	0,691	$y = 0,699e^{-0,1038x}$	0,841
	T	$y = 0,960e^{-0,0003x}$	0,620	$y = 0,975e^{-0,0061x}$	0,792
escarif.+ niveladora	RR	$y = 0,948e^{-0,0023x}$	0,969	$y = 1,020e^{-0,0419x}$	0,992
	LD	$y = 0,944e^{-0,0032x}$	0,949	$y = 1,032e^{-0,0565x}$	0,931
	LS	$y = 0,657e^{-0,0034x}$	0,652	$y = 0,773e^{-0,0671x}$	0,801
	T	$y = 0,977e^{-0,0002x}$	0,724	$y = 0,986e^{-0,0043x}$	0,864

Tabla 3. Ecuaciones de regresión entre índices de rugosidad y precipitación acumulativa admitiendo modelos de evolución exponenciales para seis tipos de laboreo (datos medios de cada fecha, n=4).

tratamientos con un pase adicional de niveladora, se comprueba en la tabla 4, que los coeficientes de determinación de cada uno de los cuatro índices estudiados con la precipitación son más elevados en el segundo caso. La mayor dispersión de los índices de rugosidad frente a la precipitación para el conjunto de superficies obtenidas por laboreo primario puede ser atribuida a que en dicho grupo se incluye el laboreo con escarificador, que presenta correlaciones más débiles cuando se analiza cada tratamiento individualmente.

Por otra parte, los resultados del análisis de regresión presentados en la tabla 4 aportan nuevos elementos para analizar la precisión de los cuatro índices utilizados en la descripción del microrrelieve. En efecto, para el conjunto de superficies creadas por laboreo primario, los coeficientes de determinación de RR y LD son inferiores a 0,25. Por otra parte, el ajuste exponencial frente a es, excepto en un caso, más preciso que el ajuste mediante un polinomio de orden 2. Además, cuando se comparan los dos grupos de tratamientos, con y sin nivelado-

Tipo de laboreo	Índice	Ajuste polinomial de orden 2	r ²	Ajuste exponencial (\sqrt{p})	r ²
sin niveladora	RR	$y = -0,0215x + 15,803$	0,221	$y = 15,985e^{-0,0248x}$	0,232
	LD	$y = -0,0252x + 18,076$	0,212	$y = 18,242e^{-0,0256x}$	0,226
	LS	$y = -0,003x + 0,103$	0,347	$y = 0,108e^{-0,0808x}$	0,601
	T	$y = -0,0004x + 1,1292$	0,363	$y = 1,151e^{-0,0074x}$	0,561
con niveladora	RR	$y = -0,016x + 11,976$	0,689	$y = 12,66e^{-0,0311x}$	0,770
	LD	$y = -0,0191x + 12,570$	0,688	$y = 13,467e^{-0,0378x}$	0,683
	LS	$y = -0,003x + 0,103$	0,435	$y = 0,106e^{-0,0815x}$	0,747
	T	$y = -0,0002x + 1,085$	0,559	$y = 1,097e^{-0,046x}$	0,721

Tabla 4. Ecuaciones de regresión entre los índices de rugosidad estudiados y la precipitación acumulativa admitiendo modelos de evolución polinomial de segundo orden y exponencial para los dos tipos de laboreo (n=12).

ra, el índice más preciso resultó ser la rugosidad aleatoria, RR, de los tratamientos con pase adicional de niveladora ajustada mediante una función exponencial frente a presentando un coeficiente de determinación $r^2 = 0,77$.

Para comparar entre sí diferentes tratamientos resulta más adecuado emplear valores relativos de los índices tomando como referencia la superficie inicial en vez de los valores absolutos de los mismos. Por ello, a continuación, se comparan los valores de rugosidad aleatoria (RR) para una precipitación dada normalizados frente a la rugosidad inicial (RR₀), es decir, la relación RR/RR₀. En los tres casos en los que el microrrelieve inicial se originó mediante una sola operación de laboreo, sin pase adicional de niveladora, la relación RR/RR₀ tras 24,4 mm de precipitación osciló entre 0,783 y 0,998 y tras 232,8 mm de precipitación osciló entre 0,64 y 0,82. Cuando la rugosidad inicial se originó por dos operaciones sucesivas, laboreo primario y un pase adicional de niveladora, la relación RR/RR₀ osciló entre 0,52 y 0,70 tras 24,4 mm de precipitación y entre 0,50 y 0,73 tras 232,8 mm de precipitación (VIDAL VÁZQUEZ, 2002).

Dada la elevada dispersión de la relación RR/RR₀ en función del tipo de laboreo, conviene comparar los datos experimentales con los proporcionados por el modelo de ZOBECK y ONSTAD (1987). Para una precipitación acumulativa de 24,4 mm el modelo de ZOBECK y ONSTAD predice una relación RR/RR₀ de 0,84, siendo la cifra corres-

pondiente a una precipitación acumulativa de 232,8 mm de 0,54. La media de la relación RR/RR₀ en los tres tratamientos sin niveladora obtenida experimentalmente fue de 0,90 y 0,69 tras 24,4 y 232,8 mm de precipitación respectivamente; por lo tanto, la velocidad de evolución de las superficies estudiadas en ausencia del pase de niveladora es más lenta que la que predice el modelo de ZOBECK y ONSTAD (1987). Si se consideran los datos medios de los tres tratamientos en los que se efectuó un pase adicional de niveladora tras el laboreo primario, la relación RR/RR₀ es de 0,82 y 0,57 respectivamente tras 24,4 y 232,8 mm de precipitación; estos resultados son relativamente próximos a los que predice el modelo de ZOBECK y ONSTAD (1987) si bien los valores estimados indican una velocidad de evolución un poco superior a la medida experimentalmente para 24,4 mm y un poco inferior a la medida para 232,8 mm.

A partir de los datos obtenidos en la experiencia objeto de este trabajo, se pone de manifiesto, por lo tanto, la influencia del laboreo del suelo en la velocidad de evolución del microrrelieve bajo la acción del agua de lluvia. Las referencias encontradas en la bibliografía acerca de la incidencia del uso del suelo en la evolución de la rugosidad son escasas pero concuerdan con los resultados de las experiencias de Campinas-Brasil en el sentido de que el tipo de laboreo puede determinar grandes diferencias en cuanto a la velocidad de evolución del microrrelieve. Así, por ejemplo, JOHNSON *et al.* (1979) estudiaron, bajo simulador de lluvia, la evolución de

un suelo franco limoso con tres niveles iniciales de rugosidad, obteniendo velocidades de evolución que diferían por un factor del orden de dos. También KAINZ *et al.* (1992) estudiaron la evolución de la rugosidad bajo lluvia simulada y a partir de los datos experimentales evaluaron un parámetro denominado susceptibilidad a la degradación, k' , que mide el descenso de la rugosidad, es decir, la velocidad de evolución. El parámetro k' osciló entre 0,4 y 1,1 $m/kj^{0,5}$, es decir, las diferencias en la velocidad de evolución pueden diferir por un factor próximo a tres.

CONCLUSIONES

La cinética de evolución del microrrelieve de un ferralsol tras seis tipos de laboreo que originaron una amplia gama de niveles de rugosidad se caracterizó por la rápida degradación observada durante los primeros estadios.

No se pudo generalizar un solo tipo de ecuación para describir la evolución de la rugosidad en los

seis tipos de laboreo estudiados, de modo que dependiendo de cada tratamiento y del índice de rugosidad considerado, la cinética que mejor se ajustaba variaba aunque, en general, las expresiones polinómicas de orden dos y exponenciales frente a la raíz de la precipitación proporcionaron mejores resultados.

Se pudo comprobar la influencia del tipo de laboreo en la cinética de degradación de la superficie del suelo de modo que en los tratamientos con laboreo primario la rugosidad aleatoria (RR) variaba más lentamente que en aquellos con un pase adicional de niveladora.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado, en parte, en el marco del Convenio Hispano-Brasileño de código PHB2003-013-PC.

Recibido:10/4/2005

Aceptado:20/6/2005

BIBLIOGRAFÍA

- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; LARSON, W.E. & HOLT, R.F. (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USA Conservation Research Report*, 7: 1-14.
- BERTUZZI, P.; RAUWS, G. & COURAULT, D. (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, 17: 87-99.
- BOIFFIN, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse Docteur Ingénieur. Paris INA-PG.
- COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. (1983). Effect of crop residue, tillage-induced roughness and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 1005-1008.
- CURRENCE, H.D. & LOVELY, W.G. (1970). The analysis of soil surface roughness. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 13: 710-714.
- DEXTER, A.R. (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soils. *Journal of Terramechanics*, 14 (1): 11-22.
- ELTZ, F.L.F. & NORTON, L.D. (1997). Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage and canopy cover. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 1746-1755.
- GOVERS, G.; TAKKEN, I. & HELMING, K. (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20: 131-146.
- HUANG, C. & BRADFORD, J.M. (1992). Application of a laser scanner to quantify soil microtopography. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 14-21.
- JOHNSON, C.B.; MANNERING, J.V. & MOLDENHAUER W.C. (1979). Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. *Soil Science Society of America Journal*, 43: 772-777.
- KAINZ, M.; AUERSWALD, K. & VÖHRINGER, R. (1992). Comparison of German and Swiss rainfall simulators – utility, labour demand and costs. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 155: 7-11.
- LADO LIÑARES, M. (1999). *Cuantificación de la rugosidad orientada y aleatoria mediante índices y su relación con la degradación del microrrelieve del suelo y el almacenamiento temporal de agua*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. 265 pp.
- LINDEN, D.R. & VAN DOREN Jr., D.M. (1986). Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1560-1565.
- MITCHELL, J.K. & JONES JR., B.A. (1976). Micro-relief surface depression storage: analysis of models to describe the depth-storage function. *Water Resources Bulletin*, 12: 1205-1222.
- MITCHELL, J.K. & JONES JR., B.A. (1978). Micro-relief surface depression storage: changes during rainfall events and their application to rainfall-runoff models. *Water Resources Bulletin*, 14: 777-802.
- VIDAL VÁZQUEZ, E. (2002). *Influencia de la precipitación y el laboreo en la rugosidad del suelo y la retención de agua en microdepressiones*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. 430 pp.
- ZOBECK, T.M. & ONSTAD, C.A. (1987). Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. *Soil & Tillage Research*, 9: 1-20.