

EVOLUCIÓN DEL MICRORRELIEVE DE LA SUPERFICIE DEL SUELO MEDIDO A DIFERENTES ESCALAS

E. Vidal Vázquez y A. Paz González

Área de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña. Campus de La Zapateira s/n. 15071 La Coruña. evavidal@mail2.udc.es

RESUMEN. Se denomina microrrelieve de la superficie del suelo, o sencillamente rugosidad, a la configuración de la superficie, a su microtopografía, desde la escala milimétrica hasta la métrica. La rugosidad de la superficie influye considerablemente en el reparto de agua de lluvia entre infiltración y escorrentía. El almacenamiento temporal de agua en las pequeñas depresiones que se forman entre agregados y terrones es un parámetro importante para la modelización de procesos erosivos. En este trabajo se revisan las técnicas disponibles para caracterizar la microtopografía del suelo, poniendo particular énfasis en las diferencias entre métodos destructivos o de contacto y telemétricos, que también presentan distinta la resolución de medida y destacando la indudable ventaja de los segundos para analizar la evolución de la superficie del suelo. En un caso, se estudió el efecto del contenido hídrico inicial sobre la evolución de la microtopografía de un lecho de siembra bajo la acción de lluvia simulada, tras caracterización mediante rugosímetro laser. Para ello, se establecieron dos condiciones iniciales diferentes, suelo seco y húmedo, lo que permitió evaluar la importancia relativa de dos de los principales mecanismos de desagregación, estallido por aire ocluido e impacto de la gota de lluvia, sobre el desmoronamiento del microrrelieve de la superficie original. Se pudo comprobar la mayor velocidad de evolución de la superficie inicial seca, como consecuencia de la acción del aire atrapado. En otro caso se estudió el efecto del laboreo en la evolución de la rugosidad bajo la acción del agua de lluvia natural, en condiciones climáticas tropicales. Se partió de superficies creadas por arado y arado + niveladora. La caracterización del microrrelieve se efectuó mediante un rugosímetro de agujas y se pudo comprobar que la superficie inicial originada por laboreo primario evolucionaba más rápidamente. En los dos casos estudiados la evolución degradativa se expresó cuantitativamente tanto en términos de disminución de la rugosidad aleatoria como de reducción del agua de lluvia almacenada en las depresiones de la superficie.

ABSTRACT. Soil surface microrelief, or singly roughness, is referred to as the the millimeter scale

configuration or microtopography variations of the soil surface within a meter scale area. Roughness considerably influences rainfall repartition between infiltration and runoff. Soil surface temporal storage of water in the small depression formed by clods and individual aggregates is thought to be an important parameter for modelling erosive processes. Current available techniques for characterizing soil surface microtopography were reviewed in this paper, so that particular emphasis has been placed on the differences between contact or destructive methods and non-contact methods. Because both types of methods are also characterized by a different scale resolution, non-contact devices are considered most adequate for soil surface evolution studies. The first case study assessed the effect of initial soil water content on the microrelief evolution of an artificial seedbed. Measurements were made before and after simulated rainfall using a non-contact laser profile meter. Two different soil initial conditions were studied, moist and dry, which allowed to assess the relative importance of the most important disaggregation mechanisms which are responsible for decay of the original soil surface microrelief, namely rupture induced by trapped air action and impact of rainfall drops. As expected, a faster evolution of the dry surface was observed, which was explained by occluded air effects. The second case study was devoted to tillage effects on soil roughness. Field experiences were made under natural rainfall in subtropical climate. Initial surfaces were created by mouldboard plow and mouldboard plow + disked. Soil surface microrelief was characterized by means of a pin-meter. A faster evolution of the soil surface resulting from primary tillage was observed. In the two study cases microrelief decay could be quantitatively assessed both, using the random roughness and the surface water storage parameters.

1. Introducción

Las propiedades físicas del suelo que intervienen en mayor medida en la erosión hídrica del suelo se suelen agrupar en tres categorías diferentes: a) la capacidad de la

superficie y el conjunto del perfil para infiltrar agua de lluvia e impedir la formación de excedentes hídricos, b) la capacidad de la superficie del suelo para almacenar agua, en las depresiones de mayores o menores dimensiones que se forman sobre la misma y c) la estabilidad de las partículas del suelo, o susceptibilidad al desprendimiento de las mismas, que sólo interviene una vez que se forma una lámina de agua sobre la superficie (Le Bissonnais, 1988; Fernández Rueda, 1997; Taboada Castro, 2001; Vidal Vázquez, 2002).

Durante la primera etapa de la erosión hídrica, la formación de escorrentía viene condicionada por la degradación de la estructura de la superficie del suelo. Esta degradación resulta particularmente conspicua en suelos susceptibles a la formación de costra superficial en los que se observa una reducción notable no solo de la capacidad de infiltración de agua de lluvia, sino también la evolución del microrrelieve de tal modo que disminuye el volumen que ocupan las depresiones de la superficie susceptibles de almacenar agua (Bresson y Boiffin, 1990). Los procesos detallados que ocurren en esta etapa todavía no se conocen adecuadamente, a pesar de que en la actualidad el estudio de la degradación física del suelo recibe una atención creciente (Paz González y Taboada Castro, 1996). Sin embargo exista amplia evidencia experimental poniendo de manifiesto que tanto la rugosidad de la superficie del suelo, parámetro con el que se suele caracterizar la configuración del microrrelieve, como el almacenaje temporal de agua en las depresiones del mismo ejercen una notable influencia sobre la infiltración, la escorrentía y la formación de costra durante los episodios de precipitación.

Las depresiones de dimensiones variables que se forman sobre la superficie de los suelos de cultivo, en efecto, pueden jugar un papel fundamental en la retención y el almacenamiento del excedente de precipitación, llegando a modificar la respuesta de cuencas de pequeñas dimensiones a la escorrentía. La posible importancia y el significado del agua almacenada temporalmente en la superficie del suelo, a escala de parcela experimental y pequeña cuenca, ya fue reconocida y evaluada empíricamente por Horton (1939) y Sharp y Holton (1942). Más adelante, la retención de agua por las depresiones de la superficie ya se consideró, en términos conceptuales, como un componente de los modelos hidrológicos a escala de cuenca (Crawford y Linsley, 1966) y se puso de manifiesto la influencia de este parámetro en la respuesta del sistema hidrológico, modificando las dimensiones y aspecto del hidrograma (Crawford, 1969).

En cuanto a la rugosidad de la superficie del suelo, se ha podido comprobar su importancia como factor del que depende la erosión hídrica y eólica. Las fuerzas erosivas inducidas por el impacto de la gota de lluvia, escorrentía superficial y el viento están muy influenciadas por el microrrelieve. El impacto de las gotas de lluvia varía en función de las condiciones de la superficie, en particular la extensión y profundidad de los charcos de agua ya formados y la pendiente local, que modifica el ángulo de

impacto. La microtopografía también controla la altura del flujo laminar y la distribución del flujo laminar y concentrado. Actualmente se admite que, los principales procesos que intervienen en la erosión hídrica como la infiltración, la formación de excedente de agua y el desprendimiento pueden ser modelados con mayor eficacia si se describen las condiciones de la superficie del suelo de los que dependen, en particular la rugosidad y la capacidad de almacenar agua en las depresiones asociadas a la superficie del suelo. Así mismo, el microrrelieve interviene en el intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera, la evaporación y el contenido hídrico, las propiedades térmicas y el balance energético y la distribución del tamaño de agregados (Helming et al., 1993).

Algunos de los modelos más recientes para predecir la erosión incluyen el agua retenida en las depresiones entre los factores de los que depende la erosión y la escorrentía el agua retenida en las depresiones (De Roo et al., 1996, a, b; Morgan et al., 1998). Por ello, la relación entre rugosidad y agua retenida en las microdepresiones también ha sido objeto de estudio. El método que más frecuentemente utilizado ha sido la caracterización indirecta del agua almacenada a partir de diversos índices de evaluación de la rugosidad superficial; para ello, se llevan a cabo medidas puntuales de altura del microrrelieve en rejilla, a partir de las que se evalúa la rugosidad y la capacidad de almacenamiento (Moore y Larson, 1979; Onstad, 1984; Huand y Bradford, 1990). Estudios más recientes han puesto de manifiesto la utilidad y las limitaciones de este método (Lado Liñares, 1999; Kamphorst et al., 2000; Vidal Vázquez, 2002).

En este trabajo se presentan medidas de microrrelieve efectuadas en campo y laboratorio con equipos de distinta resolución y características. La metodología se aplica a dos casos diferentes. En primer lugar, se estudia el efecto del contenido hídrico inicial sobre la evolución de la microtopografía de un lecho de siembra, caracterizado mediante rugosímetro laser bajo la acción de lluvia simulada en laboratorio. En segundo lugar, se compara la evolución en campo por la acción de lluvia natural de una superficie sometida a dos tipos de laboreo diferentes, caracterizando en este caso la microtopografía mediante un rugosímetro de agujas.

2. Material y métodos

2.1. Experiencias de laboratorio

El microrrelieve de una superficie similar a la de un lecho de siembra y su evolución bajo simulador de lluvia se estudió en condiciones de laboratorio, utilizando un rugosímetro de rayos láser para medir perfiles de altura.

La toma de muestra se efectuó en el horizonte de laboreo de un suelo de textura franco-limoso, con un contenido en materia orgánica del 1.25% que es conocido por su susceptibilidad a la formación de costra (Taboada Castro, 2001). Las propiedades generales de este suelo se describieron en un trabajo anterior (Paz González y

Taboada Castro, 1996).

Para preparar la superficie experimental se construyó una capa de 5 cm de espesor máximo obtenida por mezcla de agregados de distinto calibre (1-2 mm, 2-5mm, 5-10 mm, 10-20 mm y 20-30 mm, en proporciones que intentan reconstruir la estructura de la superficie del suelo durante la siembra de un cultivo de cereales. Los agregados de mayores dimensiones se dispusieron aleatoriamente. La preparación de estas capas se llevó a cabo en recipientes cuadrados de 58 cm x 58 cm sobre un lecho de arena fina. En un trabajo anterior (Paz González y Taboada Castro, 1996) se presentaron los datos analíticos generales de las diferentes fracciones de agregados y las proporciones usadas para preparar la superficie experimental inicial.

Para simular un estado inicial húmedo, previamente a la preparación del lecho de siembra artificial, los agregados se humectaron lentamente por ascenso capilar, con el objetivo de reducir o eliminar la microfisuración. Es decir, antes del inicio de la experiencia la capa se llevó a saturación. En estas condiciones el principal mecanismo que contribuye a la desagregación es el impacto de las gotas de lluvia, y se minimiza la acción de otros, como la rotura por la acción del aire atrapado, propio de condiciones de humectación rápida o la microfisuración debida a los procesos de hinchamiento-retracción. Por el contrario, en el tratamiento con la superficie inicial seca a la acción de la energía cinética del agua de lluvia se suma el efecto del aire atrapado, en contraste con la superficie inicial húmeda

La rugosidad de la superficie se midió en la superficie inicial y después de la aplicación de cantidades crecientes de lluvia producida mediante simulador. La formación artificial de lluvia se llevó a cabo mediante un simulador con una superficie de 1,30 m x 1,30 m que consta de 380 capilares, situados a 4,6 m de la superficie experimental. Las gotas homogéneas que se producen caen sobre una red metálica en donde se fragmentan y dispersan, resultando una distribución aleatoria de tamaños. La intensidad de la lluvia aplicada fue de 30 mm/h.

El rugosímetro de rayos láser utilizado ha sido descrito previamente (Beruzzi et al., 1990). En esencia consta de una fuente y un receptor de Helio-Neon (He-Ne) de baja potencia y un sistema óptico acoplado que permite proyectar verticalmente un haz de rayos emitido normalmente a la superficie del suelo y tratar las imágenes desfocalizadas que son reflejadas de modo que proporcionen perfiles de relieve. Este sistema permite eliminar las interferencias entre la curvatura de los agregados y el ángulo del haz incidente, principal limitación de los rugosímetros clásicos. El error absoluto máximo de las medidas con el equipo utilizado es < 0.25 mm. En cada superficie se obtuvieron 270 perfiles separados entre sí 2 mm y cada perfil, a su vez, constaba de 270 puntos de medida efectuadas con un paso constante de 2 mm. Para reducir los efectos de borde los datos analizados se limitaron a un área de 50 cm x 50 cm lo que equivale a tomar en consideración 62.500 medidas puntuales de altura.

2.2. Experiencias de campo

Las experiencias de campo presentadas en este trabajo se llevaron a cabo en la finca experimental del Instituto Agronómico de Campinas (I. A. C.), Sao Paulo, Brasil en un suelo de textura arcillosa (Vidal Vázquez, 2002). Las dos superficies iniciales que se comparan entre sí se obtuvieron mediante laboreo primario (arado) y dos operaciones sucesivas de preparación del terreno (arado + niveladora).

Las medidas de microrrelieve en campo se realizaron utilizando un asperímetro o rugosímetro de agujas (Lado Liñares y Taboada Castro, 1998; Vidal Vázquez, 2002), que permite obtener datos puntuales de altura de la superficie del suelo a lo largo de un perfil. La toma de fotografías se efectuó usando una cámara fotográfica Olympus C-800L digital. Para obtener los valores de altura de los diferentes puntos se usó el Profile Meter Program desarrollado por la USDA-ARS Wind Erosion Research Unit, Kansas State University (Wagner y Yiming Yu, 1991), que mediante análisis de imagen detecta los topes de las agujas en formato digital. Tras evaluar los resultados, se obtuvieron valores de altura en redes de muestreo bidimensionales. En este caso la red de muestreo fue de 135 cm x 135 cm con un paso de medida de 2,5 cm x 2,5 cm, por lo que cada superficie se caracterizó mediante 3025 puntos.

2.3. Tratamiento de los datos

El índice de rugosidad utilizado para describir el microrrelieve fue la Rugosidad aleatoria (RR), término propuesto por Allmaras et al. (1966), pero utilizado posteriormente según diversas acepciones. En este trabajo se evalúa según los criterios de Currency and Lovely (1970), mediante la desviación estándar de las medidas de altura que componen una superficie, tras filtrar los efectos de la pendiente y las huellas de los útiles de labranza (rugosidad orientada). La retención o almacenaje de agua en las depresiones del microrrelieve (ATM) se evaluó a partir del modelo propuesto por Kamphorst et al. (2000) a partir de modelos de elevación digital de cada superficie estudiada, teniendo en cuenta el efecto de borde. Los cálculos se efectuaron mediante programas contenidos en el software PC RASTER (Van Deursen y Wesseling, 1992).

3. Resultados y discusión

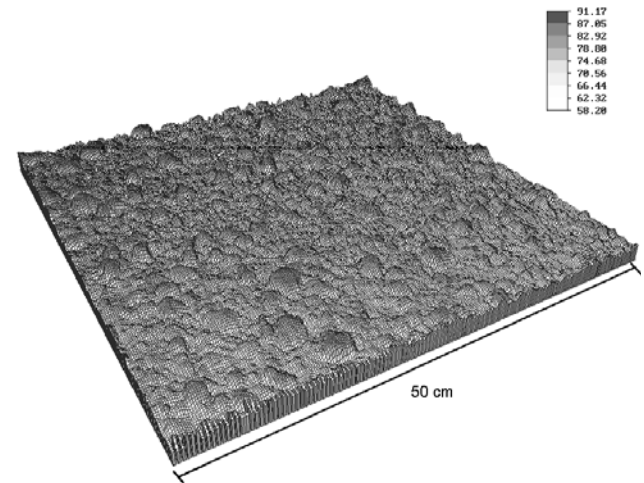
En condiciones de laboratorio, durante la evolución de la superficie bajo lluvia simulada, se caracterizó la microtopografía de las superficies iniciales, seca y húmeda y de otros cuatro estadios de evolución. Conforme aumentaba la precipitación acumulativa, se pudo constatar en primer lugar la formación de costra estructural y posteriormente de costra sedimentaria (Bresson y Boiffin, 1990). La costra estructural inicial se localizaba en las áreas ocupadas por los elementos estructurales menores; el desprendimiento y la deposición de partículas elementales origina posteriormente una costra de tipo sedimentario.

La cinética del desmoronamiento del microrrelieve fue más rápida en la superficie inicialmente seca, de modo que un estado de evolución dado se alcanzaba antes en ella que en la superficie húmeda. Cuando se consideró finalizada la experiencia ambas superficies presentaba más de un 90% de la superficie encostrada y, como consecuencia de su baja infiltración, se formaban charcas en la práctica totalidad de las mismas; en estas condiciones, la precipitación acumulativa en la superficie húmeda alcanzaba 130 mm y en la seca 50 mm. A título de ejemplo, las superficies iniciales y finales de la superficie inicialmente húmeda se presentan en la Figura 1. La costra se inició en sus primeros estadios por soldadura de los agregados de menores dimensiones (1 a 2 mm) y posteriormente se iban incorporando agregados a la misma con un diámetro cada vez mayor, exceptuando las unidades estructurales de mayores dimensiones. En estos agregados de mayor tamaño (10 a 20 y 20 a 30 mm) se pudo también observar inicialmente fragmentación a favor de microfisuras, que ocasionó cierta individualización de pequeños agregados de 1 a 3 mm de diámetro a partir de las unidades mayores, y la formación de cráteres en los puntos de impacto de las gotas de lluvia. A pesar de ello, las unidades estructurales de mayores dimensiones se podían reconocer en el estadio de evolución final, sobresaliendo sobre una costra sedimentaria prácticamente lisa.

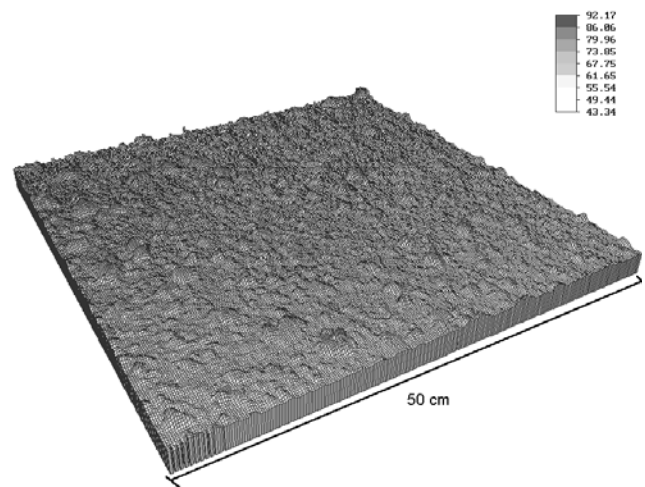
Los resultados de campo presentados se pueden considerar representativos de una evolución de la microtopografía bajo condiciones de precipitación intensa, como son las que corresponden a clima subtropical. En la Figura 2 se presenta un ejemplo de una superficie inicial creada mediante arado de disco, que se compara con la superficie evolucionada tras 232,8 mm de precipitación acumulada, pudiendo comprobarse la importante diferencia de rugosidad entre ambas. No obstante, hay que tener en cuenta que en esta experiencia se están comparando áreas vecinas, ya que el contacto de las agujas con el suelo determina que las medidas efectuadas en un estadio de evolución determinado sean destructivas. Esto induce una gran variabilidad.

A pesar de ello se pone de manifiesto que con cantidades crecientes de precipitación los terrones de mayores dimensiones permanecen individualizados, mientras que las hondonadas tienden a presentar cada vez mayor continuidad como consecuencia de la deposición de materiales en las mismas, de modo que la extensión que ocupa costra de tipo sedimentario se va ampliando.

Por tanto, junto a la menor densidad de la red de muestreo, un importante inconveniente de los rugosímetros de campo estriba en el contacto mecánico requerido entre las agujas y el suelo. En la práctica, existe un riesgo sistemático de deformación del microrrelieve durante la medida, particularmente cuando se trata de suelos arcillosos en estado húmedo, muy plásticos y también de suelos arenosos y secos que se desmoronan con mucha facilidad.



Estado Inicial



P. acumulada = 130 mm

Fig. 1. DTM de la superficie inicial y la superficie evolucionada tras 130 mm de precipitación acumulada caracterizadas con rugosímetro laser (dimensiones: 50 cm x 50 cm; escala vertical en mm; datos puntuales de altura = 62.500)

En la Figura 3 se puede apreciar la evolución de la rugosidad aleatoria de una superficie húmeda y otra seca, de similar configuración inicial, bajo simulador de lluvia, en laboratorio. Cuando se parte de una superficie previamente humectada por capilaridad la disminución de la rugosidad en función de la precipitación acumulativa es más lenta que si se parte de una superficie inicial seca. Así, en la superficie húmeda después de una lluvia acumulativa de 130 mm la rugosidad se había reducido hasta un 83% de la inicial, mientras que en la superficie seca, esta reducción ya suponía un 68% con solo 50 mm de precipitación acumulativa. Las diferencias de evolución del microrrelieve se deben a que en la superficie seca, además de la energía cinética del agua de lluvia interviene la acción del aire atrapado, lo que tiene como consecuencia una acelerando la degradación de la superficie del suelo en los estadios iniciales de evolución del microrrelieve.

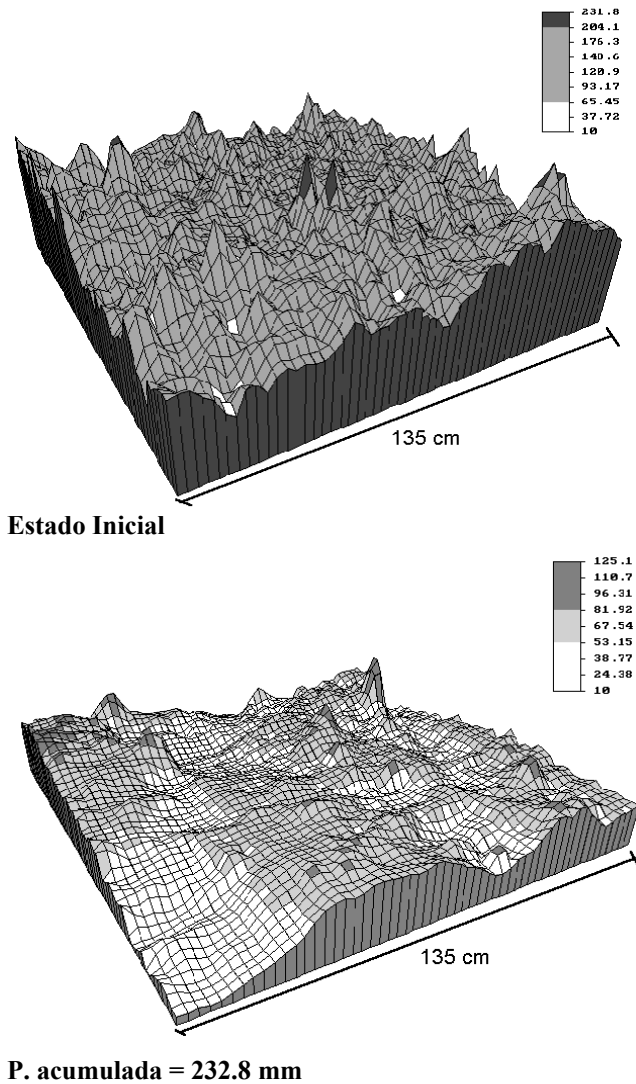


Fig. 2. DTM de la superficie inicial creada por arado y la superficie evolucionada tras 232.8 mm de precipitación acumulada caracterizadas mediante rugosímetro de agujas (dimensiones : 135 cm x 135 cm; escala vertical en mm; datos puntuales de altura = 3.025)

La incidencia del tipo de laboreo sobre la cinética de la degradación del microrrelieve se puede observar en la Figura 4. En este caso los datos fueron tomados en condiciones de campo y se compara el efecto sobre el microrrelieve de una sola operación de laboreo (arado) frente a dos operaciones sucesivas (arado + niveladora). Los valores absolutos de rugosidad aleatoria, como cabe predecir, fueron más elevados cuando se midieron tras laboreo primario, que cuando se llevó a cabo un pase de niveladora adicional; por tanto, la segunda operación de laboreo modifica sensiblemente las características del microrrelieve inicial. Además, cuando la rugosidad aleatoria se compara en términos relativos, se comprueba que la degradación de la superficie es más rápida si se efectúan dos operaciones de laboreo sucesivas. El desmoronamiento del microrrelieve se suele describir usando la rugosidad aleatoria (RR) mediante ecuaciones exponenciales, o en su defecto, funciones lineales, de tipo

decreciente (Zobeck y Onstad, 1987; Lado Liñares, 1999; Vidal Vázquez, 2002). A partir de 418 superficies experimentales Zobeck y Onstad (1987) describieron la reducción de la rugosidad mediante la expresión $RR=RR_0 \cdot 0.89 \cdot e^{-0.026p}$; trabajos posteriores permitieron comprobar que la ecuación de Zobeck y Onstad (1987) no podía ser aplicada universalmente, ya que no presentaba un buen ajuste a nuevas series de datos experimentales (Lado Liñares, 1999; Vidal Vázquez, 2002).

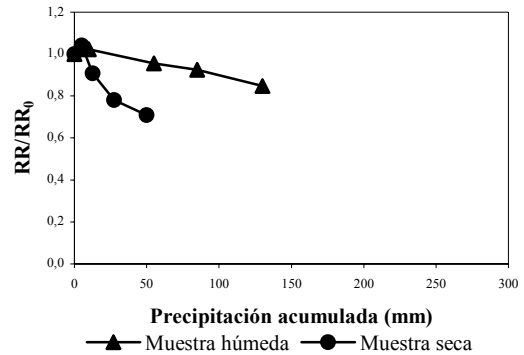


Fig. 3. Evolución de la rugosidad de superficies iniciales secas y húmedas, en condiciones de laboratorio.

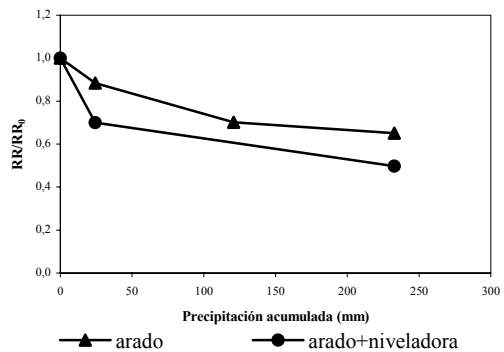


Fig. 4. Evolución de la rugosidad de superficies iniciales s creadas por distintos sistemas de laboreo en el campo.

En las Figuras 3 y 4 también se pone en evidencia una gran variabilidad de la cinética de la disgregación. Por ello, parece hacer aconsejable recomendar que no se utilice una sola ecuación para describir la disminución de la rugosidad en las diferentes condiciones estudiadas.

En la Tabla 1 se presentan los valores absolutos de la cantidad máxima de agua que pueden almacenar las depresiones del microrrelieve (ATM) en función de la precipitación acumulativa. Se comprueba que las superficies que simulan lechos de siembra presentan valores poco importantes de este parámetro, del orden de 1 mm/m² o inferiores. Por el contrario en las superficies iniciales de campo la cantidad de agua almacenada es del orden de 4 a 5 mm/m². Para un amplio rango de valores de rugosidad aleatoria, Kamphorst et al., (2000) obtuvieron valores de ATM que oscilaban entre 0,5 y 13 mm. La incidencia de este parámetro sobre el balance hídrico depende no sólo de su valor absoluto, sino también del tipo de clima; así en clima templado una superficie muy rugosa,

con una retención en depresiones del orden de 10 mm puede ser eficiente para impedir la formación de excedente de agua en la mayor parte de los episodios lluviosos, si la velocidad de infiltración es baja.

Tabla 1. Variación del almacenaje en microdepresiones (ATM) en función de la precipitación acumulativa.

P (mm)	ATM (mm)	P (mm)	ATM (mm)
Superficies de laboratorio			
Superficie I. húmeda		Superficie I. seca	
0	0.85	0	0.73
10	0.96	5.0	0.69
55	0.82	12.5	0.63
85	0.67	27.5	0.49
130	0.57	50.0	0.49
Superficies de campo			
Arado		Arado + Niveladora	
0	4.54	0	5.07
24.4	5.19	24.9	4.49
120.9	2.79	-	-
232.8	3.31	232.8	3.26

No obstante en la Tabla 1 se aprecia que la disminución del parámetro ATM no siempre es paralela a la de la rugosidad aleatoria, particularmente en las superficies de campo, que presentan mayor variabilidad por el carácter destructivo del dispositivo experimental. Por ello las correlaciones entre rugosidad aleatoria (RR) y agua retenida en las depresiones (ATM) suelen presentar alta dispersión

4. Conclusiones

Mediante el análisis de dos parámetros relacionados entre sí, como son la rugosidad de la superficie y el almacenaje de agua en depresiones, se puso de manifiesto la influencia de un factor intrínseco del suelo, el contenido hídrico inicial de la superficie, y otro externo, el tipo de laboreo, sobre la cinética del desmoronamiento del microrrelieve por acción del agua de lluvia.

En base a la variabilidad observada en cuanto a la dinámica de la evolución del microrrelieve caracterizada por la rugosidad aleatoria, se recomienda emplear modelos de degradación diferentes par distintas condiciones específicas.

Agradecimientos. Este trabajo se efectuó en el marco de los proyectos de investigación PGIDT01 AGR10302 PR, financiado por la Xunta de Galicia y REN2000-04445-C02-01-HD, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología

Referencias

Allmaras, R.R., Burwell, R. E., Larson, R. E., Holt, R. F. y Nelson, W. W. 1966. *Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage*. USDA Conserv. Res. Report 7. U. S. Gov. Print. Office. Washington, DC.

Bertuzzi, P., Causignac, J. M., Stengel, P., Morel, G., Lorendeau, J. Y. y Pelloux, G. 1990. An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ. *Soil Sci.*, 149 : 169-178.

Currence, H. D. y Lovely, W. G., 1970. The analysis of soil surface

roughness. *Transactions ASAE* 13 : 710-714.

Bresson, L. M. y Boiffin, J. 1990. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 7 : 301-325.

Crawford, N. H., 1969. Analysis of watershed changes. In: W. L. Moore and C. W. Morgan (Eds.). *Effects of watershed changes on streamflow*. University of Texas Press. Austin. Texas.

Crawford, N. H. y Lindsay, R. K., 1966. *Digital simulation in Hidrology.. The Stanford watershed model IV*. Deo. Civ. Eng., Standford Univ., Standford, California. Tech. Rep. 39. 212 pp.

De Roo, A. P. J., Offermans, J. E. y Cremers, N. H. D. T., 1996, a. LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I. Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10: 1107-1117.

De Roo, A. P. J., Offermans, J. E. y Cremers, N. H. D. T., 1996, b. LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II. Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, 10: 1119-1126..

Fernández Rueda, M. J., 1997. Características físicas y mecánicas de suelos de cultivo. Tesis doctoral. Universidade da Coruña. 283 pp.

Huang, C. y Bradford, J. M., 1990. Depressional storage for markov-gaussian surfaces. *Water Resources Res* 26, 2235-2242.

Helming, K., Roth, CH. H., Wolf, R y Diestel, H. 1993. Characterization of rainfall - microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology*, 6 : 273-286.

Horton, R. E., 1939. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity. *Trans. Am. Geophys. Union*, 20: 693-711.

Kamphorst, E.C.; Jetten, V.; Guérif, J.; Pitkänen, J.; Iversen, B.V.; Douglas, J.T. y Paz, A., 2000. Predicting depressional storage from soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1749-1758.

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*. Universidade da Coruña. 265 pp.

Lado Liñares, M. y Taboada Castro, M^a. M., 1998. Medida de la rugosidad del suelo en terrenos de cultivo. En: Gómez Ortiz, A. y Salvado Franch, F. (Eds.). V Reunión Nacional de Geomorfología. Barcelona. *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*. pp. 731-734.

Le Bissonnais, Y., 1988. Analyse des mécanismes de désagregation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. *Thèse de doctorat*. Université d'Orleans. 255 pp.

Morgan, R. P. C., Quinton, R. E., Smith, J. W. A., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M. E. y Folly, A. J. W., 1998. *The European soil erosion model. (EUROSEM): documentation and user guide. Version 3.6*. Silsoe College. Cranfield University. Silsoe. Bedford. UK. 22 pp.

Moore, I. D. and Larson, C. L., 1979. Estimating micro-relief surface storage from point data. *Transactions of the ASAE*, 20: 1073-1077.

Onstad C. A., 1984. Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the ASAE*, 27 : 729-732.

Paz González, A. y Taboada Castro, M^a. T., 1996. Medida del Microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. En: Grandal Dánglade y Pagés Valcarlos (Eds.). IV Reunión de Geomorfología. O Castro. A Coruña. *Cuadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 21: 829-841.

Sharp, A. L. y Holton, H. N., 1942. Extension of graphic methods of analysis of sprinkled-plot hydrographs to the analysis of hydrographs of control plots of small homogeneous watersheds. *Trans. Am. Geophys. Union*, 23: 578-593.

Taboada Castro, M^a. M., 2001. Morfología de las superficies cultivadas en relación con la infiltración, la formación del excedente de agua y la erosión. *Tesis doctoral*. Universidade da Coruña. 487 pp.

Van Deursen, W. P. A. y Wesseling, C. G., 1992. *PC-RASTER handleiding*. Dpt of physical geography. University of Utrecht. 313 pp.

Vidal Vázquez, E., 2002. Influencia de la precipitación y el laboreo en la rugosidad del suelo y la retención de agua en microdepresiones. *Tesis doctoral*. Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña. 430 pp.

Wagner, L. E. y Yiming Yu., 1991. Digitalization of profile meter photographs. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 34 (2): 412-416.

Zobeck, T. M. y Onstad, C. A., 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness; a review. *Soil Tillage Research*, 9: 1-20.