

Variabilidad espacial del microrrelieve de suelos de cultivo en A Coruña (España) y Campinas (Brasil)

**Spatial variability of soil microrelief in cultivated
areas of A Coruña (Spain) and Campinas (Brasil)**

VIDAL VÁZQUEZ, E. ¹

Abstract

Soil tillage systems and soil cover management are the most important factors to reduce the risk of erosion and the rainfall is considered the main factor for soil roughness degradation. The aim of this work was to study the spatial dependence of soil microrelief according to geostatistics. A total of 114 soil surfaces located at Spain and Brazil with different tillage systems and cumulative rainfall were studied. A pin microrelief meter was used for the surface roughness measurements. Height microrelief values were digitalized and the spatial variability analysis was performed using the experimental semivariogram and the random roughness index, RR. The experimental grid allowed detecting the spatial dependence pattern and semivariograms without discontinuities at small scales could be adjusted for all the studied surfaces. Moreover, semivariogram range was related with fractal parameters and the dependence between random roughness and semivariogram sill exhibited a significant parabolic relationship.

Key words: spatial variability, geostatistics, random roughness, semivariogram parameters.

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

INTRODUCCIÓN

La variabilidad espacial y temporal de los procesos hidrológicos y erosivos son características que están fuertemente correlacionadas con la dinámica de las actividades agrícolas. Entre estas actividades destacan, por su importancia, el tipo de cultivo, las modalidades de siembra, el manejo del suelo, la dirección de las hileras de cultivo y las rodadas en relación con la topografía del terreno o la frecuencia e intensidad del tráfico de maquinaria agrícola.

Dentro de la secuencia de operaciones agrícolas cabe destacar que el laboreo del suelo mejora, temporalmente, la capacidad de infiltración pero la superficie del mismo se ve expuesta a la agresividad de las lluvias, se reduce la cohesión y la materia orgánica se redistribuye hacia capas más profundas (VIDAL VÁZQUEZ, 2002).

Numerosos estudios han puesto de manifiesto que la rugosidad de la superficie del suelo influye considerablemente en el reparto del agua de lluvia entre infiltración y escorrentía ya que los suelos con mayor rugosidad tienden a presentar intensidades de infiltración más elevadas que los suelos lisos. Además, en las microdepresiones se acumula temporalmente el exceso de precipitación disminuyendo, de este modo, el desprendimiento y transporte de partículas lo que reduce las pérdidas de suelo por escorrentía (DEXTER, 1977; MOORE & LARSON, 1979; ONSTAD, 1984).

De modo general se admite que el manejo de la cubierta vegetal y los sistemas de laboreo son los factores más importantes para reducir el riesgo de erosión (FREEBAIRN *et al.*, 1991). En relación con el microrrelieve, el laboreo se considera el principal responsable de la variación de este parámetro entre diferentes parcelas. LERSCH *et al.* (1987) estudiaron la relación entre la rugosidad generada por diferentes laboreos y diversas propiedades edáficas, llegando a la conclusión de que la propiedad que más influye en la rugosidad es

la densidad aparente del suelo antes del laboreo y que existen relaciones con el contenido hídrico previo al laboreo y la textura del suelo. Entre los procesos hidrológicos que se ven influenciados por las actividades y el manejo agrícola se encuentran la interceptación, infiltración, almacenamiento temporal de agua en las microdepresiones, flujo laminar, flujo concentrado y disgregación (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999).

Por otra parte, se considera que el principal agente que degrada la rugosidad del suelo es el agua de lluvia (MITCHELL & JONES, 1978; FREEBAIRN *et al.*, 1989; PAZ GONZÁLEZ & TABOADA CASTRO, 1996). En el proceso de degradación del microrrelieve por efecto de la lluvia influyen factores como la cubierta vegetal, la textura del suelo o el contenido hídrico previo al inicio de la precipitación, puesto que si la superficie está seca la degradación de la misma será más rápida que para una superficie húmeda, debido a la existencia de aire atrapado en los agregados, cuya presión provoca la desagregación (LE BISSONNAIS, 1996; FERNÁNDEZ RUEDA, 1997).

Al igual que otras variables edáficas, climatológicas, geológicas, etc., el microrrelieve del suelo y sus componentes orientada (debida a la pendiente y el laboreo) y aleatoria (producida por los agregados y terrones), son atributos que varían continuamente en el espacio. Por lo tanto, los datos puntuales de altura situados más próximos entre sí son más similares que aquellos que están más alejados, es decir, la autocorrelación de los valores de altura depende de la proximidad de los puntos. De este modo, las observaciones no pueden considerarse independientes y resulta necesario un tratamiento estadístico diferente del clásico donde se tenga en cuenta la distancia entre puntos medidos. A partir de esta idea surge el concepto de geoestadística que tiene en cuenta la localización geográfica para analizar la dependencia espacial. Para caracterizar la estructura espacial desde el punto de vista geoestadístico se utilizan funciones como la

covarianza o la semivarianza. A partir de los datos experimentales de semivarianza se obtiene un semivariograma que proporciona una relación directa entre las diferencias de altura y la distancia o escala.

El objetivo de este trabajo es el estudio de la dependencia espacial del microrrelieve del suelo de acuerdo con criterios geoestadísticos.

MATERIAL Y MÉTODOS

El análisis geoestadístico se llevó a cabo en un total de 114 superficies, 66 de las cuales se localizaron en La Coruña (España) y 48 en Campinas (Brasil). Los suelos estudiados se clasifican como Umbrisol Cambico y Ferralsol Ocrico, respectivamente (FAO, 1998). Las medidas efectuadas en España se realizaron en distintas parcelas de dos localidades diferentes: la parroquia de Liñares (Culleredo-A Coruña) y el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (Abegondo-A Coruña).

En Liñares se llevaron a cabo 25 medidas de microrrelieve después de una labor con arado de vertedera previa al cultivo de maíz y tras diferentes cantidades de precipitación acumulativa. Durante el periodo estudiado se pudo observar la degradación de la superficie del suelo, que originó primero fenómenos de erosión difusa y finalmente erosión concentrada por incisión de la escorrentía formando surcos sobre el terreno. En Mabegondo el tipo de laboreo del suelo fue más variable. Se llevaron a cabo 41 medidas de rugosidad en diferentes parcelas que incluían superficies con laboreo primario y superficies cultivadas.

En la parcela de Campinas (Brasil) se efectuaron 48 medidas de rugosidad en seis tratamientos diferentes: tres de ellos consistían en un laboreo primario (con grade, arado de disco o arado escarificador) y en los tres restantes se efectuó un pase adicional de grade niveladora.

Para la realización de las medidas de rugosidad se utilizó un rugosímetro de agujas, descrito en anteriores trabajos (LADO

LIÑARES, 1999; VIDAL VÁZQUEZ, 2002) que permite obtener datos puntuales de altura a lo largo de un perfil obteniéndose perfiles paralelos separados por distancias regulares. La red de muestreo utilizada fue de 134 x 134 cm con un paso de medida de 2 cm en España y 2,5 cm en Brasil.

Para registrar los perfiles se usó una cámara fotográfica digital y posteriormente se analizaron las fotografías mediante el Profile Meter Program (WAGNER y YIMING YU, 1991) que permite detectar los topes de las agujas y obtener los valores de altura de las superficies muestreadas. Estos valores, junto con sus coordenadas en función de su distancia en ambos ejes, se almacenaron en un fichero de datos a partir del cual se puede efectuar el análisis de la variabilidad espacial de los valores de rugosidad mediante el cálculo del semivariograma experimental así como el cálculo de distintos índices de rugosidad.

La 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:

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

donde

Z_i = altura en cada punto

= media de las alturas

N = número de puntos

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.

Los semivariogramas se calcularon a partir de los datos originales de altura y después de separar la componente de altura debida a la pendiente de la componente aleatoria, que es la empleada para caracterizar la rugosidad. Para ello se emplearon dos tipos de retirada de

tendencia: por una parte se ajustó a los datos originales una superficie polinomial de orden uno mediante el método de mínimos cuadrados y por otra se utilizó un método no determinista (CURRENCE y LOVELY, 1970) que permite retirar las componentes de los datos puntuales de altura asociadas a la topografía y las huellas de laboreo. De este modo se obtienen superficies residuales que representan las componentes del microrrelieve determinadas por la disposición aleatoria de elementos estructurales como terrones y agregados sobre la superficie del suelo.

Para efectuar el análisis de la variabilidad espacial de los datos de altura se usaron técnicas geoestadísticas descritas en VIEIRA *et al.* (1983). Para verificar la existencia de dependencia espacial se efectuó el cálculo del semivariograma experimental, $g^*(h)$, que puede ser estimado mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{i=N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

donde representa el número de pares de valores medidos separados por un vector h . Los valores de h y $N(h)$ son definidos de acuerdo con las posiciones de los datos muestrales.

Una vez obtenido el semivariograma los datos experimentales se ajustaron a modelos de tipo esférico o exponencial (VIDAL VÁZQUEZ, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se comprobó que en la mayoría de las superficies estudiadas, al utilizar los datos originales de altura, se produjo un aumento sostenido de la semivarianza en función de la distancia por lo que el valor de semivarianza no permaneció estable para la escala de medida y con frecuencia se observó la existencia de fluctuaciones cíclicas alrededor de un valor próximo a la varianza muestral. El hecho de que los semivariogramas no fuesen estacionarios

puede deberse a la existencia de pendiente en las parcelas y el comportamiento cíclico puede atribuirse a la existencia de estructuras cíclicas como surcos de labor o surquillos de siembra. Este tipo de dependencia espacial no permite llevar a cabo interpolaciones, sin embargo, de acuerdo con HANSEN *et al.* (1999), el análisis de la dependencia espacial de los datos reales de microrrelieve, aunque presenten una tendencia muy acusada, puede ser útil para definir el rango de dependencia espacial. Ejemplos de comportamiento no estacionario o cíclico han sido presentados por LADO LIÑARES (1999) y VIVAS MIRANDA (2000).

El filtrado de la dependencia espacial mediante modelos deterministas es utilizado en estadística clásica, sin embargo en el caso del microrrelieve del suelo el uso de funciones lineales o polinómicas para retirar la tendencia provoca una disminución de la variabilidad estadística de los datos de altura en relación con la que realmente crean diversas operaciones de laboreo; por lo que las superficies residuales corresponden más a artificios de cálculo que a la realidad. Por ello conviene utilizar métodos no deterministas, como el de CURRENCE & LOVELY (1970), para retirar las componentes de los datos puntuales de altura asociadas a la topografía y el laboreo. De este modo, se obtienen superficies residuales que tienen un significado físico ya que representan las componentes del microrrelieve determinadas por la disposición aleatoria de elementos estructurales como terrones y agregados sobre la superficie del suelo (VIDAL VÁZQUEZ, 2002). Por tanto, el análisis geoestadístico de las superficies residuales obtenidas mediante procedimientos no deterministas permite evaluar el rango de dependencia espacial y ajustar modelos teóricos de semivariogramas para la componente aleatoria del microrrelieve definida de este modo. En este trabajo se presentan los resultados del análisis de la dependencia espacial de las 114 superficies residuales obtenidas tras retirar el efecto de la pendiente y las huellas de laboreo de acuerdo con el método no determinista de CURRENCE & LOVELY (1970).

Al ajustar los semivariogramas teóricos se admitió que la red de muestreo utilizada con un intervalo mínimo de 2 cm en España y 2,5 cm en Brasil capturó toda la variabilidad espacial del microrrelieve; por lo tanto, ninguno de los 114 semivariogramas ajustados presentó efecto pepita. Sin embargo, en algunos de los semivariogramas experimentales, la imprecisión en el ajuste a pequeñas distancias fue bastante importante, como por ejemplo, en la serie de datos medida en Brasil, donde se observó que, con frecuencia, en las superficies iniciales con 0 mm de precipitación, al primer punto del semivariograma muestral le correspondió una semivarianza próxima o incluso superior al 50% del valor de la meseta.

Por otra parte, en las superficies estudiadas en España, no se apreciaron diferencias de continuidad espacial a pequeña distancia entre las superficies iniciales y las evolucionadas por la acción de la precipitación; por ejemplo, en la parcela de Liñares, tanto las superficies iniciales creadas mediante arado de vertedera como las superficies que evolucionaron bajo cantidades crecientes de precipitación, presentaron, todas ellas, valores muy bajos de semivarianza en las proximidades del origen lo que permitió ajustar modelos sin efecto pepita.

En la mayor parte de las superficies estudiadas los semivariogramas experimentales de las superficies residuales obtenidas por filtrado de tendencia según el método de CURRENCE & LOVELY (1970) alcanzaron una meseta estable. Sin embargo, se observaron excepciones a este patrón general ya que en cuatro de las superficies la semivarianza a grandes distancias presentó una clara tendencia lineal de modo que, a la escala de medida, no llegó a alcanzarse una meseta estable; esto puede ser debido a la presencia, de un sistema de terrones que presentaría una tendencia de tipo lineal superpuesta a la pendiente media del área en que se efectuaron las medidas. Además, el hecho de que el microrrelieve de tres de las cuatro superficies residuales que se comportan como no estacionarias haya sido creado tras el pase adicional de niveladora

después del laboreo primario, avala la posibilidad de formación de estructuras con una tendencia lineal secundaria.

En algunas superficies se observó cierto comportamiento cíclico aunque de una magnitud no significativa en relación con la varianza muestral. Esto indica que tras la retirada de tendencia pueden permanecer estructuras que todavía presentan un efecto agujero poco patente.

En seis superficies se ajustaron a los datos experimentales de semivarianza dos modelos teóricos superpuestos lo que indica diferentes escalas de dependencia espacial en el seno del mismo área experimental. El tipo de modelo teórico que más frecuentemente se ajustó a los semivariogramas experimentales fue el exponencial seguido del esférico; en algunos casos se ajustaron dobles modelos teóricos de dependencia espacial.

En el caso de las 66 superficies de España se ajustaron 55 semivariogramas teóricos de tipo exponencial y 11 de tipo esférico con alcances que oscilaron entre 80 y 700 mm. En las 48 superficies de Brasil se ajustaron modelos exponenciales. Dos de las superficies medidas en España y cuatro de las de Brasil presentaron una doble escala de dependencia espacial. En este caso, el primer componente era de tipo esférico o exponencial y el segundo de tipo esférico, exponencial y lineal. Por tanto, los modelos más frecuentes son el exponencial y el esférico. Estos resultados concuerdan, en general, con los de LADO LIÑARES (1999) quien, después de analizar 63 superficies, también ajustó con mayor frecuencia modelos teóricos exponenciales y esféricos, si bien en tres casos encontró una dependencia de tipo gaussiano.

El modelo exponencial y el modelo esférico coinciden en que son indicativos de fenómenos continuos, o con un conjunto numerable de discontinuidades, pero no derivables. Dichos fenómenos pueden presentar quiebros que se producen a distintas escalas, como ocurre al considerar la componente aleatoria del microrrelieve, lo que sugiere un paralelismo con las unidades estructurales de distintas dimensiones

que conforman el microrrelieve. La principal diferencia entre los semivariogramas de tipo esférico y exponencial estriba en que la pendiente en el origen del primero es inferior a la del segundo, es decir, el semivariograma exponencial se aproxima a la meseta más rápidamente que el esférico; como consecuencia de la mayor pendiente en el origen, las fluctuaciones de pequeño periodo descritas por el semivariograma exponencial tienen menos amplitud que las representadas por el modelo esférico. Cabe destacar que las 11 superficies a las que se ajustaron modelos esféricos habían sufrido cierta evolución bajo la acción de la precipitación por lo que los elementos estructurales de menores dimensiones se encontraban soldados; esto sugiere que las superficies en las que la dependencia espacial del microrrelieve se describió mediante un modelo esférico estaban caracterizadas por la ausencia de agregados de pequeñas dimensiones que podrían haber causado fluctuaciones de pequeño periodo.

Para completar el análisis estructural se consideró, además de la presencia o ausencia de efecto pepita, de discontinuidad en el origen y de tipo de semivariograma, los parámetros

meseta y alcance de los semivariogramas teóricos. La meseta debe de presentar un valor próximo al de la varianza muestral; por lo tanto, este parámetro del semivariograma, presenta una relación muy estrecha con la rugosidad aleatoria, RR, que viene definida por la desviación estándar de los datos puntuales de altura; dicho de otro modo, la rugosidad aleatoria, RR, debe de ser muy próxima o similar a la raíz cuadrada de la meseta. Como cabía esperar, para el conjunto de las 114 superficies estudiadas se obtuvo, entre la rugosidad aleatoria, RR, y la varianza muestral una relación muy significativa ($p > 0,99$) que vino descrita por una función potencial, siendo el coeficiente de determinación $R^2 = 0,952$ (Figura 1). Por lo tanto, la proporción de la varianza no explicada por esta relación es inferior a un 5% y puede ser atribuida a la imprecisión del parámetro meseta de los modelos ajustados a los datos teóricos para grandes distancias; cabe esperar que el ajuste de modelos teóricos en el entorno de grandes distancias sea más preciso en aquellos casos en los que se detectan fenómenos cíclicos que determinan la presencia de efecto agujero.

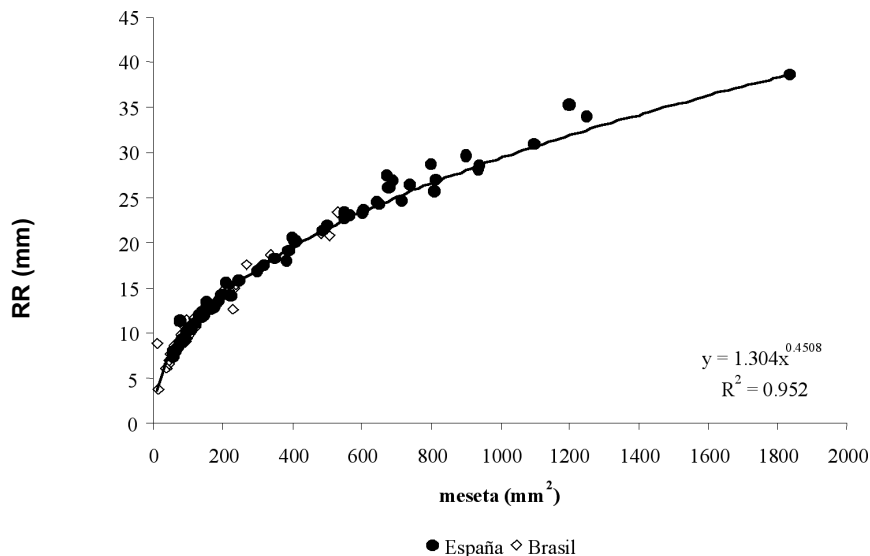


Fig. 1. Relación entre la meseta y la rugosidad aleatoria, RR, de las superficies estudiadas.

Entre las superficies estudiadas en España y Brasil se aprecian importantes diferencias en lo que respecta al valor máximo de la meseta ya que en el primer caso se cifra en 1835 mm² y en el segundo caso en 530 mm². Los microrrelieves más rugosos fueron creados en España con arado de vertedera y en Brasil con arado de disco. Por tanto, las diferencias de los valores máximos de la meseta entre los dos países pueden ser atribuidas a que el arado con vertedera originó niveles de rugosidad en España mucho más importantes que los creados por el arado de disco en Brasil.

Por otra parte, cabe destacar que el valor de la meseta tiende a disminuir sistemáticamente en función de la precipitación acumulativa en la mayor parte de las series de evolución estudiadas, lo que está de acuerdo con la disminución de la rugosidad aleatoria, RR, y otros índices usados para describir el microrrelieve. La tendencia a la disminución del valor de la meseta es particularmente patente en el caso de las series de datos de Campinas y Mabegondo. En el caso de la parcela de Liñares en la que se siguió la evolución durante un periodo largo de tiempo, con una precipitación total de 753 mm, se observó una tendencia a la disminución del valor de la meseta inicialmente y un posterior incremento de la misma durante los episodios finales de precipitación. Esto hecho puede deberse a la presencia de pequeños surcos y regueros de erosión. Por tanto, se aprecia un notable paralelismo entre la evolución del valor de la meseta y el de la rugosidad aleatoria, RR, y otros índices utilizados para describir el microrrelieve.

El parámetro alcance o rango de correlación espacial de los semivariogramas teóricos mide el intervalo entre el origen de coordenadas y el punto a partir del cual se alcanza una meseta estable. HELMING *et al.* (1993) y PAZ GONZÁLEZ *et al.* (1998) en condiciones de laboratorio y LADO LIÑARES (1999) en experiencias de campo, pusieron de manifiesto que el valor del alcance presenta una relación de dependencia notable con el tamaño de las unidades estructurales de mayores dimensiones que conforman el microrrelieve.

Los valores del alcance de los modelos de semivariograma teóricos ajustados a los datos experimentales oscilaron entre, aproximadamente, 8 y 50 cm en España y 7 y 67 cm en Brasil. Estos valores son del mismo orden de magnitud que el tamaño de los terrones y agregados de mayores dimensiones para los diferentes tipos de laboreo estudiados.

Por tanto, se puede admitir que la principal causa de que depende el alcance son los terrones de mayores dimensiones originados por las diversas operaciones de laboreo.

Por otra parte, estudiando el alcance en función de la precipitación acumulativa se aprecia, en general, una tendencia progresiva al aumento del valor del mismo para los sucesivos estadios evolutivos. Esta tendencia fue también observada por HELMING *et al.* (1993) y puede interpretarse en el sentido de que la degradación iría acompañada de un cambio de forma de las unidades estructurales por desmoronamiento y aplanamiento simultáneo; además, la formación de costra y la soldadura de agregados de pequeñas dimensiones también podría ser la responsable de la mayor continuidad a largas distancias. Por tanto, el análisis estructural y el conjunto de semivariogramas teóricos ajustados a los datos experimentales, confirman la importancia de los terrones y agregados de mayores dimensiones como elementos que conforman la estructura del microrrelieve.

Dado que el parámetro alcance está relacionado con las dimensiones de los ajustes de mayores dimensiones y la meseta depende de las diferencias de altura en relación con los valores medios de la misma, se analizó si estos dos parámetros estaban relacionados entre sí. El diagrama de dispersión de los valores de la meseta frente al alcance se presenta en la figura 2 para las superficies de España y de Brasil. En las superficies de España se apreció una correlación significativa ($p > 0,95$) cuando se establece la regresión para las 66 superficies medidas. Sin embargo, en estas superficies, se aprecia una divergencia entre los datos de las superficies aradas por una parte y los de las superficies gradeadas y cultivadas por otra, de modo que el

alcance en función de la meseta tiende a crecer más rápidamente en el segundo grupo; de hecho, el valor máximo de alcance en esta serie de superficies corresponde a algunas de las cultivadas y no a las aradas con vertedera. Cuando se consideran dos grupos de superficies diferentes en España se aprecia una importante dependencia entre los valores de la meseta y el alcance siendo los coeficientes de correlación $R^2 = 0,50$ para el laboreo con arado de vertedera y $0,53$ para los restantes tipos de laboreo.

En las 48 superficies de Brasil no se observó una correlación significativa entre la meseta y el alcance. Este resultado puede ser debido a que si bien la gama de oscilación de valores del alcance era más amplia que en las superficies estudiadas en España, los valores de la meseta oscilaban dentro de un rango muy inferior. Así, en las superficies cuyo microrrelieve se creó por laboreo primario, la meseta más elevada tenía un valor de 530 mm^2 , mientras que en las superficies en las que se efectuó un pase adicional de niveladora esta cifra se limitaba a 215 mm^2 ; en ambos casos, el valor de la meseta es muy inferior al máximo de 1835 mm^2 obtenido en las superficies de España.

Finalmente, se analizó la relación entre el parámetro alcance de los semivariogramas experimentales y la distancia máxima de la porción lineal del semivariograma útil para calcular los índices fractales D_g y l_g . El diagrama de dispersión entre el parámetro alcance y el límite máximo de dependencia lineal se presenta en la figura 3 pudiendo apreciarse que tanto en el caso de la serie de datos tomados en España como en Brasil, la relación entre ambas variables es significativa ($p > 0,95$).

Se comprueba que, en general, al reducirse el alcance del semivariograma tiende a producirse una disminución de la porción lineal del mismo en escala semilogarítmica. Ambos parámetros, alcance y límite máximo de dependencia lineal, deben de depender esencialmente de las características de los terrones de mayores dimensiones. No obstante, dada la dispersión de la relación entre estas dos variables, es posible que el rango de comporta-

miento fractal, que viene dado por la porción lineal del semivariograma representada en coordenadas semilogarítmicas, dependa también de otros factores como pueden ser la susceptibilidad a la degradación de la superficie o el estado de evolución de la misma.

CONCLUSIONES

En la mayor parte de las superficies estudiadas los semivariogramas experimentales de las superficies residuales obtenidas por filtrado no determinista según el método de CURRENCE & LOVELY (1970) alcanzan una meseta estable. No obstante, existen excepciones a este patrón general.

El análisis de la estructura espacial del microrrelieve mediante el uso de técnicas geoestadísticas y fractales permitió poner de manifiesto que las características esenciales de las superficies experimentales dependen de las unidades estructurales de mayores dimensiones.

La red de muestreo utilizada permitió detectar el patrón de dependencia espacial, de modo que se pudieron ajustar semivariogramas sin discontinuidad en el origen a los datos puntuales de altura de las 114 superficies estudiadas. Además, se pudo relacionar el alcance del semivariograma con parámetros obtenidos del análisis fractal como la longitud máxima de la porción lineal del mismo. Se comprobó que la dependencia entre la rugosidad aleatoria y la meseta del semivariograma era de tipo parabólico.

En consecuencia, el análisis estructural y el conjunto de semivariogramas teóricos ajustados a los datos experimentales, confirman la importancia de los terrones y agregados de mayores dimensiones como elementos que conforman la estructura del microrrelieve.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en el marco de los proyectos de investigación de referencia PHB 2003-0043-PC financiado por CAPES (Brasil) y MEC (España) y PGIDT04PXIC10305PN financiado por la Xunta de Galicia.

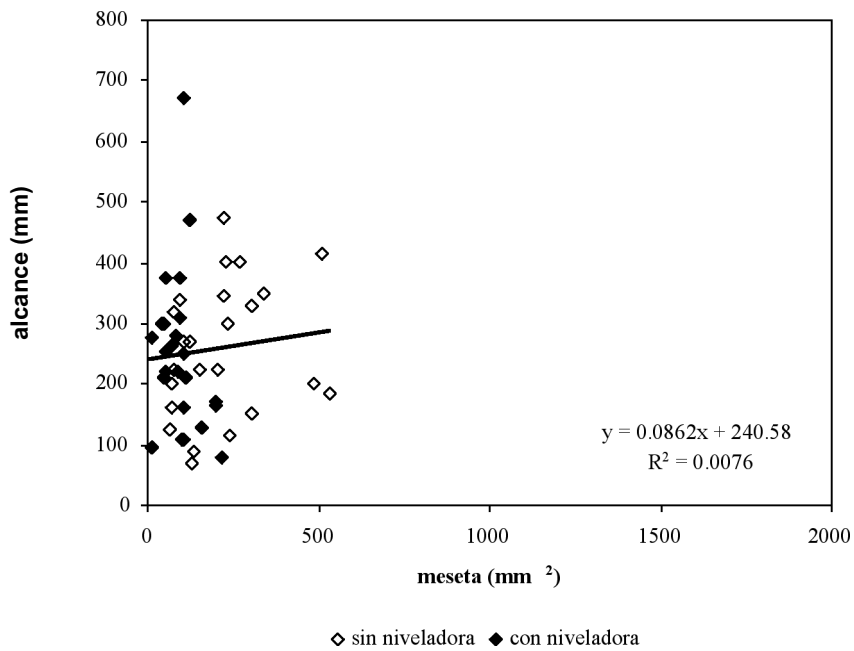
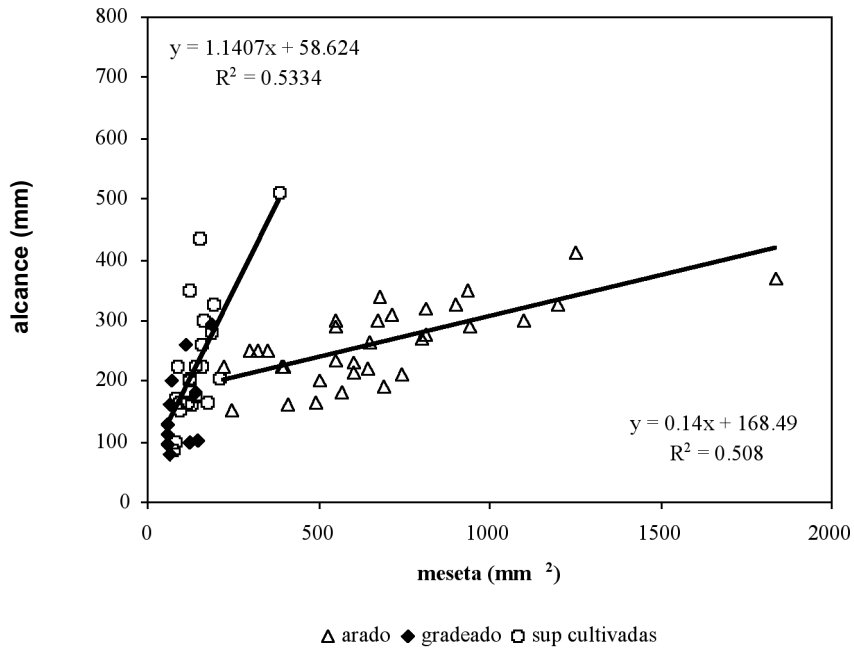


Fig. 2. Relación entre el alcance y la meseta de los modelos de semivariogramas ajustados.

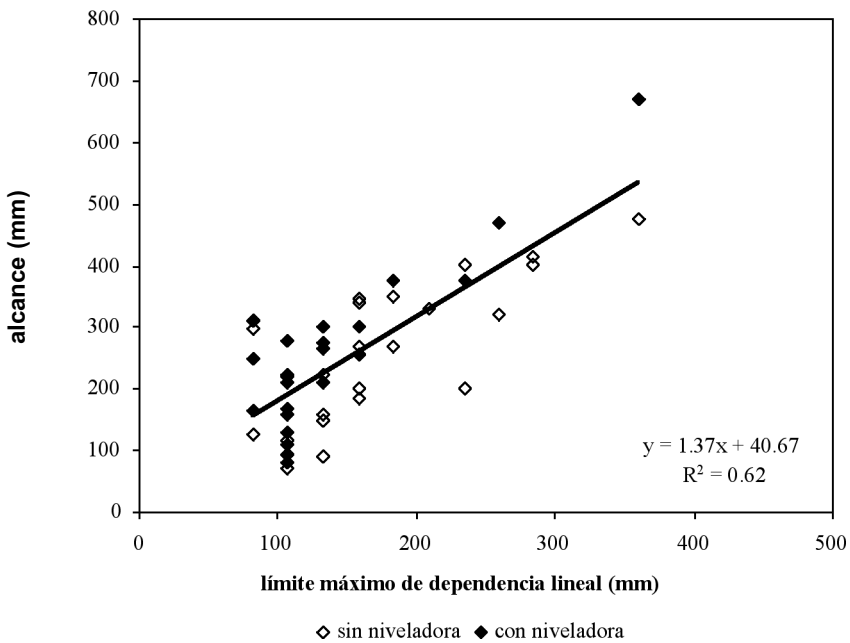
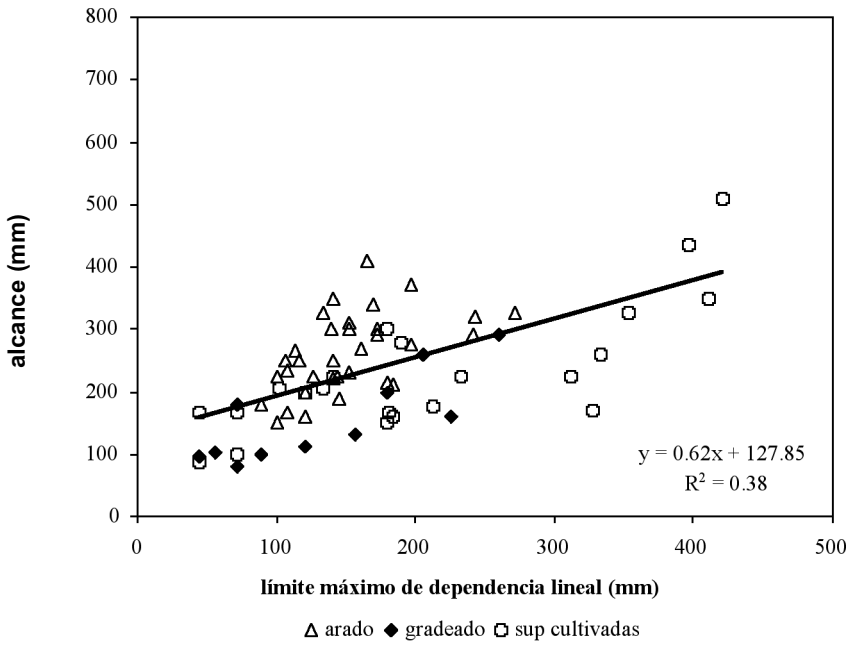


Fig. 3. Relación entre el alcance de los semivariogramas y la escala máxima de comportamiento fractal.

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.
- CACHEIRO POSE, M.; PAZ GONZÁLEZ, A. & VALCÁRCEL ARMESTO, M. (2001). Dependencia espacial de datos topográficos a escala de ladera y pequeña cuenca agrícola. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 26: 191-210.
- 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.
- FERNÁNDEZ RUEDA, M.J. (1997). *Características físicas y mecánicas de suelos de cultivo*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. 283 pp.
- FREEBAIRN, D.M.; GUPTA, S.C.; ONSTAD, C.A. & RAWLS, W.J. (1989). Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 1183-1189.
- FREEBAIRN, D.M.; GUPTA, S.C.; & RAWLS, W.J. (1991). Influence of aggregate size and microrelief on development of surface soil crust. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 188-195.
- GOVERS, G.; TAKKEN, I. & HELMING, K. (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20: 131-146.
- HANSEN, B.; SCHJONNING, P. & SIBBENSEN, E. (1999). Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. *Soil & Tillage Research*, 52: 103-111.
- HELMING, K.; ROTH, Ch.H.; WOLF, R. & DIESTEL, H. (1993). Characterization of rainfall-microrelief interactions with runoff using parameters derived from Digital Elevation Models (DEMs). *Soil Technology*, 6: 273-286.
- 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.
- Le BISSONNAIS, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425-437.
- LEHRSCHE, G.A.; WHISLER, F.D. & RÖMKENS, M.J.M. (1987). Soil surface roughness as influenced by selected soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 10: 197-212.
- 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.
- MOORE, I.D. & LARSON C.L. (1979). Estimating micro-relief surface storage from point data. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 20: 1073-1077.
- ONSTAD, C.A. (1984). Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 27: 729-732.
- PAZ GONZÁLEZ, A. & TABOADA CASTRO, M.T. (1996). Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. En: GRANDAL D'ANGLADE, A. & PAGÈS VALCARLOS, J.L. (Eds.). *IV Reunión de Geomorfología*. A Coruña. pp. 829-841.
- SAMPER, F.J. & CARRERA, J. (1990). *Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. 484 pp.
- THONON, I. & CACHEIRO POSE, M. (2001). Geostatistical interpolation of topographical field data in order to obtain a DEM of a

- small forest catchment in Northwest Spain. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 26: 179-190.
- VALCÁRCEL ARMESTO, M. (1999). *Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo*. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidade de Santiago de Compostela. 266 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. Universidade da Coruña. 430 pp.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. (1983). Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia* 51: 1-75.
- VIVAS MIRANDA, J.G. (2000). *Análisis fractal del microrrelieve del suelo*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. 313 pp.
- WAGNER, L.E. & YIMING YU (1991). Digitization of profile meter photographs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 34(2): 412-416.

Recibido: 02 / 04 / 2007

Aceptado: 24 / 10 / 2007