

## AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN (on line) 1981-0997

v.7, n.4, p.671-679, out.-dez., 2012

Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br

DOI:10.5039/agraria.v7i4a1783

Protocolo 1783 - 05/09/2011 • Aprovado em 17/03/2012

Glécio M. Siqueira<sup>1,4</sup>

Jorge Dafonte Dafonte<sup>2</sup>

Eva Vidal Vázquez<sup>3</sup>

Montserrat Valcarcel Armesto<sup>2</sup>

# Distribuição espacial da rugosidade do solo em microparcelas experimentais sob diferentes intensidades de chuva simulada

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição espacial da rugosidade do solo em microparcelas compostas por diferentes solos de Galicia (Espanha) após aplicação de distintas chuvas simuladas. Os agregados do solo, de 3-5 cm, foram coletados nos municípios de Lugo e Taboada. Em laboratório as parcelas experimentais foram construídas utilizando-se base metálica móvel de 0,86 m x 0,86 m (0,73 m<sup>2</sup>). A rugosidade do solo (dm) foi determinada com rugosímetro laser, antes e depois da aplicação de quantidades crescentes de chuva simulada (50 mm h<sup>-1</sup> e 75 mm h<sup>-1</sup>) durante uma hora. O índice de rugosidade aleatória (RR) cresceu com o aumento do volume de chuva simulada no solo franco (Taboada). Todos os tratamentos estudados apresentaram alta razão de dependência espacial entre amostras (RD) em função do grande número de leituras fornecidas pelo rugosímetro laser, que favorece uma minimização da variabilidade ao acaso.

**Palavras-chave:** geoestatística, manejo do solo, erosão hídrica, agregação do solo

## Spatial distribution of soil roughness in experimental microplots under different intensities of simulated rainfall

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the spatial distribution of soil roughness in microplots composed of different soils in Galicia (Spain) after application of different simulated rainfall. Clusters of 3-5 cm soil were collected in the municipalities of Lugo and Taboada. In the laboratory experimental plots were built using metallic mobile 0.86 m x 0.86 m (0.73 m<sup>2</sup>). The roughness of the soil (dm) was determined with laser reliefmeter before and after application of different amounts of rain (50 mm h<sup>-1</sup> and 75 mm h<sup>-1</sup>) for an hour. The index of random roughness (RR) increased with increasing the volume of simulated rain in loam soil (Taboada). All treatments studied showed a high rate of spatial dependence between samples (RD), depending on the number of readings provided by laser reliefmeter, which favors a minimization of random variability.

**Key words:** geostatistics, soil tillage, water erosion, soil aggregation

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos - CEP: 52171-900, Recife-PE-Brasil. Telefone: (81) 9977-3443. E-mail: gleciosiqueira@hotmail.com

2 Universidad de Santiago de Compostela, Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escola Politécnica Superior, Rua Benigno Ledo, Campus Universitario, 27001, Lugo, Espanha. Fone: 34 982-285-900. E-mail: jorge.dafonte@usc.es; montse.valcarcel@usc.es

3 Universidad Da Coruña, Facultad de Ciências, Departamento de Ciencias da Terra, Campus da Zapateria, 15071, La Coruña, Espanha. Fone: 34 981 167 000. E-mail: evidal@udc.es

4 Bolsista de Desenvolvimento Científico Regional CNPq/FACEPE

## INTRODUÇÃO

A rugosidade superficial do solo é composta por microelevações e microdepressões com determinada distribuição espacial (Allmaras et al., 1966; Bertolani et al., 2000; Vidal Vázquez, 2002). Paz González & Taboada Castro (1996) descrevem a importância da rugosidade superficial do solo para a manutenção e aumento das taxas de infiltração e armazenamento de água no solo, bem como na retenção de sedimento auxiliando, desta maneira, a redução das taxas de erosão.

A intensidade do preparo e a umidade antecedente ao preparo, a quantidade e tipo de resíduo vegetal, o tipo de solo e a declividade do terreno, influenciam a rugosidade superficial (Allmaras et al., 1966; Cogo, 1981; Kamphorst et al., 2000; Schick et al., 2000; Vidal Vázquez, 2002). No tempo, a rugosidade é influenciada pelo volume e pela intensidade das chuvas, pela enxurrada e pelo tipo de solo (Dexter, 1977; Cogo, 1981; Paz González & Taboada Castro, 1996; Eltz & Norton, 1997; Schick et al., 2000; Vidal Vázquez, 2002). Por sua vez, a rugosidade do solo também é influenciada pela estabilidade dos agregados, densidade e porosidade do solo, os quais determinam, em parte, a qualidade da estrutura e regulam a velocidade e seu grau de degradação (Lehrsch et al., 1987).

Com o aumento do volume e intensidade da chuva diminui-se a rugosidade superficial do solo (Cogo, 1981; Eltz & Norton, 1997; Vidal Vázquez, 2002). O solo cultivado exposto às chuvas, recebe a maior parte da energia cinética da precipitação pluvial quebrando os agregados e iniciando o processo de erosão. Com a destruição dos agregados as partículas menores em suspensão penetram e obstruem os poros diminuindo a permeabilidade e formando o selamento superficial, influenciando a infiltração da água no solo e o aumento da rugosidade do solo, por meio da formação de sulcos (Huang & Bradford, 1992; Darboux et al., 2002).

Bertolani et al. (2000) ressaltam a importância do conhecimento da rugosidade superficial e a análise da sua variabilidade espacial, por propiciar o conhecimento de uma série de informações importantes para os modelos matemáticos de perda de solo, que utilizam a evolução da retenção de água em superfície durante distintos episódios de chuva. Desta maneira, o uso da geoestatística favorece o conhecimento e a modelagem da variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo por meio de modelos matemáticos, favorecendo a construção de mapas de isolinhas por meio do processo de interpolação por krigagem ordinária (Cambardella et al., 1994; Bertolani et al., 2000; Vieira, 2000; Siqueira et al., 2008).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a distribuição espacial da rugosidade do solo em microparcelas compostas por diferentes solos de Galícia (Espanha) após aplicação de distintas chuvas simuladas.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado com dois solos da Província de Lugo, Comunidade Autônoma de Galícia (Espanha). Foram coletados, em campo, torrões entre 3 e 5 cm nos municípios de Lugo (43° 01' N e 7° 33' W) e Taboada (42° 72' N e 7° 75' W), para construção, em laboratório, das microparcelas experimentais para medida da rugosidade superficial do solo.

O solo de ambas as áreas é classificado como um Cambissolo Húmico (FAO, 1994) cujas características texturais são apresentadas na Tabela 1, ocorrendo no solo de Taboada um incremento da ordem de 2,2 % nos valores de argila. O material geológico do solo em Lugo é formado por material do período Pré-Cambriaco constituído por xistos pelíticos e gnaisses anfibolíticos (IGME, 1973). O solo em Taboada tem seu material geológico composto por granodioritas precoces com megacristais (IGME, 1978).

O clima da região, segundo Köppen, é do tipo Cs, com precipitação pluvial média anual que oscila entre 1.000 mm e 1.400 mm.

O Cambissolo Húmico textura franco-arenosa (Lugo) vem sendo mantido sob pousio nos últimos anos. No Cambissolo Húmico textura franca (Taboada) o solo vem sendo manejado intensamente com milho (*Zea mays* L.) e batata (*Solanum tuberosum* L.) em anos alternados no verão. No momento da coleta de amostras o solo dessas duas áreas estava arado.

Nas áreas de estudo foram coletados torrões com tamanho entre 3 e 5 cm. Em laboratório as parcelas experimentais foram construídas utilizando-se base metálica móvel de 0,86 x 0,86 m (0,73 m<sup>2</sup>). As parcelas estavam constituídas por uma tela plástica de malha regular de 0,3 mm, sobreposta por uma camada de areia de 2 a 3 cm cuja função é realizar a drenagem da água durante a chuva simulada. A camada de solo sobre a areia contendo os agregados possuía altura entre 4-5 cm aproximadamente. A rugosidade foi medida com um rugosímetro laser (superfície simulada), na superfície antes e após a aplicação de quantidades crescentes de chuva (50 mm h<sup>-1</sup> e 75 mm h<sup>-1</sup>) produzida mediante simulador de chuvas. O rugosímetro laser é composto por um sensor DME 2000 (Sick Ltda.®) que fornece as leituras de uma superfície simulada em decímetros (dm). O simulador de chuva utilizado neste estudo é semelhante ao descrito por Navas et al. (1990). A chuva foi propiciada por quatro aspersores do tipo Fulljet 1/8 CG6SQ, fixos com um jato aproximadamente quadrado garantindo, assim, a sobreposição, recobrimo uma área total de 1,84 m<sup>2</sup>. Os aspersores foram mantidos a 1,80 m acima da superfície do solo. O intervalo de tempo entre os testes de chuva simulada e as leituras da rugosidade superficial, variou entre 6-8 horas; assim, as chuvas foram aplicadas sobre o solo úmido. Desta maneira, cada um dos solos envolvidos neste estudo teve

**Tabela 1.** Composição granulométrica do solo em Lugo e Taboada (Galícia, Espanha)

**Table 1.** Granulometric composition of soil in Lugo and Taboada (Galicia, Spain)

	Argila (%) < 0,002 mm	Silte (%) 0,053-0,002 mm	Areia (%)			Classificação textural
			Total 2,00-0,053 mm	Grossa 2,00-0,21 mm	Fina 0,21-0,053 mm	
Lugo	15,3	27,8	57,0	19,7	37,3	Franco-arenosa
Taboada	17,2	33,2	49,6	33,5	16,1	Franca

sua rugosidade superficial medida em três ocasiões e, mais adiante, os solos de Lugo e Taboada são denominados T1 e T2, respectivamente, seguidos dos algarismos: 00 – situação inicial sem chuva simulada; 50 – chuva simulada de 50 mm h<sup>-1</sup>; 75 – chuva simulada de 75 mm h<sup>-1</sup>.

As leituras da rugosidade do solo foram obtidas em uma área útil de 0,8 m x 0,8 m com espaçamento regular de 5 mm x 5 mm, totalizando 25.600 pontos. O índice de rugosidade ao acaso (RR) foi calculado de acordo com metodologia proposta por Kamphorst et al. (2000) calculado o desvio padrão das alturas ao invés do erro-padrão e se utilizando os dados de altura da superfície do terreno, sem transformá-los para logaritmo e sem eliminar seus valores extremos (Equação 1).

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

onde:

- R - é o índice de rugosidade ao acaso (mm)
- Z<sub>i</sub> - é a altura em cada ponto
- Z - média das alturas
- n - número de pontos medidos

A geoestatística foi empregada para avaliar a dependência espacial da rugosidade superficial; para tanto, utilizou-se o conjunto de softwares Geostat desenvolvido por Vieira et al. (2002) para determinação da variabilidade espacial por meio da modelagem do semivariograma experimental (Equação 2).

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

Na Equação (2),  $\gamma^*(h)$  é semivariância estimada; N(h) representa o número de pares de valores medidos Z(x<sub>i</sub>), Z(x<sub>i</sub> + h) separados por um vetor (h). Na denominação geoestatística Z(x<sub>i</sub>) é descrito como variável regionalizada (Clark, 1979). Desta maneira foi possível determinar os parâmetros de ajuste do semivariograma: efeito pepita (C<sub>0</sub>) representa a descontinuidade entre amostras, ou seja, a variabilidade não detectada durante o processo de amostragem; variância estrutura (C<sub>1</sub>) que descreve até que ponto existe correção entre as amostras e o alcance (a) representa o tamanho máximo das zonas de variabilidade espacial.

A razão de dependência espacial (RD, Equação 3) entre amostras foi determinada conforme procedimento descrito por

Cambardella et al. (1994): 0-25 % alta, 25-75 % média e 75-100 % baixa dependência espacial entre amostras.

$$RD = \left( \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

donde:

- RD - razão de dependência espacial
- C<sub>0</sub> - efeito pepita
- C<sub>1</sub> - variância estrutural

O software Surfer 7.0 (Golden Software, 1999) foi utilizado para construção dos mapas da rugosidade superficial do solo antes e depois do início das chuvas simuladas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os principais parâmetros estatísticos para os dados de rugosidade. Verifica-se que os valores de média (Tabela 2) diminuem com o aumento do volume de chuva simulada (mm h<sup>-1</sup>). Todavia, este comportamento não está bem claro para o solo em Lugo que, ao receber a primeira chuva teve um aumento dos valores de média, voltando a diminuir posteriormente. Este fato pode estar relacionado com uma reorganização dos agregados do solo com o início da chuva.

Verifica-se que os valores de variância e coeficiente de variação (CV) (Tabela 2) são baixos e não variam muito em ambos os tratamentos; trata-se de uma resposta direta do pequeno espaçamento (5 mm x 5 mm) utilizado para a coleta dos dados, fazendo com que a população estudada seja homogênea diminuindo, então, os prováveis erros amostrais, que poderiam contribuir para o aumento desses parâmetros estatísticos.

Carvalho et al. (2002) descrevem que valores de coeficiente de assimetria e curtose (Tabela 2) próximos de 0 e 3 indicam, respectivamente, distribuição de frequência normal para o conjunto de dados. Contudo, pode-se visualizar, na Tabela 2, que ambos os coeficientes de assimetria e curtose para o solo franco-arenoso (Lugo) e franco (Taboada) não satisfazem esta premissa, fato que também é confirmado pelos valores do desvio máximo em relação à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (D) que indica a presença de uma distribuição de frequência lognormal para todos os dados. Isaaks & Srivastava (1989) descrevem que o coeficiente de assimetria é mais sensível à presença de valores extremos que

**Tabela 2.** Parâmetros estatísticos da rugosidade superficial do solo (mm) medida com rugosímetro laser em solos de Lugo e Taboada (Galícia, Espanha)

**Table 2.** Statistical parameters of the soil surface roughness (mm) measured with laser reliefmeter in soils of Lugo and Taboada (Galicia, Spain)

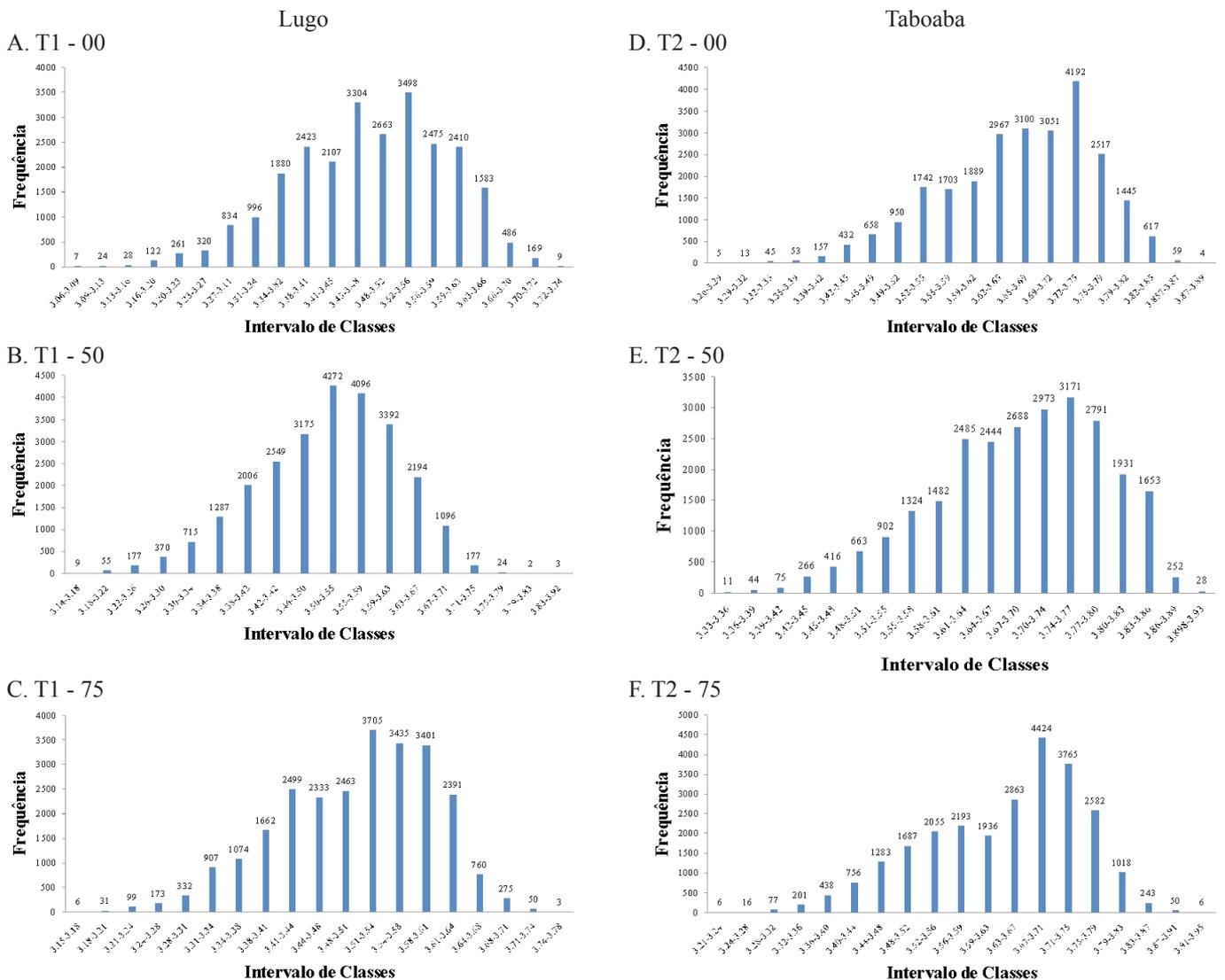
Solo	Tratamento	Média	Max	Min	Variância	CV	Assimetria	Curtose	D
Lugo	T1-00	3,471	3,744	3,056	0,012	0,031	-0,364	-0,241	0,039Ln
	T1-50	3,503	3,921	3,142	0,010	0,029	-0,388	-0,285	0,050Ln
	T1-75	3,495	3,780	3,150	0,009	0,027	-0,470	-0,287	0,068Ln
Taboada	T2-00	3,652	3,886	3,263	0,010	0,027	-0,553	-0,175	0,070Ln
	T2-50	3,652	3,926	3,326	0,010	0,027	-0,502	-0,244	0,061Ln
	T2-75	3,622	3,945	3,208	0,013	0,031	-0,551	-0,293	0,091Ln

Max: valor máximo; Min: valor mínimo; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); D: desvio máximo em relação à distribuição normal com probabilidade de erro de 1 % por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov

a média, mediana e o desvio padrão caso em que a presença de um único valor extremo pode influenciar fortemente o coeficiente de assimetria visto que os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência. Desta forma, a análise dos histogramas de distribuição de frequência (Figura 1) demonstra a presença de alguns poucos valores distanciados da média dos dados. Ressalta-se que o número de valores extremos é pequeno (Figura 1) quando comparado com o tamanho da população amostral que possui 25.600 medidas de rugosidade na superfície do solo, razão pela qual o fato de os dados apresentarem distribuição de frequência lognormal, não compromete a análise dos dados por meio da geoestatística, de vez que a maior parte dos dados está próxima da média, confirmando a homogeneidade da população amostral.

Na Tabela 3 se encontram os valores do índice de rugosidade ao acaso (RR, mm) e os parâmetros de ajuste do semivariograma da rugosidade na superfície do solo. Para o solo franco-arenoso (Lugo) ocorre diminuição do índice

de rugosidade ao acaso (RR) com o aumento do volume da chuva, concordando com Cogo (1981), Paz González & Taboada Castro (1996), Eltz & Norton (1997) e Bertol et al. (2006). Por outra parte, o índice de rugosidade aleatória para o solo franco (Taboada) se mantém estável inicialmente, aumentando na última chuva. Huang & Bradford (1992) e Darboux et al. (2002) descrevem que o processo de erosão hídrica em um primeiro momento contribui para a formação do selamento superficial do solo favorecendo, em um segundo momento, o caminhamento da água sobre o solo aumentando a rugosidade do solo pela formação de sulcos. O disposto anteriormente justifica o aumento da rugosidade do solo franco (Taboada) com o aumento do volume de chuva simulada. Vidal Vazquez et al. (2007) descrevem também que esses dois processos ocorrem juntos e que, em algum momento do processo de erosão hídrica, um é mais dominante que o outro; todavia, sempre com tendência à estabilização.



**Figura 1.** Histogramas de distribuição de frequência da rugosidade superficial para o Cambissolo em Lugo [a) T1-00, b) T1-50 e c) T1-75] e Taboada [d) T2-00, e) T2-50 e f) T2-75] após as distintas chuvas simuladas (0 mm h<sup>-1</sup>, 50 mm h<sup>-1</sup> e 75 mm h<sup>-1</sup>)

**Figure 1.** Histograms of frequency distribution of surface roughness for the Cambisol in Lugo [a) T1-00, b) T1-50 e c) T1-75] and Taboada [d) T2-00, e) T2-50 e f) T2-75] after the different simulated rainfall (0 mm h<sup>-1</sup>, 50 mm h<sup>-1</sup> e 75 mm h<sup>-1</sup>)

**Tabela 3.** Índice de rugosidade ao acaso (RR) e parâmetros de ajuste do semivariograma para a rugosidade superficial do solo de Lugo (T1-00, T1-50 e T1-75) e Taboada (T2-00, T2-50 e T2-75)

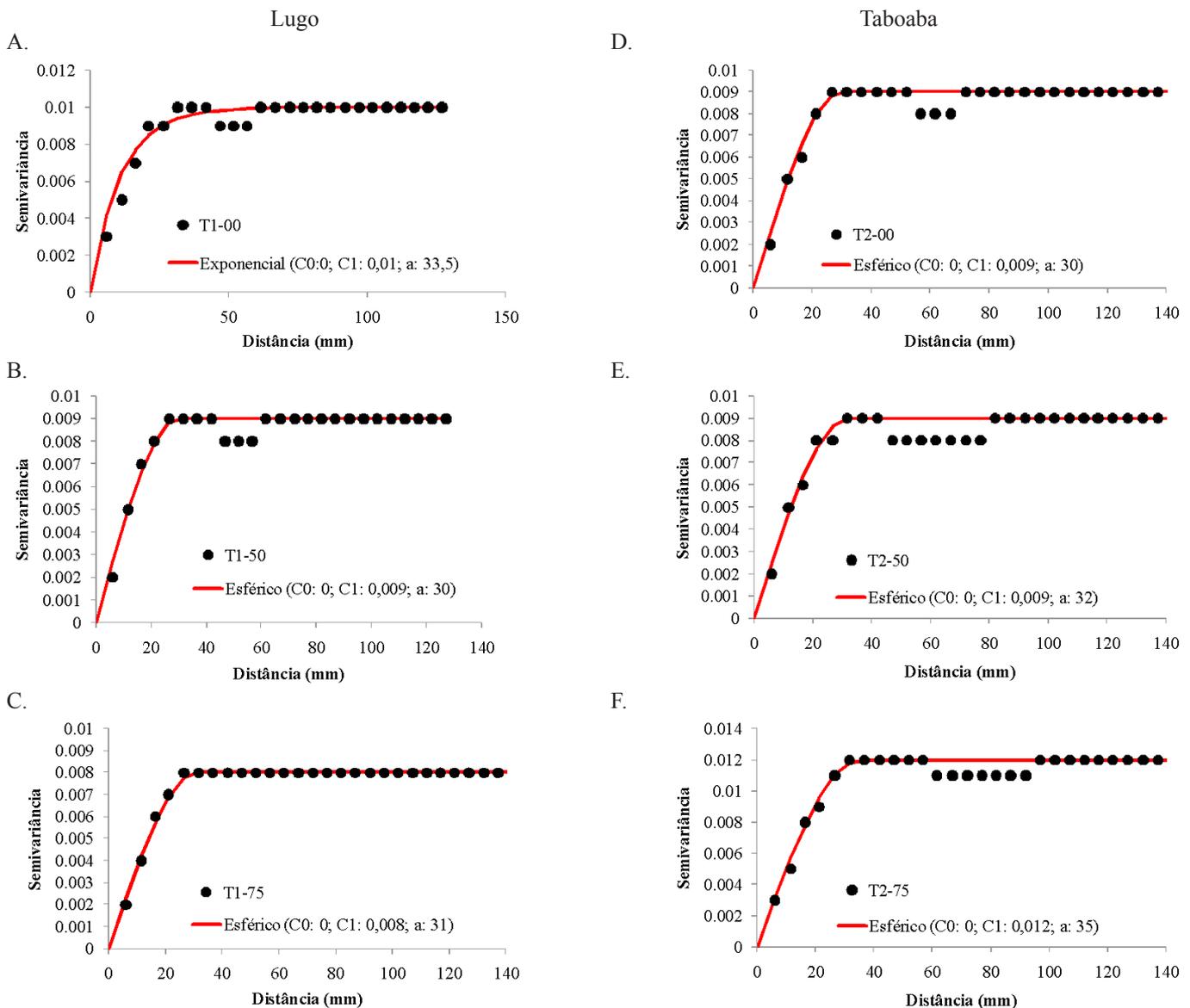
**Table 3.** Random roughness index (RR) and adjustment of the semivariogram parameters for soil surface roughness of Lugo (T1-00, T1-50 e T1-75) and Taboada (T2-00, T2-50 e T2-75)

Solo	Tratamento	RR	Modelo	$C_0$	$C_1$	a	RD
Lugo	T1-00	12	Exponencial	0,00	0,01	33,5	0,00
	T1-50	10	Esférico	0,00	0,009	30,0	0,00
	T1-75	9	Esférico	0,00	0,008	31,0	0,00
Taboada	T2-00	10	Esférico	0,00	0,009	30,0	0,00
	T2-50	10	Esférico	0,00	0,009	32,0	0,00
	T2-75	13	Esférico	0,00	0,012	35,0	0,00

RR: índice de rugosidade ao acaso (mm);  $C_0$ : efeito pepita;  $C_1$ : variância estrutural; a: alcance; RD: razão de dependência espacial entre amostras

Deve-se considerar, por outra parte, que em Taboada o solo possui textura “franca” contendo 17,2 % de argila, cerca de 2 % a mais que o solo de Lugo (15,3 %) e 5,4 % a mais de silte (Tabela 1). A concentração de partículas mais finas neste solo

favorece o entupimento dos poros dificultando a infiltração de água que, por sua vez, caminha por sulcos preferenciais, os quais vão aumento consideravelmente com o aumento da chuva simulada; apesar disto, a persistência da rugosidade no



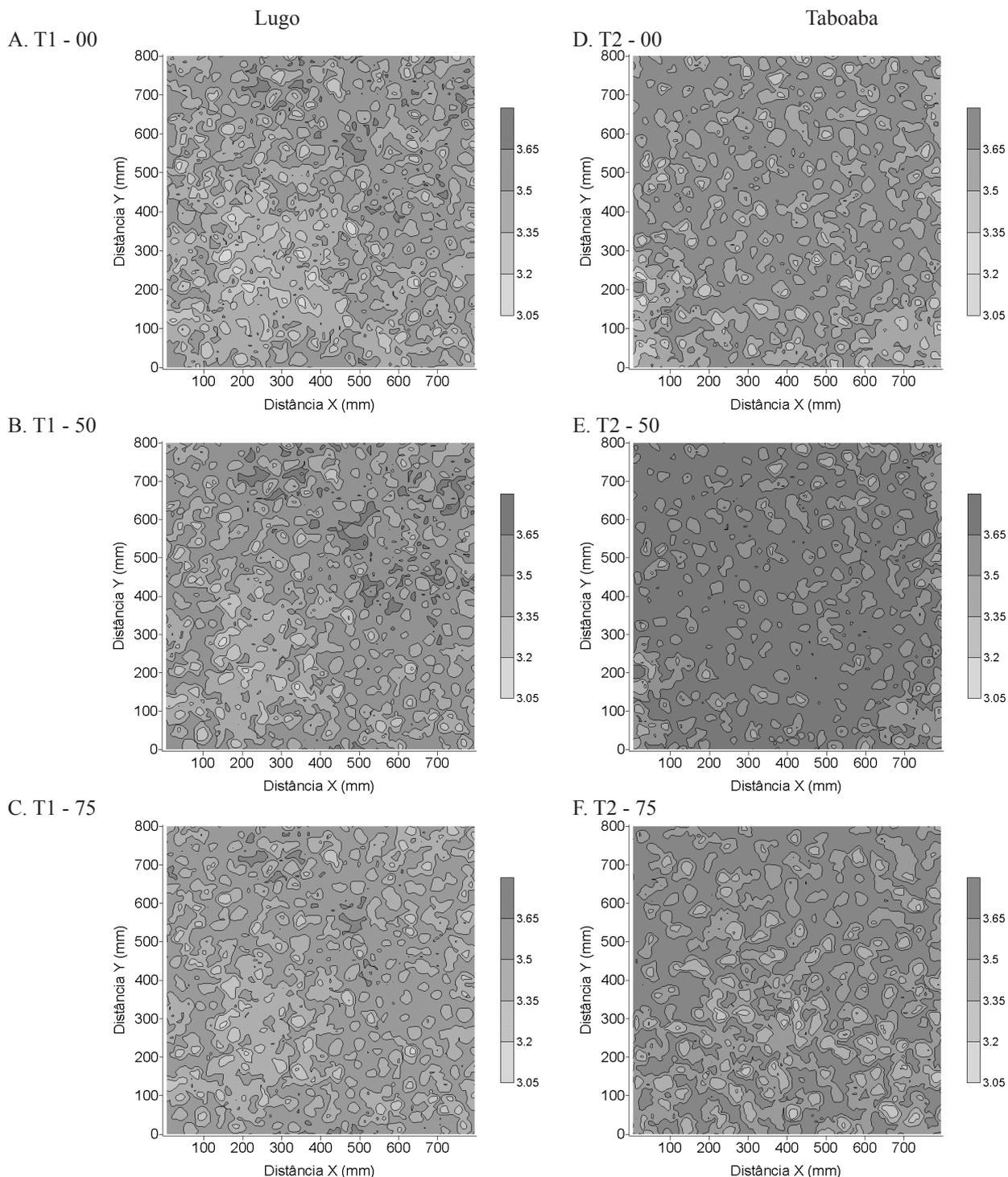
**Figura 2.** Semivariogramas ajustados da rugosidade superficial para todos os tratamentos com os solos de Lugo [a) T1-00, b) T1-50 e c) T1-75] e Taboada [d) T2-00, e) T2-50 e f) T2-75]

**Figure 2.** Adjusted semivariogram surface roughness for all treatments with soils of Lugo [a) T1-00, b) T1-50 e c) T1-75] and Taboada [d) T2-00, e) T2-50 e f) T2-75]

tempo é influenciada pelo volume e intensidade das chuvas, pela enurrada e pelo tipo de solo (Dexter, 1977; Schick et al., 2000; Bertol et al., 2006); neste caso se espera que ocorra uma estabilização do processo de formação de sulcos, com posterior diminuição da rugosidade do superficial do solo em Taboada.

Castro et al. (2006) descrevem que os solos que apresentam microrrelevo mais acentuado e, por conseguinte, maior

rugosidade superficial, possuem melhor capacidade de retenção e de infiltração superficial de água, comparados com os solos de superfície lisa. Volk et al. (2004) ressaltam que o estado de agregação ou de consolidação de um solo aumenta a coesão entre partículas de solo, tornando-o mais compacto e resistente à desagregação. Assim, verifica-se que o maior estado de consolidação dos agregados do solo em Taboada



**Figura 3.** Mapas de rugosidade superficial da superfície simulada do solo antes e depois do início da chuva simulada para o Cambissolo de Lugo [a) T1-00, b) T1-50 e c) T1-75] e Taboada [d) T2-00, e) T2-50 e f) T2-75]

**Figure 3.** Maps of simulated surface roughness of the surface soil before and after the start of simulated rainfall for the Cambisol of Lugo [a) T1-00, b) T1-50 e c) T1-75] and Taboada [d) T2-00, e) T2-50 e f) T2-75]

não é persistente no tempo (Dexter, 1977; Schick et al., 2000; Bertol et al., 2006).

A grande maioria dos atributos estudados ajustou-se ao modelo matemático esférico (Tabela 3) confirmando-o como o que mais se ajusta aos parâmetros de solo e planta (Bertolani et al., 2000; Siqueira et al., 2008). Apenas o semivariograma do primeiro tratamento em Lugo (T1-00) se ajustou ao modelo exponencial. Todos os tratamentos apresentaram baixos valores de efeito pepita ( $C_0$ ). De acordo com Cambardella et al. (1994) o efeito pepita pode referir-se a um erro analítico (variabilidade não explicada) ou ser devido a microvariações não detectadas, em face da distância de amostragem utilizada. Neste sentido, pode-se dizer que o espaçamento utilizado entre os pontos de coleta de dados de rugosidade do solo foi suficiente para detectar todas as microvariações espaciais deste atributo no presente estudo, conforme destacado também por Bertolani et al. (2000).

Os valores de alcance (a, Tabela 3) demonstram que, em todos os tratamentos, o tamanho das zonas de variabilidade espacial está em torno dos 33 mm. Para o solo de Lugo não há um padrão claro do aumento do valor de alcance com a diminuição do índice de rugosidade ao acaso (RR). No entanto, para o solo de Taboada, no qual os valores de RR aumentaram junto com o aumento das chuvas, pode-se dizer que há uma correlação determinada uma vez que ocorre aumento do número de sulcos na parcela experimental com diminuição do tamanho médio dos agregados expostos à chuva simulada. Os valores da razão de dependência espacial (RD) para todos os atributos foi 0,00, indicando haver uma alta dependência espacial entre amostras, em todos os tratamentos estudados.

Na Figura 2 são apresentados os semivariogramas para todos os atributos em estudo. Verifica-se que não existem grandes diferenças na distribuição espacial dos pares de semivariância para os diferentes tratamentos em Lugo (T1-00, T1-50 e T1-75) e Taboada (T2-00, T2-50 e T2-75). Bertolani et al. (2000) também não encontraram, estudando a variabilidade espacial da rugosidade do solo obtida com rugosímetro laser, grandes diferenças entre os semivariogramas justificando que, como as leituras com rugosímetro laser são realizadas em laboratório, existe uma homogeneidade determinada do tamanho de agregados estudados. Pode-se dizer, também, que as maiores diferenças entre os tratamentos são devidas ao decréscimo de rugosidade aleatória (Lugo) ou ao aumento da rugosidade aleatória (Taboada). No semivariograma de T1-00 e T1-50, em Lugo, observam-se, depois dos 30 mm de distância, três pares de semivariância abaixo da linha de ajuste. Contudo, com o aumento da intensidade da chuva os agregados se desfazem favorecendo a estabilização do semivariograma em T1-75. O mesmo fato ocorre em T2-00, T2-50 e T2-75, só que de maneira inversa pois, com o aumento do volume de chuva, prevalece uma tendência de aumento das microdepressões, justificando as maiores diferenças entre os semivariogramas para Taboada.

Na Figura 3 são apresentados os mapas da rugosidade superficial do solo na superfície simulada antes e depois do início das chuvas em Lugo (T1-00, T1-50 e T1-75) e Taboada (T2-00, T2-50 e T2-75).

Verifica-se, para o solo de Lugo que, as zonas de maior rugosidade superficial se encontram na parte superior direita

(T1-00) e diminuem com o aumento do volume das chuvas simuladas sobre as parcelas evidenciando a diminuição do índice de rugosidade aleatória (RR, Tabela 3). Para o solo em Taboada (Figura 3) não há um padrão de comportamento da rugosidade superficial ao acaso (RR) para os distintos tratamentos (T2-00, T2-50 e T2-75). Nota-se que o processo de formação de sulcos em T2-50 ocorre justamente nas zonas onde já se encontravam as maiores microdepressões em T2-00. Todavia, com o aumento do volume de chuva simulada (T2-75) o processo de formação de sulcos se dispersa concentrando-se na parte superior da parcela experimental, ocorrendo um aumento considerável das microdepressões, sobretudo na parte superior direita, corroborando, desta maneira, para o aumento do índice de rugosidade ao acaso (RR).

Conforme descrito anteriormente, o processo de aumento da rugosidade, ocasionado pela dominância do escoamento sob a formação do selo superficial favorece a formação de sulcos e, não ser duradouro, espera-se que, ao longo do tempo, haja diminuição da rugosidade superficial também para o solo de Taboada, conforme descrito por Dexter (1977); Schick et al. (2000), Bertol et al., 2006 e Vidal Vázquez et al. (2007).

## CONCLUSÕES

O índice de rugosidade aleatória (RR) aumentou com o aumento do volume de chuva simulada no solo franco (Taboada) uma vez que neste solo a chuva simulada favoreceu o processo de formação de sulcos enquanto no solo franco-arenoso (Lugo) o índice de rugosidade aleatória (RR) diminuiu com o aumento da chuva.

Todos os tratamentos estudados apresentaram alta razão de dependência espacial entre amostras (RD) em função do grande número de leituras fornecidas pelo rugosímetro laser, que favorece uma minimização da variabilidade ao acaso.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao *Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación* da Espanha (MAEC-AECID) pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor; à *Fundación Carolina* (Espanha) pelo apoio financeiro ao primeiro autor por meio de programa de cooperação e intercambio Brasil-Espanha. Este trabalho foi financiado pelo *Ministerio de Educación y Ciencia* da Espanha através do projeto CGL2005-08219-C02-022 e co-financiado pela *Xunta de Galicia*, por meio do projeto PGIDIT06PXIC291062PN e pela *European Regional Development Fund* (ERDF).

## LITERATURA CITADA

Allmaras, R. R.; Burwell, R. E.; Larson, W. E.; Holt, R. F. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. Washington: Agricultural Research Service/U.S. Department of Agricultural, 1966. 22p. (Conservation Research Report, 7). <<http://www.ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/36221500/cswq-t1914-allmaras.pdf>>. 16 Jun. 2011.

- Bertol, I.; Amaral, A. J.; Vidal Vázquez, E.; Paz González, A.; Barbosa, F. T. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.543-553, 2006. <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v30n3/31219.pdf>>. 13 Ago. 2011. doi:10.1590/S0100-06832006000300014.
- Bertolani, F. C.; Paz González, A.; Lado Liñares, M.; Vidal Vázquez, E.; Miranda, J. G. V. Variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo medida com rugosímetros de agulhas e laser. *Bragantia*, v.59, n.2, p.227-234, 2000. <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v59n2/a15v59n2.pdf>>. 06 Ago. 2011. doi:10.1590/S0006-87052000000200015.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal*, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994. <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/58/5/SS0580051501>>. 28 Jul. 2011. doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.
- Carvalho, J. R. P.; Silveira, P. M.; Vieira, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002. <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v37n8/11675.pdf>>. 07 Ago. 2011. doi:10.1590/S0100-204X2002000800013.
- Castro, L. G.; Cogo, N. P.; Volk, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.339-352, 2006. <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v30n2/a14v30n2.pdf>>. 02 Ago. 2011. doi:10.1590/S0100-06832006000200014.
- Clark, I. *Practical geostatistics*. London: Applied Science Publishers, 1979. 126p.
- Cogo, N. P. Effect of residue cover, tillage-induced roughness and slope length on erosion and related parameters. West Lafayette: Purdue University, 1981, p.344. Tese Doutorado.
- Darboux, F.; Gascuel-Oudoux, C.; Davy, P. Effects of surface water storage by soil roughness on overland-flow generation. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.27, n.3, p.223-233, 2002. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.313/abstract>>. 05 Jul. 2011. doi:10.1002/esp.313.
- Dexter, A. R. Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *Journal of Terramechanics*, v.14, n.1, p.11-22, 1977. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022489877900234>>. 05 Ago. 2011. doi:10.1016/0022-4898(77)90023-4.
- Eltz, F. L. F.; Norton, L. D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage and canopy cover. *Soil Science Society American Journal*, v.61, p.1746-1755, 1997. <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/61/6/SS0610061746>>. 22 Jun. 2011. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100060028x.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. *Soil map of the World. Revised Legend*. Rome: FAO, 1994. 119p. (World soil resources report, 60).
- Golden Software. *Surfer: User's Guide (Versión 7.0)*. Golden: Golden Software, 1999. 679p.
- Huang, C.; Bradford, J. M. Application of a laser scanner to quantify soil microtopography. *Soil Science Society American Journal*, v.56, n.1, p.14-21, 1992. <<https://www.soils.org/publications/sssaj/pdfs/56/1/SS0560010014>>. 22 Jun. 2011. doi:10.2136/sssaj1992.03615995005600010002x.
- Instituto Geológico y Minero de España - IGME. *Mapa Geológico de España 1:50.000. Folhas 72*, 1973. <<http://www.igme.es/internet/default.asp>>. 10 Jun. 2011.
- Instituto Geológico y Minero de España - IGME. *Mapa Geológico de España 1:50.000. Folhas 123*, 1978. <<http://www.igme.es/internet/default.asp>>. 10 Jun. 2011.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University, 1989, 561p.
- Kamphorst, E. C.; Jetten, V.; Guérif, J.; Pitkänen, J.; Iversen, B. V.; Douglas, J. T.; Paz, A. Predicting depressional storage from soil surface roughness. *Soil Science Society American Journal*, v.64, n.5, p.1749-1758, 2000. <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/64/5/1749>>. 15 Jul. 2011. doi:10.2136/sssaj2000.6451749x.
- Lehrsch, G. A.; Whisler, F. D.; Römkens, M. J. M. Soil surface roughness as influenced by selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, v.10, p.197-212, 1987. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167198787900286>>. 11 Jul. 2011. doi:10.1016/0167-1987(87)90028-6.
- Navas, A.; Albeyro, F.; Manchin, J.; Galan, A. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology*, v.3, p.385-397, 1990. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/093336309090019Y>>. 05 Jul. 2011. doi:10.1016/0933-3630(90)90019-Y.
- Paz González, A.; Taboada Castro, M. T. Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. In: *Reunión de Geomorfología*, 1996. A Coruña. Anais... A Coruña: UDC, 1996. p.829-841.
- Schick, J.; Bertol, I.; Batistela, O.; Balbinot Júnior, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminoso submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.427-436, 2000. <<http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v24n2a19.pdf>>. 02 Ago. 2011.
- Siqueira, G. M.; Vieira, S. R.; Ceddia, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*, v.67, n.1, p.203-211, 2008. <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v67n1/a25v67n1.pdf>>. 02. Ago. 2011. doi:10.1590/S0006-87052008000100025.
- Vidal Vázquez, E. Influencia de la precipitación y el laboreo en la rugosidad del suelo y la retención de agua en microdepresiones. A Coruña: Universidade de Coruña, 2002. 430p. Tese Doutorado.
- Vidal Vázquez, E.; Miranda, J. G. V.; Paz González, A. Describing soil surface microrelief by cosser length and fractal dimension. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.14, n.3, p.223-235, 2007. <<http://www.nonlin-processes-geophys.net/14/223/2007/npg-14-223-2007.pdf>>. 22 Jul. 2011. doi:10.5194/npg-14-223-2007.
- Vieira, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: *Novais, R.F., Alvarez, V.H., Schaefer, G.R. (Orgs.). Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p. 1-54.

- Vieira, S. R.; Millete, J.; Topp, G. C.; Reynolds, W. D. Handbook for geoestatistical analysis of variability in soil and climate data. In: Alvarez, V. V. H.; Schaefer, C. E. G. R.; Barros, N. F.; Mello, J. W. V.; Costa, J. M. (Orgs.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.1-45.
- Volk, L. B. S.; Cogo, N. P.; Portz, G.; Rech, J. P. D. Perda de nutrientes por erosão hídrica em solo com e sem cultivo, na condição de semeadura direta. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15., 2004. Santa Maria, Anais... Santa Maria: UFSM, 2004. CD Rom.