

ESTRUTURA DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL ENTRE PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS AO LONGO DE UMA TRANSEÇÃO ESPACIAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO FRAGATA

RODRIGO VALANDRO MAZZARO¹; LUANA NUNES CENTENO²;
LUCIANA MONTEBELLO DE OLIVEIRA³; LEANDRO SANZI AQUINO⁴; SAMUEL
BESKOW⁵; LUÍS CARLOS TIMM⁶

¹Universidade Federal de Pelotas – rvmazzaro@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas - luananunescenteno@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – lumontebello@hotmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – aquino.leandro@ufpel.edu.br

⁵Universidade Federal de Pelotas - samuelbeskow@gmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas - lctimm@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Inicialmente, a variabilidade espacial das propriedades do solo era estudada por meio de ferramentas da estatística clássica, como média, variância e coeficiente de variação, que são calculadas sem considerar a posição das observações no espaço. A intensidade dessa variação em uma área depende das condições ambientais, de como estas atuam sobre as propriedades do solo ao longo do tempo e do manejo adotado no solo (VIEIRA; DECHEN, 2010). No intuito de quantificar e caracterizar essa variabilidade, NIELSEN e WENDROTH (2003) sugerem uma amostragem do solo ao longo de uma transeção e/ou de uma malha.

Uma das funções utilizadas para quantificar a estrutura de variabilidade espacial de uma propriedade do solo medida ao longo de uma transeção espacial é a função de autocorrelação (ACF), que permite quantificar a faixa de dependência espacial entre observações adjacentes de uma dada variável (TIMM et al., 2003; QIAO et al., 2018). De acordo com NIELSEN e WENDROTH (2003), a função de autocorrelação é o principal diagnóstico de medida que indica se existe ou não uma estrutura de dependência espacial entre observações adjacentes da propriedade em estudo. Quando existe o interesse de quantificar a estrutura de dependência espacial entre duas variáveis medidas ao longo da transeção, a função de crosscorrelação (CCF) é a indicada (AQUINO et al., 2015).

As funções ACF e CCF têm sido aplicadas, na maioria das vezes, no estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo em pequenas áreas agrícolas e não em escala de bacia hidrográfica (BH), que tem sido a unidade adotada para o planejamento e gestão de recursos hídricos. Dentre as bacias hidrográficas localizadas no sul do estado do Rio Grande do Sul (RS), a do arroio Fragata (BHAF) se destaca para o desenvolvimento econômico e social da região. A importância econômica e social e a carência de estudos na bacia supracitada merecem atenção de pesquisadores, em especial para estudos relacionados a um melhor entendimento do meio físico.

O objetivo do trabalho foi caracterizar a estrutura de variabilidade espacial de algumas propriedades físico-hídricas do solo e de atributos topográficos, bem como do relacionamento entre eles, ao longo de uma transeção espacial de 15 km estabelecida na bacia hidrográfica do arroio Fragata, seção de controle ponte Passo dos Carros (PPC), por meio das funções ACF e CCF.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da Área

O trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do arroio Fragata (Bhaf), situada no município de Pelotas, Rio Grande do Sul, à montante da seção de controle Ponte Passo dos Carros (Bhaf-PPC). A amostragem do solo foi realizada em 100 pontos, equidistantes de 150m entre si, ao longo de uma transeção de 15 km estabelecida a partir dessa seção de controle.

Em cada ponto, amostras de solo com estrutura deformada e indeformada foram coletadas na camada de 0,00 a 0,20 m de profundidade, sendo determinadas as seguintes propriedades físico-hídricas do solo, utilizando as metodologias citadas: frações Areia, Silte e Argila (GEE; BAUDER, 1986), teor de Carbono Orgânico (TEDESCO et al., 1995), Densidade do solo (Ds), Macro (MA) e Microporosidade (MI) (EMBRAPA, 1997) e Condutividade Hidráulica do Solo Saturado (Ksat) pelo método do permeâmetro de carga constante (LIBARDI, 2005).

Com relação ao relevo, foram extraídas informações da base cartográfica de HASENACK e WEBER (2010), na escala de 1:50.000. Foram utilizados desta base os planos de informação como dados no software SIG-ArcGIS, sendo estes: curvas de nível e pontos cotados e hidrografia vetorizada. O MDE gerado foi corrigido, usando a ferramenta *Fill*, permitindo assim a elaboração de um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC), para obtenção da Elevação.

A estrutura de dependência espacial de cada variável foi quantificada por meio da função covariância (equação 1) e de autocorrelação (equação 2):

$$C(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}] [x_{i+j} - \bar{x}] \quad (1)$$

$$r(j) = \frac{C(j)}{C(0)} \quad (2)$$

onde: C(j) = valor da função covariância em função de j, \bar{x} = média de cada conjunto de dados, n = número de pares usados no cálculo de C para cada valor de j, r(j) = coeficiente de autocorrelação entre observações adjacentes da variável em função de j, e C(0) = variância amostral do conjunto de dados. A faixa de significância de r(j) foi calculada pela seguinte equação:

$$IC \cong \pm \frac{p}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

onde: IC = intervalo de confiança para os valores de r(j), p = probabilidade cumulativa pelo teste t a 95% probabilidade (p = 1,96 neste caso) e n = número de pontos amostrados (100 neste estudo). Para avaliar a estrutura de dependência espacial entre duas variáveis, a função crosscorrelação foi calculada conforme a seguir:

$$r_c(j) = \frac{C(x_i, y_{i+j})}{S_x \cdot S_y} \quad (4)$$

Em que: $r_c(j)$ = coeficiente de crosscorrelação entre observações das variáveis x e y em função de j, C(x_i, y_{i+j}) = covariância entre as variáveis x e y em função de j, S_x e S_y = desvios padrão dos conjuntos de dados de x e y, respectivamente. O IC para os valores de $r_c(j)$ também foi calculado pela equação 4.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O maior alcance da faixa de dependência espacial ao longo da transeção foi encontrado para as observações adjacentes da variável Elevação (mais de 9 lags, i.e., mais de 1350 m), enquanto que o menor foi para as variáveis Ksat, Argila, Macro e Ds (Alcance = 300m; $r(j) > 0,196$) (Tabela 1). Já as observações adjacentes das variáveis CO, Areia, Silte e Micro não apresentaram uma estrutura de dependência espacial, ou seja, são independentes entre si na escala estudada.

Tabela 1 – Valores de autocorrelação em função do número de lags j (1 lag = 150 m) para as propriedades do solo e atributos topográficos avaliados ao longo da transeção espacial de 15 km

Lags	Ksat	Elev	CO	AG	AR	S	MA	MI	Ds
1	0,287	0,938	0,185	0,218	-0,037	-0,014	0,308	0,060	0,204
2	0,221	0,850	0,265	0,286	0,016	0,066	0,328	0,263	0,252
3	0,119	0,763	0,220	0,136	-0,019	0,090	0,135	-0,016	0,167
4	0,195	0,676	0,096	0,208	-0,012	-0,036	0,216	0,011	0,098
5	0,333	0,591	0,132	0,137	-0,048	0,037	0,269	0,003	0,051
6	0,370	0,531	0,062	0,166	-0,006	0,086	0,312	-0,040	0,123
7	0,061	0,517	0,117	0,205	0,180	0,023	0,116	0,178	0,158
8	0,127	0,523	0,142	0,159	0,055	0,102	0,071	0,041	0,093
9	0,130	0,529	0,137	0,143	0,204	0,197	0,117	0,168	0,120

Ksat= Condutividade Hidráulica do Solo Saturado (cm.dia^{-1}), Elev= Elevação (m), CO= Teor de Carbono Orgânico (%), AG= Argila (%), AR= Areia (%), S= Silte (%), MA= Macroporosidade (%), MI= Microporosidade (%), Ds= Densidade do Solo (g.cm^{-3}).

As variáveis elevação, macroporosidade e densidade do solo apresentaram uma estrutura de dependência espacial com Ksat ao longo da transeção espacial de 15 km na BHAFF-PPC (Tabela 2). Do ponto de vista físico, era esperado uma estrutura de dependência espacial entre Ksat e Macro e entre Ksat e Ds já que tem sido bastante documentado na literatura que existe uma relação inversa entre Ksat e macroporosidade e Ksat e densidade de um solo.

Tabela 2 - Valores do coeficiente de crosscorrelação em função do número de lags j (1 lag = 150 m) para as propriedades do solo e atributos topográficos, com a Ksat, avaliados ao longo da transeção espacial de 15 km

Lags	Elev	CO	AG	AR	S	MA	MI	Ds
-10	0,165	0,298	0,15475	-0,156	0,089	0,220	0,046	-0,290
-9	0,201	0,217	0,073364	-0,059	0,022	0,204	-0,069	-0,173
-8	0,196	0,155	0,010925	0,022	-0,039	0,207	-0,042	-0,201
-7	0,209	0,113	-0,04219	-0,015	0,055	0,253	-0,154	-0,158
-6	0,184	0,132	0,170279	-0,016	-0,113	0,325	-0,130	-0,160
-5	0,221	0,134	0,189653	-0,031	-0,109	0,331	-0,105	-0,283
-4	0,247	0,181	0,200767	-0,077	-0,054	0,247	0,036	-0,245
-3	0,288	0,121	0,134421	-0,035	-0,059	0,178	-0,023	-0,191
-2	0,302	0,235	0,195466	-0,083	-0,044	0,374	-0,122	-0,259
-1	0,333	0,226	0,242835	-0,181	0,054	0,335	-0,094	-0,236
0	0,379	0,083	0,100936	0,270	-0,449	0,831	-0,493	-0,331
1	0,393	0,170	0,192472	-0,044	-0,094	0,298	-0,095	-0,227
2	0,392	0,140	0,250568	-0,090	-0,077	0,351	-0,174	-0,203
3	0,387	0,129	0,229081	-0,102	-0,043	0,187	0,017	-0,182
4	0,411	0,217	0,372228	-0,150	-0,092	0,261	0,000	-0,280
5	0,428	0,110	0,260184	-0,070	-0,112	0,308	-0,112	-0,221
6	0,454	0,216	0,297035	-0,030	-0,195	0,375	-0,070	-0,292
7	0,430	0,253	0,326534	-0,148	-0,059	0,125	-0,066	-0,076
8	0,467	0,068	0,275143	-0,112	-0,067	0,210	-0,083	-0,056
9	0,475	-0,016	0,222024	0,147	-0,378	0,227	-0,235	0,035
10	0,437	-0,020	0,219525	0,022	-0,206	0,120	-0,148	0,012

4. CONCLUSÕES

A variável condutividade hidráulica do solo saturado apresenta uma estrutura de autocorrelação na escala avaliada e possui uma estrutura de crosscorrelação espacial com as propriedades do solo macroporosidade e densidade do solo e com o atributo topográfico elevação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, L. S., TIMM, L.C., REICHARDT, K., BARBOSA, E.P., PARFITT, J.M.B., NEBEL, A.L.C., PENNING, L.H. State-space approach to evaluate effects of land levelling on the spatial relationships of soil properties of a lowland area. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 135-147, 2014.

DUAN, L., HUANG, M., ZHANG, L. Use of a state-space approach to predict soil water storage at the hillslope scale on the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 137, p.563-571, 2016.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 212 p., 1997.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size Analysis. In: PAGE, A.L. (ed.). Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods. Second Edition, Agronomy, p. 383 – 411, 1986.

HASENACK, H.; WEBER, E.(org.) Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). **ISBN 978-85-63483-00-5** (livreto) e **ISBN 978-85-63843-01-2** (DVD).

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.
NIELSEN, Donald R.; WENDROTH, Ole. **Spatial and Temporal Statistics: Sampling Field Soils and their Vegetation**. Catena Verlag, Reiskirchen, 2003. 398 p.

QIAO, J., ZHU, Y., JIA, X., HUANG, L., SHAO, M. Estimating the spatial relationships between soil hydraulic properties and soil physical properties in the critical zone (0–100 m) on the Loess Plateau, China: A state-space modeling approach. **Catena**, v. 160, p. 385-393, 2018.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed., (Boletim Técnico, 5), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 147 p., 1995.

TIMM, L. C., REICHARDT, K., OLIVEIRA, J. C. M., CASSARO, F. A. M., TOMINAGA, T. T., BACCHI, O. O. S., DOURADO-NETO, D. Sugarcane production evaluated by the state-space approach. **Journal of Hydrology**, v. 272, p. 226 – 237, 2003.

VIEIRA, S. R., DECHEN, S. C. F. Spatial variability studies in São Paulo, Brazil along the last twenty five years. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 53 - 66, 2010.