

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DA CONDUTIVIDADE HIDRAULICA DO SOLO SATURADO EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

MAURICIO FORNALSKI SOARES¹; CARLOS ROGERIO DE MELLO²; ANGELO GARCIA COSTA³; JULIANE BORBA DE COUTO⁴; THIAGO RODRIGUES DA ROSA⁵ LUÍS CARLOS TIMM⁶

¹Universidade Federal de Pelotas – mauriciofornalski@gmail.com

²Universidade Federal de Lavras – crmello@ufla.com

³Universidade Federal Pelotas – costagarciaangelo@gmail.com

⁴Universidade Federal Pelotas – jubleane@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – thiagorodrigues2000@outlook.com.br

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

1. INTRODUÇÃO

A heterogeneidade do uso do solo em bacias hidrográficas é uma característica fundamental a ser considerada em estudos hidrológicos uma vez que esta intensifica a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), atributo utilizado como dado de entrada em diversos modelos hidrológicos (SOARES et al., 2020). Diferentes coberturas e usos exercem grande influência nas propriedades relacionadas à dinâmica da água no solo (CENTENO et al., 2020). A krigagem ordinária é um dos principais métodos de interpolação espacial geoestatística utilizada em estudos hidrológicos para mapear atributos físico-hídricos do solo com boa precisão, gerando mapas com estimativas não tendenciosas e variância mínima de estimação em locais não amostrados. Para isto, é essencial que a modelagem da continuidade espacial seja consistente (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Devido à sensibilidade do estimador de semivariâncias clássico de Matheron em séries de dados que não seguem uma distribuição normal ou que apresentam *outliers*, condição frequente em series de dados espaciais de atributos do solo, Cressie e Hawkins (1980) propuseram um estimador mais robusto. Este estimador remove o quadrado presente nos incrementos do estimador de Matheron. Os autores partem do princípio de que raiz quadrada diminui a contaminação por valores discrepantes (CRESSIE; HAWKINS, 1980). Este estimador foi concebido a partir da ideia de que o denominador representa uma correção fundamentada na hipótese do processo base a ser estimado possuir diferenças normalmente distribuídas sobre todos os *lags* (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Outro estimador de semivariâncias robusto é conhecido como estimador de Pairwise, sendo um estimador de variância relativo. Para reduzir o impacto de alguma eventual discrepância expressiva na diferença $[Z(s+h) - Z(s)]$ do estimador clássico de Matheron (que será acentuada ao ser elevada ao quadrado), o quadrado dessa diferença é dividido pelo quadrado da média local dos valores. O estimador de Pairwise contribui para produzir uma melhor visualização da continuidade espacial. Esse estimador é caracterizado por diminuir o efeito de dados discrepantes em series espaciais (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Este trabalho teve como objetivo caracterizar a distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado de duas bacias hidrográficas localizadas nos estados do Rio Grande do Sul e Minas Gerais via krigagem ordinária, e avaliar o desempenho dos estimadores robustos de Cressie e Hawkins e Pairwise para construção dos semivariogramas.

2. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido nas bacias hidrográficas Sanga Ellert (BHSE) localizada no município de Canguçu-RS compreendendo uma área de drenagem de aproximadamente 66 ha, e do ribeirão Lavrinha (BHRL), localizada no município de Bocaina de Minas-MG, na região da Serra da Mantiqueira, com área de aproximadamente 687 ha. A BHSE é regionalmente estratégica e deságua diretamente no Arroio Pelotas, fornecendo água potável para a população de Pelotas com cerca de 329 mil habitantes (BESKOW et al. 2016). A BHRL desagua diretamente no Rio Grande, principal formador do Reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, MG. Esta área é representativa da região da Serra da Mantiqueira, sendo caracterizada como uma bacia hidrográfica de cabeceira.

Na BHSE foram estabelecidos 184 pontos amostrais em toda a área da bacia dispostos em uma malha regular com 106 pontos e um adensamento com mais 78 pontos. Na BHRL foram amostrados pontos com coordenadas conhecidas dispostos em malhas e transeções somando ao todo 200 pontos. Na BHSE, em cada ponto amostral, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada na camada de 0-0,20m para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. Na BHRL a K_{sat} foi levantada em condições de campo, utilizando um infiltrômetro de disco tipo Mariotti com carga constante.

Após estabelecimento do banco de dados da K_{sat} e análise estatística exploratória das duas bacias, os semivariogramas foram calculados a partir dos estimadores de Cressie e Hawkins e Pairwise. A partir dos parâmetros dos modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais, a interpolação da K_{sat} nas bacias foi realizada por krigagem ordinária. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R versão 4.0.2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados na tabela 1 mostram que a K_{sat} apresenta um elevado coeficiente de variação para as duas bacias, o que é amplamente relatado na literatura (SOARES et al. 2020, CENTENO et al. 2020). Também para as duas bacias, os valores de média e mediana estão distantes entre si, indicando uma forte assimetria para os dois conjuntos de dados. A distribuição de frequência das bacias BHRL e BHSE seguiu uma distribuição não normal de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov (P -valor < 0.05).

Tabela 1. Estatísticas descritivas da K_{sat} e parâmetros dos semivariogramas

Bacia	\bar{X}	Med.	CV%	KS	a	C_0+c	Est.
BHRL	68,8	39,6	183	0,0	516,3	0,83	Pairwise
BHSE	80,5	53,0	99	0,0	178,8	0,73	Cressie Hawkins

\bar{X} : média; Med.: mediana; CV%: coeficiente de variação; KS: Teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov (p -valor); a : alcance; C_0+c : patamar; Est.: estimador de semivariância.

A análise de dependência espacial da K_{sat} para a BHRL demonstrou uma estrutura de dependência espacial definida, quantificada mediante a construção do semivariograma robusto de Pairwise com um excelente ajuste do modelo exponencial. O alcance de 516m demonstra uma boa dependência espacial demonstrando a capacidade do estimador de semivariâncias proposto abranger

diversos *lags* na malha amostral. Já para a BHSE, o estimador de Cressie e Hawkins obteve um desempenho superior e o valor do patamar próximo ao valor da variância dos dados demonstra um ajuste do modelo exponencial satisfatório. O alcance do semivariograma também demonstrou que o estimador captou diversos *lags* para a malha amostral estabelecida na área da BHSE.

Os mapas de K_{Sat} (Fig1) para as bacias BHRL e BHSE foram interpolados por krigagem ordinária e demonstram um padrão semelhante quanto às regiões de maior e menor condutividade. Para ambas as bacias ficou demonstrado que áreas de mata nativa e próximo aos cursos d'água apresentaram valores mais elevados de K_{Sat} , enquanto áreas de pastagens apresentaram menores valores. Vários estudos relatam que a K_{Sat} é mais elevada em áreas de mata nativa em comparação com pastagens e áreas agrícolas (SOARES et al., 2020, GODOY et al. 2018; CENTENO et al., 2020). Isto se deve ao fato de que áreas de mata apresentam maior macroporosidade, menor densidade do solo e maior acúmulo de matéria orgânica, promovendo uma estruturação do solo mais efetiva. Fenômeno oposto é observado em áreas utilizadas na agropecuária, devido principalmente ao uso excessivo do solo, mecanização intensiva, pisoteio animal e outros fatores que comprometem o qualidade física dos solos, afetando especialmente a estrutura do solo.

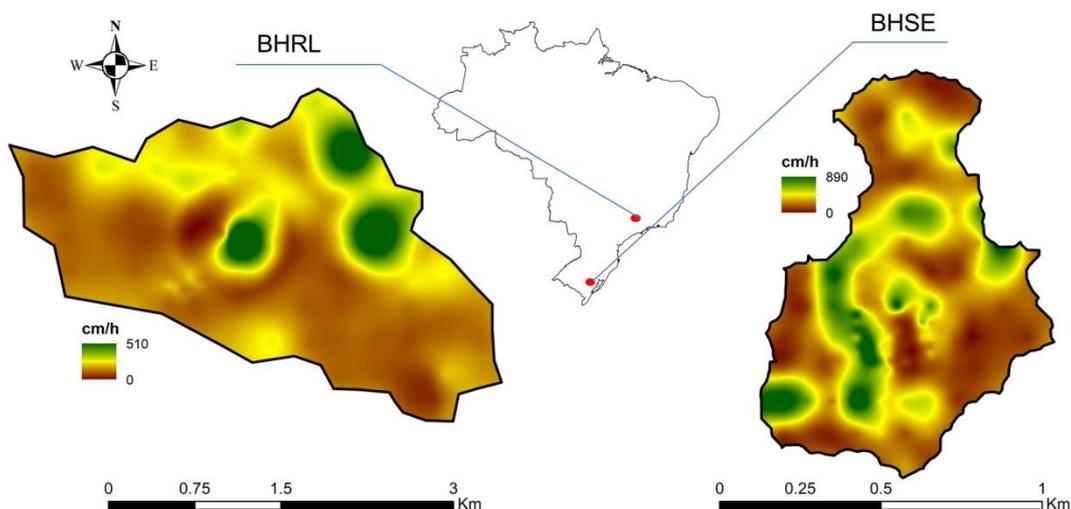


Figura 1 – Mapas da condutividade hidráulica do solo saturado nas bacia hidrográficas do Ribeirão Lavrinha e da Sanga Ellert

4. CONCLUSÕES

Com o emprego de ferramentas geoestatísticas foi possível caracterizar e quantificar a estrutura de dependência espacial da condutividade hidráulica do solo saturado para as bacias hidrográficas do Ribeirão Lavrinha e da Sanga Ellert. Os semivariogramas robustos de Pairwise e Cressie Hawkins foram eficientes para estimar a distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturada nas áreas das bacias hidrográficas avaliadas no presente trabalho.

Ambas as bacias hidrográficas demonstraram um padrão semelhante de ocorrência de menor e maior condutividade hidráulica do solo. Conclui-se também

que características semelhantes compartilhadas entre as bacias, como uso e ocupação do solo, tipos de solo e perfil topográfico são os fatores chaves para a distribuição espacial e variabilidade da condutividade hidráulica do solo saturado em escala de bacia hidrográfica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BESKOW, S.; MELLO, C.R.; VARGAS, M.M.; CORREA, L.L.; CALDEIRA, T.L.; DURÃES, M.F.; AGUIAR, M.S. . Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q90 under Brazilian conditions. **Journal Of Hydrology**, v.541, p.1406-1419, 2016.

CENTENO, L.N; TIMM, L.C; REICHARDT, K.; BESKOW, S.; CALDEIRA, T.L.; OLIVEIRA, L.M.; WENDROTH, O. Identifying regionalized co-variate driving factors to assess spatial distributions of saturated soil hydraulic conductivity using multivariate and state-space analyses. **Catena**. v.191, p.104583-104590, 2020.

CRESSIE, N.; HAWKINS, D.M. Robust estimation of the variogram: I. **Journal Of The International Association For Mathematical Geology**, v.12, n.2, p.115-125, 1980.

GODOY V.A., ZUQUETTE L.V., GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J.J. Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties. **Geoderma** v.339, p.59-69, 2019

SOARES, M.F.; CENTENO, L.N.; TIMM, L.C; MELLO, C.R.; KAISER, D.R; BESKOW, S. Identifying Covariates to Assess the Spatial Variability of Saturated Soil Hydraulic Conductivity Using Robust Cokriging at the Watershed Scale. **Journal Of Soil Science And Plant Nutrition**, v.20, n.3, p.1491-1502, 2020.

WEBSTER, R; OLIVER, MA.. **Geostatistics for Environmental Scientists**. Reading-UK: Statistics In Practice, 2007. 2ed.