



## MAPEAMENTO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM ESCALA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS POR MEIO DA SIMULAÇÃO SEQUENCIAL GAUSSIANA

Rodrigo César de Vasconcelos dos Santos<sup>1</sup>

Bruno Philippe Emídio da Silva<sup>2</sup>

Elisangela de Araujo<sup>3</sup>

Rômulo Amaral Faustino Magri<sup>4</sup>

Elias de Sá Farias<sup>5</sup>

Alisson Souza de Oliveira<sup>6</sup>

### Recursos Hídricos e Qualidade da Água

#### *Resumo*

The saturated hydraulic conductivity (Ksat) is a hydro-physical property of the soil that is of great importance for studies related to soil and water management in agriculture and the environment. In this context, the objective of this study was to simulate the spatial variability of Ksat using the Sequential Gaussian Simulation (SGS) for the Marcela Stream Watershed (MSW), located in the municipality of Nazareno - MG. The soil samples were collected from the 0 to 15 cm layer, following grids of 240 x 240 m and 60 x 60 m, totaling 165 sampled points. For the analysis of the spatial variability of Ksat, descriptive statistics were performed, and subsequently, the Sequential Gaussian Simulation (SGS) was applied. For this purpose, variography parameters were defined, and the SGS method was used to generate 100 equiprobable random fields. The results showed that Ksat in the MSW is heterogeneous, possibly due to the soil type, land use, density, and texture. The criteria for validating the SGS were met, and they helped describe the spatial continuity of Ksat in the MSW. Thus, SGS proved to be an effective tool for understanding the magnitude and structure of the spatial variability of Ksat at the watershed scale, providing valuable insights for proper soil and water management in the MSW.

**Palavras-chave:** Simulação Geoestatística; Variabilidade espacial dos solos; Campos aleatórios.

---

<sup>1</sup>Prof. Dr. Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, [rodrigo.santos@uemg.br](mailto:rodrigo.santos@uemg.br)

<sup>2</sup> Discente do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, [bruno.2140298@discente.uemg.br](mailto:bruno.2140298@discente.uemg.br)

<sup>3</sup> Discente do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, [elisangela.2197321@discente.uemg.br](mailto:elisangela.2197321@discente.uemg.br)

<sup>4</sup> Prof. Dr. Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, [romulo.magri@uemg.br](mailto:romulo.magri@uemg.br)

<sup>5</sup> Prof. Dr. Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, [elias.farias@uemg.br](mailto:elias.farias@uemg.br)

<sup>6</sup> Prof. Dr. Universidade Federal de Uberlândia – UFU, [alissonso@hotmail.com](mailto:alissonso@hotmail.com)



## INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) é uma propriedade físico-hídrica do solo de grande relevância para estudos no que se refere ao manejo do solo e da água relacionados à agricultura e ao meio ambiente. Portanto, é essencial mapear e monitorar com precisão a  $K_{sat}$  para uma gestão eficiente dos recursos do solo e da água e assim melhorar a sustentabilidade agrícola, bem como evitar impactos ambientais em escala de bacias hidrográficas.

Porém, a obtenção de valores representativos da  $K_{sat}$  não é uma tarefa fácil, dada a sua grande variabilidade espacial e a demanda de tempo e recursos de amostragem para uma boa caracterização da área analisada. Nesse sentido, a utilização da geoestatística, através da simulação estocástica como ferramenta para obter informações onde não foi possível realizar observações permite um melhor entendimento da heterogeneidade dos solos, facilita a análise da conectividade espacial dos mesmos e fornece uma visão espacial da realidade, culminando na diminuição dos custos de amostragens e análises, especialmente em se tratando da análise de grandes áreas.

Dentre as diversas técnicas de simulação geoestatística, a simulação sequencial gaussiana tem-se mostrado promissora e utilizada para reproduzir a conectividade espacial de atributos do solo, bem como servir de ferramenta para a análise de incertezas dos valores simulados (HU et al. 2007; TEIXEIRA et al. 2011; MELO 2015; SANTOS et al. 2021).

Diante do exposto, este trabalho objetivou simular a variabilidade espacial da  $K_{sat}$  por meio da SSG para a BHRM, situada em Minas Gerais.

## METODOLOGIA

A bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela localiza-se no município de Nazareno – MG entre as coordenadas UTM "550169" e "552810" de longitude W e "7650163" e "7650989" de latitude S, cuja altitude varia entre 960 e 1.060 m. Compreende a unidade geomorfológica Planalto Campos das Vertentes, inserida na região hidrográfica do Alto Rio Grande. É representada pelos ambientes associados ao Latossolo na região Alto Rio

Realização





Grande, segundo Motta et al. 2001.

Ocorre a predominância do relevo suave ondulado a ondulado e clima Cwa segundo classificação de Köppen. Sua área de drenagem é de 477 ha, cuja drenagem esco diretamente para o Ribeirão Jaguará, que por sua vez, drena para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, evidenciando a importância da bacia na contribuição de vazão para o reservatório. As unidades pedológicas predominantes na bacia são: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), ocupando 65 % da área; Latossolo Vermelho distrófico típico (LEd), em 14 % da área; Cambissolos (C), em menos de 5 %; e Solos Hidromórficos (Hi), em 17 % da área da bacia (MELLO et al. 2007).

As amostras de solos foram coletadas na camada de 0 a 15 cm, obedecendo aos grids de 240 x 240 m e 60 x 60 m, totalizando 165 pontos amostrados, conforme a Figura 1.

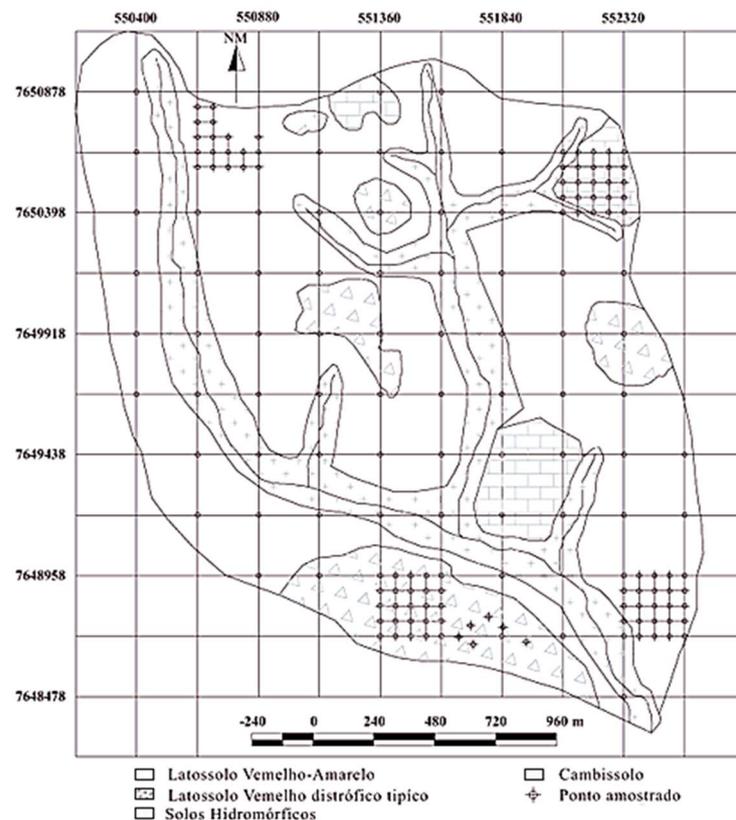


Figura 1. Unidades pedológicas presentes na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela e esquema de amostragem sistemática utilizada nos trabalhos de campo

Fonte: Mello et al. (2007).

Realização



Para avaliar a condutividade hidráulica do solo saturado foram coletadas amostras indeformadas de solo com amostrador de Uhland. Foram utilizados cilindros de alumínio cujas dimensões foram: 5 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro. Para a determinação da Ksat foi utilizado o Permeâmetro de Carga Constante, como o desenvolvido por Darcy (1856).

A análise da variabilidade espacial da Ksat foi feita por meio de SSG, através dos softwares GSlib (Geoestatistical Software Library; DEUTSCH e JOURNAL, 1998) e SGeMS (Stanford Geoestatistical Modeling; REMY et al. 2009), ambos de domínio público. Inicialmente foi feita uma análise exploratória dos dados e na sequência determinado o semivariograma experimental conforme recomendações de Goovaerts (1997). Posteriormente, utilizou-se da SSG para a geração de 100 campos equiprováveis, como recomendado por Melo (2015) e Santos et al. (2021), cuja validação foi atendida perfeitamente. A análise da variabilidade espacial da Ksat foi feita por meio da SSG e a metodologia aplicada refere-se à mesma utilizada por Siqueira et al., (2019) e Santos et al., 2021. Foram gerados cem mapas da Ksat, bem como construídos os cem histogramas dos valores simulados de cada campo simulado. Dos cem mapas gerados pela SSG, um foi tirado de forma aleatória para ilustrar o presente trabalho, da mesma forma foi mostrado seu respectivo histograma, para comprovar a similaridade com os dados amostrais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores do logaritmo neperiano da Ksat distribuídos espacialmente na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Marcela, com área em torno de 477 ha apresentam uma amplitude de  $0,24 \text{ mm.h}^{-1}$  a  $5,68 \text{ mm.h}^{-1}$  (Tabela 1).

Realização





Tabela 1. Estatística descritiva dos dados de ln da condutividade hidráulica do solo saturado expresso em mm h<sup>-1</sup> ao longo da malha amostral e da simulação

Parâmetros Estatísticos	Dados amostrais (ln Ksat mm/h)	Dados Simulados (ln ksat mm/h)
<b>Média</b>	2,90	2,66
<b>Mediana</b>	2,95	2,66
<b>Desvio padrão</b>	1,19	1,19
<b>Variância</b>	1,41	1,42
<b>Curtose</b>	-0,54	-0,37
<b>Assimetria</b>	-0,26	-0,24
<b>Mínimo</b>	0,24	-4,19
<b>Máximo</b>	5,68	5,68
<b>CV</b>	0,41	0,45

É importante destacar que todos os resultados abaixo apresentados foram derivados de 165 pontos de amostragem. A grande amplitude de variação dos dados de Ksat é bem conhecida, independentemente da metodologia de medição, localização geográfica, uso da terra, tipo ou escala do solo (BAIAMONTE et al., 2017).

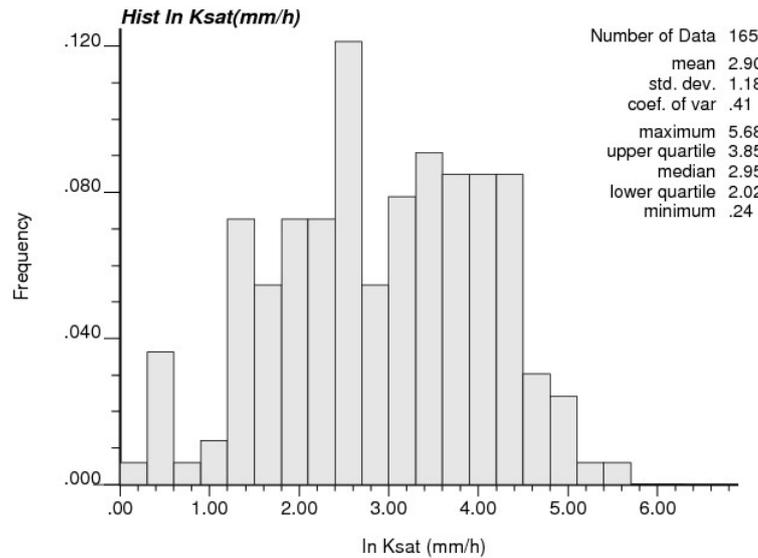
A Figura 2 retrata os histogramas do logaritmo neperiano dos dados amostrados (a) e da simulação 10 (b) da condutividade hidráulica do solo saturado.

Realização





(a)



(b)

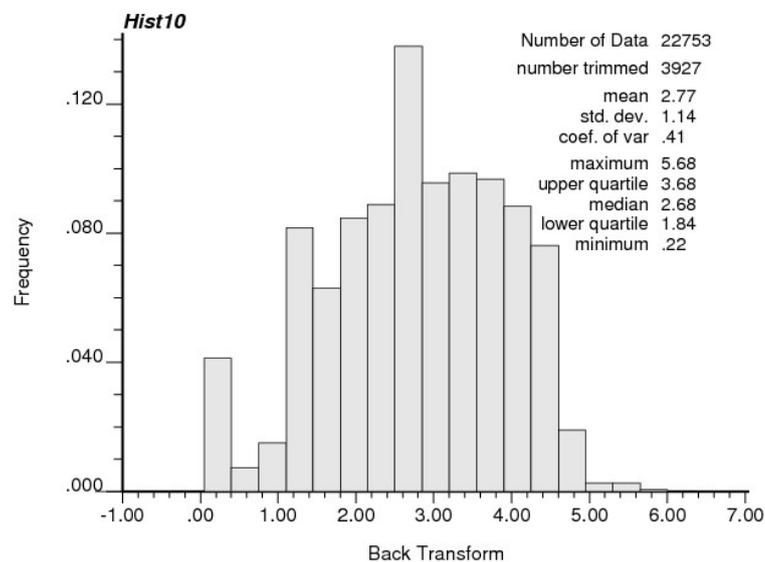


Figura 2. Histograma de ln Ksat para os dados amostrados (a) e ln Ksat para os dados da simulação 10 (b).

Fonte: os autores, 2023.

A simulação reproduziu bem o histograma amostral, mostrando que a SSG foi eficiente na BHRM. Percebe-se que os valores das médias e dos desvios-padrão dos histogramas simulados foram muito próximos aos do histograma amostral (Figura 2).

A Figura 3 apresenta o mapa da simulação 10 da condutividade hidráulica do solo saturado.

Realização



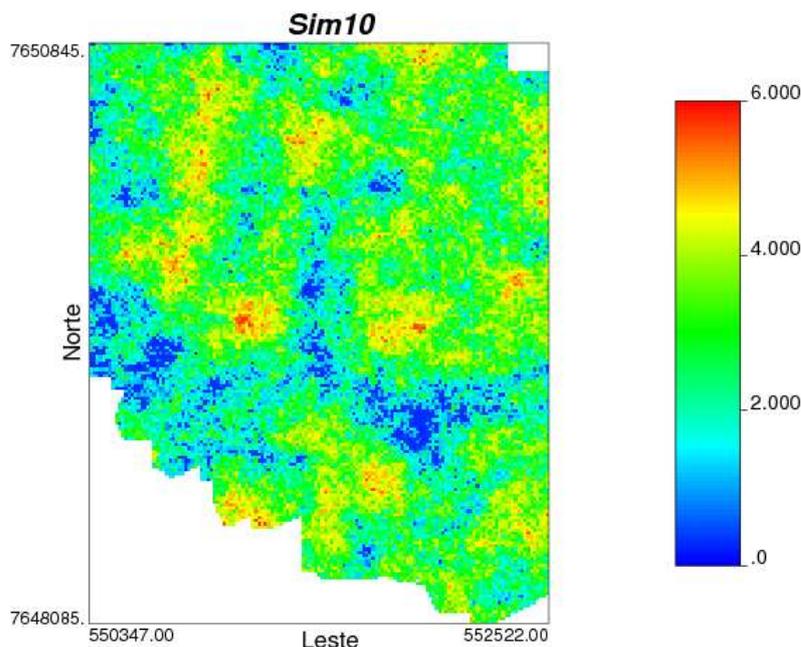


Figura 3. Mapa da simulação 10 da condutividade hidráulica do solo saturado.

Fonte: os autores, 2023.

Pode-se observar que a variabilidade espacial de  $K_{sat}$  foi reproduzida satisfatoriamente e indicando que a SSG pode ser eficiente na geração de outros campos simulados equiprováveis de  $K_{sat}$  na área estudada. Os mapas gerados pelo método SSG podem ser considerados representações realistas da variabilidade espacial dos dados da  $K_{sat}$ . A grande variabilidade da  $K_{sat}$  além de ser intrínseca ao fenômeno da variável, pode ser explicada ainda pela BHRM apresentar pastagem degradada, um pouco de vegetação nativa e cultura anual, bem como a variabilidade textural das amostras de solo.

## CONCLUSÕES

Todos os critérios necessários para a validação da SSG foram atendidos perfeitamente, portanto, serviram para descrever a continuidade espacial da  $K_{sat}$  na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. A SSG revelou-se como uma ferramenta eficaz para compreensão da magnitude e estrutura da variabilidade espacial da  $K_{sat}$ , sendo de grande valia para um bom manejo do solo e da água na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.

Realização



## AGRADECIMENTOS

Ao Programa Institucional de Apoio à Pesquisa (PAPq/UEMG), edital 11/2022, pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS

BAIAMONTE G, BAGARELLO V, D'ASARO F, PALMERI V (2017) Factors influencing point measurement of near surface saturated soil hydraulic conductivity in a small Sicilian basin. **Land Degrad Dev** 28:970–982.

DEUTSCH, C. V.; JOURNAL, A. G. **GSLIB Geostatistical software library and user's guide**. New York: Oxford University Press, p.369, 1998.

HU, K.; WHITE, R.; CHEN, D.; LI, B.; LI, W. Stochastic simulation of water drainage at the field scale and its application to irrigation management. **Agricultural Water Management**. v. 89, p. 123-130, 2007.

MELLO, R. C.; GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Modelagem de atributos físico-hídricos do solo numa bacia hidrográfica da região do Alto Rio Grande, MG**. Física do solo, Rev. Bras. Ciênc. Solo 31 (5), Out 2007.

MELO, T. M., **Simulação estocástica dos impactos das mudanças climáticas sobre as demandas de água para irrigação na região noroeste do Rio Grande do Sul**. 2015. 150p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MOTTA, P.E.F.; CURTI, N.; SILVA, M.L.N.; MARQUES, J.J.G.S.M.; PRADO, N.J.S. & FONSECA, E.M.B. Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório da Hidrelétrica de Itutinga/Camargos-MG. Lavras, UFLA/CEMIG, 2001. 51p.

REMY, N., BOUCHER, A., WU, J. **Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide**, Cambridge University Press, p. 284, 2009.

SANTOS, R.C.V., SOARES, M.F., TIMM, L.C., SIQUEIRA, T.M., MELLO, C.R., BESKOW, S., KAISER, D.R., Spatial uncertainty analysis of the saturated soil hydraulic conductivity in a subtropical watershed. **Environmental Earth Sciences**, 80:707, 2021.

SIQUEIRA, T. M.; LOUZADA, J. A.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. Soil physical and hydraulic properties in the Donato stream basin, RS, Brazil. Part 2: Geostatistical simulation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 675-680, 2019.

TEIXEIRA, D. B., BICALHO, E. S., PANOSSO, A. R., PERILLO, L. I., IAMAGUTI, J. L., PEREIRA, G. T., SCALA JÚNIOR, N. L. Krigagem Ordinária e Simulação Sequencial Gaussiana

Realização





na Interpolação da Emissão de CO<sub>2</sub> do Solo. **Revista Energia na Agricultura**. Vol. 26, n.3, p.26-42. Botucatu. 2011.

Realização

