



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Simulação Sequencial Gaussiana para mapeamento da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em uma bacia hidrográfica de Minas Gerais – Brasil

¹Rodrigo César de Vasconcelos dos Santos; ²Alisson Souza de Oliveira; ³Carlos Rogério de Mello; ⁴Elisangela de Araújo; ⁵Bruno Philippe Emídio da Silva; ⁶Rômulo Amaral Faustino Magri; ⁷Elias de Sá Farias; ⁸Matheus Vinícius de Oliveira

Prof. Dr. Universidade Federal de Viçosa – UFV, rodrigo.vasconcelos@ufv.br. Prof. Dr. Universidade Federal de Uberlândia – UFU, alissonso@hotmail.com. Prof. Dr. Universidade Federal de Lavras – UFLA, crmello@ufla.br. Engenheira Ambiental, Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, araujo.elisangelade@hotmail.com. Discente do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, bruno.2140298@discente.uemg.br. Prof. Dr. Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, romulo.magri@uemg.br. Prof. Dr. Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, elias.farias@uemg.br; Prof. Ms. Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Acadêmica de Passos, matheus.oliveira@uemg.br;

Artigo recebido em 22/01/2024 e aceito em 19/09/2024

RESUMO

A condutividade hidráulica do solo saturado (K₀) é uma propriedade físico-hídrica do solo de grande relevância para o manejo e conservação do solo e da água na agricultura e no meio ambiente. Nesse sentido, objetivou-se neste trabalho, simular a variabilidade espacial da k₀ e avaliar suas incertezas por meio da Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Marcela (BHRM), localizada na região sul do estado de Minas Gerais. Para tanto, uma vez definidos os parâmetros de variografia, utilizou-se da SSG para a geração de 100 campos aleatórios equiprováveis. As amostras de solos foram coletadas na camada de 0 a 15 cm, obedecendo aos grids de 240 x 240 m e um refinamento de 60 x 60 m, totalizando 165 amostras de solo indeformadas. Para a análise do comportamento da variabilidade espacial da K₀ foi realizada a estatística descritiva e posteriormente aplicou-se a SSG. Os resultados mostraram que a K₀ na BHRM é heterogênea e apresentou uma incerteza de 5,88 mm h⁻¹, possivelmente devido aos tipos de solo, uso e ocupação do mesmo, densidade e textura. A SSG revelou-se como uma ferramenta eficaz para compreensão da magnitude e estrutura da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado, sendo de grande valia para um bom manejo do solo e da água em bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Análise de incerteza. Campos aleatórios. Geoestatística.

Sequential Gaussian Simulation for mapping the spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity in a river basin in Minas Gerais – Brazil

ABSTRACT

The saturated hydraulic conductivity of the soil (K₀) is a physical-hydraulic property of soil that is highly relevant for soil and water management in agriculture and the environment. In this study, the aim was to simulate the spatial variability of K₀ and assess its uncertainties using Sequential Gaussian Simulation (SGS) for the Ribeirão Marcela Watershed (BHRM) located in the southern region of the state of Minas Gerais. In this scenario, following the definition of variogram parameters, Sequential Gaussian Simulation (SGS) was utilized to create 100 equiprobable random fields. Soil samples were collected from the 0 to 15 cm layer, following a grid of 240 x 240 m with a refinement of 60 x 60 m, totaling 165 undisturbed soil samples. Descriptive statistics were used to analyze the spatial variability of K₀, followed by the application of SGS. The results indicated that K₀ in the BHRM is heterogeneous and showed an uncertainty of 5.88 mm h⁻¹, possibly due to soil types, land use, density, and texture. SGS proved to be an effective tool for understanding the magnitude and structure of the spatial variability of saturated hydraulic conductivity, providing valuable insights for the proper management of soil and water in watersheds.

Keywords: Uncertainty analysis. Random fields. Geostatistics.

Introdução

As propriedades hidrológicas do solo, em especial a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), são fatores chave para entender os diferentes processos do ciclo hidrológico, assim como são parâmetros críticos para a aplicação de modelos hidrológicos (Dongli et al., 2017). Dessa forma, tais propriedades são de grande relevância para apoiar a tomada de decisão sobre a gestão dos recursos hídricos na escala de bacias hidrográficas (Beskow et al., 2016).

Os atributos dos solos possuem alta variabilidade, em parte devido aos efeitos combinados de processos físicos, químicos e biológicos que operam com diferentes intensidades e escalas (Goovaerts, 1997). Neste sentido, métodos estatísticos e matemáticos poderiam ser aplicados para resolver a complexidade e a incerteza inerentes ao sistema solo. Portanto, o uso de dados do solo e sua análise são importantes na avaliação de campo porque a incerteza e a imprecisão frequentemente ocorrem em conjuntos de dados aleatórios (Mcbratney et al., 2000).

Ferramentas geoestatísticas têm sido aplicadas para estudar a variabilidade espacial das propriedades hidrológicas do solo, bem como nas bacias hidrográficas (Reza et al., 2016; Silva et al., 2017; Usowicz e Lipiec, 2017). Neste sentido, a Simulação Geoestatística tem sido utilizada de maneira satisfatória na estimativa das estatísticas dos dados amostrais, tais como a média, o histograma e o semivariograma, proporcionando uma excelente estimativa global, além de permitir a análise de incertezas.

Dentre os métodos de simulação geoestatística mais utilizados, tem-se a Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), a qual utiliza a média e o desvio padrão da krigagem para gerar a forma da distribuição das incertezas associadas à estimativa em um determinado ponto.

De acordo com Zhao et al. (2017), a simulação sequencial gaussiana é uma ferramenta eficaz para analisar incertezas de mapeamento em vários locais simultaneamente, bem como modelar a componente aleatória (erro), o que não é possível com a técnica baseada em krigagem que não leva em conta a variável aleatória (Deutsch; Journel, 1998). Além disso, a simulação estocástica não fornece apenas uma solução, mas sim um conjunto de soluções. Sendo assim, esta abordagem tem sido preferida quando existe a necessidade de

representação das incertezas da condutividade hidráulica do solo saturado para assim caracterizar melhor o problema analisado (Hu et al., 2007; Zhao et al. 2017).

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.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo simular a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e avaliar suas incertezas, por meio da simulação geoestatística, mais especificamente a Simulação Sequencial Gaussiana, na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, inserida na região geomorfológica Planalto Campos das Vertentes, na região do Alto Rio Grande, Sul de Minas Gerais.

Material e métodos

Localização e caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela (BHRM) localiza-se na região geomorfológica Planalto Campos das Vertentes, inserida na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, no município de Nazareno – MG, entre as coordenadas UTM 550.169 m e 552.810 m E e 7.650.163 m e 7.650.989 m N, Fuso 23 Sul, cuja altitude varia entre 960 e 1.060 m. Possui uma área de drenagem de 477 ha, cujo o escoamento drena 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 neste reservatório.

Ocorre a predominância do relevo suave ondulado a ondulado e clima Cwa segundo classificação de Köppen. Segundo Araújo (2006), a BHRM é representativa dos Latossolos na região do Alto Rio Grande a montante da UHE de Camargos/CEMIG. 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) (Figura 1).

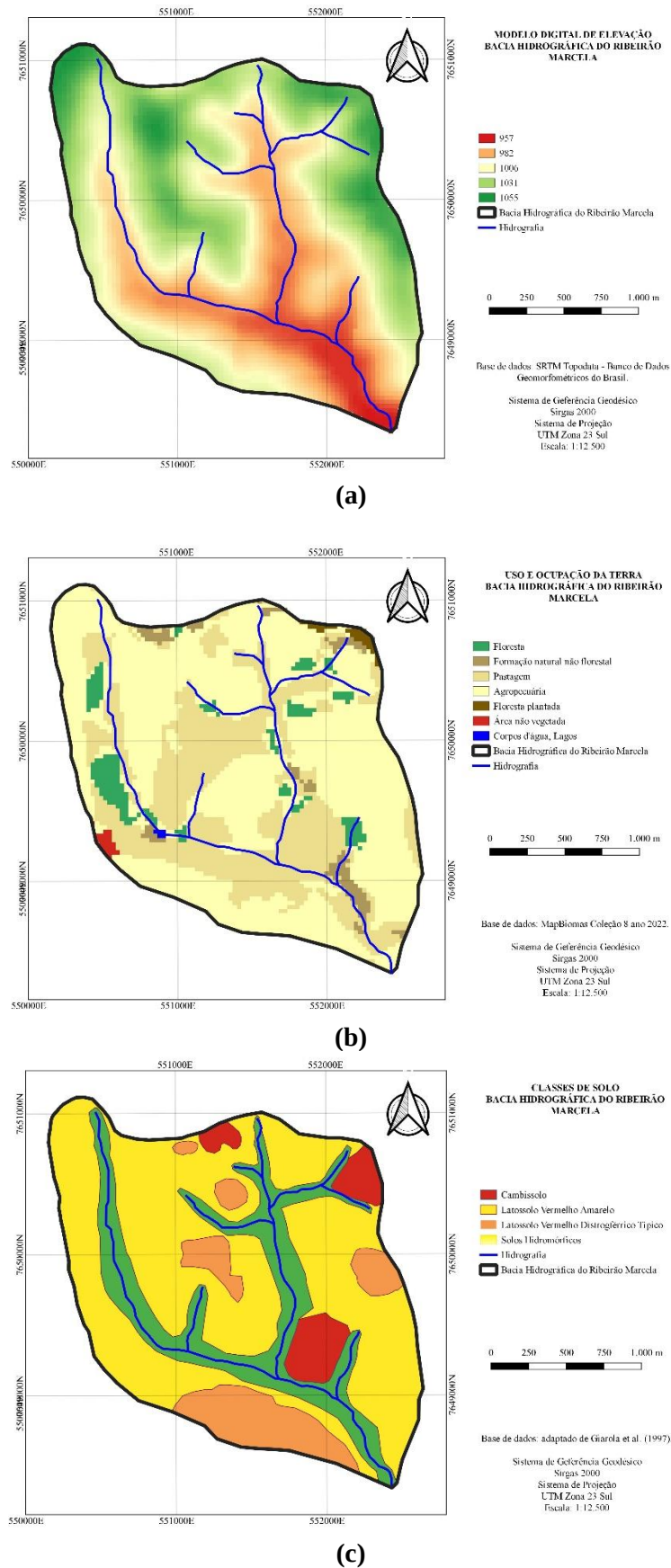


Figura 1. Modelo digitalização de elevação da BHRM (a); Uso e ocupação do solo da BHRM (b); Classes de solo da BHRM (c).

Determinações da condutividade hidráulica do solo saturado

As medidas de condutividade hidráulica saturada foram obtidas utilizando o permeâmetro de fluxo constante (Permeâmetro de Ghelph – modelo 2800KI), conforme Gomes (2005). Adotou-se o seguinte procedimento para realização dos testes em campo:

a) em cada ponto amostral foi feito um furo de 0,03m de raio e 0,15m de profundidade, com trados apropriados que compõem o aparelho;

b) fixaram-se cargas hidráulicas de 0,05m e 0,10m dentro do furo para a realização das leituras de fluxo;

c) com o aparelho instalado, foram feitas as leituras da altura da água na régua do aparelho em intervalos de tempo constantes (2 minutos), até que ficassem constantes, para ambas as cargas hidráulicas.

Os valores de k_0 foram obtidos pela expressão, disponibilizada no manual do aparelho utilizado, calibrada para as cargas hidráulicas de 0,05m e 0,10m. Ao todo, foram analisados 165 pontos na BHRM, conforme a Figura 2, segundo um grid de 240 x 240 m. Além disso, foi realizado um refinamento das amostras de solo em algumas áreas da BHRM, cujo grid foi de 60 x 60 m.

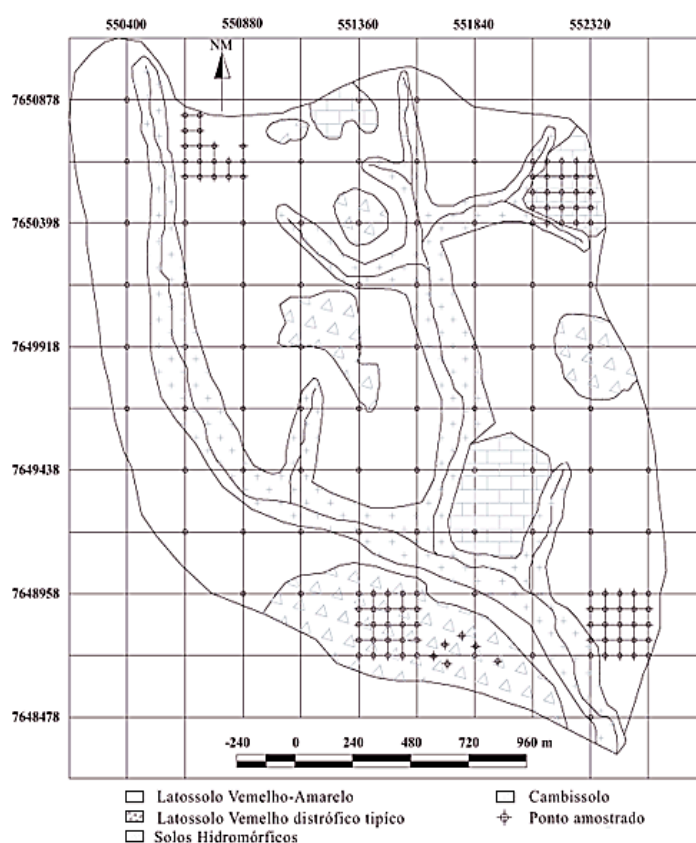


Figura 2. Unidades pedológicas presentes na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela e esquema de amostragem sistemática utilizada nos trabalhos de campo.

Fonte: Mello et al. (2007).

Análise Estatística e Geoestatística de K_0

Conforme a metodologia proposta por Santos et al. (2021), uma vez obtida os valores da condutividade hidráulica saturada, foi realizada a transformação logarítmica dos dados, aplicando-se o logaritmo neperiano. Esta transformação se faz necessária para evitar a influência dos poucos valores altos na estimativa de pontos da

vizinhança, caracterizada por baixos valores. Além disso, a Simulação Sequencial Gaussiana exige que o conjunto de dados amostrados apresente uma distribuição normal. Além disso, de acordo com Alvarenga et al. (2011), a transformação logarítmica dos dados pode facilitar a aplicação das técnicas geoestatísticas, uma vez que reduz a assimetria dos mesmos após a transformação.

Foram modelados 8 semivariogramas experimentais (Equação 1) para diferentes direções, variando de 22,5 em 22,5° (azimutes 0°; 22,5°; 45°; 67,5°; 90°; 112,5°; 135° e 157,5°) no intuito de verificar a presença de comportamento anisotrópico dos dados de K0 na área experimental. Os modelos teóricos: esférico, exponencial e gaussiano foram testados para o ajuste dos semivariogramas experimentais obtidos por meio da Equação 1 (Webster e Oliver 2007). A Equação 1 foi proposta por Matheron (1963), sendo chamada literatura de estimador clássico de Matheron.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_{\alpha}) - z(u_{\alpha} + h)]^2$$

Onde, $\gamma(h)$ é o valor da semivariância experimental em função de h ; $z(u_{\alpha})$ e $z(u_{\alpha} + h)$ são os valores da variável z determinados em u_{α} e $u_{\alpha} + h$, respectivamente; $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h .

Simulação Sequencial Gaussiana da K0

A análise da variabilidade espacial da K0 foi feita por meio da simulação sequencial gaussiana (SSG), segundo as metodologias

propostas por Siqueira *et al.*, (2019) e Santos *et al.*, 2021.

A SSG requer a determinação de N sucessivas funções de distribuição condicional acumulada (CCDFS) em todos os nós do grid, condicionadas a um nível crescente de informações. Os algoritmos de simulação geoestatística partem do princípio de que um valor da variável será extraído aleatoriamente da distribuição de probabilidades acumuladas condicionadas em cada ponto da área e obtido a partir da média e da variância da krigagem nesse ponto, conforme indicado na Equação 2 (Deutsch and Journel 1998; Goovaerts, 1997):

$$F(u; z|(n)) = \text{Prob}(Z(u) \leq z|(n)) \quad (1)$$

Em que u é a localização da variável $Z(u)$, z é um valor de corte da ccdf e n são as informações condicionantes para construir a ccdf dos valores simulados.

Da mesma forma, diferentes mapas simulados (campos aleatórios) podem ser gerados conjuntamente a partir da amostragem aleatória das ccdfs em todos os pontos do grid de acordo com a Equação 3.

$$F(u_1, u_2, \dots, u_n; z_1, \dots, z_n | (n)) = \text{Prob}(Z(u_1) \leq z_1, \dots, Z(u_n) \leq z_n | (n)) \quad (3)$$

Em que N é o número de nós no grid e u_i é a localização da variável onde não há dados observados.

Para a realização de todas as análises estatísticas e geoestatísticas envolvidas no presente trabalho foram utilizados os softwares GSlib (Geostatistical Software Library; Deutsch and Journel 1998) e SGeMS (Stanford Geoestatistical Modeling; Remy et al. 2009), ambos de domínio público. O semivariograma experimental foi determinado conforme Goovaerts (1997), indicado na Equação 1.

A partir dos semivariogramas, foi realizada a simulação sequencial gaussiana da K0 para toda área, conforme descrito por Goovaerts (1997).

1. Normalização dos dados originais (Equação 4).

$$Y(u) = \Phi(Z(u))$$

Em que, $Z(u)$ é o atributo de interesse, $Y(u)$ é o atributo normalizado; Φ é a função de normalização.

2. Definiu-se um caminho aleatório de visitação do grid somente uma vez.

3. Em cada nó u' do grid foram determinados os parâmetros da distribuição gaussiana (média e variância) por meio de krigagem simples utilizando o variograma dos dados normalizados. No primeiro nó visitado, a krigagem foi feita somente com os n dados amostrados, sendo que a média da distribuição gaussiana corresponde ao valor krigado u' e a variância da krigagem como a própria variância da distribuição gaussiana. Desta forma, cada nó do grid a ser visitado terá uma distribuição gaussiana a ele associado, condicionado ao número de dados amostrados e previamente simulados considerados para realização da krigagem.

4. Extraiu-se aleatoriamente um valor da distribuição gaussiana e adicionou-o ao banco de dados.

5. Visitação do próximo nó do grid e repetição dos passos 3 e 4 agora considerando os dados amostrais, bem como o valor previamente simulado.

6. Visitou-se todos os N nós do grid até que todos fossem simulados.

7. Como os valores simulados $\{y^{(1)}(u_j)\}$, $j = 1, \dots, N$ pertencem ao espaço gaussiano, os mesmos foram retro transformados para o espaço amostral original, por meio da função de transformação inversa, de acordo com a Equação 5.

$$Z^{(1)} = \Phi^{-1}(y^{(1)}(u_j))$$

$$j=1, \dots, N$$

8. Cem realizações para a área foram geradas repetindo os passos 2 a 6 para assim obter com maior precisão a variabilidade espacial condutividade hidráulica do solo saturado.

A validação da simulação geoestatística para a condutividade hidráulica do solo saturado foi realizada respeitando os seguintes critérios:

1. Todos os mapas gerados pela SSG devem honrar os valores da variável nos n locais amostrados, de acordo com a Equação 6.

$$Z^{(1)} = Z(u_\alpha)$$

$$\forall u = u_\alpha$$

$$\alpha = 1, \dots, n$$

2. Os histogramas dos valores simulados devem ser semelhantes aos histogramas dos dados originais.

3. O modelo de variabilidade espacial (semivariograma) da variável deve ser igualmente reproduzido pelas diversas realizações.

Cumpridas tais etapas, foram gerados 100 mapas da K0, bem como construídos os 100 histogramas dos valores simulados de cada campo simulado. Dos 10 mapas gerados pela SSG, 5 foram tirados de forma aleatória para ilustrar o presente trabalho, da mesma forma foram mostrados seus respectivos histogramas, para comprovar a similaridade com os dados amostrais.

A SSG foi realizada por meio do executável gsgsim do Software GSLIB (Geostatistical Software Library; Deutsch and Journel, 1998) por meio de células de tamanho 15 x 15 m para um grid de 2167 x 2747 m, onde o valor simulado corresponde ao centroide da célula do grid.

Análise de Incerteza da K0

A avaliação da incerteza acerca dos valores de atributos do solo é uma etapa preliminar para avaliar o risco envolvido em qualquer processo de tomada de decisão ou para investigar como os erros de previsão se propagam através de funções complexas, como na simulação de fluxo (Goovaerts, 2001).

A incerteza espacial foi calculada através de probabilidade cumulativa. De acordo com Oliveira et al. (2014), ela ajuda na determinação da confiabilidade em delinear áreas com alta probabilidade de exceder determinado valor crítico e, dessa forma, representa um indicativo da incerteza espacial.

Como parâmetro final para determinar as incertezas da K0, utilizaram-se dos percentis de 5% e 95%, indicando um cenário menos favorável e outro mais desfavorável ao fluxo de água no solo.

Resultados e discussão

Análise exploratória dos dados de K0

Os valores de K0 distribuídos espacialmente na BHRM (6) indicam uma faixa de magnitude de 1,27 a 291,51 mm h⁻¹ (Tabela 1). É importante ressaltar que todos os resultados apresentados foram derivados de 165 pontos amostrais. A grande amplitude de variação dos dados K0 é bem conhecido independentemente da metodologia de mensuração de K0, da localização geográfica, tipo e uso do solo, bem como da escala amostral (Papanicolaou et al. 2015; Baiamonte et al. 2017). Isto, possivelmente, se dá pelo fato de a condutividade hidráulica do solo saturado ser uma variável integradora, ou seja, depende de outras variáveis como a porosidade, estrutura, textura e estas variam muito para diferentes solos e também para o mesmo solo. Bagarello et al (2017) analisaram K0 para um conjunto de dados de campo e perceberam que o Coeficiente de Variação variou de 126% a 141%, o que confirma a variabilidade da K0.

Conforme a Tabela 1, percebe-se claramente que a estatística descritiva dos dados amostrais ficou muito semelhante a dos dados simulados, o que indica que a simulação representa muito bem a região estudada no que se refere à condutividade hidráulica do solo saturado. Porém, cabe frisar que a simulação 17 foi retirada, pois os valores da mesma foram muito discrepantes das demais 99, influenciando de forma negativa nos dados simulados.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos dados de $\ln$ da condutividade hidráulica do solo saturado expresso em mm h^{-1} ao longo da malha amostral e da simulação.

Parâmetros Estatísticos	Amostrais ($\ln K_0$ mm/h)	Simulados ($\ln K_0$ mm/h)	Amostrais (mm/h)	Simulados (mm/h)
Média	2.90	2.66	33.28	26.57
Mediana	2.95	2.66	19.07	14.28
Desv pad	1.19	1.19	39.05	31.81
Variância	1.41	1.42	1525.24	1012.04
Curtose	-0.54	-0.37	13.56	14.96
Assimetria	-0.26	-0.24	2.95	3.01
Mínimo	0.24	-4.19	1.27	0.02
Máximo	5.68	5.68	291.51	292.95
CV	0.41	0.45	1.17	1.20

Estrutura de variabilidade espacial dos dados de $\ln K_0$

A estrutura de variabilidade espacial dos dados K_0 foi modelada através da construção de semivariogramas experimentais direcionais para as direções de 0° , $22,5^\circ$; 45° ; $67,5^\circ$; 90° ; $112,5^\circ$; 135° e $157,5^\circ$ para avaliar a anisotropia de $\ln K_0$.

A direção da maior continuidade espacial foi de 45° e a de menor foi de 135° , ambas perpendiculares entre si, sendo o modelo exponencial melhor ajustado visualmente aos semivariogramas experimentais entre os três modelos teóricos de semivariograma avaliados. Uma estrutura de variabilidade espacial foi usada durante o processo de ajuste do modelo exponencial, no qual seus parâmetros (C_0 = efeito pepita, $C_0 + C$ = patamar e alcance) foram obtidos para a estrutura espacial. A estrutura apresentou efeito pepita de 0,2, patamar de 0,80 e alcance de 430 m. A magnitude desse alcance afeta diretamente a qualidade dos dados simulados, visto que o mesmo estabelece o número de valores amostrados que utilizados na simulação. De acordo com Siqueira et al. (2019) os semivariogramas são

importantes para determinar os raios de busca do elipsoide e assim realizar a krigagem na simulação.

Cabe salientar que a continuidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado depende da escala amostral, sendo que, quanto mais próximas as amostras estiverem, menor será o alcance obtido pela modelagem variográfica. Portanto, quanto menor a malha amostral, maiores serão a precisão e a confiabilidade na obtenção dos dados, visto que o refinamento na malha amostral ajuda a modelar o efeito pepita.

A elevada variabilidade dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado pode ser explicada pelo mapa de uso do solo, bem como pela heterogeneidade textural e densidade do solo em estudo, como verificado por Santos et al. (2021).

Simulação Sequencial Gaussiana

Na Figura 3 são apresentados os desvios-padrão de cada campo acumulado com os dados gerados por todos os campos anteriores. Na mesma, pode-se identificar o número de campos necessários, neste caso 100, para capturar a variabilidade do fenômeno estudado por meio dos dados amostrais.

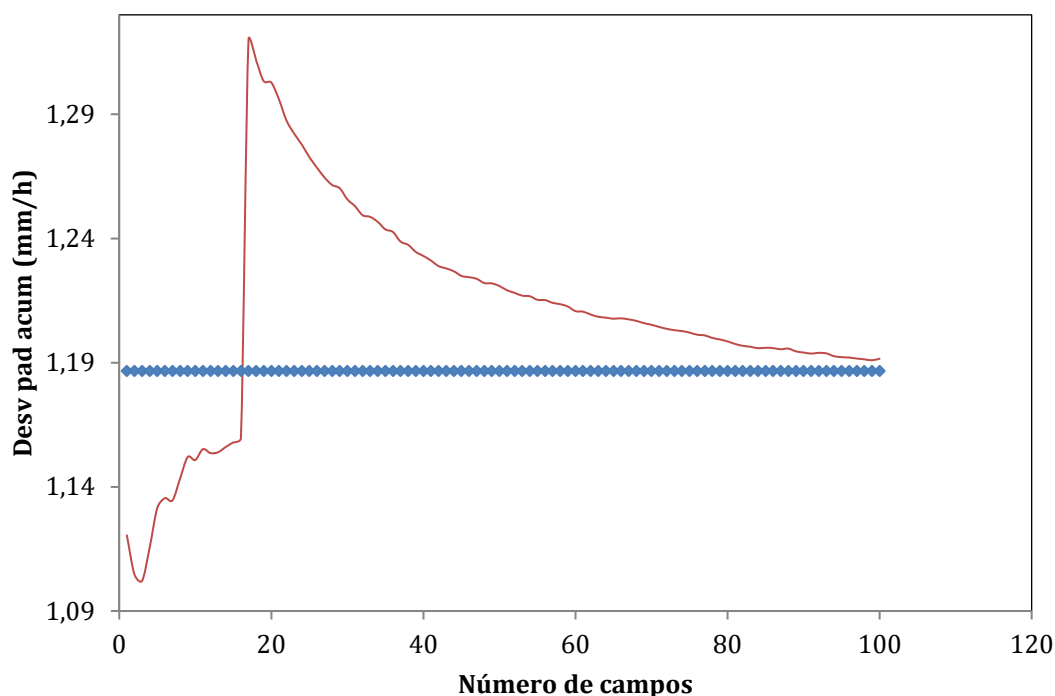


Figura 3. Determinação do número de campos da simulação Geoestatística.

Nesta investigação, conforme a Figura 3 percebeu-se que 100 campos seriam o suficiente para uma simulação adequada, visto que o desvio padrão dos valores simulados se estabilizou em torno de 100 campos aleatórios. Ou seja, gerar mais campos que este número não agregaria mais informação sobre a variabilidade de K_0 , visto que, a precisão global da simulação de K_0 é alcançada quando são considerados os primeiros 100 campos aleatórios.

Siqueira et al. (2019) e Santos et al. (2021) realizaram uma análise estocástica da condutividade hidráulica do solo saturado, onde empregou a técnica de simulação sequencial gaussiana para geração de 100 campos aleatórios, identificando grande heterogeneidade espacial,

bem como grande incerteza para a propriedade em estudo.

Além disso, é interessante notar que o valor do desvio padrão dos dados amostrais foi de 1,19 mm h⁻¹ (Tabela 1), valor este muito próximo ao da estabilização. Tal fato demonstra que os dados obtidos por meio da simulação representam adequadamente a área estudada, visto que, o desvio padrão dos dados simulados foram praticamente iguais aos dos dados amostrais, confirmando que a simulação representou satisfatoriamente a estatística de forma global.

Na Figura 4 são apresentados quatro mapas gerados por meio da simulação sequencial gaussiana, e escolhidos de forma aleatória, para a condutividade hidráulica do solo saturado.

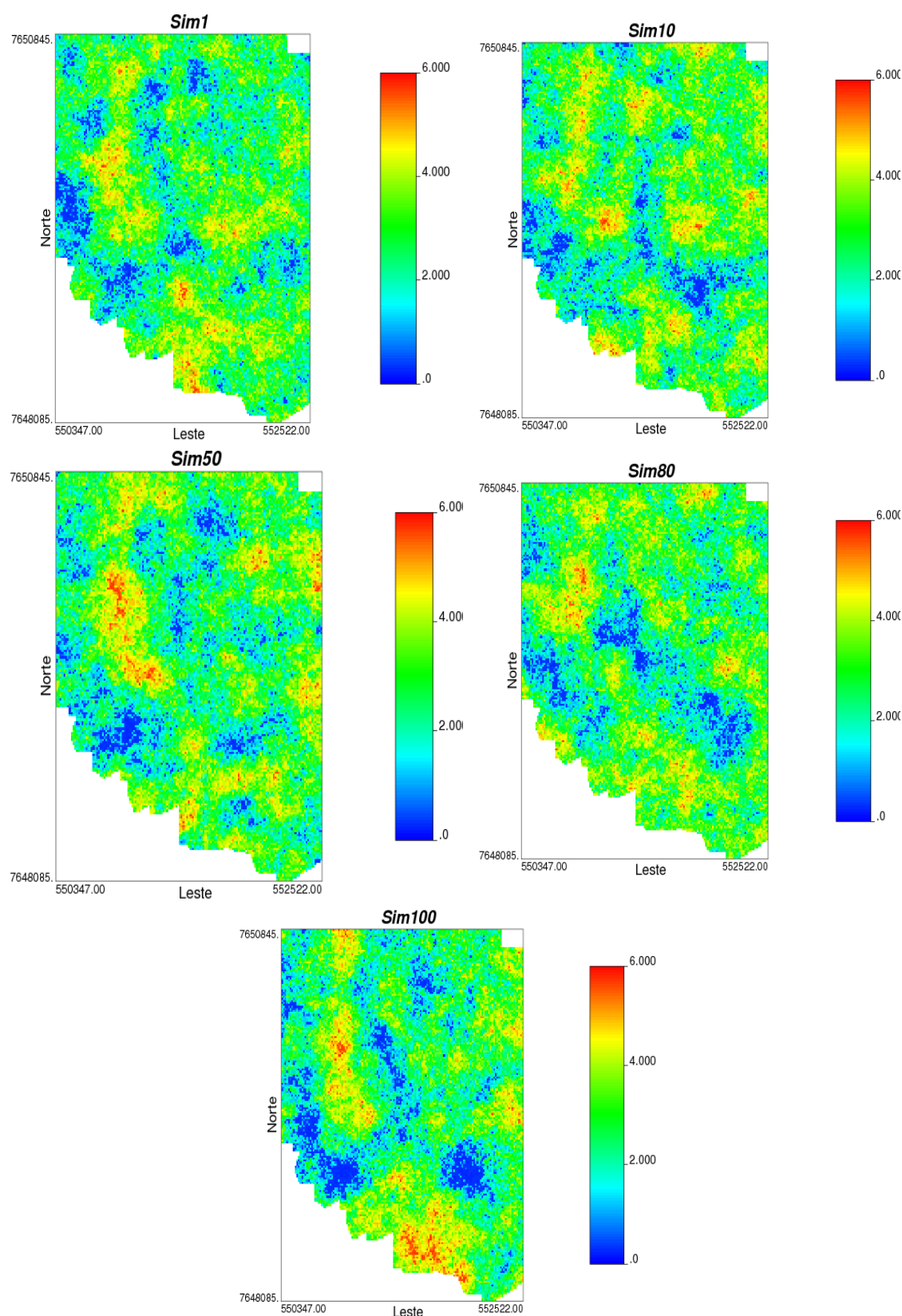


Figura 4. Mapas simulados da condutividade hidráulica do solo saturado.

Qualquer um dos campos pode ser considerado representativo da área, visto que, a simulação geoestatística não busca um campo em si, mas gera diferentes possibilidades da realidade da área em estudo, para assim obter uma visão

global da incerteza, que neste caso, é K0. Os campos aleatórios certificam que não houve o efeito suavizador da krigagem, mostrando uma mudança brusca de um local para outro próximo, o que corrobora com a explicação de Yamamoto e

Landim (2013) de que na simulação não ocorre a suavização na espacialização, tão comum em técnicas de krigagem.

Os mapas simulados evidenciam que a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado na BHRM é de grande relevância, portanto, não deve ser desconsiderada, visto que, K0 é uma propriedade hidráulica que influencia fortemente a hidrologia do solo.

No que se refere à aplicação prática dos mapas aqui apresentados destaca-se a identificação espacial de áreas propícias para a recarga subterrânea, neste caso os locais que apresentaram

valores elevados de K0, assim como áreas de elevada vulnerabilidade à erosão hídrica (K0 baixos), as quais poderão ter um manejo de forma mais correta, visando à manutenção do seu potencial de produção de água.

A Figura 5 mostra os histogramas dos dados simulados, enquanto a Figura 6 mostra o histograma dos dados amostrais. Vale ressaltar que os 5 histogramas foram retirados de forma aleatória das 100 simulações realizadas. Na Figura 5 estão apresentados os histogramas para os mesmos campos aleatórios apresentados na Figura 4.

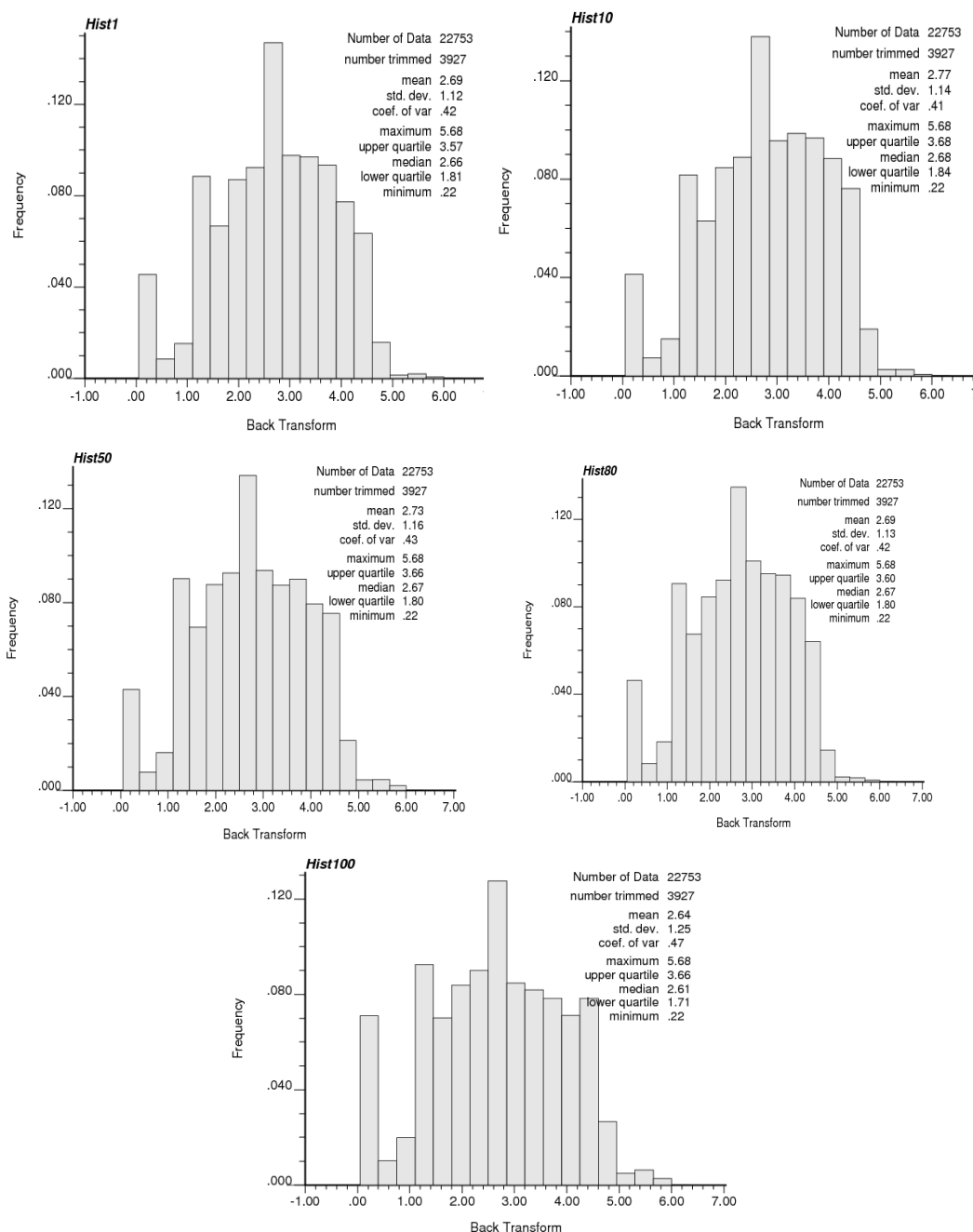


Figura 5. Histogramas do logaritmo neperiano dos dados simulados da condutividade hidráulica do solo saturado.

A Figura 6 retrata o histograma do logaritmo neperiano dos dados amostrados da condutividade hidráulica do solo saturado.

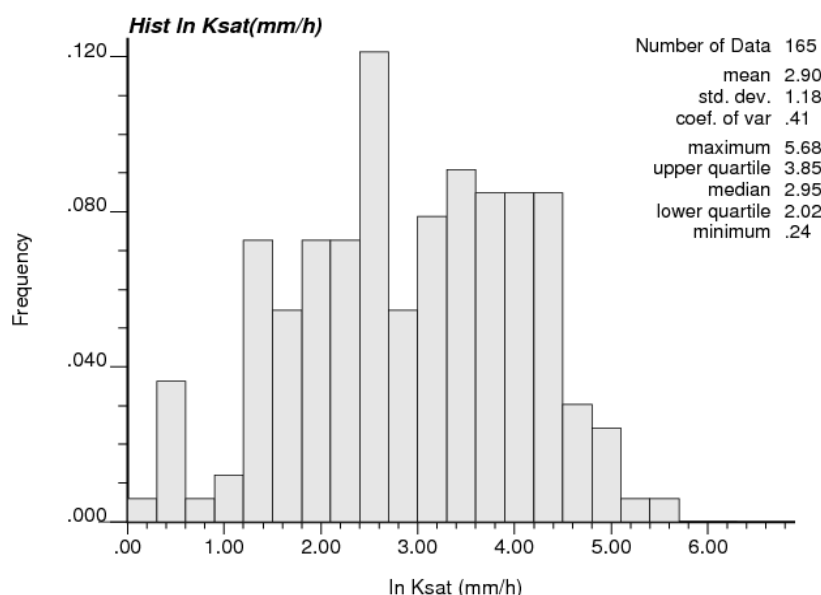


Figura 6. Histograma do logaritmo neperiano dos dados amostrados da condutividade hidráulica do solo saturado.

Como pode-se verificar, os histogramas dos dados simulados são parecidos com o histograma dos dados amostrais, mostrando boa precisão da SSG.

De acordo com Caers (2000) a simulação apresenta precisão global, ou seja, representa de forma adequada a variabilidade espacial da amostragem em detrimento da manutenção da precisão local. Por representação da variabilidade

espacial considera-se que as estatísticas globais das estimativas, tais como semivariogramas e histogramas, serão semelhantes aos das amostras.

A Figura 7 compara o semivariograma teórico utilizado para a geração dos campos equiprováveis e os semivariogramas obtidos através dos valores de $\ln(K_0)$ de cinco campos aleatórios gerados e escolhidos de forma aleatória.

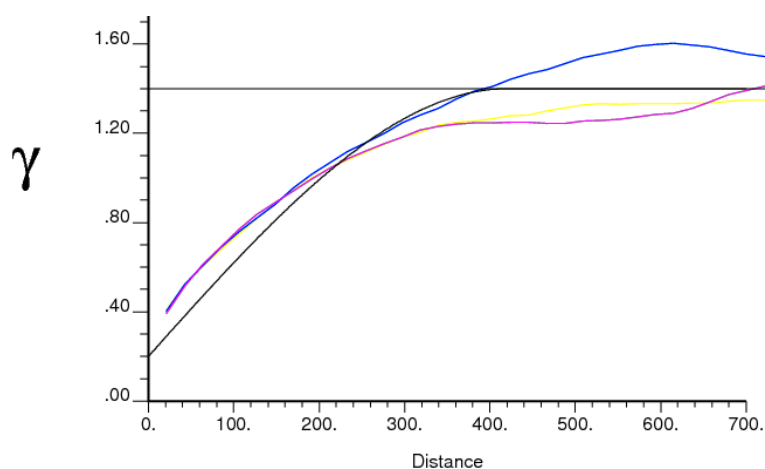


Figura 7. Semivariograma dos dados amostrais juntamente com 5 semivariogramas dos dados simulados.

Os semivariogramas da simulação são muito parecidos com o semivariograma amostral, com sill e alcances semelhantes, implicando numa continuidade espacial plausível para os valores simulados. Sendo assim, nota-se com clareza que os modelos de variabilidade espacial dos dados simulados foram reproduzidos de forma satisfatória para cinco campos equiprováveis simulados, o que indica que a simulação sequencial gaussiana foi eficiente na geração de outras imagens equiprováveis da área estudada.

Quando comparado com a krigagem, esta não permite uma boa análise da conectividade espacial como a simulação, visto que ela causa suavização dos dados, bem como aumenta o alcance, não refletindo assim a condutividade hidráulica na bacia. Tal inconveniente não ocorre em métodos de simulação geoestatística.

Análise de incerteza da K0

A avaliação da incerteza acerca dos valores de atributos do solo é uma etapa preliminar para avaliar o risco envolvido em qualquer processo de tomada de decisão ou para investigar como os erros de previsão se propagam através de funções complexas, como na simulação de fluxo. (GOOVAERTS, 2001). Portanto, como parâmetro final para determinar as incertezas da condutividade hidráulica do solo saturado, foram escolhidos os valores referentes a 5% e a 95% de probabilidade de não excedência dos valores simulados, representando, desta forma, um cenário mais favorável e outro mais desfavorável ao fluxo de água no solo.

A Tabela 2 apresenta a análise de incerteza realizada para a condutividade hidráulica do solo saturado para os percentis de 5, 25, 50, 75 e 95% e seus respectivos valores.

Tabela 2. Campos aleatórios associados aos percentis 5 e 95% de não ultrapassagem das médias de cada variável

Percentil %	Valor	Simulação
5	24,16	19
25	25,54	98
50	26,63	21
75	27,88	54
95	30,04	24

A Figura 8 retrata a incerteza da K0 na BHRM.

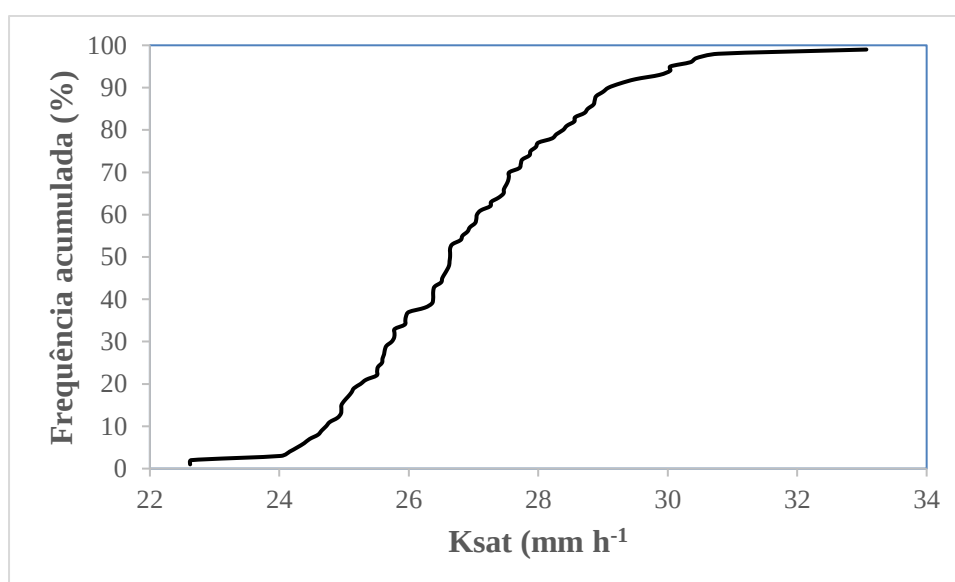


Figura 8. Probabilidade cumulativa da condutividade hidráulica do solo saturado.

Os percentis de 5% e 95% para os dados médios dos campos de K0 simulados foram respectivamente de 24,16 e 30,04 mm h⁻¹, tendo

uma incerteza de 5,88 mm h⁻¹ para tais percentis. Siqueira et al. (2019) encontraram uma incerteza de 20,56 cm dia⁻¹ para os percentis de 5 e 95%.

Sendo assim, pode-se afirmar com 90% de certeza com base nos valores médios dos campos simulados que a condutividade hidráulica do solo saturado varia entre 24,16 e 30,04 mm h⁻¹ na BHRM. Além disso, pode-se afirmar também, porém com 95% de certeza que os valores médios dos campos da K0 na BHRM não serão superiores a 30,04 mm h⁻¹. Bagarello et al. (2019) e Santos et al. (2021) presumiram em seus trabalhos que valores altos de K0 são menos incertos que valores pequenos, contrário ao encontrado neste presente trabalho, visto que, na BHRM os valores de K0 são extremamente elevados de acordo com a classificação de Gutiérrez et al. (2018).

A alta variabilidade de K0 pode ser explicada pelo mapa de uso do solo, bem como pela heterogeneidade textural, densidade do solo em estudo, pela variação topográfica e tipos de vegetação presentes na BHRM. Bagarello et al. (2019) perceberam que a variabilidade de K0 foi menor nas zonas mais íngremes de uma bacia hidrográfica do que nas mais planas. Percebeu-se que os maiores valores de K0 ocorreram em locais com mata nativa, enquanto os menores em locais com predomínio da cultura do fumo. Neste caso, a incerteza muito grande indica que a K0 é extremamente heterogênea e que, portanto, deve-se levá-la em consideração para projetos de irrigação, modelagem hidrológica, dentre outros, para uma gestão eficiente dos recursos hídricos. De acordo com Zhao et al. (2017) a simulação sequencial gaussiana é uma ferramenta eficaz para coletar incertezas de mapeamento em vários locais simultaneamente, o que não é possível através técnica baseada na krigagem.

Todavia, essa incerteza muito elevada para a propriedade em estudo, possivelmente está associada a fatores climáticos, topográficos, de uso e cobertura do solo, textura, porosidade, compactação, tipo da amostragem e até a própria malha amostral utilizada no presente estudo. De acordo com Hu et al. (2007) o método de simulação sequencial gaussiana mantém a estrutura espacial da condutividade hidráulica do solo saturado, bem como fornece a incerteza associada com K0 em pontos não amostrados, sendo estes os principais resultados obtidos nesta pesquisa. De acordo com Goovaerts (1999) há necessariamente incerteza sobre o valor da K0 em um local não amostrado, e sua avaliação é crítica para aplicação em modelos hidrológicos, que em momento oportuno, tais dados serão utilizados.

Conclusões

A simulação sequencial gaussiana revelou-se como uma ferramenta eficaz para compreensão da magnitude e estrutura da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado.

As múltiplas realizações obtidas pela simulação sequencial gaussiana permitiram avaliar a incerteza global da condutividade hidráulica do solo saturado, a qual mostrou ser significativa, visto a amplitude entre os percentis de 5 e 95%, indicando que na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela existe alta variabilidade (5,88 mm h⁻¹) da propriedade analisada. Portanto, tais incertezas devem ser utilizadas na geração de diferentes cenários de mapas de condutividade hidráulica do solo saturado, considerando-se diferentes níveis de riscos assumidos, que apoiarão nas decisões no que se refere à gestão de bacias hidrográficas.

A Simulação Sequencial Gaussiana pode ser aplicada na escala da bacia hidrográfica para mapeamento de atributos do solo, especialmente aqueles com alta variabilidade e difíceis de serem modelados, como a condutividade hidráulica do solo saturado.

Agradecimentos

Agradecimentos à UEMG/Passos pelo apoio na realização desta pesquisa e ao Programa Institucional de Apoio à Pesquisa (PAPq/UEMG), edital 11/2022, pela concessão da Bolsa de Iniciação Científica.

Referencias

- Alvarenga, C. C., Mello, C. R., Mello, J. M., & Viola, M. R. (2011). Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 1745–1757.
- Araújo, A. R. (2006). *Solos da bacia do Alto Rio Grande (MG): Base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola* (Tese de doutorado). Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Bagarello, V., Baiamonte, G., & Caia, C. (2019). Variability of near-surface saturated hydraulic conductivity for the clay soils of a small Sicilian basin. *Geoderma*, 340, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.008>
- Bagarello, V., Di Prima, S., & Iovino, M. (2017). Estimating saturated soil hydraulic conductivity by the near steady-state phase of

- a Beerkan infiltration test. *Geoderma*, 303, 70–77.
- Beskow, S., Timm, L. C., Tavares, V. E. Q., Caldeira, T. L., & Aquino, L. S. (2016). Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: A case study of the Fragata River basin, southern Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 61(14), 2567–2578.
- Caers, J. (2000). Adding local accuracy to direct sequential simulation. *Mathematical Geology*, 32(7), 815–850.
- Castro, B. E. M., Geisert, D., Yankelevich, S. N., & Chávez, A. G. T. (2016). Spatial distribution of hydraulic conductivity in soils of secondary tropical montane cloud forests and shade coffee agroecosystems. *Geoderma*, 283, 57–67.
- De Roo, A. P. J., & Offermans, R. J. E. (1995). LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model for basin-scale water and sediment management. In *Modelling and management of sustainable basin-scale water resource systems* (pp. 229–235). IAHS Publication.
- Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1998). *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*. Oxford University Press.
- Dongli, S., Qian, C., Timm, L. C., Beskow, S., Wei, H., Caldeira, T. L., & Oliveira, L. M. (2017). Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. *Geoderma*, 286, 15–24.
- Gomes, N. M., Mello, C. R., Silva, A. M., & Beskow, S. (2008). Aplicabilidade do LISEM (Limburg Soil Erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 2483–2492.
- Gomes, N. M. (2005). *Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Goovaerts, P. (1999). Performance comparison of geostatistical algorithms for incorporating elevation into the mapping of precipitation. In *GeoComputation* (pp. 1–18).
- Goovaerts, P. (2001). Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*, 103, 3–26.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.
- Gutiérrez, C. G., Pachepsky, Y., & Martín, M. Á. (2018). Saturated hydraulic conductivity and textural heterogeneity of soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7), 3923–3932.
- Hu, K., White, R., Chen, D., Li, B., & Li, W. (2007). Stochastic simulation of water drainage at the field scale and its application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 89, 123–130.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246–1266.
- McBratney, A. B., Odeh, I. O. A., Bishop, T. F. A., Dunbar, M. S., & Shatar, T. M. (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97, 293–327.
- Mello, R. C., Gomes, N. M., Silva, A. M., & Junqueira Júnior, J. A. (2007). Modelagem de atributos físico-hídricos do solo numa bacia hidrográfica da região do Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(5), 1246–1266.
- Motta, P. E. F., Curi, N., Silva, M. L. N., Marques, J. J. G. S. M., Prado, N. J. S., & Fonseca, E. M. B. (2001). *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*. UFLA/CEMIG.
- Oliveira, I. R., Teixeira, D. D. B., Panosso, A. R., Júnior, J. M., & Pereira, G. T. (2014). Modelagem e quantificação da incerteza espacial do potássio disponível no solo por simulações estocásticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(9), 708–718.
- Santos, R. C. V., Soares, M. F., Timm, L. C., Siqueira, T. M., Mello, C. R., Beskow, S., & Kaiser, D. R. (2021). Spatial uncertainty analysis of the saturated soil hydraulic conductivity in a subtropical watershed. *Environmental Earth Sciences*, 80, 707.
- Silva, A. C., Armindo, R. A., Brito, A. S., & Schaap, M. G. (2017). SPLINTEX: A physically-based pedotransfer function for modeling soil hydraulic functions. *Soil & Tillage Research*, 174, 261–272.
- Siqueira, T. M., Louzada, J. A., Pedrollo, O. C., & Castro, N. M. R. (2019). Soil physical and hydraulic properties in the Donato stream basin, RS, Brazil. Part 1: Spatial variability. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 669–674.

- Siqueira, T. M., Louzada, J. A., Pedrollo, O. C., & Castro, N. M. R. (2019). Soil physical and hydraulic properties in the Donato stream basin, RS, Brazil. Part 2: Geostatistical simulation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 675–680.
- Trangmar, B. B. (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, 38, 45–91.
- Usowicz, B., & Lipiec, J. (2017). Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. *Soil & Tillage Research*, 174, 241–250.
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Yamamoto, J. K., & Landim, P. M. B. (2013). *Geoestatística: Conceitos e aplicações*. Oficina de Textos.
- Yao, R. J., Yang, J. S., Wu, D. H., Li, F. R., Gao, P., & Wang, X. P. (2015). Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland. *Journal of Soils and Sediments*.
- Zhao, C., Shao, M., Jia, X., Nasir, M., & Zhang, C. (2016). Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China. *Catena*, 143, 1–6.
- Zhao, Y., Lei, J., Tumurbay, H., Xue, J., & Zhang, C. (2017). Using sequential Gaussian simulation to assess the uncertainty of the spatial distribution of soil salinity in arid regions of Northwest China. *Arid Land Research and Management*.
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H., & de Moraes, J. M. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management*, 222, 29–38.