

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SIMULAÇÃO SEQUENCIAL GAUSSIANA PARA ANÁLISE DE INCERTEZA DE ATRIBUTOS FÍSICOS HÍDRICOS DO SOLO EM ESCALA DE BACIA HIDROGRÁFICA

Rodrigo César de Vasconcelos dos Santos¹; Frederico Carlos Martins de Menezes Filho²; Maurício Fornalski Soares³; Paulo Henrique Pereira dos Santos⁴; José Rodrigues da Silva Neto⁵; Tirzah Moreira Siqueira⁶; Luis Carlos Timm⁷

Abstract: The soil's physical and hydraulic attributes are key factors for understanding the various processes of the hydrological cycle, which are essential for the application of hydrological models. Geostatistical tools have been used to study the spatial variability of the soil's physical and hydraulic attributes at the watershed scale. This study aims to quantify the uncertainty of soil bulk density, macroporosity, and saturated hydraulic conductivity (Ksat) using Sequential Gaussian Simulation (SGS) in the Sanga Ellert watershed (BHSE), located in Rio Grande do Sul, Brazil. Data were collected from an experimental grid of 179 points, established in a watershed characterized by shallow soils and a gently to strongly undulating relief. Experimental and theoretical semivariograms were calculated, and SGS was used to generate 100 equiprobable realizations. Uncertainty was assessed using the 5th and 95th percentiles. The 5th and 95th percentiles indicated that soil bulk density ranged from 1.38 to 1.41 g.cm⁻³, macroporosity from 25.91 to 27.59 cm³.cm⁻³, and Ksat from 72.93 to 85.89 cm.h⁻¹. The multiple realizations obtained through sequential Gaussian simulation enabled the assessment of global uncertainty for soil bulk density, macroporosity, and saturated hydraulic conductivity. The uncertainties in soil bulk density and macroporosity were not very significant, whereas the uncertainty in saturated hydraulic conductivity was considerable due to the wide range between the 5th and 95th percentiles, indicating high variability in saturated hydraulic conductivity in the Sanga Ellert watershed.

Resumo: Os atributos físicos hídricos do solo são fatores-chave para entender os diferentes processos do ciclo hidrológico, imprescindíveis na aplicação de modelos hidrológicos. Ferramentas geoestatísticas têm sido aplicadas para estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos hídricos do solo em escala de bacias hidrográficas. Este trabalho objetiva quantificar a incerteza da densidade do solo, da macroporosidade, e da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) por meio da Simulação Sequencial Gaussiana (SSG) na bacia hidrográfica Sanga Ellert (BHSE), localizada no Rio Grande do Sul, Brasil. Os dados foram obtidos em uma grade experimental de 179 pontos, estabelecida em uma bacia hidrográfica com solos rasos e relevo variando de ondulado a fortemente ondulado. Semivariogramas experimentais e teóricos foram calculados e a SSG foi utilizada para gerar 100 campos equiprováveis. As incertezas foram avaliadas para os percentis de 5 e 95%. Os

¹) Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, Brasil, (35)998237941, rodrigo.vasconcelos@ufv.br

²) Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, Brasil, (34)992874982, frederico.menezes@ufv.br

³) Santa Maria, RS, Brasil, (55)996762742, mauriciofornalski@gmail.com

⁴) Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, Brasil, (34) 999755360, paulo.h.santos@ufv.br

⁵) Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, Brasil, (34) jose.r.neto@ufv.br

⁶) Centro de Engenharia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, (51)993358104, tirzahsiqueira@hotmail.com

⁷) Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão, RS, Brasil, (53)981614305, luiscimm@gmail.com

percentis de 5 e 95% indicaram que a densidade do solo variou entre 1,38 e 1,41 g.cm⁻³, a macroporosidade entre 25,91 e 27,59 cm³.cm⁻³, e a ksat entre 72,93 e 85,89 cm.h⁻¹. As múltiplas realizações obtidas pela simulação sequencial gaussiana permitiram avaliar a incerteza global da densidade do solo, da macroporosidade e da condutividade hidráulica do solo saturado. As incertezas da densidade do solo e da macroporosidade não foram tão expressivas, enquanto a incerteza da condutividade hidráulica do solo saturado foi significativa, visto a amplitude entre os percentis de 5 e 95%, indicando que na bacia hidrográfica Sanga Ellert existe alta variabilidade da condutividade hidráulica do solo saturado.

Palavras-Chave – Geoestatística; Densidade do Solo; Condutividade Hidráulica do Solo Saturado.

INTRODUÇÃO

Os atributos físicos hídricos do solo 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 atributos 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 fatores de formação do solo, devido à complexidade das interações de seus processos na natureza, são responsáveis pelos diferentes padrões de distribuição espacial dos atributos do solo, variando em intensidade em diferentes direções e escalas espaciais (Trangmar *et al.*, 1985). A variabilidade espacial dos atributos físicos hídricos do solo é influenciada por fatores intrínsecos (material do solo, clima, topografia, relevo e tempo) e fatores extrínsecos (práticas de manejo agrícola, como nivelamento da terra, adubação e irrigação). Neste sentido, métodos estatísticos e matemáticos podem ser aplicados para resolver a complexidade e a incerteza inerentes ao sistema do solo. Portanto, o uso de dados do solo e sua análise são importantes na avaliação de campo visto que a incerteza e a imprecisão frequentemente ocorrem em conjuntos de dados (Mcbratney *et al.*, 2000).

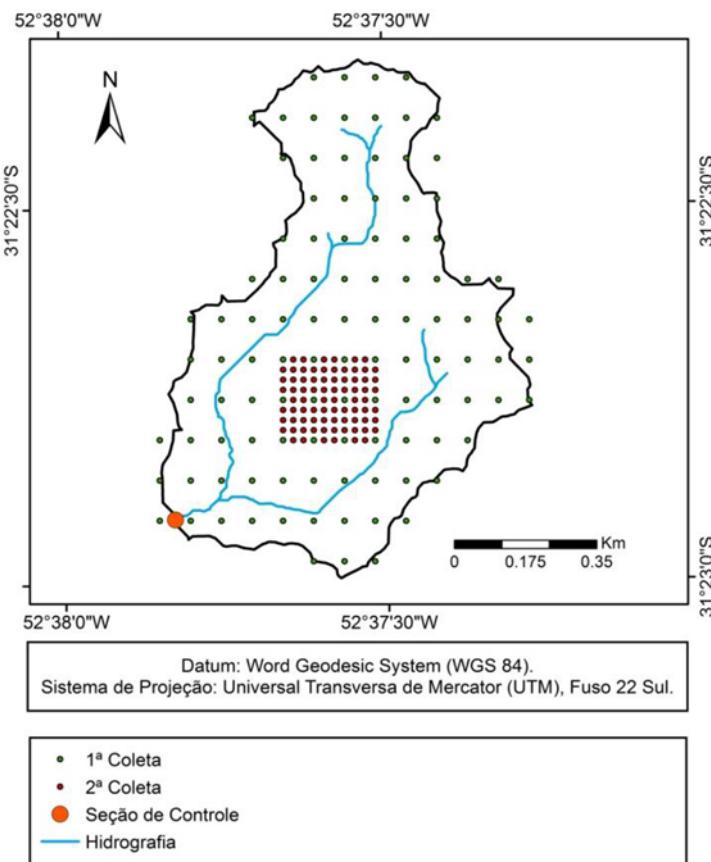
Ferramentas geoestatísticas têm sido aplicadas para estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos hídricos do solo no campo, bem como nas bacias hidrográficas (Reza *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2017; Usowicz e Lipiec, 2017; Santos *et al.* 2021). Dentre os métodos de simulação geoestatística 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.

Diante disso, este trabalho objetiva quantificar a incerteza da densidade do solo, da macroporosidade e da condutividade hidráulica do solo saturado por meio da Simulação Sequencial Gaussiana (SSG) na bacia hidrográfica Sanga Ellert (BHSE), localizada no Rio Grande do Sul, Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na bacia hidrográfica Sanga Ellert (BHSE) localizada no município de Canguçu, Rio Grande do Sul, Sul do Brasil, cujos limites se encontram dentro da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas (BHAP). Primeiramente, procedeu-se a coleta de solos obedecendo a um grid amostral espaçado de 75 m x 100 m, cobrindo toda a área da bacia, totalizando 106 pontos de coleta. Posteriormente, foi realizada uma segunda etapa para um melhor detalhamento amostral, com 73 pontos, cujo espaçamento foi de 25 m x 25 m, totalizando assim 179 pontos (Figura 1).

Figura 1 - Mapa da bacia hidrográfica Sanga Ellert e o grid amostral.



Em cada ponto experimental, amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas na camada de 0-0,20 m usando anéis volumétricos (5,0 cm de altura x 4,8 cm de diâmetro) para determinação dos atributos físico hídricos.

Inicialmente foi realizada uma análise exploratória do conjunto de dados e na sequência foram modelados 8 semivariogramas experimentais para diferentes direções, variando de 22,5° em 22,5° (azimutes 0°; 22,5°; 45°; 67,5°; 90°; 112,5°; 135° e 157,5°).

A análise da variabilidade espacial da densidade do solo, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado foi realizada por meio de simulação sequencial gaussiana (SGG) e a metodologia aplicada refere-se à mesma utilizada por Siqueira *et al.* (2019) e Santos *et al.* (2021).

Foram geradas 100 realizações usando um algoritmo de SSG com o mesmo número de semente (primeiro nó visitado). A simulação geoestatística foi feita por meio de blocos de 15 x 15 m para um grid de 1020 x 1350 m, onde o valor simulado corresponde ao centroide do bloco.

Para chegar aos resultados aqui apresentados foram feitas 100 simulações, dentre as quais com variação nos parâmetros exigidos pelo sgsim. Portanto, diferentes modelos de semivariograma (exponencial e esférico), com semente fixa e variável, bem como com diferentes extrações da cauda da distribuição dos dados foram considerados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise exploratória dos dados

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva dos 179 pontos de amostragem e também simulados considerando a densidade do solo, a macroporosidade e Ksat. É importante destacar que todos os resultados apresentados na Tabela 1 foram derivados de 179 pontos de amostragem.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos dados amostrais e simulados de densidade do solo (g.cm^{-3}), macroporosidade e Ksat (cm.h^{-1}).

Parâmetros Estatísticos	Densidade do solo (g.cm^{-3})		Macroporosidade ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)		Ksat (cm.h^{-1})	
	Amostrais	Simulados	Amostrais	Simulados	Amostrais	Simulados
Média	1,41	1,40	26,05	26,75	81,15	79,8
Mediana	1,42	1,41	26,46	26,91	52,65	54,59
Desvio padrão	0,17	0,18	7,81	7,31	80,69	79,26
Variância	0,03	0,03	61,05	53,59	6510,81	6282,2
Curtose	1,53	1,35	0,98	1,06	1,16	1,2
Assimetria	-1,006	-1,005	0,16	0,16	1,39	1,35
Mínimo	0,81	0,81	6,44	6,19	0,76	0,74
Máximo	1,75	1,76	53,70	53,94	376,43	365,04
Coeficiente de Variação (CV)	12,37	12,60	29,99	27,34	99,00	99,00

Os valores amostrais médios de densidade do solo, macroporosidade e Ksat distribuídos espacialmente na BHSE, com área em torno de $0,7 \text{ km}^2$ foram respectivamente de $1,41 \text{ g.cm}^{-3}$, $26,05$ e $81,15 \text{ cm.h}^{-1}$.

Percebeu-se variação na amplitude dos dados dos atributos físicos hídricos analisados, especialmente da Ksat. Essa variação é bem conhecida para Ksat, independentemente da metodologia de medição, localização geográfica, uso da terra, tipo ou escala do solo (Baiamonte *et al.* 2017).

As florestas nativas fornecem valores médios mais altos de Ksat ($131,0 \text{ cm.h}^{-1}$) e Macro (31%) e menores valores de DS ($1,26 \text{ g.cm}^{-3}$) quando comparados aos outros sistemas de uso do solo (Silvicultura: Ksat = $96,0 \text{ cm.h}^{-1}$, Macro = 30% e DS = $1,30 \text{ g.cm}^{-3}$; Cultura anual: Ksat = $73,0 \text{ cm.h}^{-1}$, Macro = 25% e DS = $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$; e Pastagem: Ksat = $62,0 \text{ cm.h}^{-1}$, Macro = 24% e DS = $1,42 \text{ g.cm}^{-3}$). Em média, os solos de florestas nativas apresentaram valores de Ksat aproximadamente 1,8 e 2,1 vezes superiores aos encontrados em solos de cultivo anuais e pastagem neste estudo, respectivamente.

A falta de práticas de conservação do solo na bacia estudada associadas ao cultivo do tabaco em áreas com alta fragilidade ambiental aumentaram a suscetibilidade do solo à degradação, diminuindo sua qualidade e aumentando os riscos de erosão do solo, principalmente pelo uso intensivo da camada de arado (0-0,20 m de camada do solo) pelos agricultores.

Análise de incerteza

Foi gerado um conjunto de representações equiprováveis da distribuição espacial da densidade do solo, macroporosidade e Ksat e utilizou-se os 100 diferentes mapas simulados como uma medida de incerteza, como indicado por Goovaerts (2001). 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 da técnica baseada na krigagem.

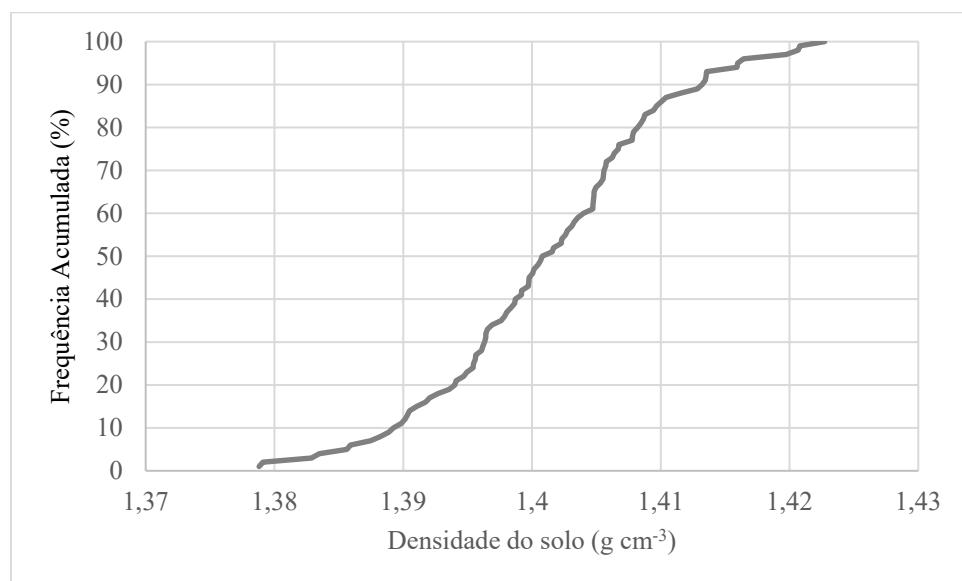
A incerteza espacial foi calculada através de probabilidade cumulativa, já que a mesma ajuda na determinação da confiabilidade em delinear áreas com alta probabilidade de exceder determinado valor crítico e, dessa forma, representa um indicativo da incerteza espacial (Oliveira *et al.* 2014).

Portanto, como parâmetro final para determinar as incertezas da densidade do solo, macroporosidade e Ksat, 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.

Densidade do solo

A Figura 2 retrata a incerteza da densidade do solo na bacia hidrográfica Sanga Ellert.

Figura 2 - Probabilidade cumulativa da densidade do solo.



Os percentis de 5% e 95% para os dados médios dos campos de densidade do solo simulados foram respectivamente de 1,38 e 1,41 g.cm⁻³, tendo uma incerteza de 0,03 g cm⁻³ para tais percentis.

Sendo assim, pode-se afirmar com 90% de certeza com base nos valores médios dos campos simulados que a densidade do solo varia entre 1,38 e 1,41 g cm⁻³ na BHSE. Pode-se afirmar também, porém com 95% de certeza que os valores médios dos campos da densidade do solo na BHSE não serão superiores a 1,41 g cm⁻³.

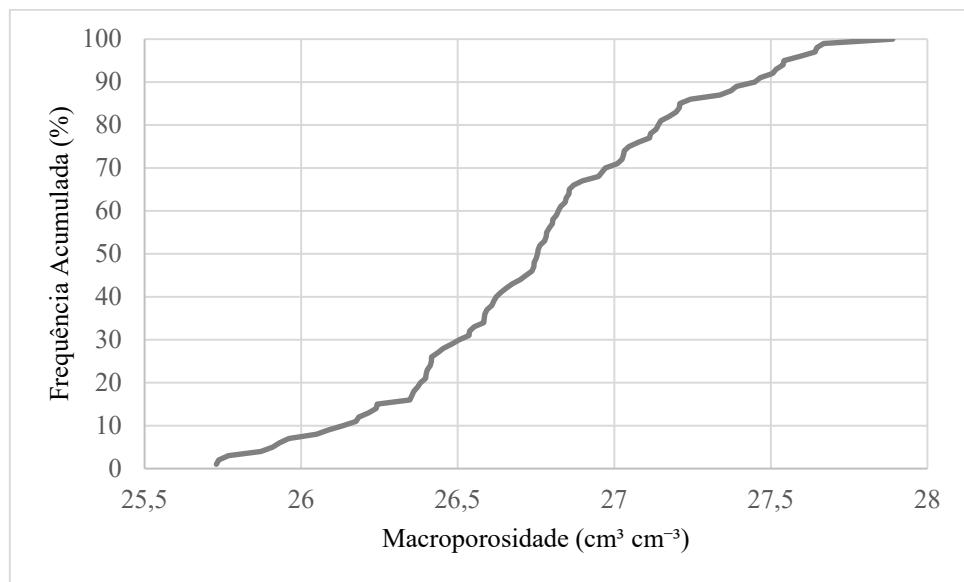
A pequena amplitude da incerteza sugere uma distribuição espacial mais homogênea da densidade do solo em comparação a outros atributos físico-hídricos, como a Ksat. No entanto, mesmo variações aparentemente pequenas podem ter impacto significativo em processos como infiltração de água, retenção hídrica, porosidade total e desenvolvimento radicular, especialmente em regiões com maior atividade antrópica ou compactação superficial.

Apesar da incerteza observada para a densidade do solo seja reduzida, sua consideração é essencial em aplicações como modelagem hidrológica, estimativas de armazenamento de água no solo e avaliação da qualidade física do solo

Macroporosidade

A Figura 3 retrata a incerteza da densidade do solo na bacia hidrográfica Sanga Ellert.

Figura 3 - Probabilidade cumulativa da macroporosidade



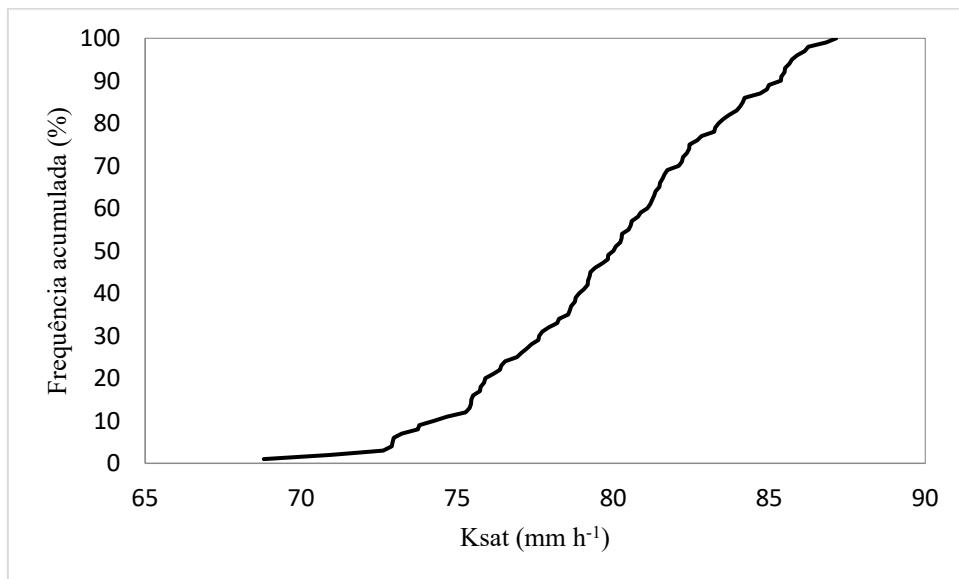
Os percentis de 5% e 95% para os dados médios dos campos de macroporosidade simulados foram respectivamente de $25,91$ e $27,59 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, tendo uma incerteza de $1,68 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para tais percentis.

Sendo assim, pode-se afirmar com 90% de certeza com base nos valores médios dos campos simulados que a macroporosidade varia entre $25,91$ e $27,59 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ na BHSE. Pode-se afirmar também, porém com 95% de certeza que os valores médios dos campos da macroporosidade na BHSE não serão superiores a $27,59 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

A amplitude moderada da incerteza sugere que a macroporosidade apresenta uma variabilidade intermediária em relação aos demais atributos analisados. Essa variabilidade pode ser atribuída a diferenças no uso e manejo do solo, compactação superficial, atividade biológica, e à própria estrutura física do solo. A macroporosidade é um parâmetro-chave para o escoamento preferencial, aeração e drenagem interna do solo.

Condutividade hidráulica do solo saturado

A Figura 4 retrata a incerteza da condutividade hidráulica do solo saturado na bacia hidrográfica Sanga Ellert.



Os percentis de 5% e 95% para os dados médios dos campos de Ksat simulados foram respectivamente de 72,93 e 85,89 cm h⁻¹, tendo uma incerteza de 12,96 cm.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 72,93 e 85,89 cm h⁻¹ na BHSE. Além disso, pode-se afirmar também, porém com 95% de certeza que os valores médios dos campos da Ksat na BHSE não serão superiores a 85,89 cm h⁻¹.

A alta variabilidade de Ksat pode ser explicada pelo mapa de uso do solo, bem como pela heterogeneidade textural, densidade do solo em estudo, pela variação topográfica (Dongli *et al.* 2017) e tipos de vegetação presentes na BHSE. Bagarello *et al.* (2017) perceberam que a variabilidade de Ksat foi menor nas zonas mais íngremes de uma bacia hidrográfica do que nas mais planas. Na bacia em estudo percebeu-se que os maiores valores de Ksat ocorreram em locais com mata nativa, enquanto os menores em locais com predomínio da cultura do fumo. Neste caso, a incerteza elevada em relação à densidade e à macroporosidade indica que a Ksat 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.

CONCLUSÃO

Todos os critérios necessários para a validação dos campos aleatórios gerados foram satisfeitos e, portanto, serviram para descrever a continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia analisada. Desta forma, a SSG revelou-se como uma ferramenta eficaz para compreensão da magnitude e estrutura da variabilidade espacial dos atributos físicos hídricos do solo, sendo de grande valia para um bom manejo do solo e da água em bacias hidrográficas.

As múltiplas realizações obtidas pela SSG permitiram avaliar a incerteza global da densidade do solo, da macroporosidade e da condutividade hidráulica do solo saturado. As incertezas da macroporosidade e densidade do solo não foram tão expressivas, enquanto a incerteza da condutividade hidráulica do solo saturado foi significativa, visto a amplitude entre os percentis de 5 e 95%, indicando que na bacia hidrográfica Sanga Ellert existe alta variabilidade da condutividade

hidráulica do solo saturado. Tais incertezas devem ser utilizadas na geração de diferentes cenários de mapas de macroporosidade, densidade do solo e condutividade hidráulica do solo saturado, considerando-se diferentes níveis de riscos assumidos, que apoiarão nas decisões no que se refere à gestão do solo e da água em bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

- 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 v. 303, p.70–77.
- 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 Degradation & Development v.28, p. 970-982.
- 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.
- 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, p. 15–24.
- GOOVAERTS, P. (2001). *“Geostatistical modelling of uncertainty in soil Science”*. Geoderma, v.103, p.3–26.
- 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 v.97, p.293–327.
- REZA, S. K.; NAYAK, D. C.; CHATTOPADHYAY, T.; MUKHOPADHYAY, S.; SINGH, S. K.; SRINIVASAN, R. (2015). *Spatial distribution of soil physical properties of alluvial soils: a geostatistical approach*. Archives of Agronomy and Soil Science, 62(7), 972–981.
- 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.; SPLINTEX, A. (2017). *“Physically-based pedotransfer function for modeling soil hydraulic functions”*. Soil & Tillage Research v.174, p.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 2: Geostatistical simulation. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v. 23, p. 675-680.
- SOARES, M.F.; TIMM, L.C.; SIQUEIRA, T.M.; DOS SANTOS, R.C.V.; REICHARDT, K. (2023). *“Assessing the spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity at the watershed scale using the sequential Gaussian co-simulation method”*. Catena v. 221, p. 106756.

TRANGMAR, B.B. (1985). “*Application of geostatistics to spatial studies of soil Properties*”. Advances in Agronomy, v. 38, p. 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, v.174, p.241–250.

ZHAO, Y.; LEI, J.; TUMARBAY, H.; XUE, J. (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 v.32, p. 20-37,

AGRADECIMENTOS - À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio.