



**ALICE RAQUEL CAMINHA**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-  
HÍDRICOS DO SOLO EM UMA ÁREA DE RECARGA DE  
NASCENTE**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**ALICE RAQUEL CAMINHA**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM  
UMA ÁREA DE RECARGA DE NASCENTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, linha de pesquisa de Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Gilberto Coelho  
Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Setor de Repositório  
Insitucional da Biblioteca Universitária da UFLA**

Caminha, Alice Raquel.

Distribuição espacial dos atributos físico-hídricos do solo em  
uma área de recarga de nascente / Alice Raquel Caminha. - 2022.  
105 p.

Orientador(a): Gilberto Coelho.

Coorientador(a): Luiz Fernando Coutinho de Oliveira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Geoestatística. 2. Krigagem ordinária. 3. Física do solo. I. Coelho,  
Gilberto. II. Oliveira, Luiz Fernando Coutinho de. III. Título.

**ALICE RAQUEL CAMINHA**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM  
UMA ÁREA DE RECARGA DE NASCENTE**

**SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL PHYSICAL-HYDRIC ATTRIBUTES IN A  
SPRING RECHARGE AREA**

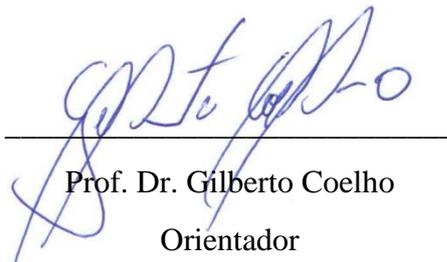
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, linha de pesquisa de Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 14 de fevereiro de 2022.

Dr. Gilberto Coelho - UFLA

Dr. Marcelo Ribeiro Viola - UFLA

Dr. Daniel Brasil Ferreira Pinto - UFVJM



---

Prof. Dr. Gilberto Coelho  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me mantido até aqui.

Ao meu orientador Gilberto Coelho, pelos ensinamentos e pelas vezes que minimizou minhas limitações e meus medos. “Cabeça erguida e fé, Alice! ”.

Aos meus amigos Jonas e Jorge, por terem tido a boa vontade de me acompanharem nas coletas em campo, que considero ter sido a parte mais difícil dessa trajetória. Faltam-me palavras para expressar minha gratidão. Espero um dia poder retribuir e, caso não consiga, espero que Deus o faça.

Ao meu professor, Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, pelo tempo que me concedeu para sanar minhas dúvidas e pelo apoio emocional de sempre.

À Diretoria de Gestão da Qualidade e Meio Ambiente (DQMA – UFLA), por financiar parte das análises e contribuir para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Departamento de Ciência do Solo – UFLA, em especial ao Doroteo, pela boa vontade para emprestar todos os materiais que precisei.

Ao Núcleo de Estudos em Hidráulica e Hidrologia - NEHIDRO, por todo crescimento pessoal e profissional, pela amizade e por serem uma das partes divertidas da minha semana durante o período de isolamento social.

Ao Ronan Naves Carvalho, por toda a ajuda que me prestou no laboratório. Sem suas orientações, seria extremamente mais difícil.

Aos meus amigos da pós-graduação: Flávia, Marina, Mateus e Lorena, pelo acolhimento, pelos momentos de descontração, pelas correções e por todas as vezes que se prontificaram a me ajudar nos perrengues desses últimos dois anos.

Ao Renato, Elvis, Pâmela, Aline e Jean, pela boa convivência durante o tempo em que realizei as análises no DRH e pela paciência nos momentos de tensão, quando temi que as coisas não dessem certo.

Ao meu companheiro, Guilherme, por me fazer acreditar que dias melhores virão e por sempre me fazer enxergar aquilo que conquistei com muito esforço, embora essa seja apenas uma das etapas iniciais da vida que construiremos.

À ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, por todo o aprendizado.

**Obrigada!**

## RESUMO

A quantidade e qualidade da água produzida por uma nascente são controladas pela interação entre os fatores que atuam em sua área de recarga, entre eles, as características e propriedades físico-hídricas dos solos. Nesse sentido, visando a manutenção da produção de água e a compreensão da dinâmica hidrológica nestas áreas, torna-se fundamental conhecer o comportamento dos atributos físico-hídricos do solo e a forma como estão distribuídos no espaço. Diante disso, objetivou-se com o presente estudo analisar a distribuição espacial e realizar o mapeamento dos atributos físico-hídricos da área de recarga da principal nascente que abastece a Universidade Federal de Lavras, MG. Após a delimitação da área por meio de ferramentas SIG, foi estabelecida uma malha amostral com pontos separados por 50 m e, em cada um, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas, nas camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. Para a caracterização físico-hídrica, foram determinadas, em laboratório, a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), volume total de poros (VTP), porosidade drenável ( $\mu$ ), teor de matéria orgânica (MO) e teores de areia, argila e silte. Posteriormente à etapa de análise exploratória dos dados, a análise geoestatística foi aplicada para o estudo da estrutura espacial dos atributos físico-hídricos. Após a seleção do melhor modelo de semivariograma teórico, os valores ajustados de cada parâmetro foram utilizados para a geração dos mapas, adotando-se krigagem ordinária como interpolador. Para a camada 0 – 20 cm, os atributos  $D_s$ ,  $D_p$  e VTP foram classificados como de baixa variabilidade e  $\mu$ , MO, areia, argila e silte, de média variabilidade. Para a camada 20 – 40 cm, os resultados foram similares, exceto para  $\mu$  que apresentou alta variabilidade, com um CV de 66,69%. A condutividade hidráulica do solo saturado apresentou alta variabilidade para as duas camadas analisadas, com CV de 128,15% e 217,22%, respectivamente. Por meio da análise do grau de dependência espacial, para ambas as camadas, a maioria dos atributos físico-hídricos apresentou dependência espacial classificada como forte e nenhuma como fraca. A partir da avaliação do Erro Médio Reduzido e do Desvio Padrão do Erro, gerados no procedimento de validação cruzada, o modelo exponencial foi considerado o melhor modelo para a maioria dos atributos de ambas as camadas. A interpolação por meio da krigagem ordinária permitiu a identificação de áreas com condições favoráveis à recarga de água, como as regiões mais baixas, ao entorno da nascente, e as regiões mais altas, situadas a leste. Visando a manutenção da produção de água da nascente, recomenda-se que essas áreas sejam consideradas locais prioritários para conservação.

**Palavras-chave:** Geoestatística. Krigagem. Física do solo. Dinâmica hidrológica.

## ABSTRACT

The quantity and quality of water produced by a spring are controlled by the interaction between the factors that act in its recharge area, among them, the physical-hydric properties and characteristics of the soil. In this sense, in order to maintain the water production of the springs and to understand the hydrological dynamics of these areas, it is essential to know the behavior of the physical-hydric attributes of the soil and how they are distributed in space. Therefore, the objective of the present work was to analyze the spatial distribution and to map the physical-water attributes of the recharge area of the main spring that supplies the Federal University of Lavras, MG. After delimiting the recharge area using GIS tools, a sampling grid was established with points separated by 50 m and, in each one, deformed and undeformed soil samples were collected in the 0 - 20 cm and 20 - 40 cm depths. For the soil's physical-hydric characterization, the saturated soil hydraulic conductivity ( $K_0$ ), bulk density ( $D_s$ ), particle density ( $D_p$ ), total pore volume (VTP), drainable porosity ( $\mu$ ), organic matter content (MO) and sand, clay and silt contents were determined in the laboratory. After the exploratory data analysis step, geostatistical analysis was applied to study the spatial structure of the physical-hydrological attributes. After the selection of the best theoretical semivariogram model, the adjusted values of each parameter were used for the generation of maps, adopting ordinary kriging as interpolator. For the 0 - 20 cm depth, the attributes  $D_s$ ,  $D_p$  and VTP were classified as having low variability and  $\mu$ , MO, sand, clay and silt, as having medium variability. For the depth 20 - 40 cm, the results were similar, except for  $\mu$  that presented high variability, with a CV of 66.69%. The saturated soil hydraulic conductivity showed high variability for the two depths analyzed, with CV of 128.15% and 217.22%, respectively. Through the analysis of the degree of spatial dependence, for both depths, most of the physical-hydric attributes presented spatial dependence classified as strong and none as weak. By evaluating the of the Mean Standardized Error and the Root Mean Square Standardized Error, generated in the cross validation procedure, the exponential model was considered the best model for most attributes, in both depths. The interpolation through ordinary kriging allowed the identification of areas with favorable conditions for water recharge, such as the lower regions, around the spring, and the higher regions, located to the east. In order to maintain the spring's water production, it is recommended that these areas be considered priority sites for conservation.

**Keywords:** Geostatistics. Kriging. Soil physics. Hydrological dynamics.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

- Figura 1 - Representação de uma área de recarga.....4  
Figura 2 - Representação gráfica de um semivariograma típico e seus parâmetros básicos..... 14

### SEGUNDA PARTE

- Figura 1 - Localização da área de estudo. ....26  
Figura 2 – Classes de relevo da área de recarga. ....27  
Figura 3 - Uso e ocupação do solo da área de recarga. ....28  
Figura 4 - Distribuição dos pontos amostrais. ....29  
Figura 5 - Coleta de solo com estrutura deformada (1) e indeformada (2 e 3). ....30  
Figura 6 - Gráficos boxplot para os atributos  $K_0$  sem transformação logarítmica (1) e com transformação logarítmica (2),  $D_s$  (3),  $D_p$  (4), VTP (5),  $\mu$  (6), MO (7), Areia (8), Argila (9) e Silte (10), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.....36  
Figura 7 – Distribuição espacial dos atributos  $K_0$  sem transformação (1) e com transformação logarítmica (2),  $D_s$  (3),  $D_p$  (4), VTP (5),  $\mu$  (6), MO (7), Areia (8), Argila (9) e Silte (10), para a camada 0 – 20 cm. ....53  
Figura 8 - Distribuição espacial dos atributos  $K_0$  sem transformação (1) e com transformação logarítmica (2),  $D_s$  (3),  $D_p$  (4), VTP (5),  $\mu$  (6), MO (7), Areia (8), Argila (9) e Silte (10), para a camada 20 - 40 cm. ....56

### APÊNDICE

- Figura 1 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. 70  
Figura 2 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado com transformação logarítmica ( $\text{Log}(K_0)$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm..... 71  
Figura 3 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de densidade do solo ( $D_s$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. .... 72  
Figura 4 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de densidade de partículas ( $D_p$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. .... 73

Figura 5 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de volume total de poros (VTP), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.....	74
Figura 6 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de porosidade drenável ( $\mu$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.....	75
Figura 7 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de matéria orgânica (MO), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	76
Figura 8 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de Areia (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	77
Figura 9 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de Argila (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.....	78
Figura 10 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de Silte (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.....	79
Figura 11 - Histograma de frequência para o atributo $K_0$ sem transformação logarítmica (1) e com transformação logarítmica (2), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	80
Figura 12 - Histograma de frequência para o atributo $D_s$ ( $g\ cm^{-3}$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	80
Figura 13 - Histograma de frequência para o atributo $D_p$ ( $g\ cm^{-3}$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	81
Figura 14 - Histograma de frequência para o atributo VTP (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	81
Figura 15 - Histograma de frequência para o atributo $\mu$ ( $cm^3\ cm^{-3}$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	81
Figura 16 - Histograma de frequência para o atributo MO (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	81
Figura 17 - Histograma de frequência para o atributo Areia (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	82
Figura 18 - Histograma de frequência para o atributo Argila (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	82
Figura 19 - Histograma de frequência para o atributo Silte (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. ....	82
Figura 20 - Semivariogramas ajustados para os atributos físico-hídricos da camada 0- 20 cm. ....	83

Figura 21 - Semivariogramas ajustados para os atributos físico-hídricos da camada 20 - 40 cm. .....	87
--	----

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físico-hídricos da área de recarga para a camada 0 - 20 cm. ....	39
Tabela 2 - Estatística descritiva dos atributos físico-hídricos da área de recarga para a camada 20 - 40 cm. ....	40
Tabela 3 - Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariograma testados para os atributos físico-hídricos e seus respectivos graus de dependência espacial, para a camada 0 – 20 cm. .	42
Tabela 4 - Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariograma testados para os atributos físico-hídricos e seus respectivos graus de dependência espacial, para a camada 20 – 40 cm.	43
Tabela 5 - Estatísticas geradas pelo procedimento de validação cruzada para os atributos da camada 0 – 20 cm. ....	47
Tabela 6 - Estatísticas geradas pelo procedimento de validação cruzada para os atributos da camada 20 – 40 cm. ....	48

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
2.1 Áreas de recarga .....	3
2.2 Atributos físico-hídricos do solo e sua variabilidade espacial .....	5
2.3 Geostatística aplicada ao estudo do solo .....	11
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>15</b>
<b>SEGUNDA PARTE - ARTIGO</b> .....	<b>22</b>
<b>ARTIGO – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM UMA ÁREA DE RECARGA DE NASCENTE</b> .....	<b>23</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>24</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
2.1 Caracterização da área de estudo .....	25
2.2 Amostragem do solo .....	29
2.3 Determinação dos atributos físico-hídricos .....	30
2.4 Análises estatísticas.....	32
2.4.1 Análise exploratória dos dados.....	32
2.4.2 Análise geostatística .....	33
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>35</b>
3.1 Análise exploratória.....	35
3.2 Análise geostatística .....	41
3.3 Mapeamento dos atributos físico-hídricos do solo.....	50
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>70</b>

## **PRIMEIRA PARTE**

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Nascentes são fundamentais para a formação e perenidade dos cursos d'água, sobretudo quando mantêm suas vazões adequadas ao longo do ano (PINTO et al., 2012; SANTOSA; HARSANTI, 2020). Nesse sentido, a conservação da capacidade de produção de água dessas feições tem se tornado um tema cada vez mais relevante para a gestão dos recursos hídricos, frente à crescente demanda de água para as atividades antrópicas, principalmente o abastecimento público (GOMES et al., 2018; GRAEPIN et al., 2016; LEAL et al., 2017).

As atividades na Universidade Federal de Lavras geram um consumo aproximado de 1 milhão de litros de água por dia, atendendo cerca de 16 mil pessoas que circulam no campus diariamente. Por se tratar da 2ª universidade do mundo com o certificado *Blue University* em reconhecimento pela gestão das águas, a instituição tem um papel importante, não só para o meio ambiente, mas também para os recursos públicos. Para a universidade, a produção de água por meio das nascentes representa uma economia de cerca de 4 milhões de reais por ano, o que chega a quase 10% do custeio de toda a instituição. Dessa forma, os recursos que não são empregados na compra de água podem ser destinados para a melhoria da formação dos estudantes e para o desenvolvimento de projetos de pesquisa e extensão, trazendo benefícios à população (UFLA, 2020).

A produção de água de uma nascente é resultado da interação entre todos os fatores que atuam em sua área de recarga, que constitui o local de reabastecimento das reservas subterrâneas (FREEZE; CHERRY, 1979; OLIVEIRA et al., 2020; PINTO et al., 2012). Entre estes fatores, destacam-se o clima, a topografia, o uso e ocupação do solo, o tipo de solo e suas características e propriedades físico-hídricas, que estão intimamente relacionadas ao processo de recarga, uma vez que influenciam as condições de permeabilidade do solo e controlam os padrões de infiltração da água (ALMEIDA et al., 2018; ALVARENGA et al., 2012; BONAMIGO et al., 2017).

Atualmente, as atividades antrópicas em áreas de recarga, associadas à falta de planejamento urbano, têm sido cada vez mais intensificadas (ANDRADE et al., 2015; BAUM et al., 2018), gerando alterações no uso e ocupação do solo capazes de influenciar diretamente os atributos físico-hídricos, principalmente os mais sensíveis ao manejo empregado (ALVARENGA et al., 2012). Somado a isso, destaca-se a variabilidade espacial destes atributos, que ocorre naturalmente devido aos processos físicos, químicos e biológicos de formação e desenvolvimento dos solos (SIQUEIRA et al., 2019). A junção desses fatores

dificulta as tomadas de decisão relacionadas ao planejamento e manejo adequados dos recursos solo e água.

Nesse sentido, considerando a importância da manutenção da produção de água pelas nascentes, a delimitação das áreas de recarga e o conhecimento da distribuição espacial dos atributos físico-hídricos tornam-se etapas necessárias ao sucesso da gestão integrada dos recursos hídricos (FRISBEE et al., 2013; GLEASON et al., 2020; MANNING et al., 2012). Tal conhecimento pode contribuir para o levantamento de zonas favoráveis à recarga de água, além do estabelecimento, por parte dos tomadores de decisão, de práticas voltadas à priorização e recuperação dessas áreas, visando a manutenção da qualidade do solo e dos indicadores associados à recarga (ALVARENGA et al., 2012; CARMO et al., 2014; ROCHA et al., 2019).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho analisar a distribuição espacial e realizar o mapeamento dos atributos físico-hídricos do solo na área de recarga da principal nascente que abastece a Universidade Federal de Lavras, a fim de contribuir no entendimento da dinâmica hidrológica na área e prover subsídios à gestão integrada dos recursos hídricos locais, visando a manutenção da capacidade de produção de água da nascente.

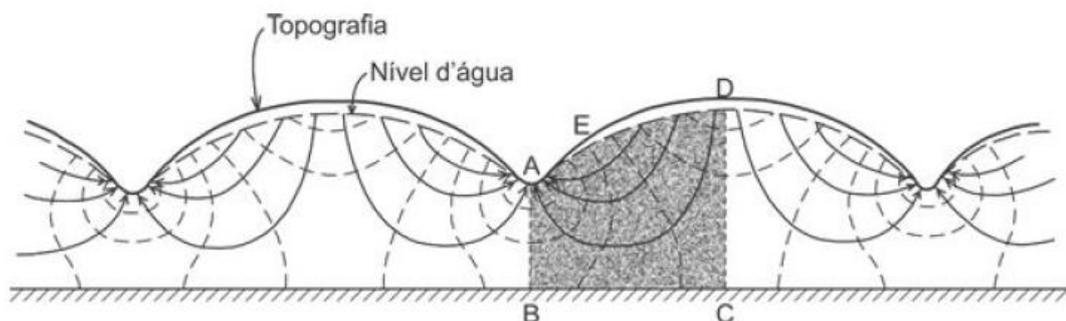
## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Áreas de recarga**

Conforme dito anteriormente, as áreas de recarga podem ser definidas como os locais da superfície terrestre nos quais ocorrem o reabastecimento das reservas subterrâneas, que acontece por meio dos processos de infiltração e percolação da água abaixo da zona das raízes (FELIPPE; MAGALHÃES JÚNIOR, 2009; FREEZE; CHERRY, 1979). Partindo da perspectiva superficial, segundo definição de Silva (2009), as áreas de recarga compreendem a área de drenagem acumulada, inclusa entre os divisores topográficos, acima da cota altimétrica de um ponto. Além disso, por serem locais favoráveis à infiltração e percolação, possuem maior vulnerabilidade à introdução de contaminantes (MORITA; WENDLAND, 2019), o que reforça a necessidade de medidas ambientais que visem o manejo adequado da água e do solo nesses locais (VILAVERDE, 2016).

No que diz respeito à dinâmica hidrológica do solo, a água que precipita chega aos aquíferos através dos processos de infiltração e percolação que ocorrem nas áreas de recarga (FIGURA 1) e se movimenta sempre em direção às áreas de descarga, devido ao gradiente de potencial total e condutividade hidráulica dos solos e das rochas (CARMO, 2014; FREEZE; CHERRY, 1979). Dessa forma, as áreas de recarga são fundamentais para definir a potencialidade de produção de água em uma bacia. Esta potencialidade está associada, sobretudo, à capacidade da superfície em permitir a infiltração da água e à capacidade de armazenamento do reservatório subterrâneo (FELIPPE; MAGALHÃES JÚNIOR, 2009; FETTER, 1994). Segundo Freeze e Cherry (1979), as principais formas de identificar as áreas de recarga são por meio de padrões piezométricos, padrões hidroquímicos, isótopos ambientais, análises das características da superfície, como cobertura vegetal e tipo de solo; e por meio da topografia, que parte da consideração simplista de que elevações tendem a constituir áreas favoráveis à recarga. Para a área sombreada da Figura 1, a região DE compreende a área de recarga e a região EA, a área de descarga.

Figura 1 - Representação de uma área de recarga.



Fonte: Adaptado de Freeze e Cherry (1979).

Menezes et al. (2009) analisaram a dinâmica hidrológica de nascentes da sub-bacia do Ribeirão Lavrinha, em Minas Gerais, que possuem áreas de recarga sob diferentes coberturas vegetais, uma sob pastagem e uma sob Mata Atlântica. Os autores verificaram que o uso do solo na área de recarga influenciou os valores e o comportamento temporal das vazões específicas das nascentes estudadas e recomendam que, para estudos relacionados à dinâmica da água, também sejam levadas em consideração as condições fisiográficas, pedológicas e topográficas das áreas de recarga. Felipe e Magalhães Júnior (2009) apresentaram uma proposta de classificação qualitativa de topos de morro como áreas preferencias de recarga de aquíferos, tendo como estudo de caso o município de Belo Horizonte, MG, e considerando os impactos ambientais característicos de um espaço metropolitano. De acordo com os resultados, nove áreas de recarga foram consideradas de baixa eficiência e 89 de média a baixa. Os autores relacionaram esses resultados ao comprometimento da recarga subterrânea natural em razão da acentuada impermeabilização do solo na região.

Por meio de ferramentas SIG, Melo Neto et al. (2013) realizaram a delimitação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Siriri, Sergipe. Os autores partiram da elaboração de mapas hipsométricos e de declividade, baseado no Modelo Digital de Elevação, associando a mapas temáticos de classe de solo, tipo de uso e ocupação, características geomorfológicas, tipo de aquífero e rede de drenagem. Os resultados mostraram regiões mais favoráveis à recarga concentradas na cabeceira, constituindo 254,15 km<sup>2</sup>, o que representou 61,04% da área da bacia. Além disso, os autores verificaram que a metodologia empregada se mostrou eficiente para a análise da distribuição da recarga na bacia, podendo servir como ferramenta de manejo e gestão integrada dos recursos hídricos locais.

Lamichhane e Shakya (2019) avaliaram o impacto da mudança do uso e cobertura do solo nas áreas de recarga da bacia hidrográfica do Rio Bagmati, no Nepal, sob diferentes

cenários futuros. A análise procedeu-se com a utilização de um conjunto de técnicas, incluindo modelos, ferramentas SIG e ensaios de campo. Por meio das projeções, os autores estimaram que 6% das áreas expostas serão convertidas em áreas impermeabilizadas a cada década, até 2050. Segundo os autores, essa projeção implica em possível esgotamento do reservatório subterrâneo, incluindo impactos nas vazões de nascentes e nos fluxos base para os rios, levando a problemas de abastecimento urbano.

## **2.2 Atributos físico-hídricos do solo e sua variabilidade espacial**

O solo, como um corpo natural complexo, possui dinamismo e é resultante da atuação simultânea de seus fatores de formação, que incluem o clima, os organismos vivos, o material de origem, relevo e tempo (RESENDE et al., 2014). Suas características estão relacionadas à composição da matriz sólida e ao conteúdo dos poros. O conjunto destas características define as propriedades físicas, que, juntamente com condições de contorno específicas, determinam a ocorrência e a intensidade dos processos (VAN LIER, 2020). Considerado um reservatório dinâmico, os atributos físico-hídricos do solo são capazes de interferir no comportamento da lâmina precipitada após chegar à superfície, influenciando, sobretudo, a capacidade de armazenamento, o processo de infiltração e o movimento de água (OWUOR et al., 2016; SOUZA et al., 2004a).

No que diz respeito à qualidade do solo, a condutividade hidráulica saturada, porosidade drenável, teor de matéria orgânica e densidade são considerados indicadores associados à recarga subterrânea, sendo, também, influenciados pelo uso e manejo do solo, conforme apontam os trabalhos de Menezes et al. (2009), Alvarenga et al. (2012) e Oliveira et al. (2020).

Por serem atributos de fácil determinação e sensíveis às mudanças de uso e manejo, a densidade do solo e a porosidade total, são utilizados, também, para a avaliação do estado estrutural do meio poroso, bem como na identificação de impactos causados por processos de compactação (MELLO et al., 2007; PRICE et al., 2010; RIZZARDI et al., 2014).

A densidade do solo, especificamente, está relacionada à retenção, armazenamento e desenvolvimento do sistema radicular de plantas (REICHARDT; TIMM, 2012). O aumento da densidade do solo, por afetar sua estrutura e porosidade, causa, sobretudo, resistência mecânica à penetração, prejuízos às atividades biológicas e diminuição da condutividade hidráulica, levando, até mesmo, à redução da produtividade agrícola (MELO FILHO et al., 2006; SANTOS et al., 2006). Segundo Junqueira Júnior (2006), áreas de recarga com maiores densidades de

solo possuem restrição ao fluxo de água no perfil e prejuízos às condições de infiltração, comprometendo a recarga dos aquíferos e a produção de água das nascentes.

A matéria orgânica é um atributo importante que exerce influência sobre a recarga de água. Isso porque, além de favorecer a capacidade de retenção e armazenamento (DUTAL; REIS, 2020), por se tratar de um agente cimentante, é capaz de unir as partículas de solo, conferindo maior estabilidade aos agregados e alterando a distribuição dos poros, o que facilita a infiltração e reduz a erodibilidade (LE MAITRE et al., 1999; RESENDE et al., 2014). Além disso, os compostos orgânicos promovem a ciclagem de nutrientes (KARLEN et al., 1997) e são fontes de energia para a biota edáfica, a qual contribui para a melhora dos indicadores de qualidade do solo (ALVARENGA et al., 2012; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Em diferentes trabalhos (LEITE et al., 1990; MENDONÇA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2020), foi observado que a matéria orgânica presente no solo, principalmente em formações florestais, possui papel importante para a manutenção de parâmetros favoráveis à recarga dos aquíferos, tais como aumento da umidade, porosidade, capacidade de infiltração e condutividade hidráulica.

A porosidade total ou volume total de poros do solo (VTP) é definida como a parcela de seu volume ocupada por ar e água (VAN LIER, 2020). Os poros são estabelecidos pelo arranjo das partículas sólidas do solo. Poros com diâmetro maior ou igual a 0,05 mm constituem a macroporosidade do solo e poros com diâmetro menor que 0,05 mm, a microporosidade. O limite da diferença entre macro e microporos não é possível de ser estabelecido com clareza, uma vez que a distribuição de tamanho dos poros é contínua. Em razão disso, essa distinção é feita, arbitrariamente, a partir das curvas de retenção (REICHARDT; TIMM, 2012).

A porosidade dos diferentes tipos de solo varia conforme suas características, principalmente aquelas determinadas pela estrutura e textura. No que diz respeito à textura, solos arenosos possuem VTP variando entre 35 e 60%, solos siltosos entre 30 e 60% e solos argilosos entre 30 e 70% (KOOEVAAR et al., 1983). Em solos com partículas maiores, como as areias, há o predomínio de macroporos, os quais favorecem a aeração do solo e o movimento de água. Nos solos argilosos, nos quais há predomínio de partículas menores, há maior presença de microporos, que favorecem a retenção e armazenamento de água (KIEHL, 1979; VIEIRA et al., 1988).

A porosidade drenável é definida como a parcela da porosidade total em que a água se movimenta livremente sob a ação da gravidade (FEITOSA et al., 2008; GOMES, 2005). De acordo com Queiroz (1995), trata-se de uma propriedade importante para o manejo adequado do solo e para estudos que abordem o movimento das águas subterrâneas, de forma que sua

determinação se torna fundamental para previsões de contaminação do lençol freático, por exemplo (MELLO et al., 2002).

De maneira simples, a porosidade drenável pode ser determinada pela diferença entre a umidade volumétrica de saturação e a umidade do solo na capacidade de campo (MELLO et al., 2002). Porém, em razão da complexidade envolvida na determinação da capacidade de campo em condições reais, alguns autores (ALVARENGA et al., 2012; QUEIROZ, 1995) aconselham o uso da macroporosidade em análises relacionadas à recarga de água, uma vez que este parâmetro se aproxima fisicamente da porosidade drenável.

Menezes et al. (2009), estudando o comportamento hidrológico de duas nascentes na sub-bacia do Ribeirão Lavrinha, MG, encontraram valores de porosidade drenável superiores a 40% na área de recarga da nascente sob Mata Atlântica, fato que, segundo os autores, contribuiu para melhores condições de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, para a recarga dos aquíferos responsáveis pela alimentação das nascentes. Pinto et al. (2017) analisaram o efeito do uso do solo na hidropedologia em uma região montanhosa do sudeste do Brasil e verificaram que os menores valores de porosidade drenável do solo foram associados à remoção da floresta nativa e sua substituição por pastagem. Por outro lado, valores altos a moderados foram encontrados em áreas sob fragmentos de Mata Atlântica, fato que reforçou a importância das florestas nativas para os processos de recarga de água.

Oliveira et al. (2020) buscaram compreender a dinâmica da água no solo em áreas de recarga de duas nascentes, inseridas nas Bacias Hidrográficas dos Ribeirões Lavrinha e Marcela, MG e cujas áreas de recarga possuem tipos de solo distintos, Cambissolo e Latossolo. Os autores verificaram que, embora com presença de Cambissolo na área de recarga da nascente da bacia do Ribeirão Lavrinha, este foi capaz de converter a maior proporção do volume precipitado em deflúvio base devido a suas propriedades físico-hídricas favoráveis, em particular a condutividade hidráulica e porosidade drenável. Além disso, os autores comentam que o elevado teor de matéria orgânica no solo pode ter contribuído para esse cenário.

Entre as variáveis associadas à dinâmica da água no solo, a condutividade hidráulica do solo saturado se destaca, uma vez que é capaz de influenciar todo comportamento hidrológico de uma bacia, especialmente por ser capaz de controlar os padrões de infiltração e a geração de escoamento superficial (JULIÀ et al., 2004; SILVA JUNIOR et al., 2013). Esse atributo descreve o dinamismo do sistema poroso, englobando propriedades associadas à porosidade, como o tamanho dos poros, quantidade, morfologia, continuidade e orientação (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Dessa forma, por depender da geometria das partículas sólidas e da continuidade do espaço poroso, torna-se altamente variável de um ponto a outro, além da

possibilidade de variação nas diferentes orientações do mesmo solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013; REICHARDT; TIMM, 2012). Conforme explica Van Lier (2020), a presença de um poro muito grande em uma amostra de solo é capaz de alterar completamente o valor de  $K_0$ .

A condutividade hidráulica do solo saturado é apontada como uma das variáveis hidrológicas do solo mais importantes relacionadas ao movimento da água (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006; VAN LIER, 2020), sendo imprescindível para estudos que envolvam modelagem chuva-vazão (ALMEIDA et al., 2017), transporte de solutos no solo (MESQUITA; MORAES, 2004) e recarga de aquíferos (ALVARENGA et al., 2012). Klinke Neto et al. (2017), a fim de compreenderem o potencial de infiltração para recarga de águas subterrâneas em uma área adjacente ao Rio Mogi Guaçu, SP, verificaram que os atributos físico-hídricos do solo apresentaram características favoráveis, principalmente pela elevada condutividade hidráulica do solo saturado, que obteve média de  $7,3 \text{ cm h}^{-1}$ , classificada, segundo Kutílek & Nielsen (1994), como alta permeabilidade. Além disso, segundo os autores, esse cenário foi favorecido devido à predominância de ocupações florestais e relevo plano/ondulado na área. Dada a importância desse atributo, conforme aponta Santos (2020), torna-se fundamental sua determinação e mapeamento, tendo em vista a gestão adequada dos recursos naturais, a definição de áreas prioritárias e a diminuição dos impactos ambientais na bacia.

Ao contrário dos atributos físico-hídricos supracitados, os quais são sensíveis ao manejo, a densidade de partículas ( $D_p$ ) e a textura são fatores intrínsecos do solo, sendo pouco mutáveis ao longo do tempo. Por isso, são atributos considerados estáveis, uma vez que dependem exclusivamente da composição da parte sólida do solo (DARIM, 2017).

A densidade de partículas do solo é definida como a relação entre a massa de sólidos e o volume de sólidos (EMBRAPA, 2017). É uma característica que depende da proporção entre matéria orgânica e a parte mineral, bem como da contribuição mineralógica do solo. Conforme explicam Ferreira et al. (2003), na maioria dos solos minerais, a  $D_p$  pode variar entre 2,6 a 2,7  $\text{g cm}^{-3}$  devido à influência do quartzo, que possui peso específico de 2,65  $\text{g cm}^{-3}$ . Os autores também apontam que os óxidos de ferro aumentam o valor de  $D_p$ , enquanto a matéria orgânica contribui para sua diminuição.

Em razão de sua estabilidade, a densidade de partículas é considerada importante para a identificação e classificação do solo, bem como na tomada de decisão a respeito do manejo adotado. Caso o manejo do solo leve à modificação significativa dos teores de matéria orgânica, tal fato poderá contribuir para a modificação do valor de  $D_p$  ao longo do tempo, mesmo possuindo estabilidade. Entre as aplicações da densidade de partículas do solo estão o cálculo

indireto da porosidade total, o cálculo do tempo de sedimentação de partículas em um fluido e, ainda, a sua utilização em estudos mineralógicos (FERREIRA et al., 2003; EMBRAPA, 2017).

A textura do solo diz respeito à distribuição quantitativa das partículas em relação ao tamanho e representa um atributo fundamental para a compreensão do comportamento físico-hídrico do solo, uma vez que afeta, de maneira relevante, os fenômenos de movimento e retenção de água. Sua grande estabilidade faz com que tenha grande aplicação para a descrição, identificação e classificação do solo. Embora possa conferir algum nível de qualidade ao solo, sua determinação apresenta caráter prioritariamente quantitativo (FERREIRA et al., 2003).

Areia, argila e silte são as três frações texturais do solo e apresentam intervalos de tamanho que variam em função do sistema de classificação utilizado. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo adota quatro classes de tamanho das partículas menores que 2 mm: areia grossa – 2 a 0,2 mm, areia fina – 0,2 a 0,05 mm, silte – 0,05 a 0,002 mm e argila – menor do que 0,002 mm (SANTOS et al., 2015). Por meio do conhecimento da quantidade de cada fração granulométrica do solo, classifica-se o mesmo de acordo com os grupamentos texturais, que são representados pelos solos de textura arenosa, média, argilosa e muito argilosa e textura siltosa (SANTOS et al., 2018b).

A areia possui baixa capacidade de retenção de água em razão da maior dimensão das partículas e, conseqüentemente, menor superfície específica. Dessa forma, solos de textura arenosa possibilitam uma maior infiltração de água, sendo locais propícios à recarga subterrânea. O silte, por sua vez, possui um poder de retenção de água considerável, apresentando poros intermediários e baixa permeabilidade. Segundo Santos et al. (2012b), em áreas com altos teores de silte, a obstrução dos poros tende a ser maior, o que diminui consideravelmente a permeabilidade do solo. Já as argilas são caracterizadas por partículas de menor tamanho e grande superfície específica, favorecendo a retenção de água por adsorção (REICHARDT; TIMM, 2012).

Os atributos do solo variam de forma natural e significativa entre pontos relativamente próximos de uma mesma unidade pedológica, devido, principalmente, aos processos físicos, químicos e biológicos. Esses processos atuam simultaneamente e com diferentes intensidades durante a formação e desenvolvimento dos solos (SIQUEIRA et al., 2019) e conforme o uso e manejo adotados (BRAKENSIEK et al., 1980; RIBON et al., 2017). Além disso, a combinação simultânea entre formas de relevo, classes e usos do solo diferentes resulta em um território com comportamento hidrológico complexo, contribuindo para a alta variabilidade espacial destes atributos (JULIÀ et al., 2004; SOARES, 2018).

Na literatura podem ser encontrados diversos trabalhos que abordam a variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo, como a condutividade hidráulica saturada (ALMEIDA et al., 2017; ALVARENGA et al., 2011; SCHERPINSKI et al., 2010), densidade (ANDRADE et al., 2005; GUIMARÃES et al., 2016; MARTINS et al., 2019), porosidade drenável (GOMES et al., 2007; JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008; QUEIROZ et al., 1999), teor de matéria orgânica (LEITE et al., 2015; SOARES et al., 2018; SOUZA et al., 2004) e textura (BRITO FILHO et al., 2018; LEÃO et al., 2010; MONTEIRO; MENDES, 2008).

Queiroz et al. (1999) avaliaram a distribuição espacial da porosidade drenável de um solo de várzea no município de Piracicaba, estado de São Paulo, utilizando técnicas de estatística descritiva e geoestatística. Após as análises, os resultados mostraram que os dados se ajustaram à distribuição normal, apresentando média variabilidade e fraca dependência espacial. Já Gomes et al. (2007) verificaram que a porosidade drenável, no geral, não pode ser tratada como aleatória, em razão do grau de dependência espacial variando de forte a moderado encontrado pelos autores, ao proceder-se a análise da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG. A partir dos resultados, os autores também verificaram que os atributos VTP (volume total de poros) e  $\theta_{CC}$  (umidade na capacidade de campo) apresentaram baixa variabilidade espacial e a condutividade hidráulica do solo saturado, alta variabilidade, com coeficiente de variação de 88,37%.

Os resultados são coerentes com os encontrados por Junqueira Júnior et al. (2008) onde, a partir da análise da continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, MG, verificaram que os atributos VTP,  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$ , porosidade drenável e CTA apresentaram média variabilidade, enquanto a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), alta variabilidade, segundo classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980).

Scherpinski et al. (2010) analisaram a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada em uma área de 20 ha, com solo classificado como Latossolo Vermelho distroférrico. Os autores encontraram um coeficiente de variação de 110,24 % para o parâmetro. Santos et al. (2012b) analisaram a variabilidade espacial de atributos físicos nos solos da bacia hidrográfica do Rio Ipanema, PE, utilizando técnicas da estatística clássica e geoestatística. Os autores verificaram que a condutividade hidráulica saturada apresentou alta variabilidade, com valor de CV de 261%, evidenciando a grande heterogeneidade dos solos da área de estudo.

Klinke Neto et al. (2017) buscaram estudar a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em uma sub-bacia às margens do Rio Mogi Guaçu (SP) e verificaram que os

solos da área de estudo apresentaram condições favoráveis ao fluxo de água e drenagem do solo, conferindo elevado potencial de recarga de água subterrânea no que se referiu à classe textural, uma vez que possuíam textura média a arenosa, com percentuais de areia variando de 65 a 87%.

Young e Hammer (2000) comentam que a variabilidade espacial das frações texturais depende de vários fatores, mas os principais são o material de origem, a deposição de sedimentos, o relevo e o tempo de exposição aos processos de intemperismo. Campos et al. (2007) avaliaram a variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem e, a partir dos resultados, comprovaram que os atributos granulométricos apresentaram distribuição espacial conforme o material de origem e o relevo. Leão et al. (2010) analisaram a variabilidade espacial da textura em um Latossolo Vermelho distrófico, de textura média a argilosa, e verificaram que o comportamento espacial das frações granulométricas esteve diretamente relacionado com as formas do relevo, que controlam o sentido dos fluxos superficial e subsuperficial, instaurando áreas de divergência e convergência de água no solo, condicionando ambientes erosionais e deposicionais.

### **2.3 Geoestatística aplicada ao estudo do solo**

Com o avanço do conhecimento científico, foram evidenciadas limitações dos métodos tradicionais da estatística clássica para análise da variabilidade espacial dos atributos do solo (FURTUNATO et al., 2013; GONÇALVES; FOLEGATTI, 2002; MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006). Isso porque a estatística clássica utiliza parâmetros como média e desvio padrão para representação de um fenômeno, considerando a hipótese de que as variações de um ponto a outro são aleatórias e cuja aplicação dispensa o conhecimento da posição espacial dessas amostras e a relação entre elas (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002; VIEIRA, 2000).

Dessa forma, em estudos aplicados, os métodos baseados na estatística clássica ignoram a heterogeneidade característica dos solos ao considerarem os valores médios das amostras (JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008; SOUZA et al., 2006). Diante da alta variabilidade espacial desses atributos, o simples uso dos valores médios torna-se de pouca utilidade, levando a equívocos nas tomadas de decisão aplicadas ao manejo do solo e da água, podendo ocasionar danos permanentes e prejuízos econômicos (MACEDO et al., 1998; SOUZA et al., 2006).

Como alternativa, são utilizados procedimentos geoestatísticos, os quais consideram que as características e propriedades naturais da superfície terrestre são espacialmente

contínuas, demandando a aplicação de princípios fundamentais relacionados à dependência espacial das variáveis distribuídas no espaço (CRESSIE, 1993; JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008). De acordo com Matheron (1962), a geoestatística tem a finalidade de desenvolver e aplicar modelos que representem fenômenos naturais, cujas características e propriedades variam em função da localização espacial dos pontos de observação.

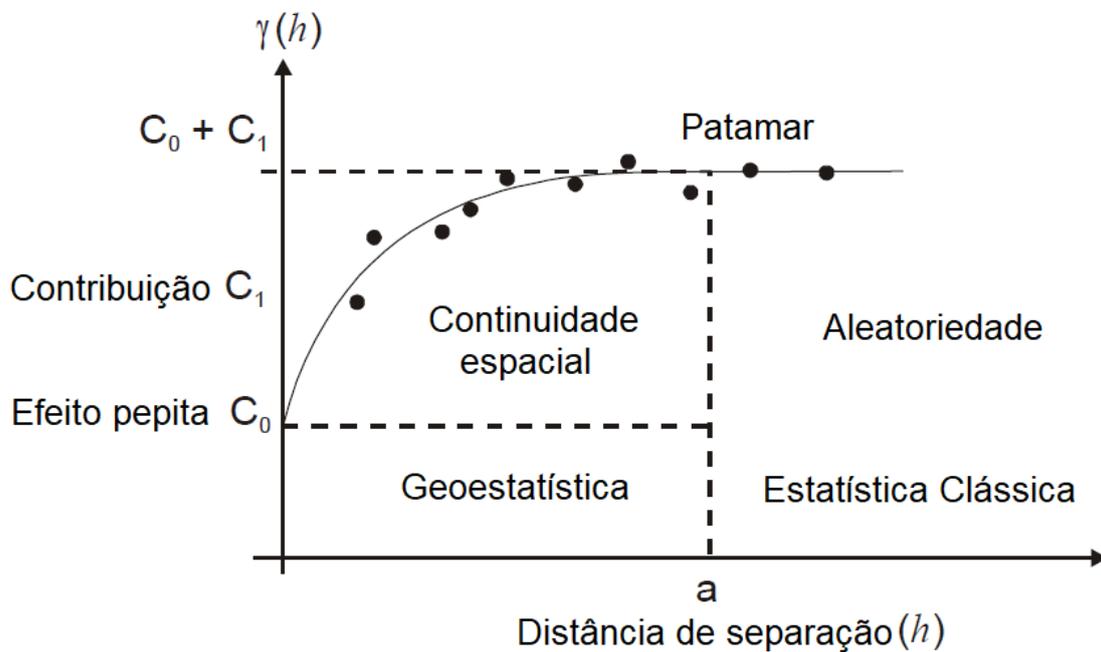
De acordo com Vieira (2000), para a geoestatística, os valores de uma variável em uma determinada região estão em concordância com sua distribuição no espaço. Logo, observações tomadas a distâncias curtas deverão ser mais semelhantes do que aquelas obtidas a distâncias maiores. Quando essa amostragem se dá em duas direções, a ferramenta mais indicada para descrever a dependência espacial entre amostras é o semivariograma, que, basicamente, é uma função que descreve a variância entre pontos que são separados por uma distância  $h$ . Dessa forma, quanto maior a distância, maior será a variabilidade entre os pontos amostrais, de forma que a variância aumenta até sua estabilização em torno de um valor máximo, denominado patamar.

Para determinar o modelo de distribuição espacial, primeiramente, constrói-se o semivariograma experimental, a fim de interpretar a continuidade espacial dos pontos amostrados. Posteriormente, procede-se a modelagem desta estrutura espacial, ajustando-se o semivariograma teórico ao experimental. Dessa forma, o conhecimento dos parâmetros básicos que caracterizam o semivariograma (FIGURA 2) permite ajustar modelos teóricos que explicam a variabilidade da maioria dos fenômenos espaciais. Os modelos mais utilizados atualmente são o esférico, o exponencial e o gaussiano (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Yamamoto e Landim (2013), um semivariograma com patamar é estruturado por:

- Alcance ( $a$ ): representa a distância segundo a qual as amostras tornam-se independentes e sem correlação espacial;
- Patamar ( $C_0 + C_1$ ): ponto no qual o valor da variância se estabiliza;
- Efeito pepita ( $C_0$ ): é o valor da semivariância na origem. Indica a variância não captada pela escala de amostragem ou erros de medição;
- Contribuição ( $C_1$ ): é a diferença entre o patamar e o efeito pepita.

Figura 2 - Representação gráfica de um semivariograma típico e seus parâmetros básicos.



Fonte: Adaptado de Pelissari (2012).

Santos et al. (2018a) avaliaram a variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em uma planície aluvial. Após as análises, os resultados mostraram uma forte dependência espacial para as frações granulométricas areia e argila, enquanto a fração silte apresentou moderada dependência espacial, com alcances de 5,2, 4,81 e 6,17 m, respectivamente. Foi obtido melhor ajuste dos dados granulométricos ao modelo exponencial. Os mesmos autores verificaram que, para a condutividade hidráulica do solo saturado, o modelo que melhor se ajustou foi o do tipo esférico, corroborando com o trabalho de Eguchi et al. (2003), em seu estudo realizado no município de Lavras, MG.

Alvarenga et al. (2012) estudou a continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande. Os autores obtiveram o melhor ajuste para o modelo esférico, tanto para os dados sem transformação quanto para os dados com transformação logarítmica. Santos et al. (2012b), analisando a condutividade hidráulica saturada de solos de vale aluvial, no semiárido de Pernambuco, obtiveram melhor ajuste ao modelo gaussiano. Já Marín-Castro et al. (2016) avaliaram a heterogeneidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em campo sob dois tipos de cobertura vegetal, café e floresta secundária, analisando sua relação com as propriedades do solo sensíveis à alteração do uso e ocupação. Os autores constataram que os dois ambientes possuem alta capacidade de

conduzir água, sendo esta menor no último caso. Porém, a partir dos resultados, não pode ser estabelecida nenhuma estrutura de dependência espacial desse atributo nas parcelas analisadas.

Montenegro e Montenegro (2006) verificaram que as frações de areia fina, areia grossa, silte e argila apresentaram semivariogramas experimentais com melhores ajustes ao modelo esférico. Resultados semelhantes foram encontrados por Eguchi et al (2002), que analisaram a variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. Os autores não obtiveram ajuste para os dados de densidade de partículas, sendo necessária a aplicação da estatística clássica para avaliação deste atributo.

Uma vez constatada a dependência espacial entre as amostras e realizado o ajuste do semivariograma teórico ao experimental, realiza-se a etapa de interpolação, por meio da krigagem ordinária. Segundo Andriotti (2003) e Yamamoto e Landim (2013), a krigagem ordinária é um método de interpolação no qual a estimativa para um ponto não amostrado provém da combinação dos valores encontrados em sua vizinhança, utilizando as propriedades estruturais do semivariograma ajustado ao experimental. Conforme Silva et al. (2015), em análises de atributos do solo, a krigagem é o método interpolador mais utilizado. A ferramenta destaca-se por possuir a vantagem de promover estimativas confiáveis, sem viés e com mínima variância (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Nesse sentido, em áreas, até então, consideradas homogêneas, a geoestatística pode contribuir para a identificação de características e propriedades que demandam manejos diferenciados. Tal conhecimento auxilia na diminuição dos efeitos da variabilidade natural do solo para a gestão dos recursos naturais, além de fornecer estimativa das respostas dos atributos do solo às atuais práticas de manejo adotadas, contribuindo, dessa forma, ao melhor entendimento da dinâmica da água no solo (AMARO FILHO et al., 2007; RIBEIRO et al., 2016).

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, K. S. S. A. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo Distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 259–274, 2017.
- ALMEIDA, W. S. et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. June 2017, p. 130–138, 2018.
- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1745–1758, 2011.
- ALVARENGA, C. C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSra) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1608–1619, 2012.
- AMARO FILHO, J. et al. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 415–422, 2007.
- ANDRADE, D. C.; REIS, T. E. DA S.; REIS, L. C. Conflito de uso do solo em área de recarga do Aquífero Guarani na bacia do médio rio das cinzas. **Geociências**, v. 34, n. 1, p. 69–76, 2015.
- ANDRADE, A. R. S. DE et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 2, p. 322–329, 2005.
- ANDRIOTTI, J. L. . **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003.
- BAUM, C. A.; MANCUSO, M. A.; FRITZEN, R. R. Aplicação do método WTF no estudo da variabilidade da recarga em aquífero urbano. **Geociências**, v. 37, n. 1, p. 85–98, 2018.
- BONAMIGO, A. et al. Changes in permanent preservation areas in rural properties of the Santa Catarina state southern plateau according to the laws No. 4,771 and 12,651. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, 2017.
- BRAKENSIEK, D. L.; ENGLEMAN, R. L.; RAWLS, W. J. Variation Within Texture Classes of Soil Water Parameters. **Paper - American Society of Agricultural Engineers**, n. V, p. 335–339, 1980.
- BRITO FILHO, E. G. et al. Variabilidade Espacial Da Textura Do Solo Em Área De Terra Preta Arqueológica Sob Diferentes Usos Na Região Sul Do Amazonas. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n. 1, p. 139–143, 2018.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 2, p. 149–157, 2007.
- CARMO, J. A. R. DO. **Recarga subterrânea direta e sua influência sobre a temperatura e a condutividade elétrica em microbacias do Rio Vacaí-Mirim, RS**. Dissertação (Mestrado)—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

CARMO, L. G.; FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Áreas De Preservação Permanente No Entorno De Nascentes: Conflitos, Lacunas E Alternativas Da Legislação Ambiental Brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 34, n. 2, p. 275–293, 2014.

CARVALHO, J. R. P. DE; SILVEIRA, P. M. DA; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1151–1159, 2002.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley and Sons, 1993.

DARIM, E. P. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em área irrigada**. Dissertação (Mestrado)—Ceres: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, 2017.

DUTAL, H.; REIS, M. Determining the effects of land use on soil erodibility in the Mediterranean highland regions of Turkey: a case study of the Korsulu stream watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 3, 2020.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L. DA; OLIVEIRA, M. S. DE. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 242–246, 2002.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas “in situ”. **Ciência e Agrotecnologia**, p. 1607–1613, 2003.

FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Espacialização e classificação de topos como zonas preferenciais de recarga natural de aquíferos: o caso de Belo Horizonte – MG. **Geografias**, v. 05, n. 1, p. 67–82, 2009.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1979.

FRISBEE, M. D. et al. Effect of source integration on the geochemical fluxes from springs. **Applied Geochemistry**, v. 28, p. 32–54, 2013.

FURTUNATO, O. et al. Variabilidade Espacial de Atributos Físico-hídricos de Solos em uma Bacia Experimental no Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 135–147, 2013.

GLEASON, C. L. et al. Hydrogeology of desert springs in the Panamint Range, California, USA: Identifying the sources and amount of recharge that support spring flow. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 3, p. 730–748, 2020.

GOMES, E. C. F. et al. A nova legislação ambiental brasileira e seus efeitos sobre a reestruturação de nascentes e remanescentes florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG.** Dissertação (Mestrado)—Lavras: UFLA, 2005.

GOMES, N. M. et al. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 435–443, 2007.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Correlação espacial entre retenção de água e textura do solo, para fins de manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 3, p. 296–303, 2002.

GONÇALVES, A. D. M. DE A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, 2013.

GRAEPIN, C. et al. Estimativa de recarga de aquífero e enquadramento dos corpos de água em sub-bacias parcialmente florestadas no noroeste do Rio Grande do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 39, n. 3, p. 25–31, 2016.

GUIMARÃES, W. D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247–255, 2016.

JULIÀ, M. F. et al. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, v. 123, n. 3–4, p. 257–277, 2004.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande - MG.** Dissertação (Mestrado)—Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 914–922, 2008.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, 1997.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KLINKE NETO, G.; OLIVEIRA, A. H.; PEREIRA, S. Y. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em uma sub-bacia às margens do Rio Mogi Guaçu (SP). **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 381–394, 2017.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. **Elements of soil physics. Developments in Soil Science.** Amsterdam: Elsevier, 1983.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D. R. **Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geocology, hydrology, geomorphology and other related disciplines.** Reiskirchen, Germany: Catena Verlag GMBH, 1994.

LAMICHHANE, S.; SHAKYA, N. M. Alteration of groundwater recharge areas due to land use/cover change in Kathmandu Valley, Nepal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.

26, n. July 2019, p. 100635, 2019.

LE MAITRE, D. C.; SCOTT, D. F.; COLVIN, C. A review of information on interactions between vegetation and groundwater. **Water SA**, v. 25, n. 2, p. 137–152, 1999.

LEAL, M. S. et al. Caracterização hidroambiental de nascentes. **Revista Ambiente e Água**, v. 12, n. 1, p. 445–458, 2017.

LEÃO, M. G. A. et al. Variabilidade espacial da textura de um latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 121–131, 2010.

LEITE, E. P. F.; FIGUEIREDO, M. A.; SILVA, Z. R. Avaliação Da Evapotranspiração Real Do Solo Em Áreas Desmatadas E Não Desmatadas Na Chapada Do Araripe No Município De Santana Do Cariri - Ceará. **Revista Caatinga**, v. 7, n. 1, p. 256–265, 1990.

LEITE, L. F. C. et al. Variabilidade espacial das frações da matéria orgânica do solo em área degradada sob recuperação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 394–401, 2015.

MACEDO, J. R.; OTONNI FILHO, T. B.; MENEGUEW, N. D. A. Variabilidade de características físicas, químicas e físico-hídricas em solo podzólico vermelho-amarelo de Deropédica, RJ. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 12, p. 2043–2052, 1998.

MANNING, A. H. et al. Evolution of groundwater age in a mountain watershed over a period of thirteen years. **Journal of Hydrology**, v. 460–461, p. 13–28, 2012.

MARÍN-CASTRO, B. E. et al. Spatial distribution of hydraulic conductivity in soils of secondary tropical montane cloud forests and shade coffee agroecosystems. **Geoderma**, v. 283, p. 57–67, 2016.

MARTINS, E. L. et al. Efeitos da variabilidade espacial da densidade do solo e fração grosseira na estimativa dos estoques de nutrientes em solo degradado. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 29434–29449, 2019.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Paris: Editions Technip, 1962.

MELLO, C. R. et al. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1319–1324, 2002.

MELLO, C. R. DE et al. Modelagem de atributos físico-hídricos do solo numa bacia hidrográfica da região do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 845–852, 2007.

MELO FILHO, J. F. DE et al. Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de latossolo amarelo coeso do tabuleiros costeiros da Bahia. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 2, p. 199–205, 2006.

MELO NETO, J. O.; CHAGAS, R. M.; JÚNIOR, A. V. M. Delimitação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Siriri, Sergipe. **Scientia Plena**, v. 9, n. 7, p. 1–10, 2013.

MENDONÇA, L. A. R. et al. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 89–98, 2009.

MENEZES, M. D. et al. Hydrological dynamics of two springs, associated to land use, soil characteristics and physical-hydrological attributes at lavrinha creek watershed - Mantiqueira Mountains (MG). **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 37, n. 82, p. 175–184, 2009.

MESQUITA, M. DA G. B. DE F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963–969, 2004.

MONTEIRO, A.; MENDES, S. Variabilidade espacial da textura de dois solos do Deserto Salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 2, p. 19–27, 2008.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 30–37, 2006.

MORITA, A. K. M.; WENDLAND, E. C. Caracterização geoquímica de área impactada por depósito de resíduos desativado em zona de recarga do aquífero Guarani. **Geociências**, v. 38, n. 4, p. 1017–1028, 2019.

OLIVEIRA, A. S.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R. Dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes em dois ambientes na Região Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 59–67, 2020.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56–69, 2014.

OWUOR, S. O. et al. Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. **Ecological Processes**, v. 5, n. 1, 2016.

PELLISSARI, A. L. **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* L.f. na região sul do estado de Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado)—[s.l.] Universidade Federal de Mato Grosso, 2012.

PINTO, L. C. et al. Land-use effect on hydrology in a mountainous region of Southeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 4, p. 413–427, 2017.

PINTO, L. V. A.; ROMA, T. N.; BALIEIRO, K. R. C. Avaliação qualitativa da água de nascentes com diferentes usos do solo em seu entorno. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 495–505, 2012.

PRICE, K.; JACKSON, C. R.; PARKER, A. J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. **Journal of Hydrology**, v. 383, n. 3–4, p. 256–268, 2010.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. Tese (Doutorado)—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1995.

QUEIROZ, J. E.; CRUCIANI, D. E.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial da porosidade drenável de um solo de várzea, no município de Piracicaba, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 135–139, 1999.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Lavras: Editora UFLA, 2014.

RIBEIRO, L. DA S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1699–1702, 2016.

RIBON, A. A. et al. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração em pomar de citros análise exploratória. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 60, n. 4, p. 335–342, 2017.

RIZZARDI, A. S. et al. Atributos físicos e fluxo de água em solos da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim – RS. **Revista Monografias Ambientais - REMOA**, v. 13, n. 5, p. 3690–3701, 2014.

ROCHA, R. E. et al. Variações espaciais na condutividade hidráulica do solo em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. **Revista do Instituto Geológico**, v. 40, n. 2, p. 35–51, 2019.

SANTOS, D. P. DOS et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em vale aluvial na região de Pernambuco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2271–2282, 2018a.

SANTOS, R. C. DE V. DOS. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e implicações no escoamento superficial direto em escala de bacia hidrográfica**. Tese (Doutorado)—Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2020.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018b.

SANTOS, K. S. et al. Spatial variability of physical attributes of soil in alluvial valley of semiarid region of Pernambuco State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 828–835, 2012.

SANTOS, M. L. et al. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 313–321, 2006.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SANTOSA, L. W.; HARSANTI, A. Water balance analysis of springs in Banjarasri Village, Kalibawang Sub-District, Kulonprogo District. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 451, n. 1, 2020.

SCHERPINSKI, C. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 7–13, 2010.

SILVA, A. F. DA et al. Simulação sequencial de atributos diagnósticos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 418–425, 2015.

SILVA JUNIOR, J. J. et al. Determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando o problema inverso do software Hydrus-1D. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 3, p. 242–251, 2013.

SIQUEIRA, T. M. et al. 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.

SOARES, M. D. R. et al. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 2, p. 125–133, 2018.

SOARES, M. F. **Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu - RS**. Dissertação (Mestrado)—Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2018.

SOUZA, Z. M. DE et al. Influência da pedofoma na variabilidade espacial de alguns atributos físico e hídricos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2004.

SOUZA, Z. M. DE et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água no solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 128–134, 2006.

SOUZA, Z. M. DE; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 5, p. 491–499, 2004.

UFLA. **Plano Diretor: proteção de nascentes que abastecem a UFLA está em votação na Câmara de Lavras**. Disponível em: <<https://ufla.br/noticias/institucional/14158-plano-diretor-proposta-que-preve-protecao-das-nascentes-que-abastecem-a-ufla-esta-em-votacao-na-camara-de-lavras>>. Acesso em: 30 jul. 2021.

VAN LIER, Q. DE J. **Física do Solo baseada em processos**. Piracicaba: Edição do autor, 2020.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C.; VIEIRA, N. F. **Solos: propriedades, classificação e manejo**. Brasília: MEC/ABEAS, 1988.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 1, p. 1–54, 2000.

VILAVERDE, A. L. A. **Metodologias para a delimitação de áreas preferenciais de recarga em aquíferos fraturados**. Dissertação (Mestrado)—Braga, PT: Universidade do Minho, 2016.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

YOUNG, F.J.; HAMMER, R. D. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy and cluster analysis. **Soil Science Society American Journal**, v. 64, p. 989–998, 2000.

**SEGUNDA PARTE - ARTIGO**

## ARTIGO – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO EM UMA ÁREA DE RECARGA DE NASCENTE

### RESUMO

A produção de água de uma nascente depende dos fatores que atuam em sua área de recarga, entre eles, os atributos físico-hídricos do solo. Porém, a variabilidade natural dos mesmos, associada às alterações causadas pelas atividades antrópicas, dificulta o planejamento e manejo adequados nestes locais. Nesse sentido, objetivou-se analisar a distribuição espacial e realizar o mapeamento dos atributos físico-hídricos da área de recarga da principal nascente que abastece a Universidade Federal de Lavras, MG. Em cada ponto, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas, nas camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. Foram determinadas, em laboratório, a condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), volume total de poros (VTP), porosidade drenável ( $\mu$ ), teor de matéria orgânica (MO), areia, argila e silte. A geoestatística foi utilizada para a análise da distribuição espacial, utilizando a krigagem ordinária para espacialização das variáveis. Para ambas as camadas, a maioria dos atributos apresentou dependência espacial classificada como forte e nenhum classificado com dependência espacial fraca. Por meio da análise do Erro Médio Reduzido e do Desvio Padrão do Erro, gerados no procedimento de validação cruzada, o modelo exponencial foi considerado o melhor modelo para a maioria dos atributos de ambas as camadas. A krigagem permitiu a identificação de zonas com condições favoráveis à recarga de água, contribuindo para o estabelecimento de locais prioritários para conservação. Destacam-se as regiões mais baixas da área, ao entorno da nascente, a porção central da área cultivada e a região mais alta, situada a leste.

**Palavras-chave:** Geoestatística. Krigagem ordinária. Física do solo. Dinâmica hidrológica.

### ABSTRACT

The production of water from a spring depends on the factors that act in its recharge area, among them, the physical-hydric attributes of the soil. However, the natural variability of these attributes, associated with changes caused by human activities, makes it difficult to adequately plan and manage these sites. In this sense, the objective of this study was to analyze the spatial distribution and to map the physical-hydric attributes of the recharge area of the main spring that supplies the Federal University of Lavras, MG. At each point, deformed and undeformed soil samples were collected in the 0 - 20 cm and 20 - 40 cm depths. The saturated hydraulic conductivity ( $K_0$ ), bulk density ( $D_s$ ), particle density ( $D_p$ ), total pore volume (VTP), drainable porosity ( $\mu$ ), organic matter (MO), sand, clay and silt content were determined in the laboratory. Geostatistics was used for spatial distribution analysis, using ordinary kriging for spatialization of the variables. For both depths, most attributes showed spatial dependence classified as strong and none classified with weak spatial dependence. Through the analysis of the Mean Standardized Error and the Root Mean Square Standardized Error, generated in the cross validation procedure, the exponential model was considered the best model for most attributes, in both depths. The kriging allowed the identification of areas with favorable conditions for water recharge, contributing to the establishment of priority sites for conservation, such as the

lower regions of the area, around the spring, the central portion of the cultivated area and the higher regions, to the east.

**Keywords:** Geostatistics. Ordinary Kriging. Soil physics. Hydrologic dynamics.

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de água de uma nascente está associada aos processos que atuam em sua área de recarga, com destaque à infiltração, cujos padrões são controlados, entre outros, pelo comportamento dos atributos físico-hídricos do solo (ALMEIDA et al., 2018; NERY et al., 2017; PRUSKI et al., 1997). Sendo assim, para o conhecimento da dinâmica hidrológica em ambientes naturais e antropizados, visando o manejo adequado dos recursos, torna-se fundamental a caracterização precisa dos fatores relacionados ao solo. Porém, um fato que dificulta este planejamento consiste na alta variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos, que ocorre naturalmente devido aos processos físicos, químicos e biológicos de formação e desenvolvimento dos solos (SIQUEIRA et al., 2019).

Somada a essa variabilidade natural, alterações indesejáveis destes atributos têm sido causadas pela intensificação das atividades antrópicas, resultando no desequilíbrio da distribuição de água no sistema (ANDRADE et al., 2015; BAUM et al., 2018; BRAUMAN et al., 2012). Estas alterações prejudiciais atuam, principalmente, sobre os atributos considerados indicadores de qualidade do solo associados à recarga de água, sendo evidenciadas pela redução da condutividade hidráulica do solo saturado, aumento da densidade, diminuição da porosidade drenável e do teor de matéria orgânica (ASKARI; HOLDEN, 2014; BATISTA et al., 2019; PINTO et al., 2017).

Na literatura podem ser encontrados diversos trabalhos que abordam a variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo, como a condutividade hidráulica saturada (ALMEIDA et al., 2017; ALVARENGA et al., 2011; SCHERPINSKI et al., 2010), densidade (ANDRADE et al., 2005; GUIMARÃES et al., 2016; MARTINS et al., 2019), porosidade drenável (FUENTES-GUEVARA et al., 2022; GOMES et al., 2007a; JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008), teor de matéria orgânica (LEITE et al., 2015; SOARES et al., 2018) e frações texturais (LEÃO et al., 2010; BRITO FILHO et al., 2018; GELAIN et al., 2021).

Nesse contexto, ferramentas geoestatísticas vêm sendo utilizadas no estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, as quais consideram que estas características e propriedades variam em função da localização dos pontos de observação no espaço (VIEIRA, 2000; YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Dessa forma, torna-se possível caracterizar uma

variável de interesse a partir do conhecimento de sua distribuição espacial e, posteriormente, fornecer estimativas para pontos não amostrados, por meio de uma ferramenta de interpolação.

A krigagem ordinária tem sido um dos métodos de interpolação mais aplicados aos atributos físico-hídricos do solo (SILVA et al., 2015), fornecendo mapas com estimativas não tendenciosas e variância de estimação mínima, desde que seja feita a modelagem adequada da continuidade espacial. Resultados satisfatórios da utilização desta ferramenta podem ser verificados pelos trabalhos de Guimarães et al. (2016), Klinke Neto et al. (2017) e Araújo et al. (2018), Santos et al. (2018a) e Alves et al. (2021).

Considerando a importância da manutenção da produção de água pelas nascentes, a análise da distribuição espacial dos atributos físico-hídricos do solo nas áreas de recarga torna-se um importante instrumento para a compreensão da dinâmica hidrológica, servindo como ferramenta no auxílio para o levantamento de zonas prioritárias e de áreas com necessidade de intervenções, bem como o estabelecimento, por parte dos tomadores de decisão, de medidas voltadas à proteção e recuperação dessas áreas. Além disso, tal conhecimento pode contribuir para a implementação de práticas conservacionistas no solo, com vistas à manutenção de sua qualidade enquanto recurso.

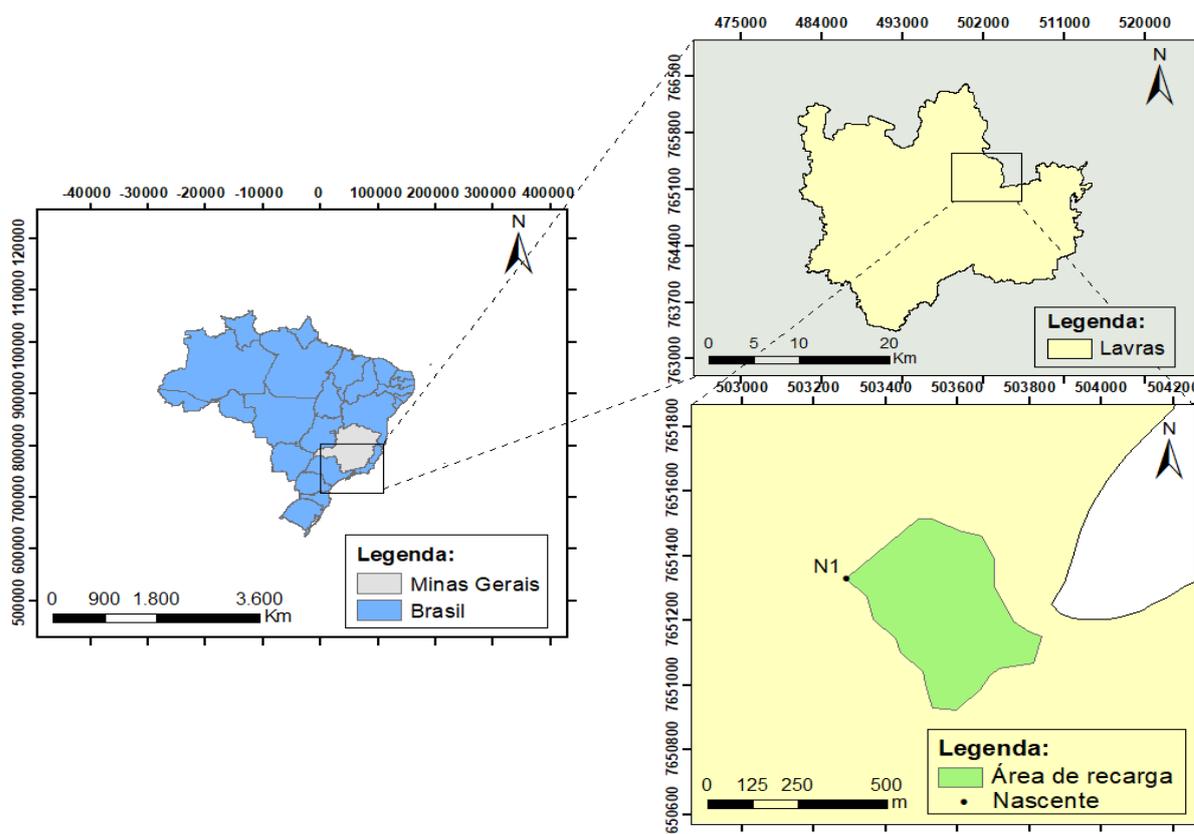
Nesse sentido, objetivou-se com o presente trabalho analisar, descrever e mapear a distribuição espacial dos atributos físico-hídricos dos solos da área de recarga de uma nascente perene, responsável pelo abastecimento da Universidade Federal de Lavras, MG, visando compreender os fatores associados ao solo que instauram locais com condições favoráveis e desfavoráveis à recarga de água.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área de estudo**

O estudo foi realizado na área de recarga da nascente responsável por fornecer a maior quantidade de água para a Universidade Federal de Lavras. A área possui aproximadamente 17,4 hectares e está localizada no município de Lavras, MG (FIGURA 1). O município situa-se na região do Alto Rio Grande, no sul do Estado de Minas Gerais, a uma altitude média de 918 metros (CURI et al., 2020). De acordo com a classificação de Köppen, o clima é do tipo Cwb, com inverno seco e verão chuvoso (ALVARES et al., 2013), temperatura média anual de 19,4 °C e precipitação média anual em torno de 1400 mm, concentrada entre os meses de outubro e março. Dessa forma, há um período seco característico, o qual, em condições normais, inicia-se em abril e é finalizado em setembro (SÁ JÚNIOR et al., 2012).

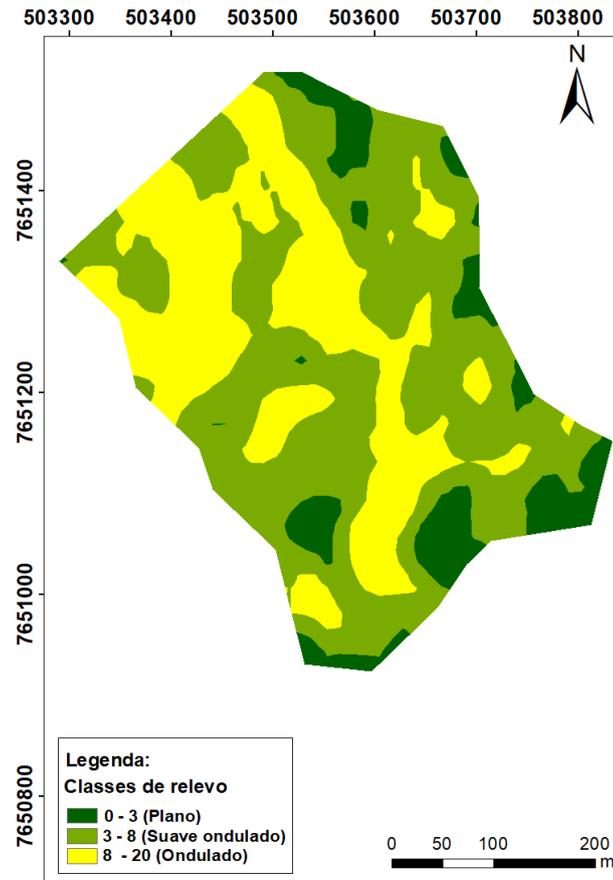
Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Da autora (2021).

A nascente encontra-se inserida sob coordenadas  $21^{\circ}14'22.50''\text{S}$   $44^{\circ}58'5.75''\text{O}$ . Para a delimitação de sua área de recarga, foram utilizadas cenas do sensor orbital ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), com 12,5 m de resolução espacial (ALASKA SATELLITE FACILITY, 2021). Os procedimentos foram realizados no *software* ArcMap®, versão 10.2 (ESRI, 2014). Embora a nascente seja classificada como perturbada (FERREIRA et al., 2009), é responsável pela produção de quase 90% da água destinada do consumo interno da universidade. Segundo o levantamento realizado por Curi et al. (2020), o tipo de solo predominante na área é o Latossolo Vermelho, conforme o segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018b). As classes de relevo estão divididas em: relevo plano, representando cerca de 8,2% da área total, suave ondulado (53%) e ondulado (38,8%) (FIGURA 2).

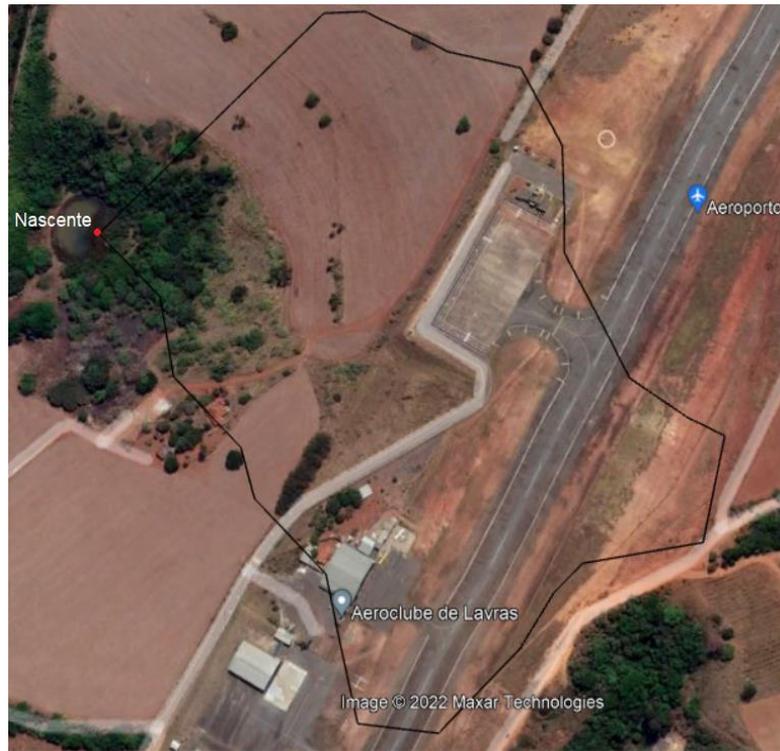
Figura 2 – Classes de relevo da área de recarga.



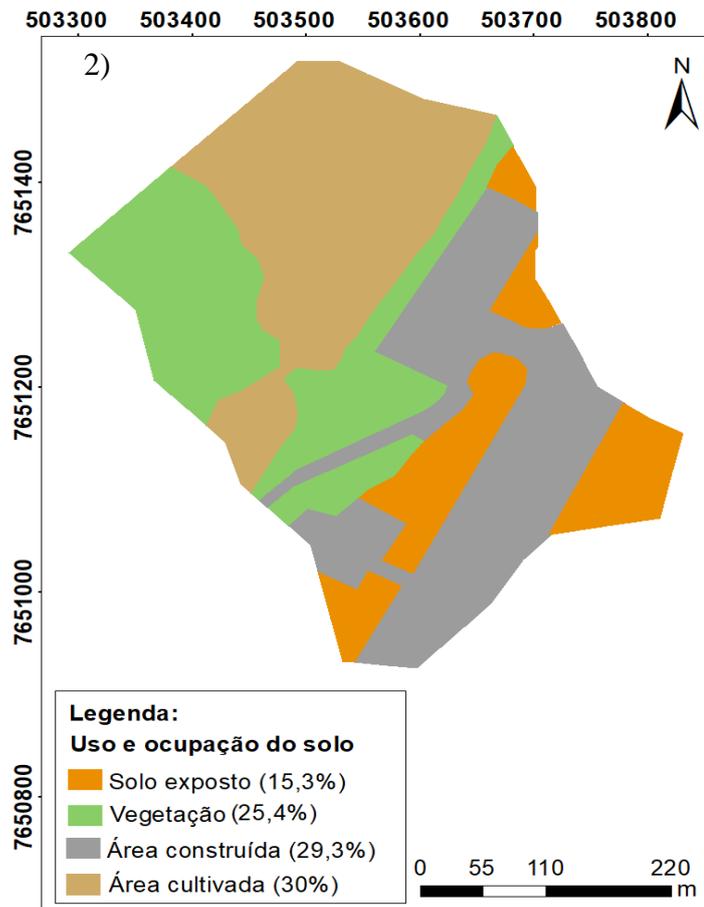
Fonte: Da autora (2021).

A área possui cerca de 30% de seu território ocupado pelo cultivo de milho e feijão e outra grande parte (29,3%) ocupada pelo Aeroporto Municipal de Lavras. O restante da área divide-se em porções sob vegetação (25,4%) e solo exposto (15,3%) (FIGURA 3.1 e 3.2). Atualmente, o local é considerado como zona de expansão urbana, sendo possível a implantação de empreendimentos de parcelamentos de solo (LAVRAS, 2020).

Figura 3 - Uso e ocupação do solo da área de recarga.



Fonte: Google Earth (2021).

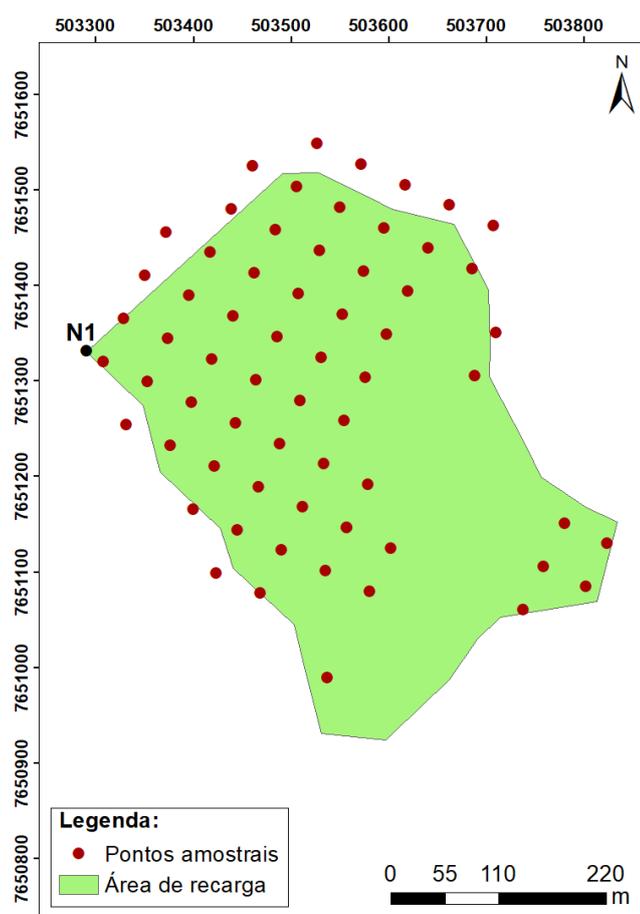


Fonte: Da autora (2021).

## 2.2 Amostragem do solo

Para elaboração do plano amostral, foi estabelecida uma malha com pontos espaçados de 50 m, totalizando 63 pontos (FIGURA 4). A alocação dos pontos em campo foi realizada com auxílio de um GPS. Nos pontos situados sob área construída, não foi possível realizar a coleta, em razão da cobertura do solo no local.

Figura 4 - Distribuição dos pontos amostrais.



Fonte: Da autora (2021).

Em cada ponto, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas, nas camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. As amostras deformadas foram obtidas com o auxílio de uma cavadeira manual e, posteriormente, colocadas em sacos plásticos devidamente identificados (FIGURA 4.1). As amostras indeformadas foram coletadas com dois amostradores do tipo Uhland (FIGURA 4.2), utilizando cilindros de dimensões conhecidas (FIGURA 4.3). O amostrador maior foi utilizado para a coleta em cilindros de PVC, com 60 mm de diâmetro interno e 80 mm de altura, para determinação da condutividade hidráulica do

solo saturado e da densidade do solo. O amostrador menor foi utilizado para coleta das amostras em anéis metálicos, com volume aproximado de 75 cm<sup>3</sup>, para determinação da umidade do solo na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ).

Figura 5 - Coleta de solo com estrutura deformada (1) e indeformada (2 e 3).



Fonte: Da autora (2022).

### 2.3 Determinação dos atributos físico-hídricos

Para a caracterização físico-hídrica do solo, foram determinadas a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), volume total de poros (VTP), porosidade drenável ( $\mu$ ), teores de areia, argila e silte e teor de matéria orgânica (MO). Os ensaios para determinação de  $K_0$ ,  $D_s$ ,  $D_p$  e  $\mu$  foram realizados no Laboratório de Análise Física do Solo, localizado no Departamento de Recursos Hídricos - UFLA. Já as determinações dos teores de areia, argila, silte e MO foram feitas no Departamento de Ciência do Solo - UFLA, seguindo as metodologias propostas pela Embrapa (2017).

Primeiramente, as amostras foram levadas à saturação por 24 horas e, depois, conduzidas ao permeâmetro de carga constante, onde procedeu-se o ensaio para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ). O método consiste em manter uma carga hidráulica constante sobre a amostra de solo e efetuar a medição do volume drenado em tempos pré-estabelecidos (10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos). Para isso, foram utilizados uma proveta graduada de 20 ml e um cronômetro. A partir da equação de Darcy, o cálculo de  $K_0$  pode ser feito segundo a Equação 1 (EMBRAPA, 2017):

$$K_0 = \frac{Q L}{A t (h + L)} \quad (1)$$

Em que  $K_0$  é a condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{cm h}^{-1}$ ),  $Q$  é o volume do percolado (ml);  $L$  representa a altura do bloco do solo (cm);  $h$  é a carga hidráulica (cm);  $A$  é a área da seção transversal em ( $\text{cm}^2$ ) e  $t$  é o tempo de percolação (h).

Posteriormente, a densidade do solo ( $D_s$ ) foi obtida pelo método do cilindro volumétrico, a partir da equação (EMBRAPA, 2017):

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (2)$$

Em que  $D_s$  é a densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $m_s$  é a massa do solo seco (g) e  $V$  é o volume do cilindro ( $\text{cm}^3$ ).

A densidade de partículas ( $D_p$ ) foi determinada pelo método do balão volumétrico, conforme a equação (EMBRAPA, 2017):

$$D_p = \frac{m_s}{(V_t - V_u)} \quad (3)$$

Em que  $D_p$  é a densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $m_s$  é a massa do solo seco (g),  $V_t$  é o volume total aferido do balão (ml) e  $V_u$ , o volume utilizado para completar o balão contendo a amostra (ml).

Para a determinação da umidade do solo na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) utilizada no cálculo da porosidade drenável ( $\mu$ ), as amostras foram devidamente preparadas e, em seguida, levadas à saturação por um período de 24 horas. Após essa etapa, foram dispostas em funis de placa porosa e submetidas a uma tensão de 6 kPa (ANDRADE; STONE, 2011; REICHARDT, 1988).

Após a drenagem ter cessado, período que durou cerca de 24 a 48 horas, as amostras foram pesadas, levadas à estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 24 horas e depois pesadas novamente. Dessa forma, a umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ) pode ser encontrada por meio da relação (EMBRAPA, 2017):

$$U_g = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \quad (4)$$

Em que  $m_u$  é a massa do solo + água (g) e  $m_s$ , a massa do solo seco (g). Assim, a partir do produto entre a umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ) e a densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), foi possível obter a umidade volumétrica para a tensão estabelecida, conforme a Equação 5:

$$\theta = U_g \times D_s \quad (5)$$

O volume total de poros (VTP) foi calculado, indiretamente, a partir da relação entre a densidade do solo ( $D_s$ ) e a densidade de partículas ( $D_p$ ), expressa pela Equação 6 (REICHARDT; TIMM, 2012):

$$VTP = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \times 100 \quad (6)$$

Em que  $D_s$  é a densidade do solo e  $D_p$ , a densidade de partículas, em  $g\ cm^{-3}$ .

A porosidade drenável ( $\mu$ ) foi determinada, de forma indireta, com base no volume total de poros e na umidade do solo na capacidade de campo (MELLO et al., 2002; QUEIROZ, 1995):

$$\mu = VTP - \theta_{cc} \quad (7)$$

Em que VTP é o volume total de poros ( $cm^3\ cm^{-3}$ ) e  $\theta_{cc}$ , a umidade do solo na capacidade de campo ( $cm^3\ cm^{-3}$ ).

## 2.4 Análises estatísticas

### 2.4.1 Análise exploratória dos dados

Anteriormente ao uso da geoestatística, os conjuntos de dados foram submetidos a uma análise exploratória, realizada no software ActionStat® (ESTATCAMP, 2019). Tais análises têm como finalidade a visualização do comportamento geral das séries e a identificação de possíveis valores discrepantes, desconsiderando a posição geográfica dos dados observados. Foram gerados histogramas de frequência, gráficos para verificação de tendências em função da latitude e da longitude, cálculo dos valores mínimos, máximos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação e coeficiente de assimetria.

Para a verificação da normalidade dos dados, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), a 5% de significância. Uma transformação logarítmica foi aplicada aos dados de  $K_0$ , visando melhorar a distribuição e facilitar o ajuste do semivariograma. Posteriormente, procedeu-se a visualização dos dados por meio de gráficos *boxplot*, a fim de averiguar a existência de *outliers*. Embora os valores discrepantes possam comprometer a

análise da continuidade espacial, neste estudo, optou-se por sua remoção do conjunto amostral apenas se apresentassem diferenças acentuadas em relação a seus vizinhos mais próximos.

### 2.4.2 Análise geoestatística

Posteriormente à etapa de análise exploratória, a análise geoestatística foi utilizada para o estudo da estrutura espacial dos atributos físico-hídricos. A análise da dependência espacial dos dados foi feita a partir da função semivariograma, conforme descrito por Isaaks e Srivastava (1989):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

Em que  $N(h)$  é o número de pares  $[z(x_i), z(x_i + h)]$  separados pelo vetor  $h$ .

Uma vez determinado o semivariograma experimental, é necessário ajustá-lo ao semivariograma teórico. Neste trabalho, foram ajustados os modelos esférico (Equação 9), exponencial (Equação 10) e gaussiano (Equação 11). Para isto, foi utilizado o *software* GS+ (ROBERTSON, 2008). Nas equações abaixo,  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_0 + C_1$  é o patamar,  $a$  é o alcance do semivariograma,  $h$  é a distância entre pares de pontos e  $d$  é a máxima distância na qual o semivariograma é definido (VIEIRA, 2000):

- Modelo esférico:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h < a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (9)$$

- Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp \left( -3 \frac{h}{a} \right) \right] \quad 0 < h < d \quad (10)$$

- Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - \exp \left[ -3 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad 0 < h < d \quad (11)$$

Primeiro, para a avaliação da qualidade do ajuste de cada modelo ao semivariograma experimental, foram levados em consideração o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o grau de dependência espacial (GD) (Equação 12), segundo classificação proposta por Cambardella et al. (1994). De acordo com os autores,  $GD < 25\%$  indica uma variável com forte dependência espacial,  $25\% < GD < 75\%$ , moderada dependência espacial e  $75\% < GD < 100\%$ , fraca dependência espacial. Caso o efeito pepita corresponda exatamente a 100% do patamar ( $GD = 100\%$ ), o semivariograma possui efeito pepita puro e não se verifica dependência espacial na escala utilizada. Assim:

$$GD = \left( \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (12)$$

Em que  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_1$  é a contribuição e a soma  $C_0 + C_1$  representa o patamar.

Para escolha do melhor modelo entre os três ajustados, foram avaliados o Erro Médio Reduzido (EMR) (Equação 13) e Desvio Padrão do Erro (DPE) (Equação 14) gerados no procedimento de validação cruzada. Foram considerados o EMR mais próximo de zero e o DPE mais próximo de 1 (ANDRIOTTI, 2003). A análise do GD foi utilizada como critério auxiliar.

Segundo Cressie (1993), o EMR pode ser definido como:

$$EMR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{z(x_i) - z^*(x_i)}{\sigma(x_i)} \right) \quad (13)$$

Já o DPE pode ser obtido por meio da equação:

$$DPE = \sqrt{\frac{1}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N \left( \frac{z(x_i) - z^*(x_i)}{\sigma(x_i)} \right)^2 \right\}} \quad (14)$$

Em que  $N$  é o número de dados,  $z(x_i)$  é o valor observado no ponto  $i$ ,  $z^*(x_i)$  é o valor estimado para o ponto  $i$  e  $\sigma(x_i)$  é o desvio-padrão da krigagem no ponto  $i$ .

Após a seleção do melhor modelo de semivariograma, os valores ajustados para cada parâmetro foram inseridos manualmente no *software* ArcMap®, versão 10.2 (ESRI, 2014) para a geração dos mapas, utilizando-se a krigagem ordinária como interpolador.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise exploratória

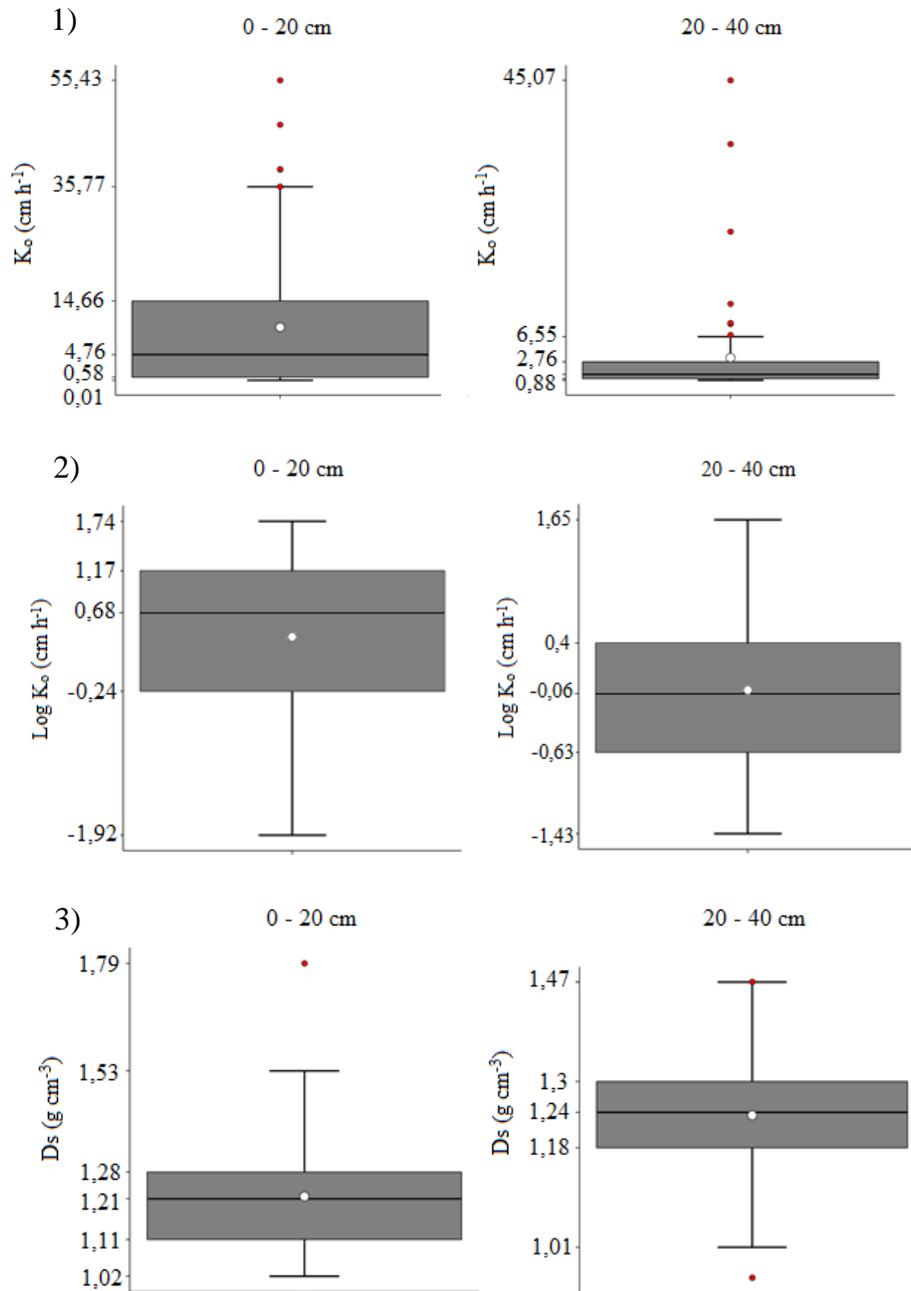
Considerando a distribuição dos dados no espaço, não se constatou nenhum tipo de tendência para os atributos analisados, uma vez que os valores não tendem a crescer ou diminuir em função da latitude ou longitude (Figuras 1 a 10 do APÊNDICE). Dessa forma, de acordo com Vieira (2000) e Mello (2004), há boas condições de aplicação das ferramentas geoestatísticas.

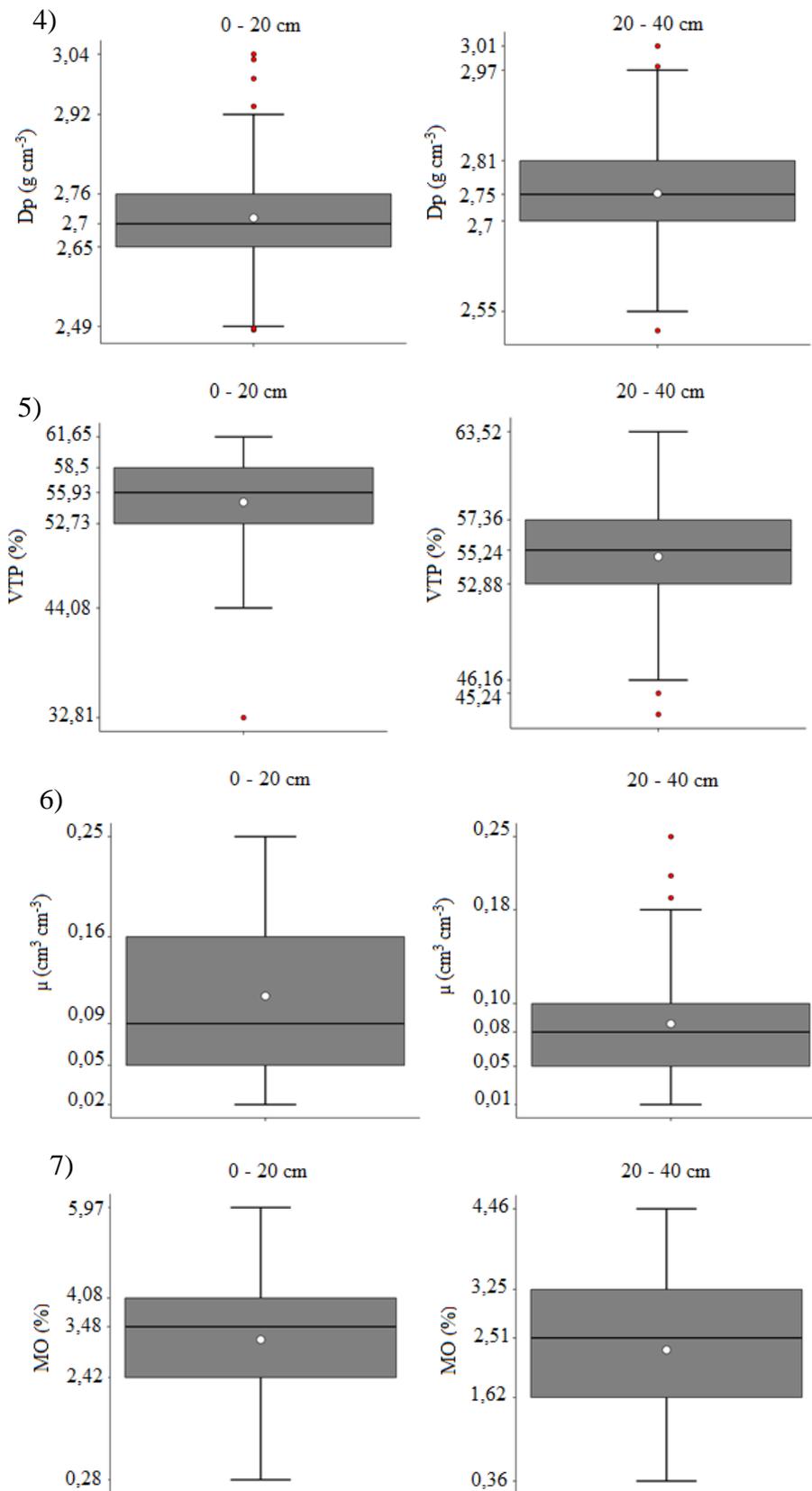
Por meio da análise dos gráficos *boxplot* (FIGURA 6) gerados para a camada 0 – 20 cm, verificou-se que os atributos areia, argila e silte apresentaram, cada um, cinco *outliers*,  $K_0$  e Dp, quatro e Ds e VTP, um. As variáveis  $\mu$ , MO e  $K_0$  com transformação logarítmica ( $\text{Log}(K_0)$ ) não apresentaram *outliers*. Para a camada 20 – 40 cm, as frações texturais e  $K_0$  apresentaram seis *outliers*, Dp e  $\mu$ , três, Ds e VTP, dois, e MO e  $\text{Log}(K_0)$  não apresentaram nenhum.

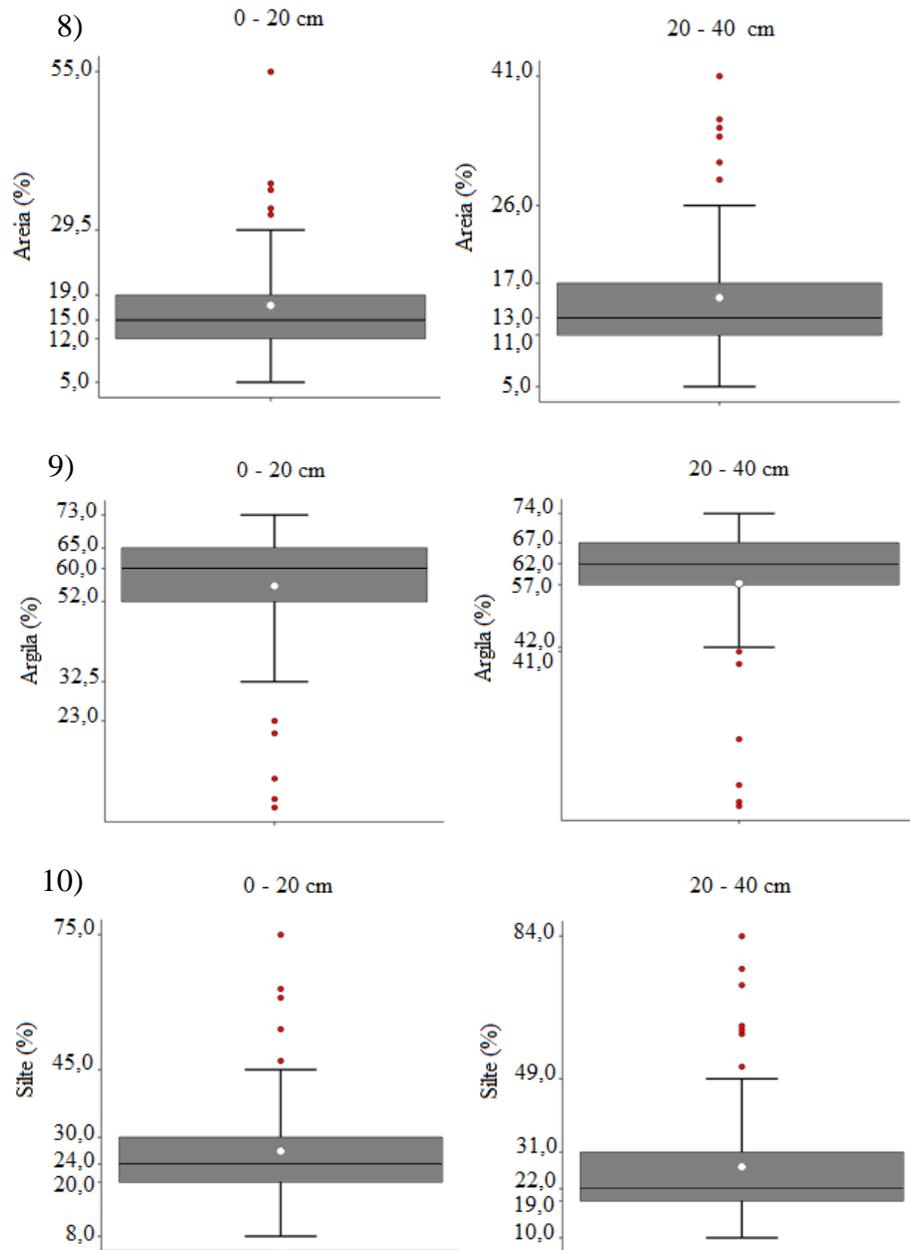
A quantidade de valores discrepantes apresentados pela  $K_0$  também foi observada por Gomes (2005) e Junqueira Júnior et al. (2008), que relatam a grande variabilidade espacial deste atributo, com estrutura de dependência espacial indefinida. A transformação logarítmica de  $K_0$  proporcionou uma melhora na distribuição dos dados, que pode ser constatada pela ausência de *outliers* (Figura 6.2). A quantidade de pontos discrepantes para areia, argila e silte evidenciou certa heterogeneidade das características texturais na área de estudo, provavelmente em razão de diferentes processos de formação do solo. Além disso, ressalta-se que, segundo Gomes (2005), valores discrepantes para o atributo silte podem estar relacionados às análises laboratoriais, uma vez que é obtido por diferença, ou seja, sua determinação pode conter erros gerados pela separação da areia e argila.

Para ambas as camadas, nenhum dos valores apresentou grandes discrepâncias quando comparado aos vizinhos mais próximos, o que sustentou a não remoção destes do conjunto amostral. Como se trata do estudo da distribuição espacial, estes dados discrepantes possivelmente descrevem o real comportamento do atributo no campo, considerando a escala adotada.

Figura 6 - Gráficos boxplot para os atributos  $K_0$  sem transformação logarítmica (1) e com transformação logarítmica (2),  $D_s$  (3),  $D_p$  (4), VTP (5),  $\mu$  (6), MO (7), Areia (8), Argila (9) e Silte (10), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.







Fonte: Da autora (2022).

Nas Tabelas 1 e 2 encontram-se os resultados da estatística descritiva de cada variável. Destaca-se que, a partir da observação dos valores médios de Ds e MO, verifica-se que a camada 0 – 20 cm apresentou menores valores de Ds e maiores teores de MO quando comparada com a camada 20 – 40 cm. Estes resultados corroboram com os encontrados por Lemos Filho et al. (2008), que estudaram a variabilidade espacial destes atributos em uma área cultivada com cana-de-açúcar, considerando camadas de igual profundidade às deste estudo. Tal comportamento pode ser explicado porque a matéria orgânica melhora a qualidade estrutural do solo e pode influenciar diretamente os valores de densidade, conforme apontam vários trabalhos (DUTAL; REIS, 2020; PRICE et al., 2010; SOUZA et al., 2004).

Segundo classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), valores de CV menores que 12% são considerados como baixa variabilidade, de 12% a 60%, média variabilidade e acima de 60%, alta variabilidade. Para a camada 0 – 20 cm, os atributos densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp) e volume total de poros (VTP) foram classificados como de baixa variabilidade e porosidade drenável ( $\mu$ ), MO, areia, argila e silte, de média variabilidade. Para a camada 20 – 40 cm, os resultados foram semelhantes, exceto para a porosidade drenável ( $\mu$ ) que apresentou alta variabilidade, com um CV de 66,69%. Os resultados para Ds são coerentes aos encontrados por Carvalho et al. (2003) e Santos et al. (2012b), que obtiveram CV abaixo de 10% para este atributo. Os maiores CV encontrados para as frações areia e silte, de acordo Klinko Neto et al. (2017), podem indicar, além da heterogeneidade natural do solo, grande mobilidade destas partículas no ambiente.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físico-hídricos da área de recarga para a camada 0 - 20 cm.

Camada 0 - 20 cm								
Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	D. P.	CV (%)	Assimetria	W
$K_0$ (cm h <sup>-1</sup> )	0,012	55,431	10,113	4,784	12,960	128,156	1,620	0,758
Log $K_0$ (cm h <sup>-1</sup> )	-1,921	1,744	0,395	0,677	0,970	245,339	-0,731	0,921
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	1,020	1,791	1,217	1,211	0,135	11,066	1,320	0,910
Dp (g cm <sup>-3</sup> )	2,483	3,042	2,710	2,698	0,109	4,015	0,889	0,931
VTP (%)	32,810	61,648	54,953	55,933	4,857	8,839	-1,739	0,867
$\mu$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,022	0,245	0,112	0,089	0,064	56,613	0,472	0,941*
MO (%)	0,280	5,970	3,208	3,480	1,361	42,423	-0,481	0,954
Areia (%)	5,000	55,000	17,274	15,000	9,135	52,882	1,671	0,842
Argila (%)	2,000	73,000	55,762	60,000	15,178	27,220	-2,085	0,740
Silte (%)	8,000	75,000	26,889	24,000	12,446	46,287	1,713	0,837

\* = Dados seguem distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância; D.P. = Desvio Padrão; CV = coeficiente de variação; W = estatística do teste de Shapiro-Wilk.

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 2 - Estatística descritiva dos atributos físico-hídricos da área de recarga para a camada 20 - 40 cm.

Camada 20 - 40 cm								
Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	D. P.	CV (%)	Assimetria	W
$K_0$ (cm h <sup>-1</sup> )	0,000	45,073	3,680	0,887	7,995	217,221	3,584	0,472
Log $K_0$ (cm h <sup>-1</sup> )	-1,434	1,654	-0,021	-0,057	0,682	-	0,266	0,986*
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	0,955	1,473	1,239	1,244	0,107	8,595	-0,231	0,980*
Dp (g cm <sup>-3</sup> )	2,515	3,007	2,752	2,751	0,098	3,567	0,033	0,974*
VTP (%)	43,761	63,524	54,792	55,244	4,116	7,513	-0,421	0,967*
$\mu$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,014	0,246	0,084	0,077	0,056	66,693	1,264	0,870
MO (%)	0,360	4,460	2,354	2,530	1,044	44,324	-0,300	0,960
Areia (%)	5,000	41,000	15,302	13,000	7,879	51,494	1,547	0,821
Argila (%)	4,000	74,000	57,339	62,000	17,953	31,311	-2,034	0,692
Silte (%)	10,000	84,000	27,381	22,000	15,434	56,368	2,085	0,717

\* = Dados seguem distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância; D.P. = Desvio Padrão; CV = coeficiente de variação; W = estatística do teste de Shapiro-Wilk.

Fonte: Da autora (2022).

Conforme esperado, a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) apresentou alta variabilidade, verificada pelo alto coeficiente de variação para as duas camadas analisadas (128,15% e 217,22%, respectivamente). Uma vez que  $K_0$  depende do espaço poroso, esta propriedade varia bastante de solo para solo e até mesmo em um mesmo solo (REICHARDT; TIMM, 2012). Kutílek e Nielsen (1994) também comentam que diferenças de material de origem e cobertura vegetal contribuem para essa variabilidade, mesmo em solos com textura semelhante, ou quando pequenas distâncias são consideradas.

Os resultados para este atributo são semelhantes aos de Scherpinski et al. (2010), que encontraram um valor de CV de 110,24% em uma área de 20 ha, classificada como Latossolo Vermelho distroférico. Já Gomes et al. (2007) verificaram um CV de 88,37%, ao analisarem os solos da sub-bacia hidrográfica Ribeirão Marcela, onde há predominância de Latossolos. Jury et al. (1991) indicaram que o coeficiente de variação para a condutividade hidráulica em solo saturado pode variar de 48 a 320%. O elevado grau de variabilidade da condutividade hidráulica tem sido atestado na literatura, observando-se comportamento Log-Normal desta variável (FURTUNATO et al., 2013; MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006; WOODBURY; SUDICKY, 1991), conforme pode ser observado visualmente neste trabalho por meio da análise dos histogramas de frequência para as duas camadas analisadas (FIGURA 11.1, APÊNDICE).

Verifica-se, pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) que, para a camada 0 – 20 cm, apenas a porosidade drenável ( $\mu$ ) apresentou distribuição normal a 5% de significância e, para a camada 20 – 40 cm, apenas os atributos Ds, Dp e VTP. Purcino (2017) analisou a variabilidade espacial dos parâmetros físico-hídricos do solo em duas sub-bacias do Ribeirão do Cipó, MG e verificou que os atributos Ds, MO e VTP apresentaram-se normalmente distribuídos em torno da média. Alves et al. (2021) analisaram a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em uma microbacia do Rio Pandeiros, e, por meio da aplicação do teste de Shapiro-Wilk, também encontraram ausência de normalidade para as frações texturais, VTP, Ds, Dp e  $K_0$  da camada 0 – 20 cm.

Embora não tenha sido verificada a distribuição normal por meio da aplicação do teste, para as variáveis  $\text{Log}K_0$ , Ds, Dp e MO da camada 0 – 20 cm, os coeficientes de assimetria próximos a zero bem como a proximidade entre os valores da média e mediana indicam uma tendência à normalidade dos dados (CARVALHO et al., 2002), podendo contribuir de forma positiva para que as análises geoestatísticas possam ser feitas de maneira mais precisa e sejam gerados melhores resultados.

No que diz respeito aos valores da estatística descritiva aplicada aos dados de  $K_0$  com e sem transformação logarítmica, observa-se que apenas os dados referentes à camada 20 – 40 cm se ajustaram à distribuição normal. Entretanto, comparando-se os resultados da aplicação do teste de Shapiro-Wilk antes e depois da transformação, foi observado o aumento significativo dos valores da estatística do teste (W) para ambas as camadas. A melhoria na distribuição dos dados pode ser evidenciada, também, por meio da redução dos valores de assimetria calculados e dispostos na tabela, bem como por meio da análise visual dos gráficos *boxplot* (FIGURA 6.1 e 6.2) e dos histogramas de frequência para os dados com e sem transformação (FIGURAS 11.1 e 11.2, APÊNDICE). Resultados semelhantes foram encontrados por Alvarenga et al. (2010) e Hurtado (2004).

### 3.2 Análise geoestatística

Nas Tabelas 3 e 4 estão dispostos os resultados gerados pela análise variográfica dos atributos físico-hídricos, onde se encontram os valores do efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ), alcance (a) e grau de dependência espacial (GD) para os três modelos testados (esférico, gaussiano e exponencial).

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariograma testados para os atributos físico-hídricos e seus respectivos graus de dependência espacial, para a camada 0 – 20 cm.

0 - 20 cm							
Variável	Modelo	$C_1$	$C_0$	$(C_0 + C_1)$	a (m)	GD (%)	Classificação
$K_0$	Esférico	165,117	6,483	171,600	66,53	3,778	Forte
	Gaussiano	172,300	0,100	172,400	53,35	0,058	Forte
	Exponencial	181,800	0,100	181,900	86,24	0,055	Forte
Log ( $K_0$ )	Esférico	0,763	0,095	0,858	216,10	11,072	Forte
	Gaussiano	0,808	0,001	0,809	118,82	0,124	Forte
	Exponencial	0,992	0,001	0,993	331,80	0,101	Forte
$D_s$	Esférico	0,020	0,004	0,024	364,90	16,942	Forte
	Gaussiano	0,017	0,008	0,024	321,30	30,738	Moderada
	Exponencial	0,031	0,002	0,033	776,40	7,527	Forte
$D_p$	Esférico	0,012	0,001	0,013	253,00	6,240	Forte
	Gaussiano	0,012	0,000	0,012	133,71	0,084	Forte
	Exponencial	0,015	0,000	0,015	393,60	0,066	Forte
VTP	Esférico	27,930	6,660	34,590	405,40	19,254	Forte
	Gaussiano	22,180	10,890	33,070	325,97	32,930	Moderada
	Exponencial	35,900	4,900	40,800	699,30	12,010	Forte
MO	Esférico	1,975	0,122	2,097	460,30	5,818	Forte
	Gaussiano	1,558	0,382	1,940	355,76	19,691	Forte
	Exponencial	2,010	0,001	2,011	565,80	0,050	Forte
$\mu$	Esférico	0,003	0,002	0,006	397,37	41,062	Moderada
	Gaussiano	0,002	0,003	0,005	423,35	54,465	Moderada
	Exponencial	0,004	0,002	0,006	706,39	36,665	Moderada
Areia	Esférico	76,920	2,100	79,020	110,80	2,658	Forte
	Gaussiano	79,010	0,100	79,110	89,20	0,126	Forte
	Exponencial	79,360	2,600	81,960	147,60	3,172	Forte
Argila	Esférico	99,300	6,200	105,500	280,80	5,877	Forte
	Gaussiano	83,600	22,200	105,800	241,62	20,983	Forte
	Exponencial	113,500	0,100	113,600	371,70	0,088	Forte
Silte	Esférico	311,000	0,100	311,100	685,30	0,032	Forte
	Gaussiano	335,900	25,000	360,900	610,37	6,927	Forte
	Exponencial	206,768	0,100	206,868	507,09	0,048	Forte

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 4 - Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariograma testados para os atributos físico-hídricos e seus respectivos graus de dependência espacial, para a camada 20 – 40 cm.

20 - 40 cm							
Variável	Modelo	C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub>	(C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub> )	a (m)	GD (%)	Classificação
K <sub>0</sub>	Esférico	66,170	7,500	73,670	113,200	10,181	Forte
	Gaussiano	53,510	53,500	107,010	482,030	49,995	Moderada
	Exponencial	65,480	40,100	105,580	755,700	37,981	Moderada
Log (K <sub>0</sub> )	Esférico	0,488	0,035	0,523	141,500	6,692	Forte
	Gaussiano	0,517	0,001	0,518	98,034	0,193	Forte
	Exponencial	0,567	0,001	0,568	211,200	0,176	Forte
Ds	Esférico	0,009	0,004	0,013	330,100	31,975	Moderada
	Gaussiano	0,010	0,000	0,011	103,230	1,689	Forte
	Exponencial	0,011	0,002	0,013	372,600	15,038	Forte
Dp	Esférico	0,006	0,003	0,010	177,000	36,621	Moderada
	Gaussiano	0,009	0,000	0,009	96,822	0,107	Forte
	Exponencial	0,009	0,000	0,010	171,300	3,776	Forte
VTP	Esférico	13,710	5,040	18,750	288,000	26,880	Moderada
	Gaussiano	16,340	0,010	16,350	107,387	0,061	Forte
	Exponencial	18,510	1,320	19,830	321,300	6,657	Forte
MO	Esférico	0,669	0,195	0,864	246,150	22,571	Forte
	Gaussiano	0,584	0,364	0,948	256,689	38,394	Moderada
	Exponencial	0,822	0,042	0,864	264,065	4,888	Forte
μ	Esférico	0,004	0,001	0,005	265,000	23,382	Forte
	Gaussiano	0,004	0,001	0,005	143,760	14,565	Forte
	Exponencial	0,004	0,001	0,005	249,000	18,157	Forte
Areia	Esférico	52,080	0,300	52,380	90,200	0,573	Forte
	Gaussiano	52,330	0,100	52,430	75,691	0,191	Forte
	Exponencial	54,000	0,100	54,100	120,900	0,185	Forte
Argila	Esférico	130,476	31,500	161,976	388,813	19,447	Forte
	Gaussiano	116,665	61,300	177,965	385,873	34,445	Moderada
	Exponencial	161,393	23,300	184,693	572,756	12,616	Forte
Silte	Esférico	213,200	2,300	215,500	575,200	1,067	Forte
	Gaussiano	234,900	34,000	268,900	572,789	12,644	Forte
	Exponencial	201,000	0,100	201,100	775,800	0,050	Forte

Fonte: Da autora (2022).

Para a camada 0 – 20 cm, a partir da análise do grau de dependência espacial e sua classificação segundo Cambardella et al. (1994), verifica-se que a maioria dos atributos físico-hídricos apresentaram forte dependência espacial, com exceção de Ds e VTP, que apresentaram dependência espacial moderada pelo modelo gaussiano e μ, para os três modelos testados. Para

a camada 20 – 40 cm, foi encontrada dependência espacial moderada para os atributos  $K_0$  (modelos gaussiano e exponencial),  $D_s$ ,  $D_p$  e VTP (modelo esférico), e MO e Argila (modelo gaussiano). Em ambas as camadas analisadas, nenhum dos atributos apresentou fraca dependência espacial ( $GD > 75\%$ ) na escala utilizada neste estudo. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Ferreira (2016), ao analisar a variação espacial de atributos do solo em uma área de recarga de nascente do semiárido, considerando a profundidade de 0 – 30 cm.

Grego e Vieira (2005) encontraram dependência espacial moderada para  $D_s$ , fornecida pelo modelo esférico, para a camada 0 – 15 cm de um Latossolo Vermelho. Lemos Filho et al. (2008) analisaram a variabilidade espacial de  $D_s$  e MO em uma área de 0,9 ha com 49 pontos separados de forma equidistante e encontraram moderada dependência espacial para  $D_s$  para os modelos gaussiano, esférico e exponencial, considerando a camada 0 – 20 cm. Para MO, os autores encontraram forte dependência espacial apenas para o modelo exponencial, contrastando com os obtidos neste trabalho, onde forte dependência espacial foi observada para os três modelos ajustados para este atributo. Já os resultados obtidos para a porosidade drenável ( $\mu$ ) corroboram com os encontrados por Junqueira Júnior et al. (2008), que analisaram a continuidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo em uma sub-bacia hidrográfica de cabeceira e encontraram a dependência espacial moderada deste atributo para os modelos esférico e exponencial.

A forte dependência espacial encontrada para as frações texturais areia, argila e silte pode ser atribuída ao material de origem do solo e à ação do processo de intemperismo (SANTOS et al., 2018a). Os resultados encontrados neste estudo se assemelham aos obtidos por Delbari et al. (2019), que analisaram a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em uma área de 85 ha utilizando uma malha amostral com pontos separados por 70 m. Os autores relatam que todas as frações texturais apresentaram um grau de dependência espacial variando entre moderada e forte para as camadas 0 – 15 cm.

Iqbal et al. (2005) encontraram dependência espacial moderada para areia e argila em um solo de planície de inundação aluvial. Delbari et al. (2011) analisaram as propriedades do solo em uma área agrícola da Áustria e obtiveram forte dependência espacial para areia e silte e moderada dependência espacial para argila. Rosemary et al. (2017) exploraram a dependência espacial em uma área de 94 ha de um solo tropical e encontraram dependência espacial moderada e forte para argila e areia, respectivamente. Dependência espacial classificada como forte para  $K_0$  também foi constatada por Santos et al. (2018a), que analisaram a variabilidade

espacial de atributos físicos do solo em um vale aluvial, utilizando uma malha amostral com pontos espaçados de 8 m.

Comparando os parâmetros de ajuste dos semivariogramas teóricos, constatou-se que  $\text{Log}(K_0)$  forneceu valores de efeito pepita reduzidos de forma significativa em relação aos dados sem transformação, embora tenha apresentado a mesma classificação de GD. Segundo Alvarenga et al. (2010), tal fato se explica pelo efeito da transformação logarítmica, que reduz as semivariâncias a partir da diminuição da amplitude de variação dos valores do atributo analisado, reduzindo o efeito pepita e produzindo modelos de semivariograma mais consistentes.

Conforme aponta Cambardella et al. (1994), a forte dependência espacial dos atributos do solo pode ser atribuída à variabilidade intrínseca do mesmo, causada por alterações naturais, majoritariamente aquelas relacionadas aos processos pedogenéticos, como material de origem, intemperismo de minerais, acúmulo de matéria orgânica e outros. A partir da análise dos dados, verifica-se que existe forte dependência espacial para a maioria dos atributos, indicando que o solo apresenta certa homogeneidade na escala adotada. A fraca e moderada dependência espacial, ainda segundo os autores, geralmente se relaciona à variabilidade extrínseca, causada por mudanças no uso e ocupação do solo, práticas culturais, erosão e compactação. Dessa forma, os diferentes graus de dependência espacial das propriedades do solo encontrados neste estudo podem estar relacionados tanto aos processos de formação, quanto às práticas de gestão do solo adotadas na área de estudo (ADUGNA; ABEGAAZ, 2015).

De acordo com Sampaio et al. (2010), o alcance é um parâmetro importante por contribuir como ferramenta auxiliar para o delineamento de futuras amostragens de solo, uma vez que indica a linha divisória para a aplicação de geoestatística e estatística clássica e representa a máxima distância entre as amostras para determinação de variáveis com boa representatividade. Para a camada 0 – 20 cm, os menores valores foram obtidos para atributo  $K_0$ , pelos modelos gaussiano e esférico, com alcances de 53,35 m e 66,53 m, respectivamente. Estes resultados estão em conformidade com os obtidos por Scherpinski et al. (2010), que utilizaram uma malha amostral semelhante à deste estudo para a análise da variabilidade espacial da condutividade hidráulica em uma área localizada no estado do Paraná. Os autores detectaram estruturas de dependência espacial para o atributo com alcances de até 96,22 m.

Os maiores valores foram observados para os atributos  $D_s$  e  $\mu$ , com alcances de 776,40 m e 706,39 m, respectivamente, ambos para o modelo exponencial. De forma geral, constatou-se uma maior tendência do modelo exponencial em fornecer maiores alcances para os atributos analisados, provavelmente em razão dos menores valores de efeito pepita produzidos, com

exceção da fração Silte, que apresentou maior alcance para o modelo esférico. Junqueira Júnior et al. (2008) encontraram alcances para porosidade drenável ( $\mu$ ) variando de 583 a 1400 m para a camada 0 – 15 cm, com o maior valor fornecido pelo modelo esférico. Delbari et al. (2019) obtiveram alcances de 540 m para a  $D_s$ , porém os maiores foram observados para as frações texturais, com valores de até 800 m. Gomes et al. (2007b) encontraram alcance de 425 m para  $D_s$  e valores entre 291 e 3000 m para as frações texturais da camada 0 – 15 cm.

Para a camada 20 – 40 m, os menores valores de alcance foram observados para o atributo Areia, para os modelos gaussiano e esférico, com 75,69 m e 90,20 m, respectivamente. Os maiores valores foram encontrados para Silte e  $K_0$ , com alcances de 775,80 m e 755,70 m, respectivamente, ambos para o modelo exponencial. Souza et al. (2004b) analisaram a variabilidade espacial da textura de um Latossolo, utilizando uma malha regular com pontos separados por 50 m. Para a camada 60 – 80 cm, os autores obtiveram alcances de 57,9 m e 83,1 para as frações Areia e Silte, respectivamente, ambos fornecidos pelo modelo exponencial. Os resultados obtidos neste estudo para o atributo  $K_0$  estão em consonância com os encontrados por Klinke Neto et al. (2017), que analisaram a variabilidade espacial deste atributo em uma sub-bacia hidrográfica utilizando uma malha amostral regular de 400 x 400 metros. Para a camada 20 – 40 cm, os autores obtiveram alcances variando entre 400 e 600 m, com o maior valor fornecido pelo modelo esférico.

Já Guimarães et al. (2016), estudando a variabilidade espacial de atributos de solos ocupados por pastagens, adotaram uma malha regular com espaçamento de 10 x 10 m e encontraram alcances menores para  $K_0$ , os quais variaram de 20,7 m para o modelo esférico e 38,9 m para o modelo exponencial. No que diz respeito aos modelos, foi observado um comportamento semelhante ao da camada 0 – 20 cm, no qual o modelo exponencial forneceu os maiores valores de alcance para a maioria dos atributos, com exceção de  $D_p$  e  $\mu$ , que apresentaram maiores valores para o modelo esférico.

Os valores referentes ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ), obtido a partir do ajuste do semivariograma teórico ao experimental, bem como o EMR (Erro Médio Reduzido) e DPE (Desvio Padrão do Erro), gerados pelo procedimento de validação cruzada para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, podem ser visualizados nas Tabela 5 e 6. O EMR e o DPE foram utilizados como critério para escolha do melhor modelo, sendo adotados o EMR mais próximo de 0 e o DPE mais próximo de 1 (ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013). O GD e o alcance foram utilizados como critérios auxiliares.

Tabela 5 - Estatísticas geradas pelo procedimento de validação cruzada para os atributos da camada 0 – 20 cm.

0 - 20 cm					
Variável	Modelo	R <sup>2</sup>	EMR	DPE	Melhor modelo
K <sub>0</sub>	Esférico	0,950	-0,013	0,902	Esférico
	Gaussiano	0,910	-0,013	0,901	
	Exponencial	0,928	-0,014	0,871	
Log (K <sub>0</sub> )	Esférico	0,756	-0,003	1,474	Exponencial
	Gaussiano	0,776	-0,019	3,399	
	Exponencial	0,793	0,001	1,465	
D <sub>s</sub>	Esférico	0,993	0,014	1,207	Exponencial
	Gaussiano	0,991	0,024	1,146	
	Exponencial	0,996	0,008	1,283	
D <sub>p</sub>	Esférico	0,672	-0,018	1,731	Exponencial
	Gaussiano	0,690	0,004	4,497	
	Exponencial	0,695	-0,013	1,611	
VTP	Esférico	0,994	-0,021	1,284	Exponencial
	Gaussiano	0,998	-0,017	1,257	
	Exponencial	0,986	-0,013	1,285	
MO	Esférico	0,934	0,019	1,171	Gaussiano
	Gaussiano	0,944	0,004	1,162	
	Exponencial	0,933	0,027	1,136	
μ	Esférico	0,517	-0,002	1,046	Gaussiano
	Gaussiano	0,550	0,005	1,024	
	Exponencial	0,515	-0,001	1,059	
Areia	Esférico	0,453	0,017	1,011	Esférico
	Gaussiano	0,450	0,012	1,054	
	Exponencial	0,446	-0,004	1,039	
Argila	Esférico	0,735	0,023	1,162	Esférico
	Gaussiano	0,718	0,033	1,174	
	Exponencial	0,665	0,033	1,160	
Silte	Esférico	0,919	-0,025	1,070	Gaussiano
	Gaussiano	0,961	0,021	1,018	
	Exponencial	0,872	-0,037	1,076	

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 6 - Estatísticas geradas pelo procedimento de validação cruzada para os atributos da camada 20 – 40 cm.

20 - 40 cm					
Variável	Modelo	R <sup>2</sup>	EMR	DPE	Melhor modelo
K <sub>0</sub>	Esférico	0,489	-0,006	1,173	Exponencial
	Gaussiano	0,888	-0,001	0,989	
	Exponencial	0,897	-0,001	1,039	
Log (K <sub>0</sub> )	Esférico	0,791	-0,008	1,377	Exponencial
	Gaussiano	0,829	-0,006	1,818	
	Exponencial	0,839	0,0004	1,270	
D <sub>s</sub>	Esférico	0,928	-0,007	1,151	Esférico
	Gaussiano	0,762	0,007	2,056	
	Exponencial	0,924	-0,006	1,239	
D <sub>p</sub>	Esférico	0,986	-0,011	1,022	Exponencial
	Gaussiano	0,911	-0,007	1,379	
	Exponencial	0,990	-0,005	1,056	
VTP	Esférico	0,832	0,007	1,316	Esférico
	Gaussiano	0,768	-0,005	2,568	
	Exponencial	0,827	0,007	1,435	
MO	Esférico	0,796	0,015	1,077	Gaussiano
	Gaussiano	0,856	0,016	1,021	
	Exponencial	0,766	0,017	0,977	
μ	Esférico	0,668	0,000	1,238	Exponencial
	Gaussiano	0,664	-0,005	1,299	
	Exponencial	0,677	0,005	1,070	
Areia	Esférico	0,215	0,013	1,031	Exponencial
	Gaussiano	0,217	0,013	1,038	
	Exponencial	0,323	0,010	1,063	
Argila	Esférico	0,912	0,024	1,640	Esférico
	Gaussiano	0,947	0,028	1,247	
	Exponencial	0,868	0,038	1,555	
Silte	Esférico	0,956	-0,035	1,449	Gaussiano
	Gaussiano	0,967	0,032	1,324	
	Exponencial	0,931	-0,041	1,321	

Fonte: Da autora (2022).

Para a camada 0 – 20 cm, destaca-se a qualidade dos ajustes dos modelos testados ao semivariograma experimental dos atributos K<sub>0</sub>, D<sub>s</sub>, VTP e MO, com valores de R<sup>2</sup> maiores que 0,9. Os menores valores foram obtidos para o ajuste dos atributos Areia e μ, com coeficientes menores que 0,4 e 0,5, respectivamente. Verifica-se valores de EMR próximos de 0 para todas as variáveis, evidenciando a qualidade das predições. Para os dados de K<sub>0</sub> com transformação logarítmica (Log (K<sub>0</sub>)), embora obtidos menores valores de R<sup>2</sup>, foram observados valores de

EMR mais próximos de 0 para os modelos esférico e exponencial. Segundo a ESRI (2021), o DPE maior que 1 indica subestimativa da variância nas estimativas fornecidas pelo interpolador e valores menores que 1, superestimativa. De forma geral, observa-se valores maiores que 1 para a maioria das variáveis. Excetua-se a  $K_0$  sem transformação, cujos valores foram menores que 1 para os três modelos testados e as variáveis  $\text{Log}(K_0)$  e  $D_p$ , ambas para o modelo gaussiano, que apresentaram valores de DPE muito maiores, sendo 3,399 e 4,497, respectivamente.

Para a camada 20 – 40 cm, os atributos apresentaram valores de  $R^2$  menores, quando comparados aos da camada 0 – 20 cm. Destaca-se os menores valores observados para o atributo Areia, variando de 0,215 a 0,323 para os modelos esférico e exponencial, respectivamente. De forma oposta, valores de  $R^2$  maiores que 0,9 evidenciam a qualidade dos ajustes dos semivariogramas teóricos para os atributos  $D_s$ ,  $D_p$ , Argila e Silte. A transformação logarítmica dos dados de  $K_0$  forneceu um melhor ajuste ao modelo esférico, constatado pelo maior valor de  $R^2$  (0,791), quando comparado aos dados sem transformação (0,489). Da mesma forma, na análise do EMR, destacam-se os valores muito próximos a 0 para modelo exponencial e esférico, ajustado aos dados de  $K_0$  sem transformação e porosidade drenável ( $\mu$ ), respectivamente. Por meio da análise do DPE, verifica-se valores significativamente maiores que 1, fornecidos pelo modelo gaussiano, para os atributos  $D_s$  e VTP, indicando subestimativa da variância das predições. Valores menores que 1, indicativos de superestimativa da variância, foram observados para o modelo gaussiano de  $K_0$  e exponencial de MO.

Montenegro e Montenegro (2006) analisando a variabilidade espacial da condutividade hidráulica de solos em planície aluvial, encontraram melhor ajuste às semivariâncias experimentais pelo modelo gaussiano, cujo procedimento de validação cruzada produziu resíduos com EMR de 0,010 e DPE de 1,091, os quais são suficientemente próximos de zero e um, respectivamente. Já Alvarenga et al. (2010) investigaram o efeito da transformação logarítmica na estrutura de dependência espacial de  $K_0$  para a bacia do Alto Rio Grande, MG e verificaram que as estatísticas EMR e DPE, para os modelos exponencial e esférico, não contribuíram decisivamente para a escolha do melhor modelo, uma vez que foi observada uma diferença muito pequena entre esses valores para os dados sem transformação e transformados.

Conforme constata-se nas Tabelas 5 e 6, em ambas as camadas, o modelo exponencial foi considerado o melhor modelo para a maioria dos atributos, corroborando com os resultados obtidos por Lemos Filho et al. (2008), Furtunato et al. (2013), Klinke Neto et al. (2017) e Brito Filho et al. (2018). De acordo com Souza et al. (2001), Souza et al. (2004) e Souza et al. (2004b), o modelo exponencial é o mais eficiente na descrição da variabilidade de atributos do solo. As

Figuras 20 e 21 do Apêndice contemplam os ajustes dos três modelos de semivariogramas teóricos para cada atributo das camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, respectivamente.

### 3.3 Mapeamento dos atributos físico-hídricos do solo

Nas Figuras 7 e 8 estão dispostos os mapas da distribuição espacial dos atributos físico-hídricos da área de recarga para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, respectivamente, sendo: condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), condutividade hidráulica saturada com transformação logarítmica ( $\text{Log}(K_0)$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), volume total de poros (VTP), porosidade drenável ( $\mu$ ), matéria orgânica (MO), areia, argila e silte.

A Figura 7.1 contempla o mapa de condutividade hidráulica saturada para a camada 0 – 20 cm. Associando a imagem ao mapa de uso e ocupação do solo para a área (FIGURA 3), observa-se que os maiores valores de  $K_0$  são encontrados em áreas sob vegetação, como aquelas próximas à nascente, nas áreas cultivadas e nas pequenas porções com altos teores de areia, evidenciando a importância da cobertura vegetal e da textura no processo de infiltração da água no solo. Para ambas as camadas, a partir da comparação dos mapas da distribuição espacial de  $K_0$  e  $D_s$  (FIGURAS 7.1, 7.3, 8.1 e 8.3), é possível observar maiores valores de condutividade hidráulica saturada em áreas com menores valores de  $D_s$ , indicando locais favoráveis à recarga de água. Estes resultados corroboram com os encontrados por Klinke Neto et al. (2017), que analisaram a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em uma sub-bacia do estado de São Paulo, dando foco às questões hidrogeológicas acerca da capacidade de infiltração da água no solo.

Áreas cobertas por vegetação geralmente têm melhores condições para o processo de infiltração e percolação da água (LIMA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014; REICHERT et al., 2017). Tal fato pode ser explicado pelo maior aporte de matéria orgânica conferido pela presença de árvores, o que melhora a estrutura e porosidade do solo, fundamentais ao movimento de água (DUTAL; REIS, 2020; PRICE, 2011). Confrontando os mapas das Figuras 7.7 e 7.5, visualiza-se os maiores valores de VTP, provavelmente com maior predomínio de macroporos, em porções com maiores teores de MO.

De acordo com resultados encontrados por Bonell et al. (2010), Roa-García et al. (2011) e Hümman et al. (2011), a presença de árvores com raízes profundas promove condições para a criação dos macroporos, que aumentam a porosidade drenável e a condutividade hidráulica saturada, contribuindo para a formação de fluxos preferenciais e favorecendo a percolação da

água. Constata-se tais afirmações a partir da comparação entre os mapas de  $K_0$  (FIGURA 7.1) e VTP (FIGURA 7.5), onde se observa maiores valores de  $K_0$  nas porções com maiores valores de VTP.

Para a camada 0 – 20 cm, a transformação logarítmica dos dados não permitiu uma visão mais detalhada da distribuição espacial de  $K_0$  (FIGURAS 7.1 e 7.2), diferindo dos resultados obtidos por Alvarenga et al. (2010), que obtiveram melhores respostas a partir dos dados transformados. Observa-se que, embora o mapa gerado a partir dos dados com transformação tenha conseguido captar as áreas com maiores valores de condutividade, os valores mais baixos não foram realçados tão detalhadamente como no mapa gerado a partir dos dados originais. Entretanto, em ambos os mapas, foram evidenciados os maiores valores de  $K_0$  em áreas próximas à nascente e os menores valores próximos às áreas impermeabilizadas onde se encontra o Aeroporto Municipal de Lavras, bem como nas áreas com maiores teores de silte (FIGURAS 7.10 e 8.10). Para a camada 20 – 40 cm, a transformação logarítmica dos dados de  $K_0$  forneceu melhores resultados, uma vez que o mapa gerado apresentou maior detalhamento. Dessa forma, foi possível obter uma melhor visualização da distribuição espacial do atributo na área, fornecendo informações mais precisas do comportamento de  $K_0$  (FIGURA 8.2).

Os valores mais baixos de  $K_0$  em áreas com maiores teores de silte (FIGURA 7.1 e 7.10) se justificam porque, segundo Santos et al. (2012a), em locais com altos teores de silte, a possibilidade de obstrução dos poros é potencializada, diminuindo consideravelmente a permeabilidade do solo. Gomes et al. (2007b) relatam que, em função de sua instabilidade, a fração silte é pouco desejável no ambiente por ser a primeira a ser desprendida e arrastada pela ação das gotas de chuva, podendo levar ao assoreamento de corpos d'água. Uma vez que se verifica maiores teores de silte em áreas com solo exposto (FIGURA 3 e 7.10), recomenda-se a adoção de práticas de manejo conservacionistas nesses locais, como as do tipo vegetativas que promovem a proteção do solo; e práticas mecânicas que visem reduzir a velocidade do escoamento superficial direto, como a construção de terraços, escadas de dissipação, entre outros.

De forma geral, a espacialização da fração areia revelou maiores teores nas partes mais altas da paisagem (FIGURAS 7.8 e 8.8). Segundo Gomes et al. (2007b), além dos processos relacionados à formação do solo, isso pode estar associado ao transporte distinto dos sedimentos, que desloca, com mais facilidade, as partículas menores para as partes mais baixas do relevo. Este fato pode ser verificado por meio da distribuição espacial da fração argila, a qual concentra os maiores valores nas partes mais baixas da área (FIGURA 7.9). Já os maiores teores de areia encontrados próximos à nascente (FIGURA 7.8) podem estar associados à

vegetação que a rodeia, corroborando com os resultados encontrados por Amaral et al. (2020). Segundo os autores, a complexidade estrutural da vegetação nesses locais é capaz de impedir a chegada das partículas de menor tamanho (silte e argila) que são carregadas para as partes mais baixas do terreno por meio de processos erosivos. Dessa forma, a presença de vegetação em torno da nascente pode contribuir para a redução dos efeitos negativos decorrentes da exposição do solo que ocorre nas partes mais altas da área (FIGURA 3).

Em relação à distribuição espacial da Ds (FIGURAS 7.3 e 8.3), constatou-se os maiores valores (1,334 a 1,791 g cm<sup>-3</sup>) associados às áreas próximas ao Aeroporto Municipal de Lavras (FIGURA 3), o que evidencia o possível comprometimento da qualidade do solo nessa região, em razão do atual uso e ocupação do solo. Tal fato pode indicar prejuízos às condições de infiltração e restrição ao fluxo de água no solo, podendo comprometer o abastecimento do lençol subterrâneo. Esses resultados refletem a influência antrópica sobre os atributos considerados sensíveis ao manejo do solo, sendo a densidade um deles (ALVARENGA et al., 2012; GOMES et al., 2007b).

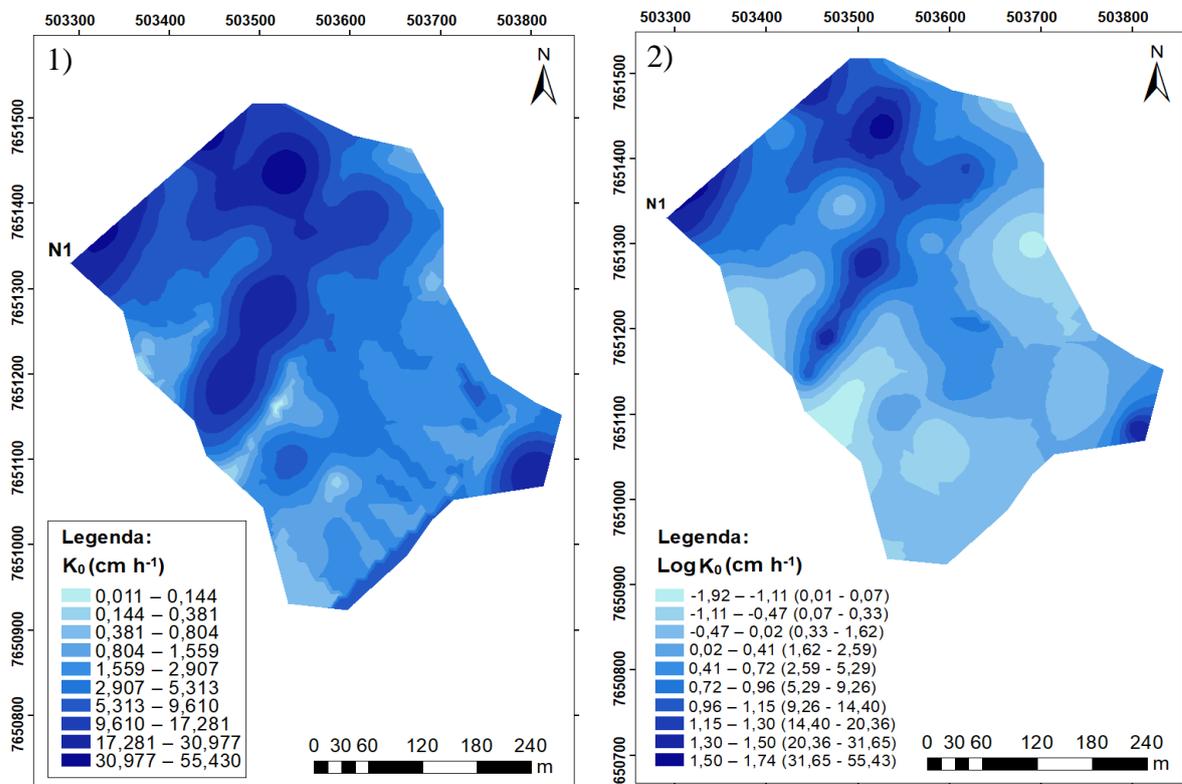
Confrontando os mapas de distribuição espacial de Ds e MO (FIGURAS 7.3, 7.7, 8.3 e 8.7) verifica-se que, em áreas com alto teor de matéria orgânica, foram observados baixos valores de densidade do solo, evidenciando a relação inversa entre os atributos. Essas áreas se situam nas porções próximas à nascente, sob vegetação, sendo também as áreas com os maiores valores de K<sub>0</sub> e VTP. Tal fato reflete a qualidade do solo nestes locais e indica condições favoráveis à recarga de água. Segundo Gomes et al. (2007b), a densidade do solo e o teor de matéria orgânica sofrem influência do manejo empregado. Dessa forma, podem ser considerados bons indicadores das condições de uso e ocupação do solo e da sua qualidade enquanto recurso.

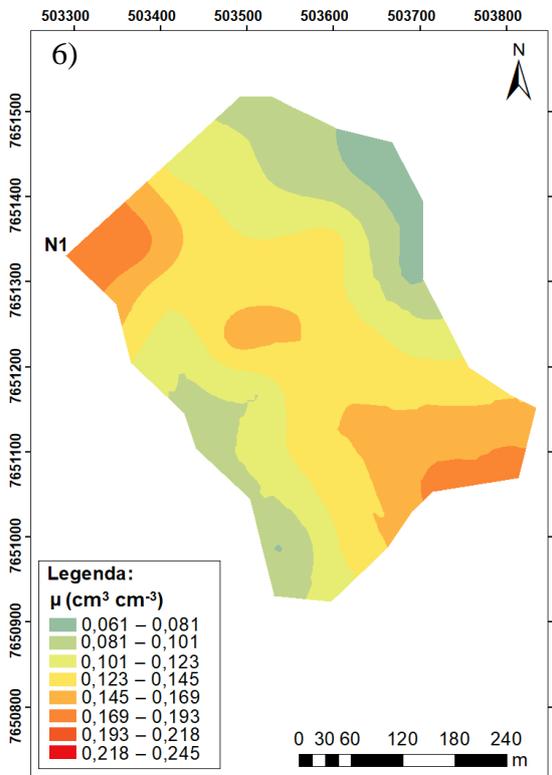
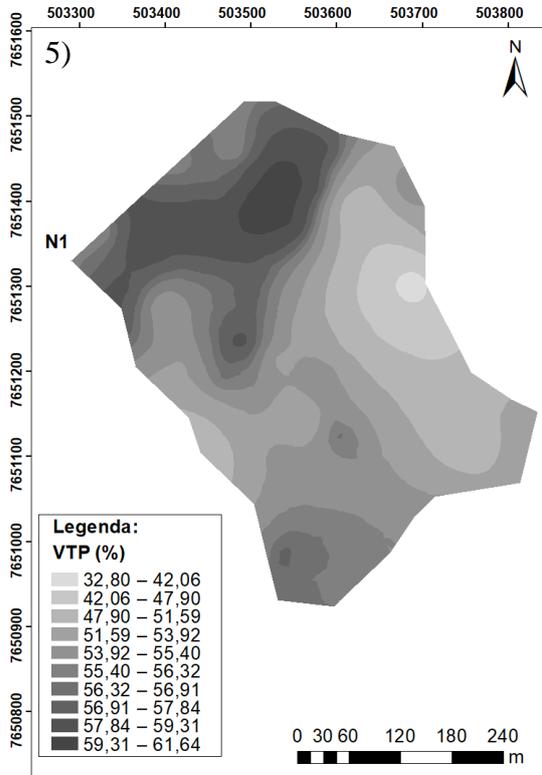
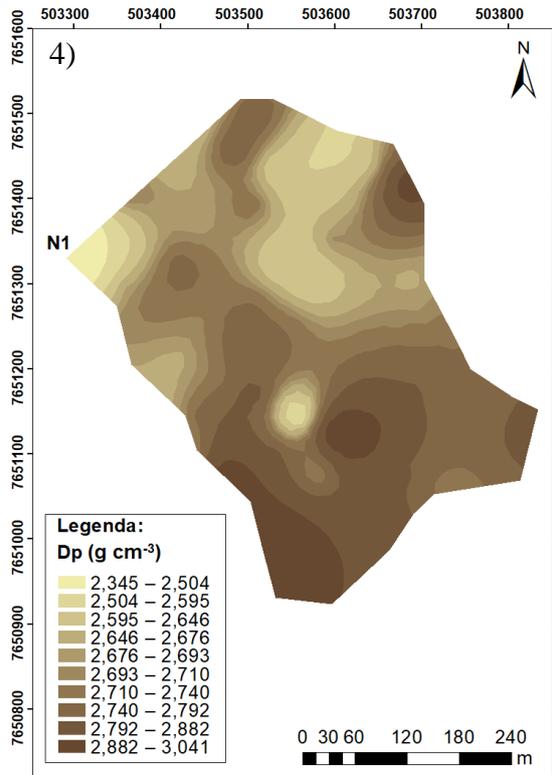
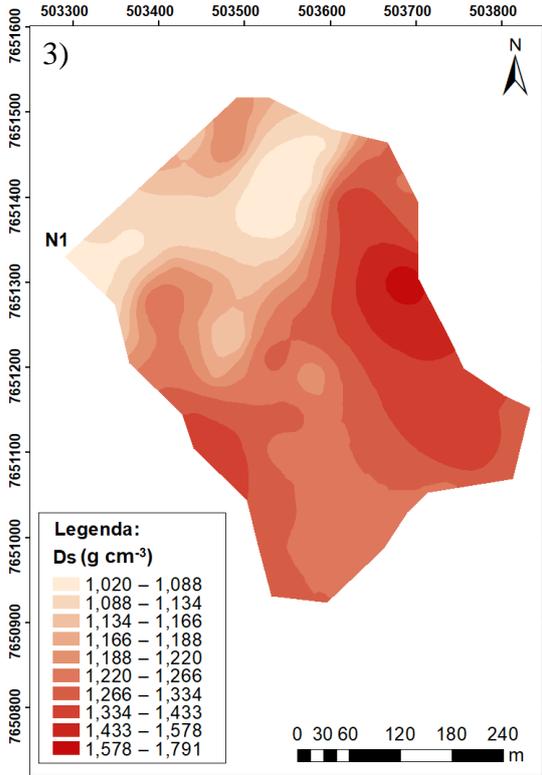
Situação semelhante pode ser verificada a partir da comparação entre os mapas de Dp e MO (FIGURAS 7.4, 7.7, 8.4 e 8.7), de forma que áreas com os menores valores de Dp concentram os maiores valores de MO. Segundo Ferreira et al. (2003), a densidade de partículas será tanto menor quanto maior for o conteúdo de matéria orgânica no solo. Os maiores valores de Dp observados se encontram acima do valor geralmente adotado, 2,65 g cm<sup>-3</sup>, indicando a existência de partículas mais densas que o quartzo (FERREIRA, 2010). Tais resultados corroboram com os encontrados por Rizzardi et al. (2014), que avaliaram os atributos físicos e o fluxo de água em uma bacia hidrográfica do Rio Grande do Sul.

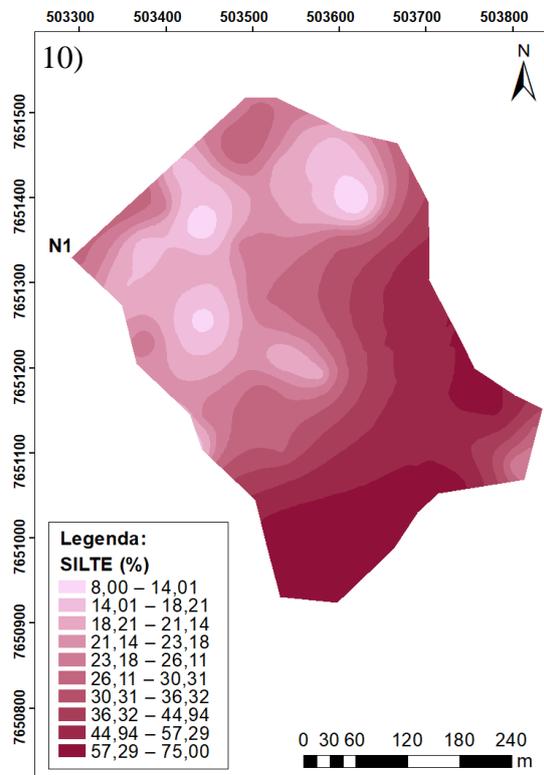
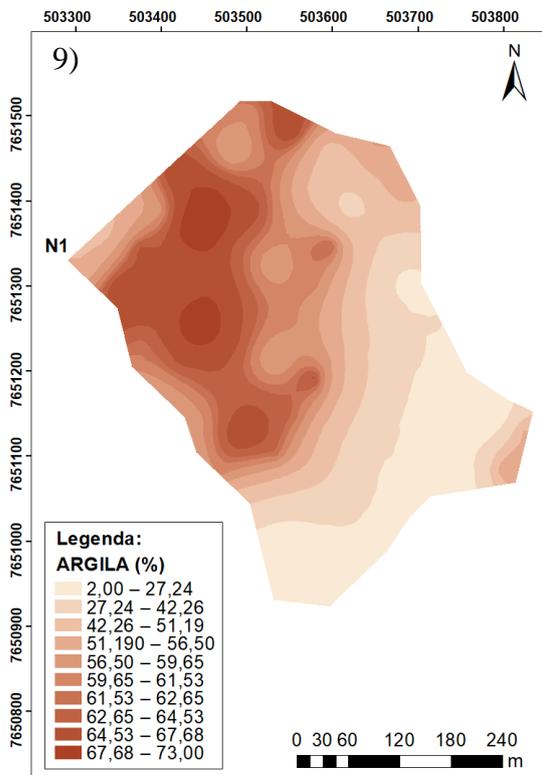
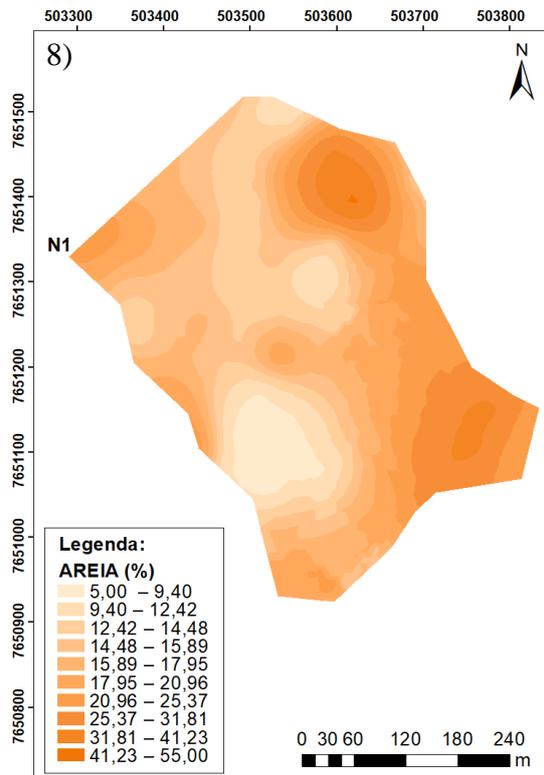
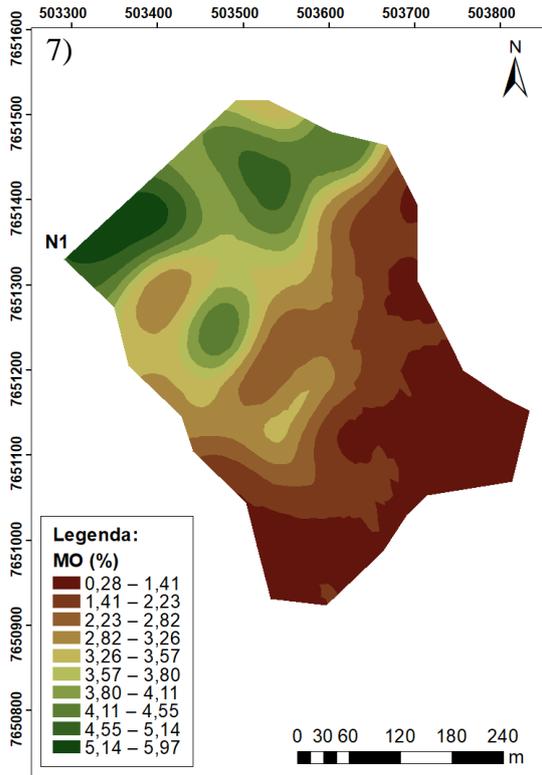
Nas Figuras 7.6 e 8.6 estão dispostos os mapas da distribuição espacial da porosidade drenável ( $\mu$ ) para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, nos quais se verificam os maiores valores, sobretudo, em áreas com maiores teores de areia. A predominância destas partículas maiores

instaura áreas mais favoráveis ao movimento de água no solo, em decorrência da maior presença de macroporos (REICHARDT; TIMM, 2012). Além disso, solos com altos teores de areia tendem a possuir baixos valores de umidade na capacidade de campo (ANDRADE; STONE, 2011; OTTONI FILHO et al., 2014), variável que compõe o cálculo da porosidade drenável.

Figura 7 – Distribuição espacial dos atributos  $K_0$  sem transformação (1) e com transformação logarítmica (2),  $D_s$  (3),  $D_p$  (4), VTP (5),  $\mu$  (6), MO (7), Areia (8), Argila (9) e Silte (10), para a camada 0 – 20 cm.

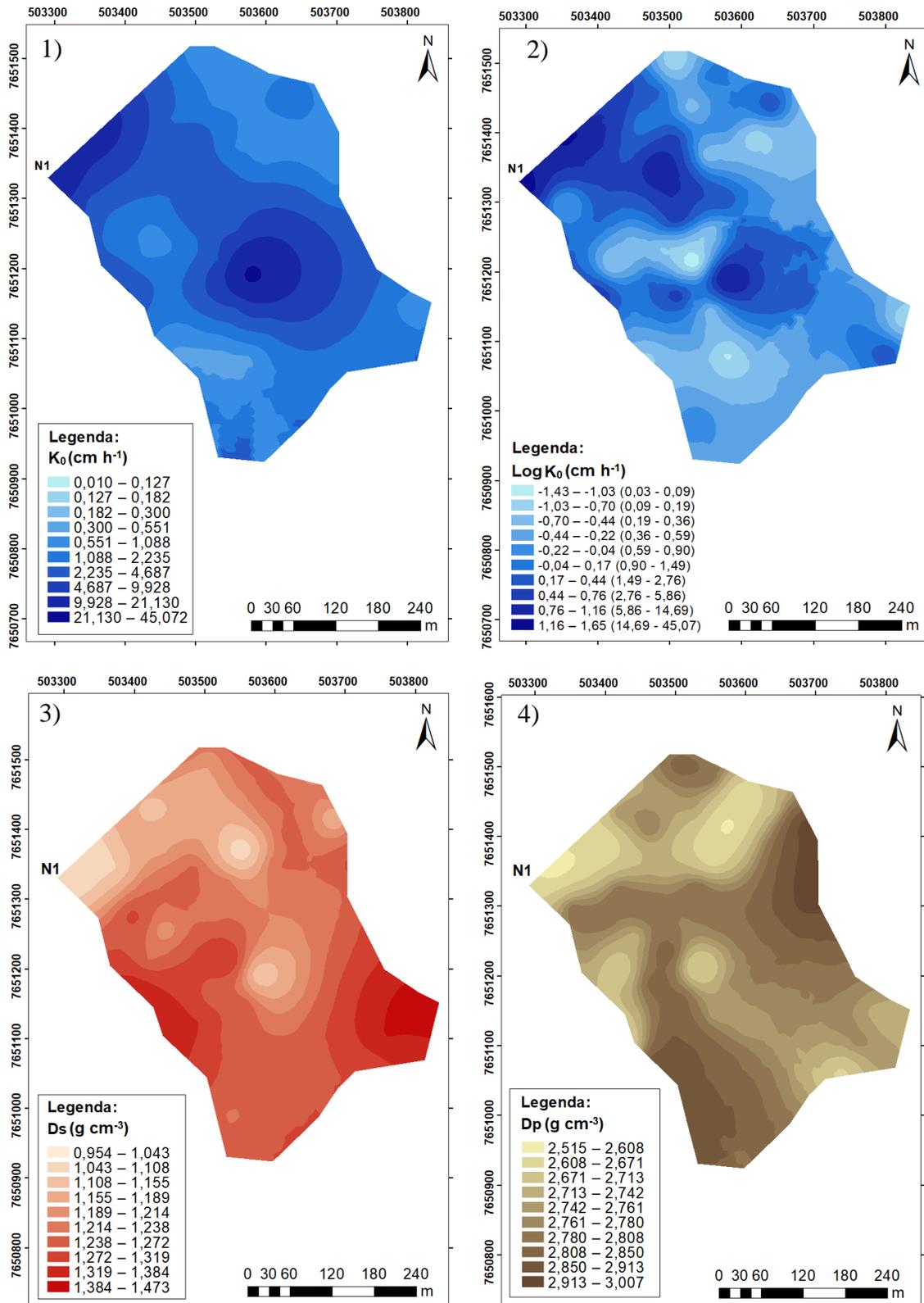


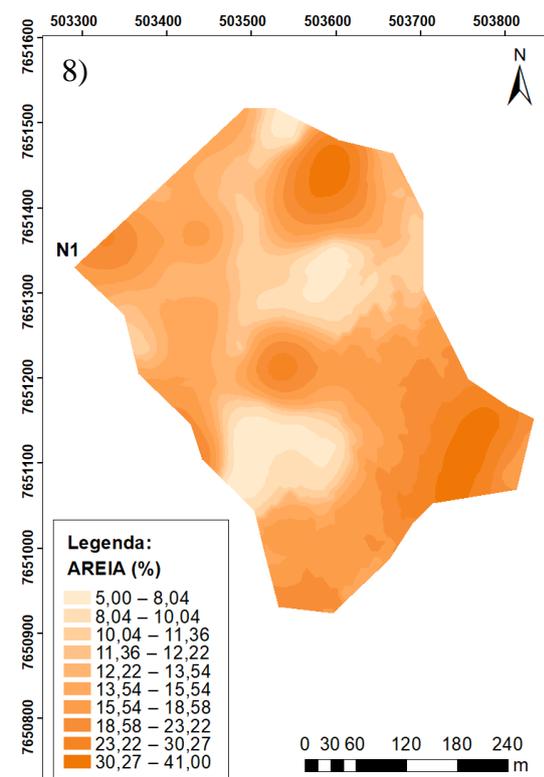
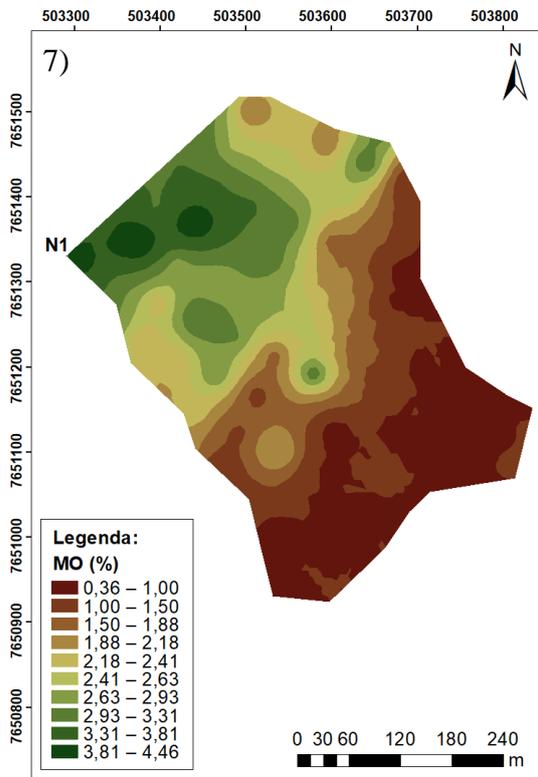
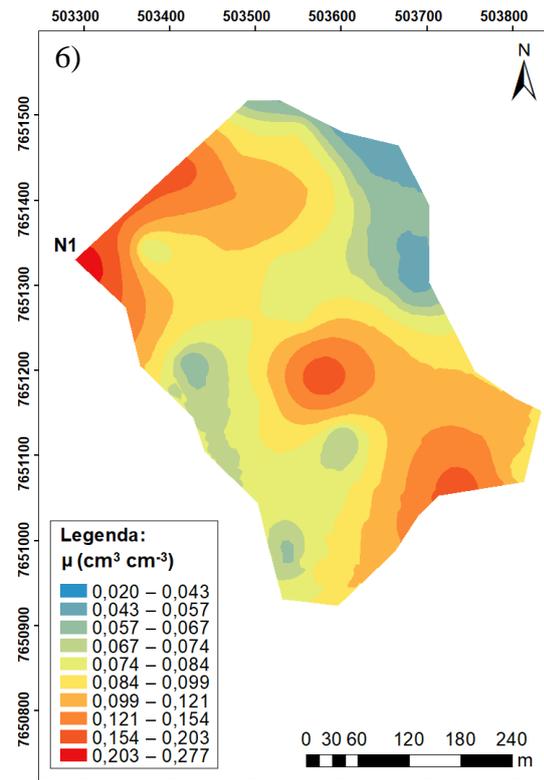
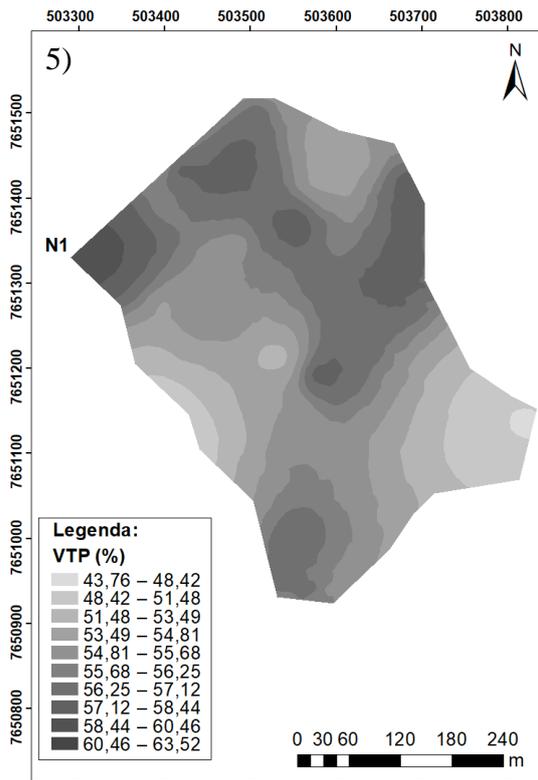


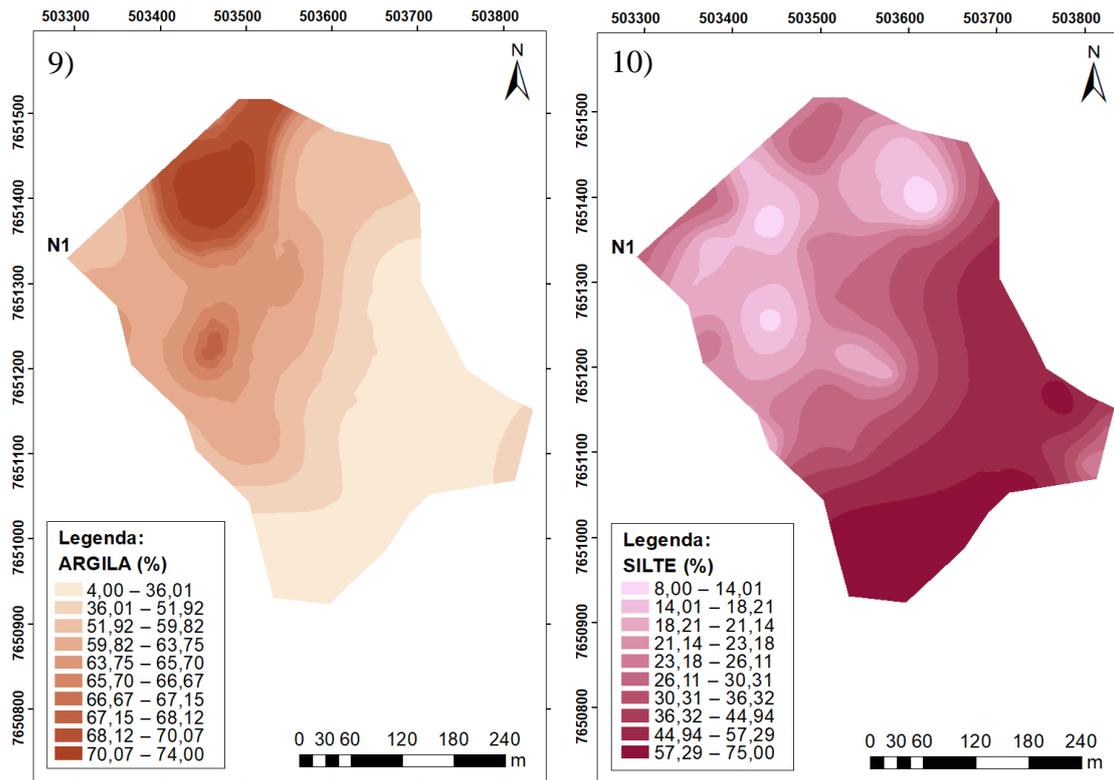


Fonte: Da autora (2022).

Figura 8 - Distribuição espacial dos atributos  $K_0$  sem transformação (1) e com transformação logarítmica (2),  $D_s$  (3),  $D_p$  (4), VTP (5),  $\mu$  (6), MO (7), Areia (8), Argila (9) e Silte (10), para a camada 20 - 40 cm.







Fonte: Da autora (2022).

#### 4. CONCLUSÃO

Para a camada 0 – 20 cm, os atributos  $D_s$ ,  $D_p$  e VTP foram classificados como de baixa variabilidade e  $\mu$ , MO, areia, argila e silte como de média variabilidade. Para a camada 20 – 40 cm, os resultados foram similares, exceto para  $\mu$  que apresentou alta variabilidade. A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) apresentou alta variabilidade para ambas as camadas.

Todos os atributos físico-hídricos analisados apresentaram estrutura de dependência espacial. A partir da análise do GD, as classificações variaram entre moderada e forte. Nenhuma variável apresentou fraca dependência espacial. Dentre os três modelos testados, o exponencial foi considerado como o melhor modelo para a maioria dos atributos de ambas as camadas.

Visando a manutenção da produção de água da nascente, os produtos gerados neste trabalho contribuíram para a identificação, no tocante aos fatores relacionados ao solo, de áreas com condições favoráveis à recarga de água, que devem ser consideradas prioritárias para conservação. Destacam-se as regiões mais baixas, ao entorno da nascente, a porção central da área cultivada e a região mais alta, situada a leste, que possuem altos valores de  $K_0$ , VTP,  $\mu$ , teor de areia e MO.

Quanto aos locais mais críticos, destacam-se os mais próximos às áreas construídas, que apresentam, simultaneamente, menores valores de  $K_0$ , VTP e MO e altos valores de  $D_s$  e teor de silte. Tal fato, associado parte ao asfaltamento e parte à atual exposição do solo nessas áreas, pode comprometer as condições de infiltração e recarga de água, sendo recomendada a implementação de práticas conservacionistas mecânicas e vegetativas ao manejo do solo visando a melhora de sua qualidade.

## REFERÊNCIAS

ADUGNA, A.; ABEGAAZ, A. Effects of soil depth on the dynamics of selected soil properties among the highlands resources of Northeast Wollega, Ethiopia: are these sign of degradation? **Solid Earth Discussions**, v. 7, n. 3, p. 2011–2035, 2015.

ALASKA SATELLITE FACILITY. **Vertex**. Disponível em: <<https://search.asf.alaska.edu/#/>>.

ALMEIDA, K. S. S. A. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo Distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 259–274, 2017.

ALMEIDA, W. S. et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. June 2017, p. 130–138, 2018.

ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1745–1758, 2011.

ALVARENGA, C. C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSra) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1608–1619, 2012.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, P. F. S. et al. Variabilidade espacial e análise multivariada dos atributos físicos do solo em uma microbacia do Rio Pandeiros. **Geo UERJ**, n. 39, 2021.

AMARAL, P. H. M. DO et al. Caracterização granulométrica do sedimento de nascentes tropicais em áreas plantadas com eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1075–1084, 2020.

AMARO FILHO, J. et al. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 415–422, 2007.

ANDRADE, D. C.; REIS, T. E. DA S.; REIS, L. C. Conflito de uso do solo em área de recarga do Aquífero Guarani na bacia do médio rio das cinzas. **Geociências**, v. 34, n. 1, p. 69–76, 2015.

ANDRADE, A. R. S. DE et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 2, p. 322–329, 2005.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado Estimation of moisture at field capacity in soils under Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111–116, 2011.

ANDRIOTTI, J. L. . **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003.

ARAÚJO, D. C. DO. S. et al. Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 38–44, 2018.

ASKARI, M. S.; HOLDEN, N. M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. **Geoderma**, v. 230–231, p. 131–142, 2014.

BATISTA, P. H. D. et al. Spatial variability of soil physical-hydric attributes under bovine trampling in Agreste of Pernambuco state, Brazil. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 41, n. 1, p. 1–11, 2019.

BAUM, C. A.; MANCUSO, M. A.; FRITZEN, R. R. Aplicação do método WTF no estudo da variabilidade da recarga em aquífero urbano. **Geociências**, v. 37, n. 1, p. 85–98, 2018.

BONAMIGO, A. et al. Changes in permanent preservation areas in rural properties of the Santa Catarina state southern plateau according to the laws No. 4,771 and 12,651. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, 2017.

BONELL, M. et al. The impact of forest use and reforestation on soil hydraulic conductivity in the Western Ghats of India: Implications for surface and sub-surface hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 47–62, 2010.

BRAKENSIEK, D. L.; ENGLEMAN, R. L.; RAWLS, W. J. Variation Within Texture Classes of Soil Water Parameters. **Paper - American Society of Agricultural Engineers**, n. V, p. 335–339, 1980.

BRAUMAN, K. A.; FREYBERG, D. L.; DAILY, G. C. Land cover effects on groundwater recharge in the tropics: Ecohydrologic mechanisms. **Ecohydrology**, v. 5, n. 4, p. 435–444, 2012.

BRITO FILHO, E. G. et al. Variabilidade Espacial Da Textura Do Solo Em Área De Terra Preta Arqueológica Sob Diferentes Usos Na Região Sul Do Amazonas. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n. 1, p. 139–143, 2018.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. et al. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 2, p. 149–157, 2007.

CARMO, J. A. R. DO. **Recarga subterrânea direta e sua influência sobre a temperatura e a condutividade elétrica em microbacias do Rio Vacaí-Mirim, RS**. Dissertação

(Mestrado)—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

CARMO, L. G.; FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Áreas De Preservação Permanente No Entorno De Nascentes: Conflitos, Lacunas E Alternativas Da Legislação Ambiental Brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 34, n. 2, p. 275–293, 2014.

CARVALHO, J. R. P. DE; SILVEIRA, P. M. DA; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1151–1159, 2002.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 695–703, 2003.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley and Sons, 1993.

CURI, N. et al. **Mapeamento de solos, aptidão agrícola e taxa de adequação do uso das terras do município de Lavras (MG)**. Lavras: Editora UFLA, 2020.

DARIM, E. P. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em área irrigada**. Dissertação (Mestrado)—Ceres: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, 2017.

DELBARI, M. et al. Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 3, 2019.

DELBARI, M.; AFRASIAB, P.; LOISKANDL, W. Geostatistical analysis of soil texture fractions on the field scale. **Soil and Water Research**, v. 6, n. 4, p. 173–189, 2011.

DUTAL, H.; REIS, M. Determining the effects of land use on soil erodibility in the Mediterranean highland regions of Turkey: a case study of the Korsulu stream watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 3, 2020.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L. DA; OLIVEIRA, M. S. DE. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 242–246, 2002.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas “in situ”. **Ciência e Agrotecnologia**, p. 1607–1613, 2003.

ESRI. **ArcMap 10.2**. Redlands, USA: [s.n.].

ESRI. **Performing cross-validation and validation**. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/performing-cross-validation-and-validation.htm#GUID-7460E552-DAF6-4D04-8247-8B5866D7B06D>>. Acesso em: 28 dez. 2021.

ESTATCAMP. **Portal Action**. Disponível em: <<https://www.estatcamp.com/>>.

FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Espacialização e classificação de topos como zonas preferenciais de recarga natural de aquíferos: o caso de Belo Horizonte – MG. **Geografias**, v. 05, n. 1, p. 67–82, 2009.

FERREIRA, M. J. et al. Avaliação da regeneração natural em nascentes perturbadas no município de Lavras, MG. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 109–129, 2009.

FERREIRA, M. M. et al. **Física do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2003.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: **Van Lier, Q. J. Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1–28.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1979.

FRISBEE, M. D. et al. Effect of source integration on the geochemical fluxes from springs. **Applied Geochemistry**, v. 28, p. 32–54, 2013.

FUENTES-GUEVARA, M. D. et al. Examining the land leveling impacts on the physical quality of lowland soils in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 215, n. August 2021, p. 0–3, 2022.

FURTUNATO, O. et al. Variabilidade Espacial de Atributos Físico-hídricos de Solos em uma Bacia Experimental no Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 135–147, 2013.

GELAIN, E. et al. Variabilidade Espacial E Correlação Dos Atributos Do Solo Com Produtividade Do Milho E Da Soja. **Nativa**, v. 9, n. 5, p. 536–543, 2021.

GLEASON, C. L. et al. Hydrogeology of desert springs in the Panamint Range, California, USA: Identifying the sources and amount of recharge that support spring flow. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 3, p. 730–748, 2020.

GOMES, E. C. F. et al. A nova legislação ambiental brasileira e seus efeitos sobre a reestruturação de nascentes e remanescentes florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG**. Dissertação (Mestrado)—Lavras: UFLA, 2005.

GOMES, N. M. et al. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 435–443, 2007a.

GOMES, N. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 427–435, 2007b.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Correlação espacial entre retenção de água e

textura do solo, para fins de manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 3, p. 296–303, 2002.

GONÇALVES, A. D. M. DE A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, 2013.

GRAEPIN, C. et al. Estimativa de recarga de aquífero e enquadramento dos corpos de água em sub-bacias parcialmente florestadas no noroeste do Rio Grande do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 39, n. 3, p. 25–31, 2016.

GUIMARÃES, W. D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciencia Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247–255, 2016.

HÜMANN, M. et al. Identification of runoff processes - The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. **Journal of Hydrology**, v. 409, n. 3–4, p. 637–649, 2011.

HURTADO, A. L. B. **Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial**. Tese (Doutorado)—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2004.

IQBAL, J. et al. Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 4, p. 1338–1350, 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989.

JULIÀ, M. F. et al. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, v. 123, n. 3–4, p. 257–277, 2004.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande - MG**. Dissertação (Mestrado)—Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 914–922, 2008.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. New York: John Wiley and Sons, 1991.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, 1997.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KLINKE NETO, G.; OLIVEIRA, A. H.; PEREIRA, S. Y. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em uma sub-bacia às margens do Rio Mogi Guaçu (SP). **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 381–394, 2017.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. **Elements of soil physics**. **Developments**

in **Soil Science**. Amsterdam: Elsevier, 1983.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D. R. **Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geocology, hydrology, geomorphology and other related disciplines**. Reiskirchen, Germany: Catena Verlag GMBH, 1994.

LAMICHHANE, S.; SHAKYA, N. M. Alteration of groundwater recharge areas due to land use/cover change in Kathmandu Valley, Nepal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 26, n. July 2019, p. 100635, 2019.

LAVRAS. **Lei complementar nº 419, de 17 de dezembro de 2020.**, 2020. Disponível em: <<https://sapl.lavras.mg.leg.br/norma/7679>>

LE MAITRE, D. C.; SCOTT, D. F.; COLVIN, C. A review of information on interactions between vegetation and groundwater. **Water SA**, v. 25, n. 2, p. 137–152, 1999.

LEAL, M. S. et al. Caracterização hidroambiental de nascentes. **Revista Ambiente e Água**, v. 12, n. 1, p. 445–458, 2017.

LEÃO, M. G. A. et al. Variabilidade espacial da textura de um latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 121–131, 2010.

LEITE, E. P. F.; FIGUEIREDO, M. A.; SILVA, Z. R. Avaliação Da Evapotranspiração Real Do Solo Em Áreas Desmatadas E Não Desmatadas Na Chapada Do Araripe No Município De Santana Do Cariri - Ceará. **Revista Caatinga**, v. 7, n. 1, p. 256–265, 1990.

LEITE, L. F. C. et al. Variabilidade espacial das frações da matéria orgânica do solo em área degradada sob recuperação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 394–401, 2015.

LE MOS FILHO, L. C. DE A. et al. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 2, p. 193–202, 2008.

LIMA, G. C. et al. Estimativa do potencial de recarga na sub-bacia das Posses, Extrema (MG), em função dos atributos fisiográficos, pedológicos e topográficos. **Geociências**, v. 32, n. 1, p. 51–62, 2013.

MACEDO, J. R.; OTONNI FILHO, T. B.; MENEGUEW, N. D. A. Variabilidade de características físicas, químicas e físico-hídricas em solo podzólico vermelho-amarelo de Deropédica, RJ. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 12, p. 2043–2052, 1998.

MANNING, A. H. et al. Evolution of groundwater age in a mountain watershed over a period of thirteen years. **Journal of Hydrology**, v. 460–461, p. 13–28, 2012.

MARÍN-CASTRO, B. E. et al. Spatial distribution of hydraulic conductivity in soils of secondary tropical montane cloud forests and shade coffee agroecosystems. **Geoderma**, v. 283, p. 57–67, 2016.

MARTINS, E. L. et al. Efeitos da variabilidade espacial da densidade do solo e fração grosseira na estimativa dos estoques de nutrientes em solo degradado. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 29434–29449, 2019.

- MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Paris: Editions Technip, 1962.
- MELLO, C. R. et al. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1319–1324, 2002.
- MELLO, C. R. DE et al. Modelagem de atributos físico-hídricos do solo numa bacia hidrográfica da região do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 845–852, 2007.
- MELLO, J. M. **Geostatística aplicada ao inventário florestal**. Tese (Doutorado)—Piracicaba: ESALQ, 2004.
- MELO FILHO, J. F. DE et al. Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de latossolo amarelo coeso do tabuleiros costeiros da Bahia. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 2, p. 199–205, 2006.
- MELO NETO, J. O.; CHAGAS, R. M.; JÚNIOR, A. V. M. Delimitação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Siriri, Sergipe. **Scientia Plena**, v. 9, n. 7, p. 1–10, 2013.
- MENDONÇA, L. A. R. et al. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 89–98, 2009.
- MENEZES, M. D. et al. Hydrological dynamics of two springs, associated to land use, soil characteristics and physical-hydrological attributes at lavrinha creek watershed - Mantiqueira Mountains (MG). **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 37, n. 82, p. 175–184, 2009.
- MESQUITA, M. DA G. B. DE F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963–969, 2004.
- MONTEIRO, A.; MENDES, S. Variabilidade espacial da textura de dois solos do Deserto Salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 2, p. 19–27, 2008.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 30–37, 2006.
- MORITA, A. K. M.; WENDLAND, E. C. Caracterização geoquímica de área impactada por depósito de resíduos desativado em zona de recarga do aquífero Guarani. **Geociências**, v. 38, n. 4, p. 1017–1028, 2019.
- NERY, A. R. et al. Infiltração da água nos solos cultivados com palma forrageira e pastagem no IFCE Campus Crato. **Acta Kariri - Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 2, n. 1, p. 56–61, 2017.
- OLIVEIRA, A. S. et al. Stream flow regime of springs in the Mantiqueira Mountain range region, Minas Gerais State. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 343–349, 2014.
- OLIVEIRA, A. S.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R. Dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes em dois ambientes na Região Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 59–67, 2020.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56–69, 2014.

OTTONI FILHO, T. B. et al. Revisiting Field Capacity (Fc): Variation of Definition of Fc and Its Estimation From. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 1750–1764, 2014.

OWUOR, S. O. et al. Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. **Ecological Processes**, v. 5, n. 1, 2016.

PELISSARI, A. L. **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* L.f. na região sul do estado de Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado)—[s.l.] Universidade Federal de Mato Grosso, 2012.

PINTO, L. C. et al. Land-use effect on hydropedology in a mountainous region of Southeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 4, p. 413–427, 2017.

PINTO, L. V. A.; ROMA, T. N.; BALIEIRO, K. R. C. Avaliação qualitativa da água de nascentes com diferentes usos do solo em seu entorno. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 495–505, 2012.

PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. **Progress in Physical Geography**, v. 35, n. 4, p. 465–492, 2011.

PRICE, K.; JACKSON, C. R.; PARKER, A. J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. **Journal of Hydrology**, v. 383, n. 3–4, p. 256–268, 2010.

PRUSKI, F. F. et al. Infiltração da água num latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 1, p. 77–84, 1997.

PURCINO, M. D. **Espacialização dos parâmetros físico-hídricos do solo e associação com a vulnerabilidade à erosão hídrica em dois ambientes antropizados do Ribeirão do Cipó**. Dissertação (Mestrado)—Poços de Caldas: Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas, 2017.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. Tese (Doutorado)—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1995.

QUEIROZ, J. E.; CRUCIANI, D. E.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial da porosidade drenável de um solo de várzea, no município de Piracicaba, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 135–139, 1999.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 211–216, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

REICHERT, J. M. et al. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237–238, p. 282–295, 2017.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Lavras: Editora UFLA,

2014.

RIBEIRO, L. DA S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1699–1702, 2016.

RIBON, A. A. et al. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração em pomar de citros análise exploratória. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 60, n. 4, p. 335–342, 2017.

RIZZARDI, A. S. et al. Atributos físicos e fluxo de água em solos da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim – RS. **Revista Monografias Ambientais - REMOA**, v. 13, n. 5, p. 3690–3701, 2014.

ROA-GARCÍA, M. C. et al. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. **Water Resources Research**, v. 47, n. W05510, p. 1–12, 2011.

ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences**. Plainwell, Michigan, USA: Gamma Design Software, 2008.

ROCHA, R. E. et al. Variações espaciais na condutividade hidráulica do solo em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. **Revista do Instituto Geológico**, v. 40, n. 2, p. 35–51, 2019.

ROSEMARY, F. et al. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. **Catena**, v. 150, p. 53–61, 2017.

SÁ JÚNIOR, A. et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1–2, p. 1–7, 2012.

SAMPAIO, F. D. M. T. et al. Variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 30, n. 5, p. 854–861, 2010.

SANTOS, D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 16, n. 8, p. 843–848, 2012a.

SANTOS, D. P. DOS et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em vale aluvial na região de Pernambuco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2271–2282, 2018a.

SANTOS, R. C. DE V. DOS. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e implicações no escoamento superficial direto em escala de bacia hidrográfica**. Tese (Doutorado)—Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2020.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018b.

SANTOS, K. S. et al. Spatial variability of physical attributes of soil in alluvial valley of semiarid region of Pernambuco State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 828–835, 2012b.

SANTOS, M. L. et al. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.)

e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 313–321, 2006.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SANTOSA, L. W.; HARSANTI, A. Water balance analysis of springs in Banjarasri Village, Kalibawang Sub-District, Kulonprogo District. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 451, n. 1, 2020.

SCHERPINSKI, C. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 7–13, 2010.

SHAPIRO, S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality ( Complete Samples ) Published by: Biometrika Trust Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/2333709>. **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SILVA, A. F. DA et al. Simulação sequencial de atributos diagnósticos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 418–425, 2015.

SILVA JUNIOR, J. J. et al. Determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando o problema inverso do software Hydrus-1D. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 3, p. 242–251, 2013.

SIQUEIRA, T. M. et al. 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.

SOARES, M. D. R. et al. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 2, p. 125–133, 2018.

SOARES, M. F. **Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu - RS**. Dissertação (Mestrado)—Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2018.

SOUZA, Z. M. DE et al. Influência da pedofoma na variabilidade espacial de alguns atributos físico e hídricos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2004a.

SOUZA, Z. M. DE et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água no solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 128–134, 2006.

SOUZA, Z. M. DE; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 5, p. 491–499, 2004.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 699–707, 2001.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial da textura de um latossolo vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 309–319, 2004b.

UFLA. **Plano Diretor: proteção de nascentes que abastecem a UFLA está em votação na Câmara de Lavras**. Disponível em: <<https://ufla.br/noticias/institucional/14158-plano-diretor-proposta-que-preve-protecao-das-nascentes-que-abastecem-a-ufla-esta-em-votacao-na-camara-de-lavras>>. Acesso em: 30 jul. 2021.

VAN LIER, Q. DE J. **Física do Solo baseada em processos**. Piracicaba: Edição do autor, 2020.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C.; VIEIRA, N. F. **Solos: propriedades, classificação e manejo**. Brasília: MEC/ABEAS, 1988.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 1, p. 1–54, 2000.

VILAVERDE, A. L. A. **Metodologias para a delimitação de áreas preferenciais de recarga em aquíferos fraturados**. Dissertação (Mestrado)—Braga, PT: Universidade do Minho, 2016.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: **HILLEL, D. Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980.

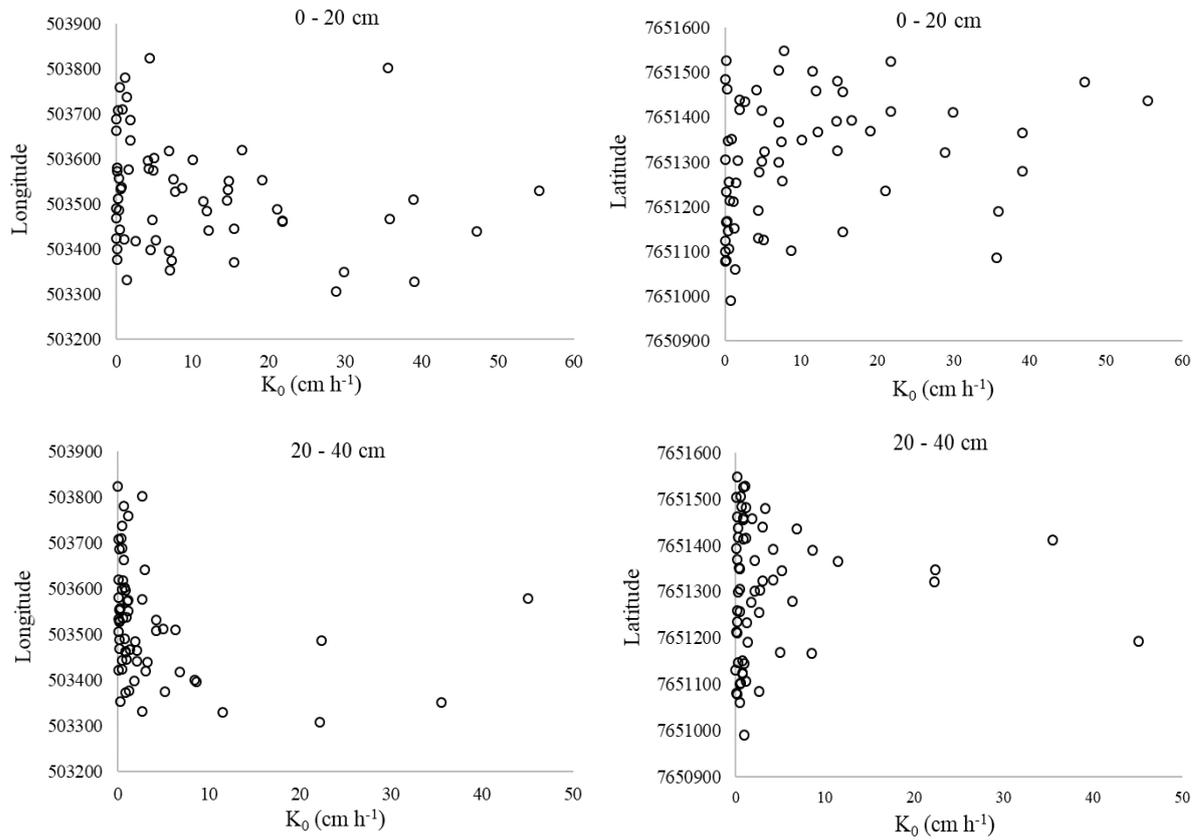
WOODBURY, A. D.; SUDICKY, E. A. The geostatistical characteristics of the Borden Aquifer. **Water Resources Research**, v. 27, n. 4, p. 533–546, 1991.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

YOUNG, F.J.; HAMMER, R. D. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy and cluster analysis. **Soil Science Society American Journal**, v. 64, p. 989–998, 2000.

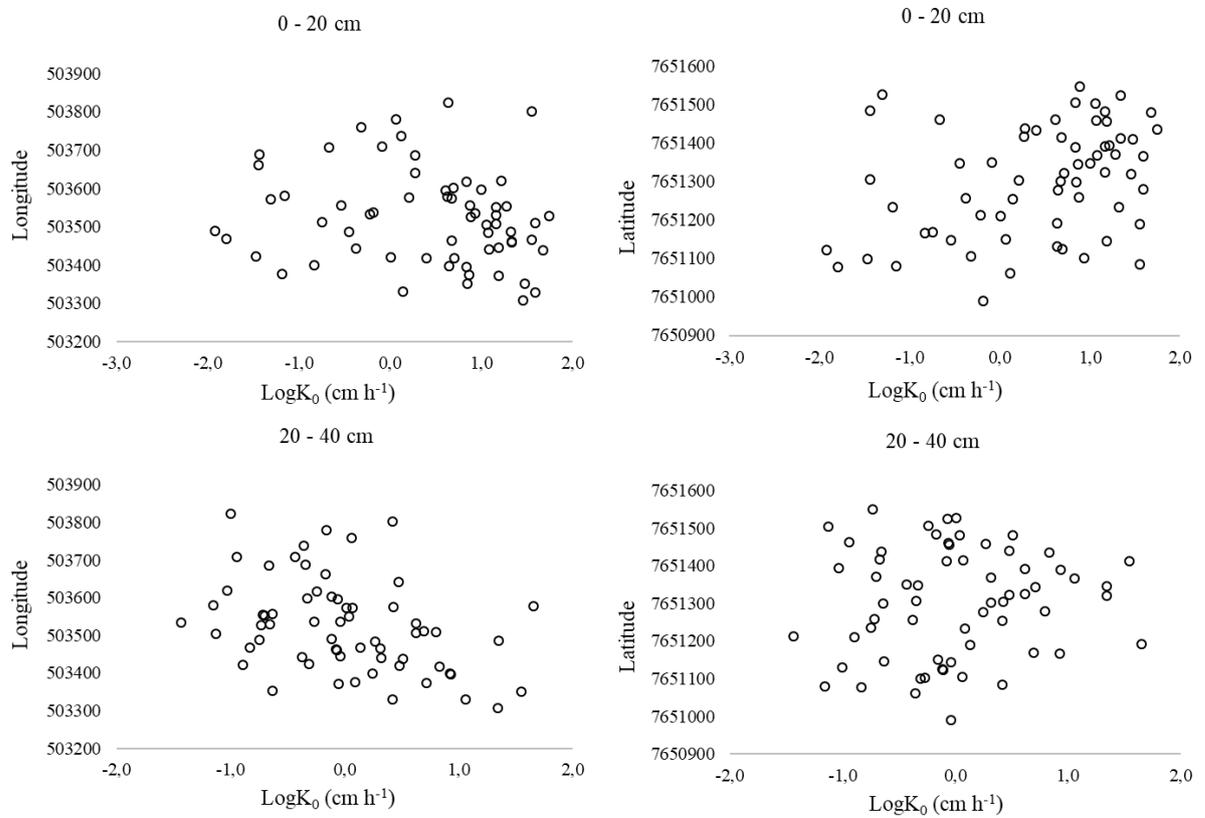
## APÊNDICE

Figura 1 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



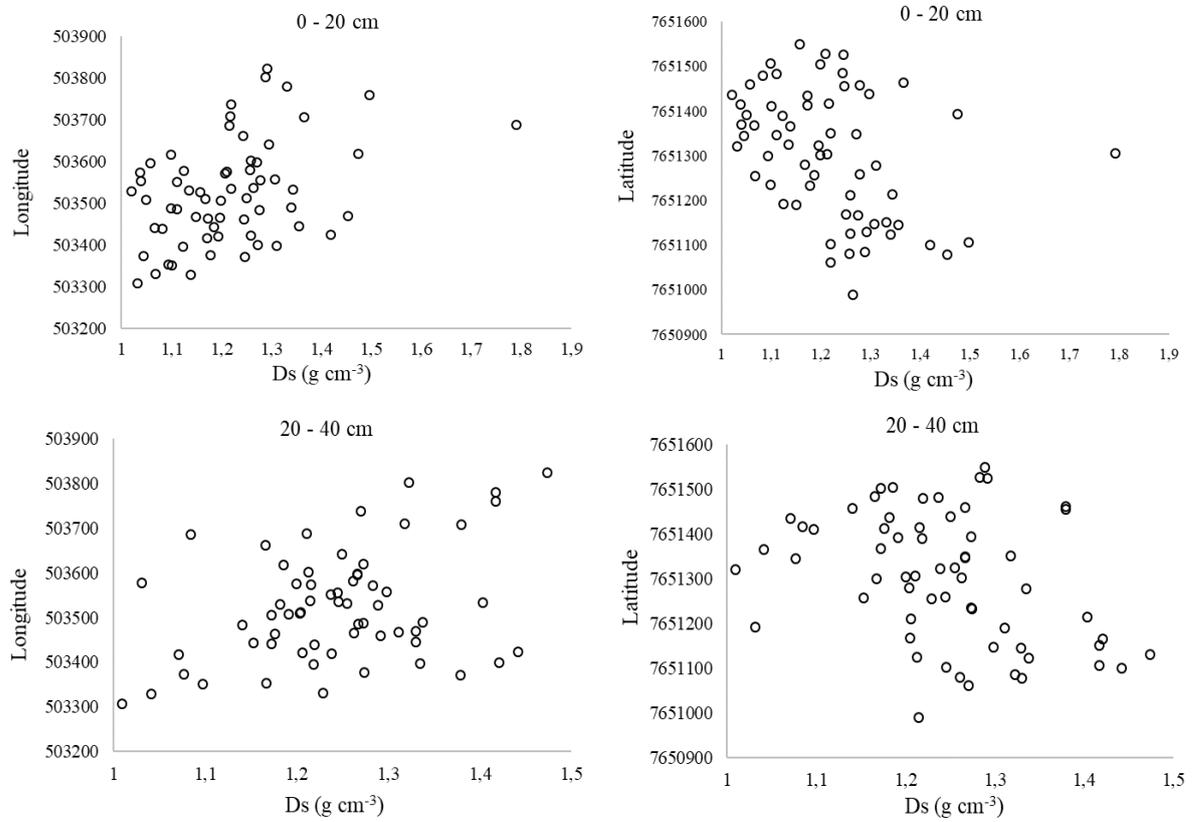
Fonte: Da autora (2022).

Figura 2 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado com transformação logarítmica ( $\text{Log}(K_0)$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



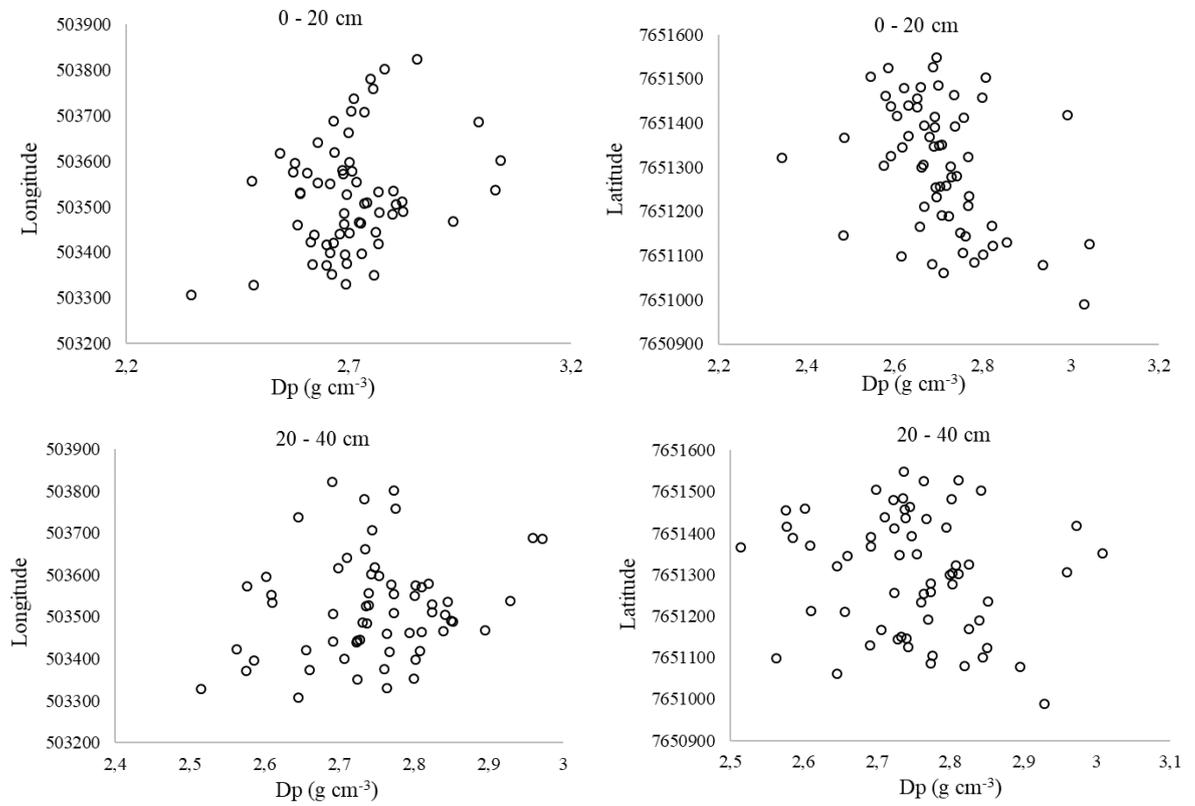
Fonte: Da autora (2022).

Figura 3 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de densidade do solo (Ds), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



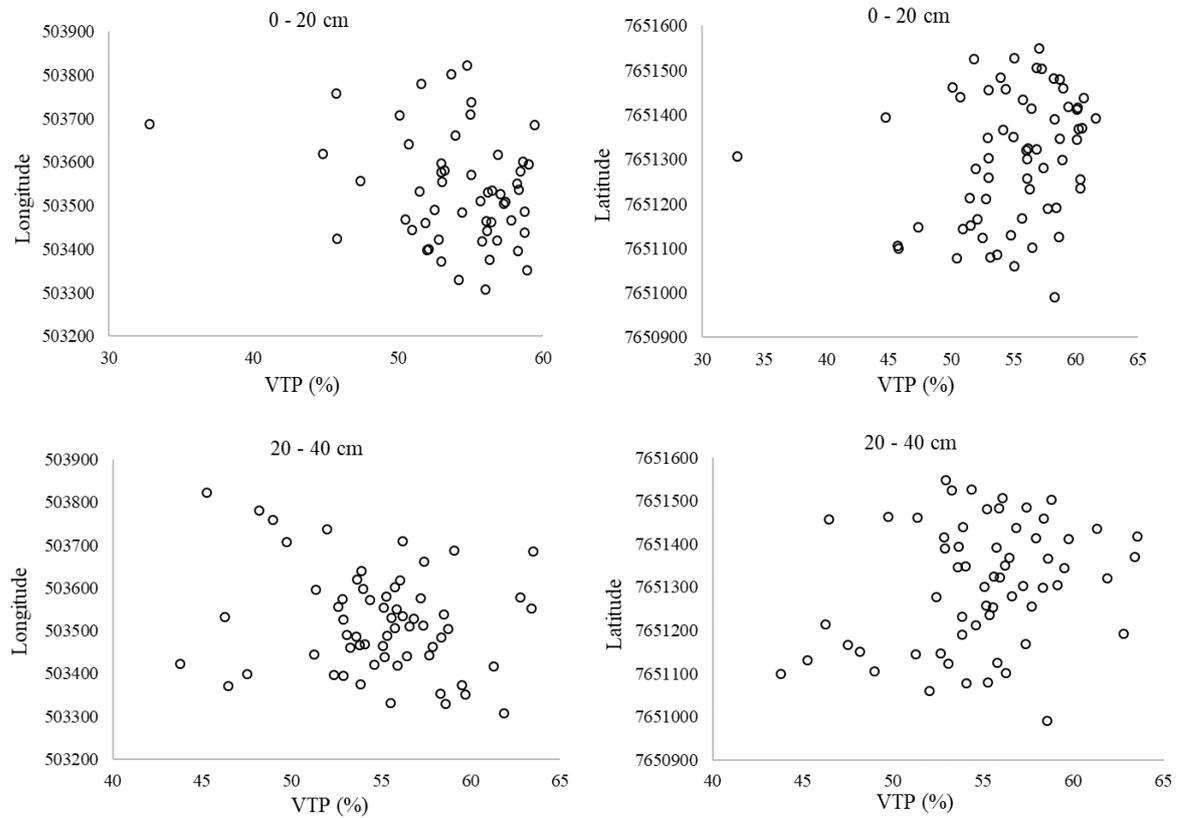
Fonte: Da autora (2022).

Figura 4 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de densidade de partículas ( $D_p$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



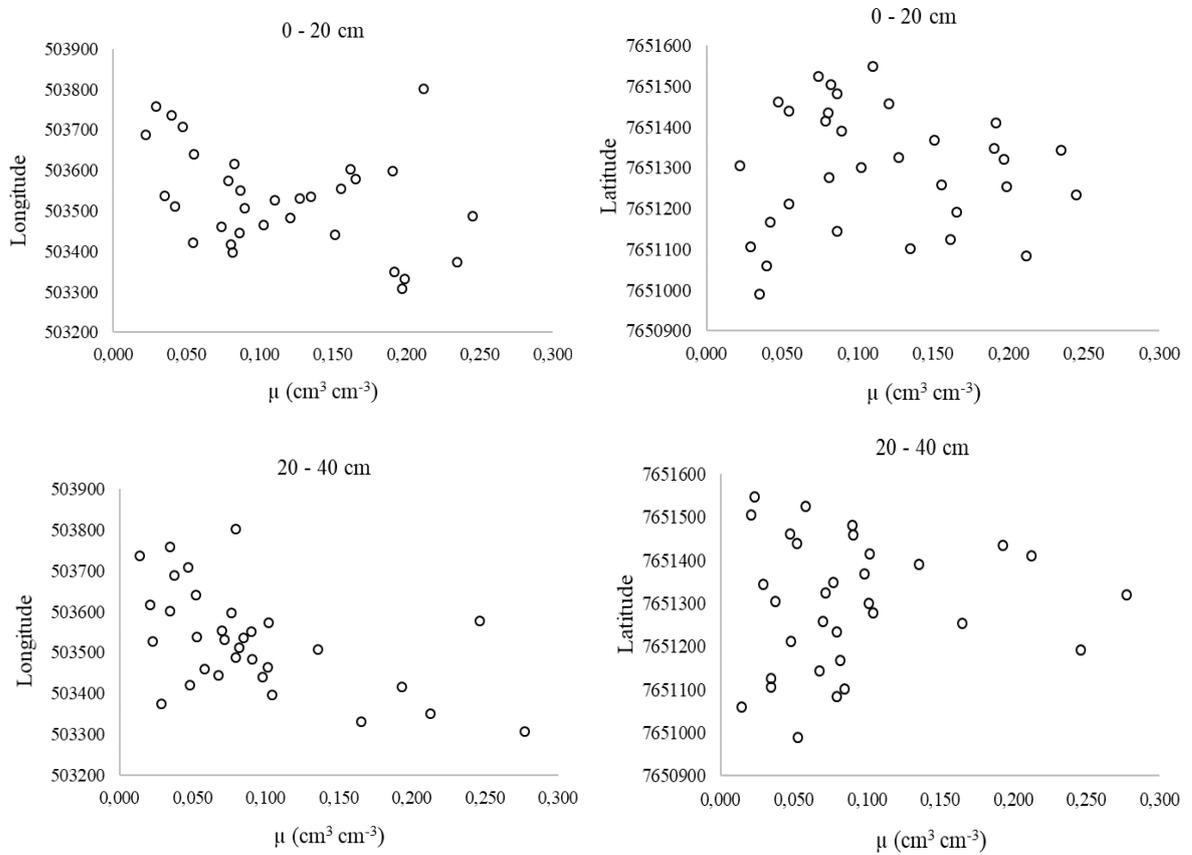
Fonte: Da autora (2022).

Figura 5 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de volume total de poros (VTP), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



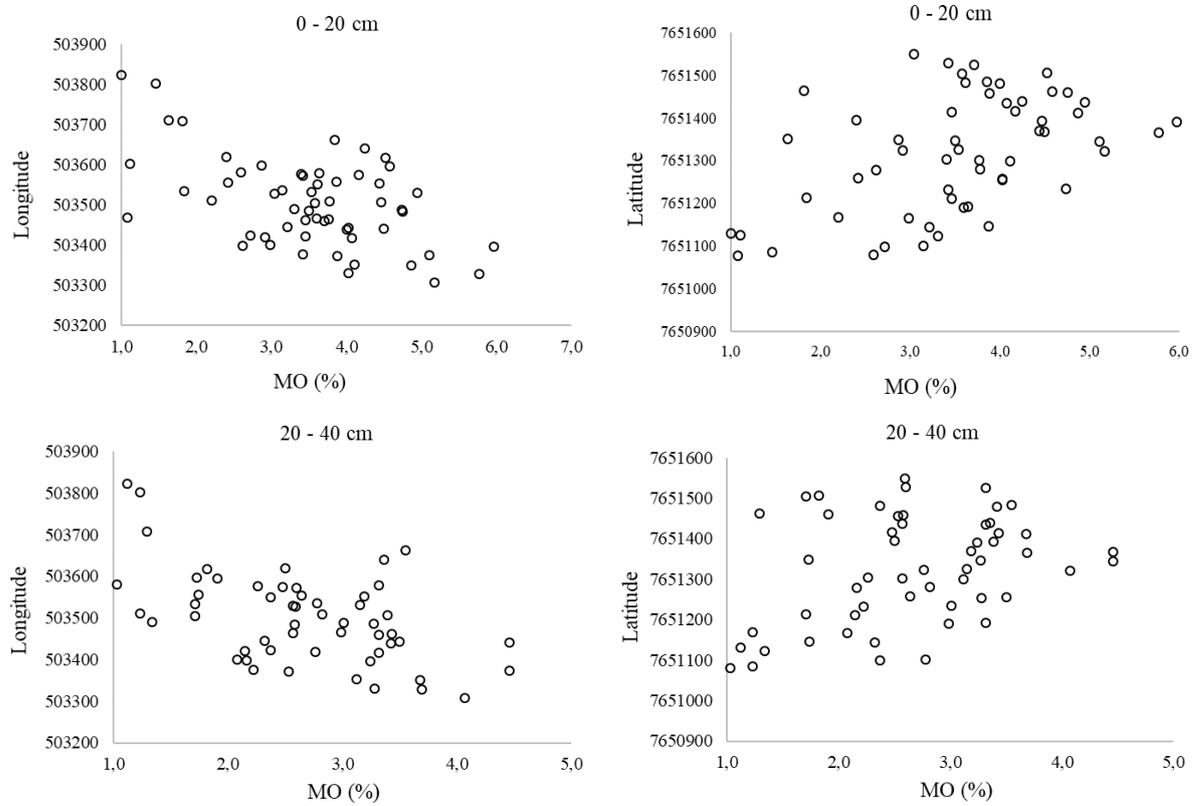
Fonte: Da autora (2022).

Figura 6 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de porosidade drenável ( $\mu$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



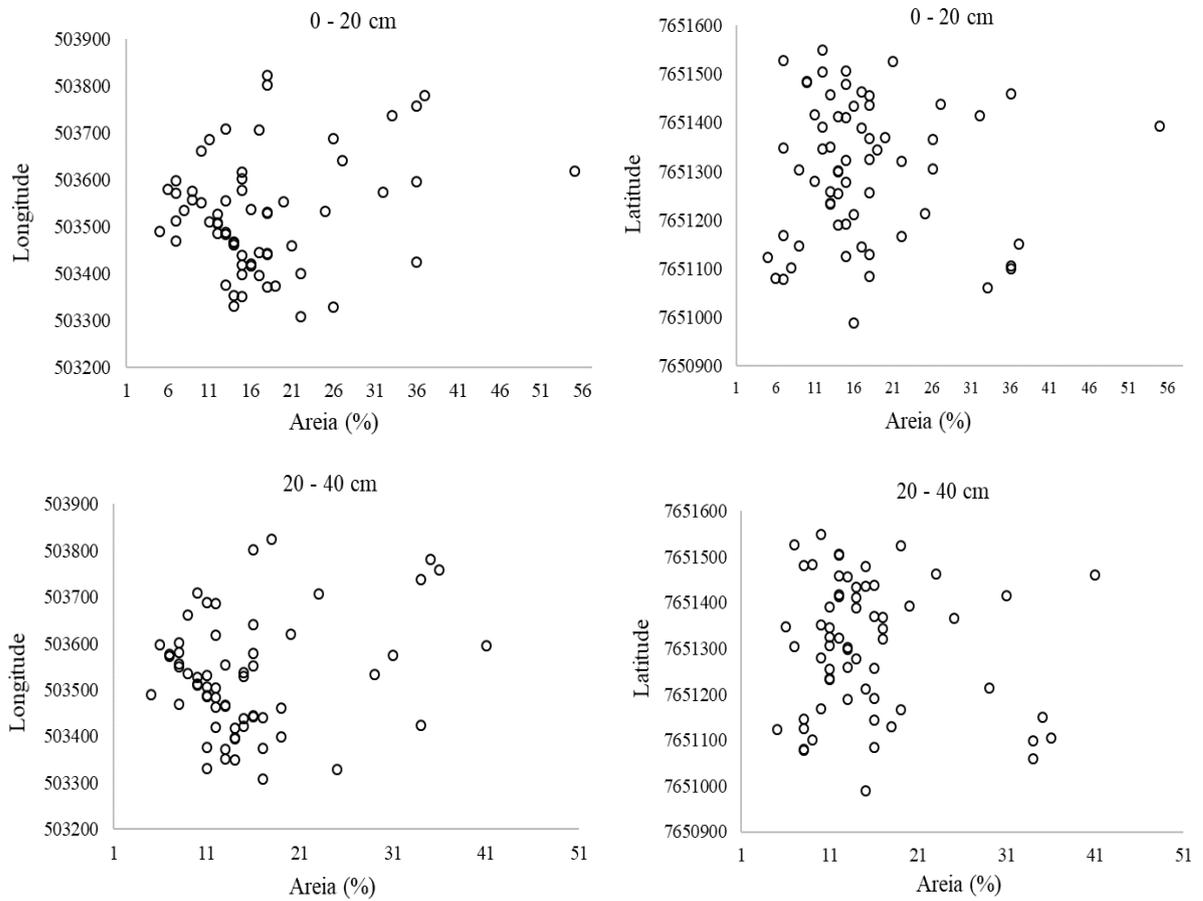
Fonte: Da autora (2022).

Figura 7 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de matéria orgânica (MO), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



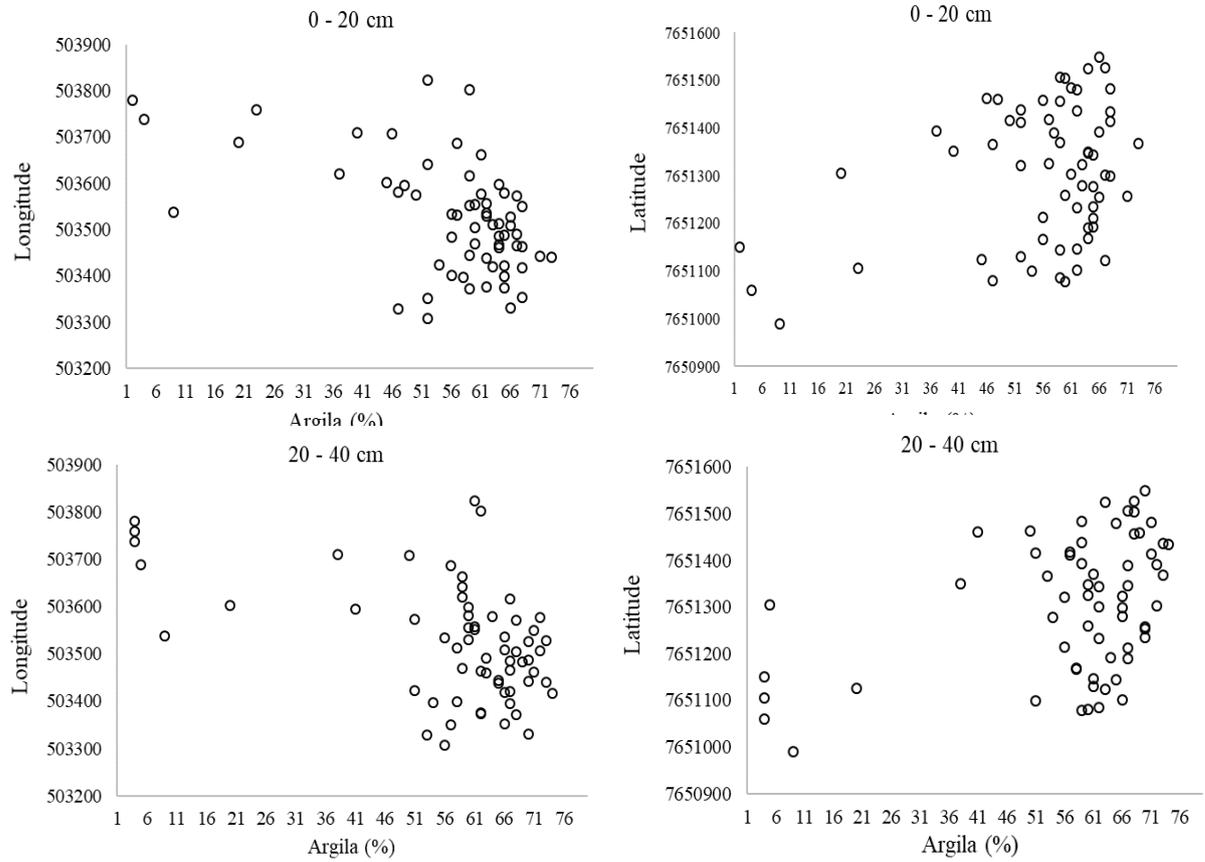
Fonte: Da autora (2022).

Figura 8 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de Areia (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



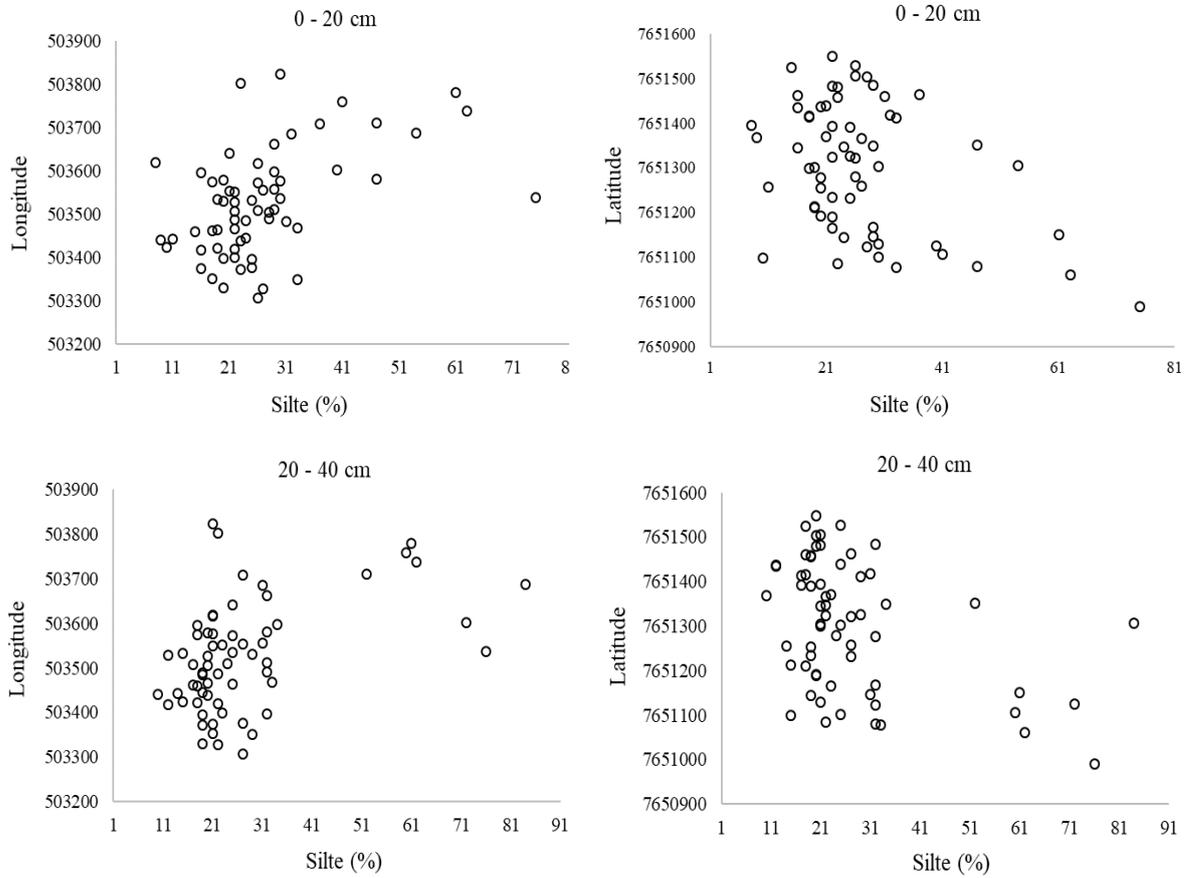
Fonte: Da autora (2022).

Figura 9 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de Argila (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



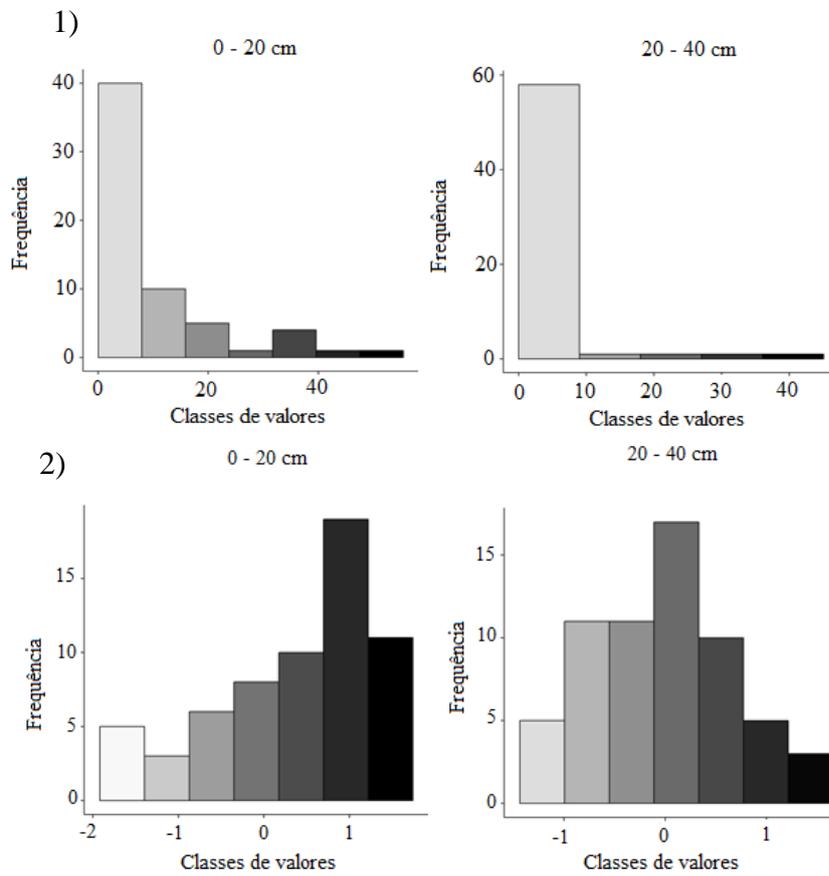
Fonte: Da autora (2022).

Figura 10 - Gráfico para verificação de tendências, em função da latitude e longitude, dos dados de Silte (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



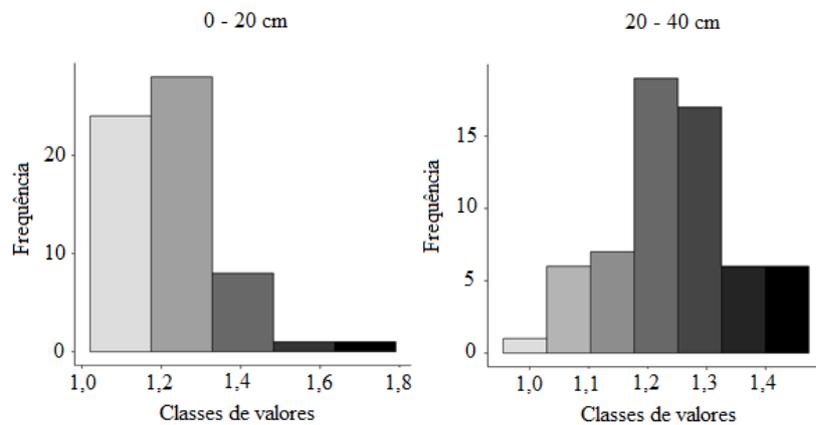
Fonte: Da autora (2022).

Figura 11 - Histograma de frequência para o atributo  $K_0$  sem transformação logarítmica (1) e com transformação logarítmica (2), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



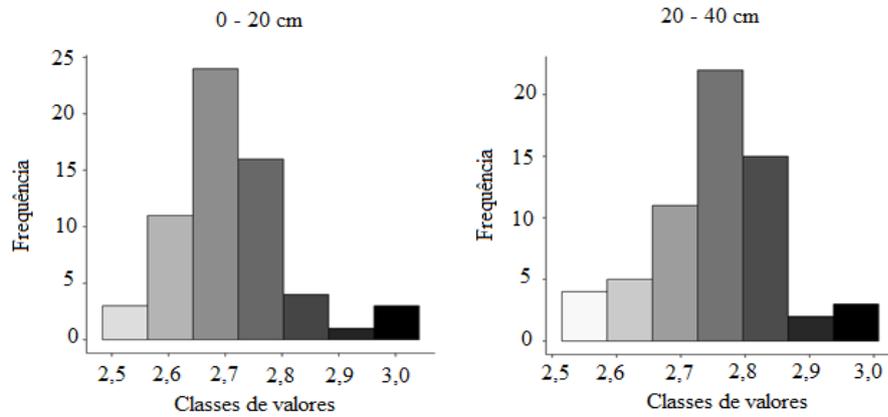
Fonte: Da autora (2022).

Figura 12 - Histograma de frequência para o atributo  $D_s$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



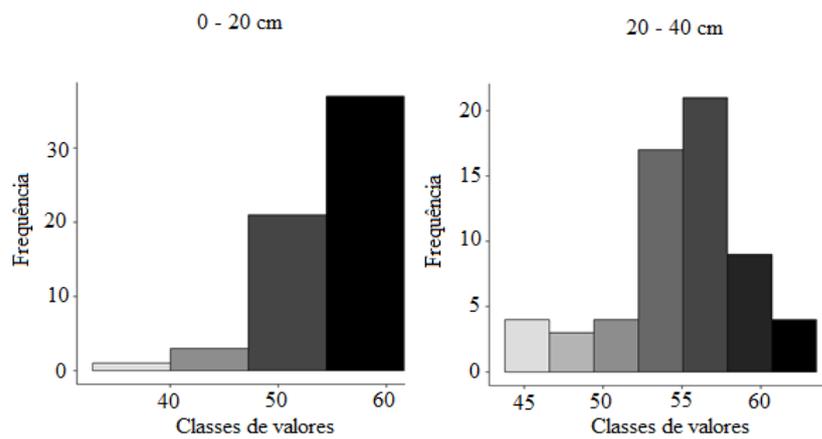
Fonte: Da autora (2022).

Figura 13 - Histograma de frequência para o atributo  $D_p$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



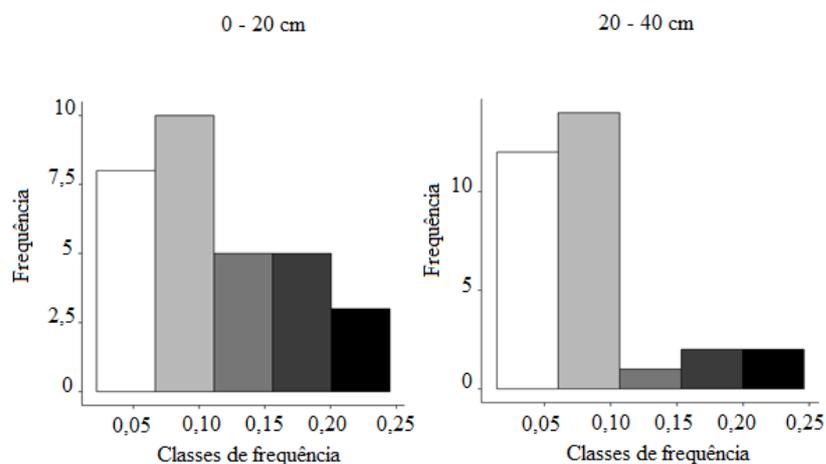
Fonte: Da autora (2022).

Figura 14 - Histograma de frequência para o atributo VTP (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



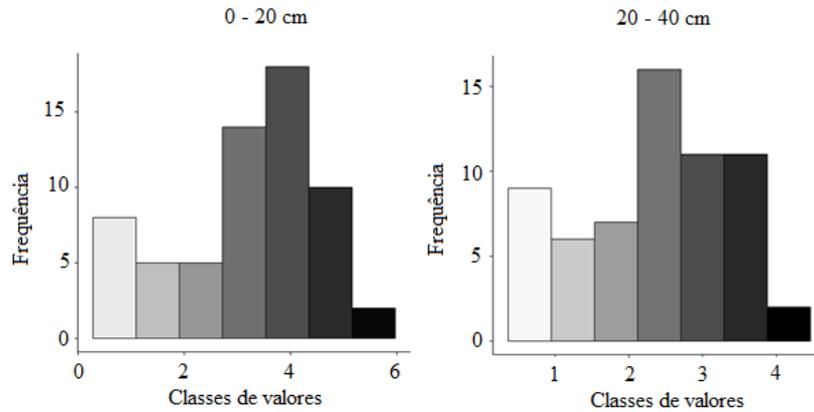
Fonte: Da autora (2022).

Figura 15 - Histograma de frequência para o atributo  $\mu$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



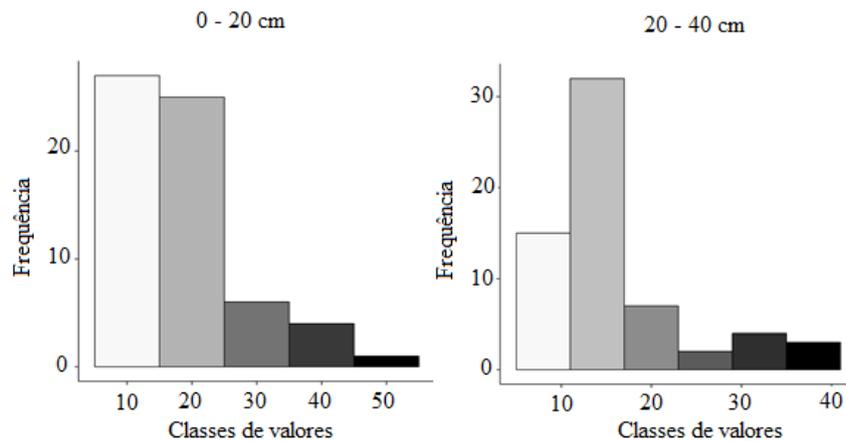
Fonte: Da autora (2022).

Figura 16 - Histograma de frequência para o atributo MO (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



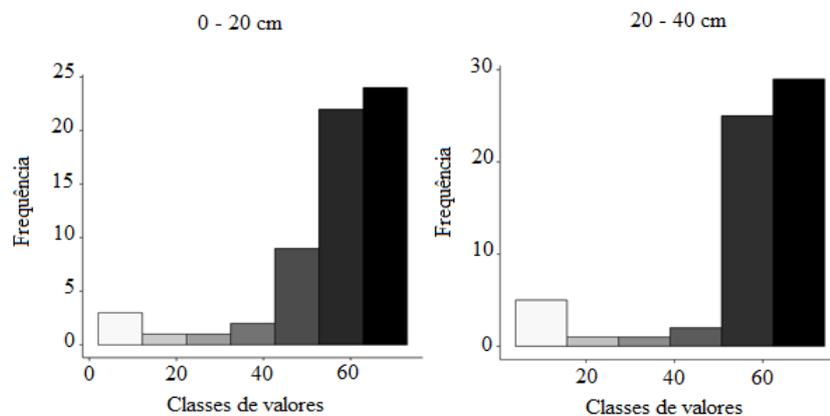
Fonte: Da autora (2022).

Figura 17 - Histograma de frequência para o atributo Areia (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



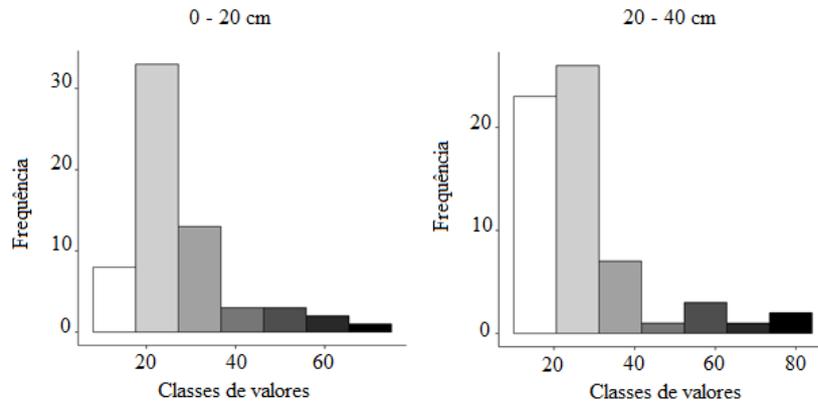
Fonte: Da autora (2022).

Figura 18 - Histograma de frequência para o atributo Argila (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.



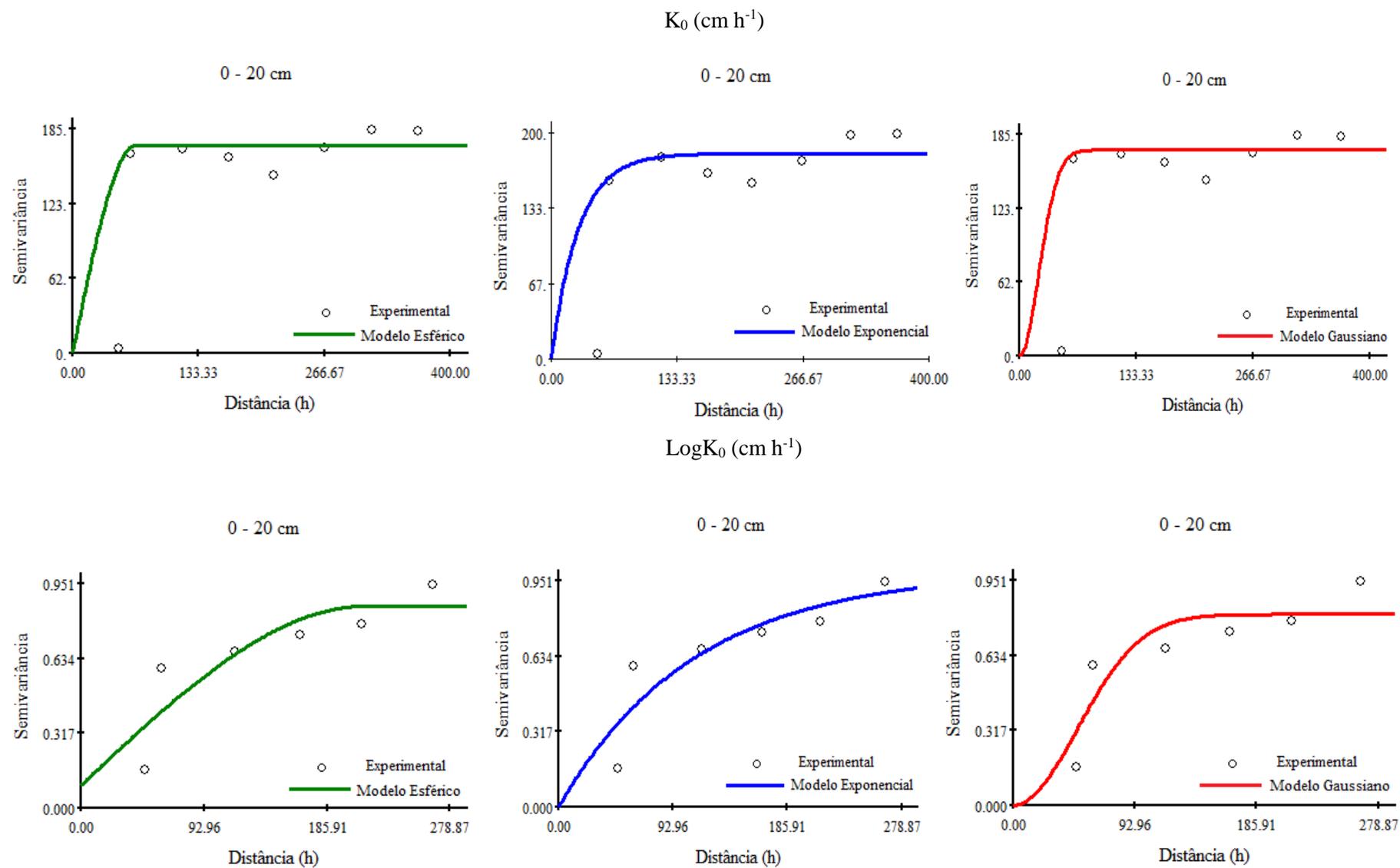
Fonte: Da autora (2022).

Figura 19 - Histograma de frequência para o atributo Silte (%), para as camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.

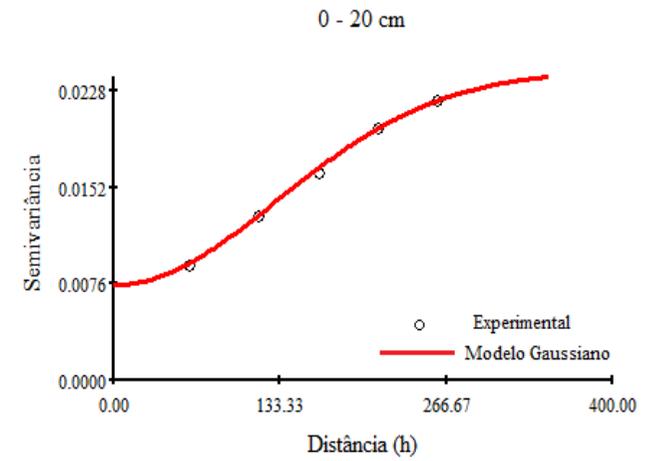
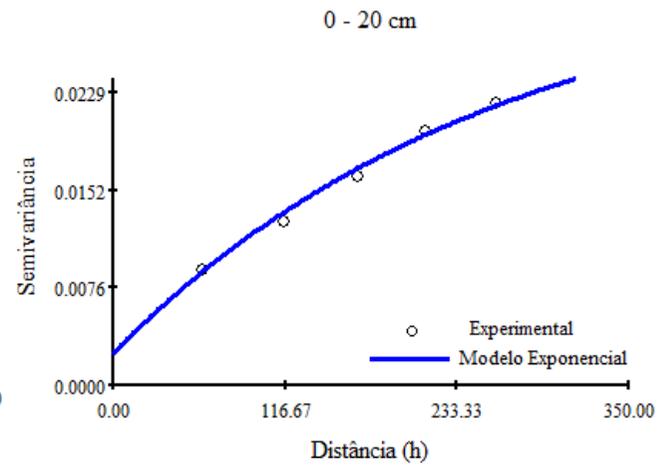
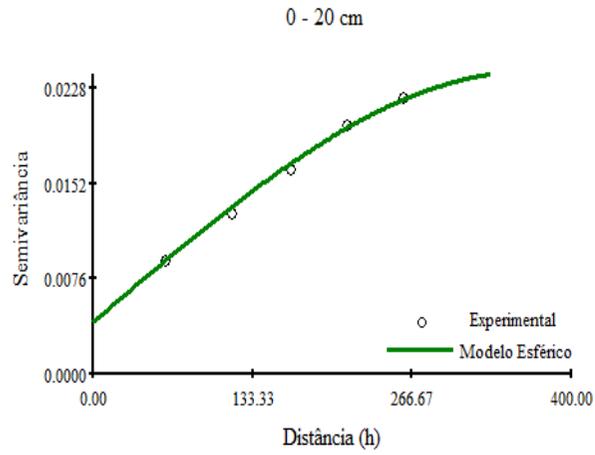


Fonte: Da autora (2022).

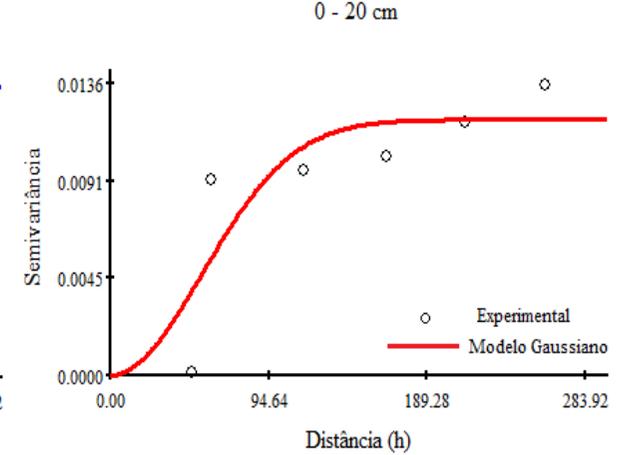
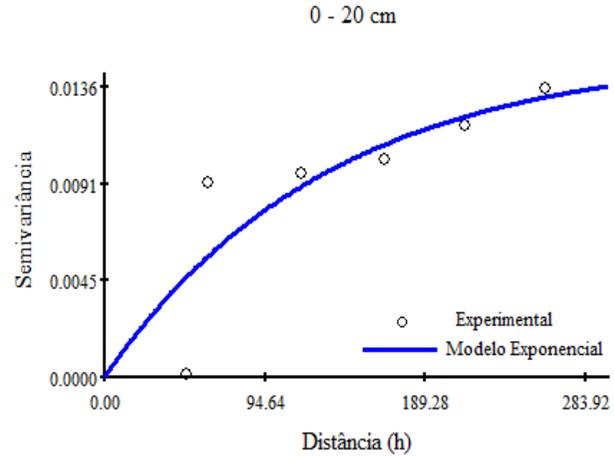
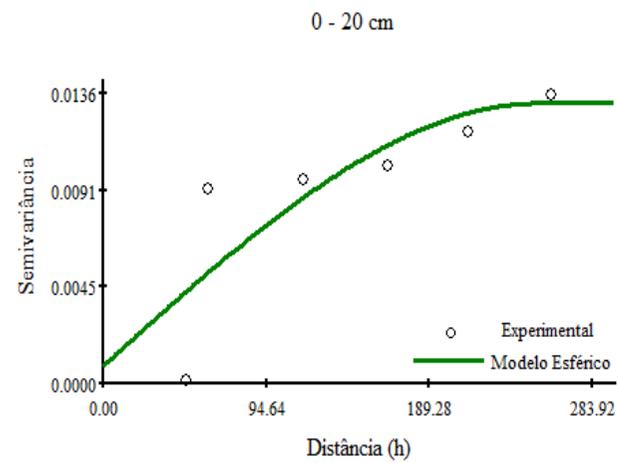
Figura 20 - Semivariogramas ajustados para os atributos físico-hídricos da camada 0- 20 cm.



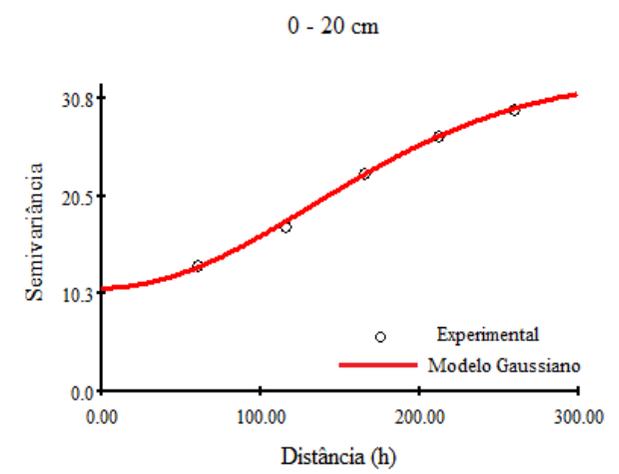
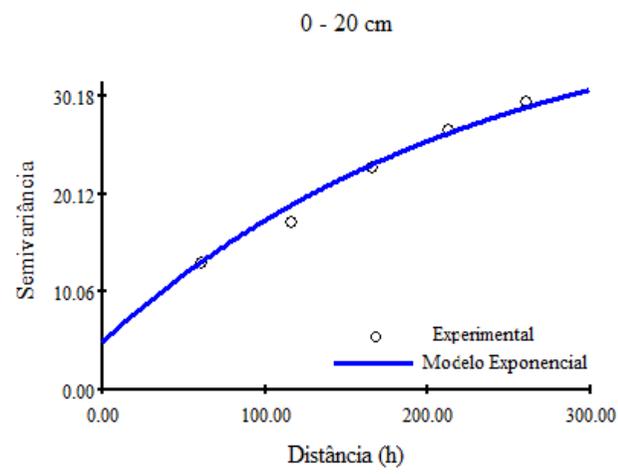
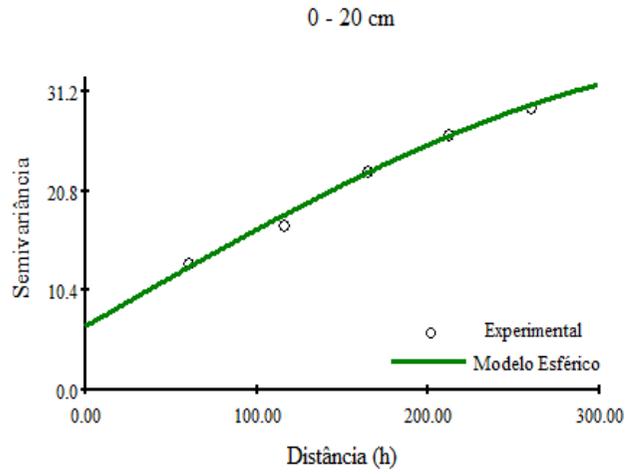
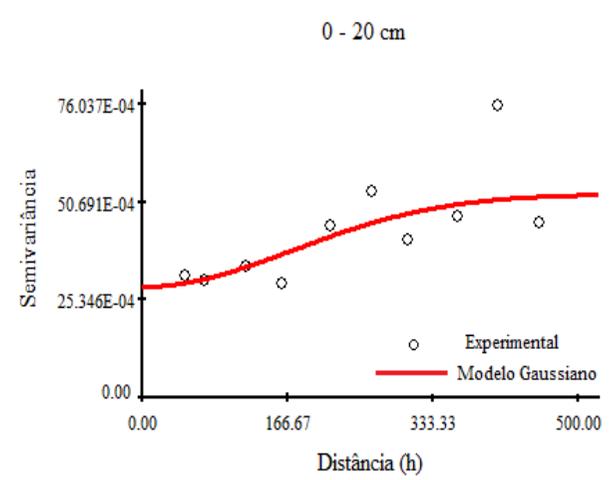
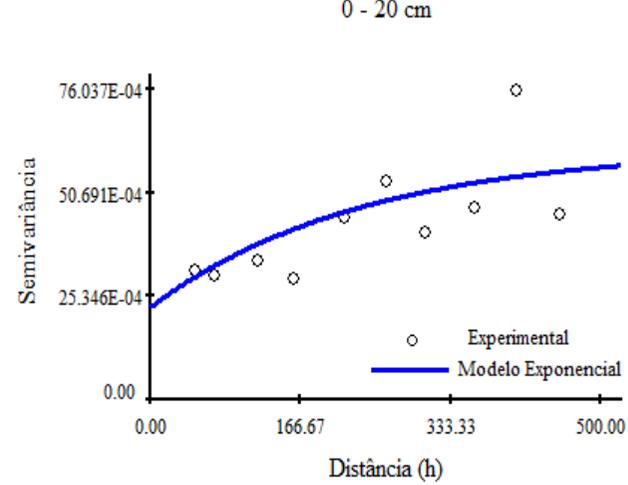
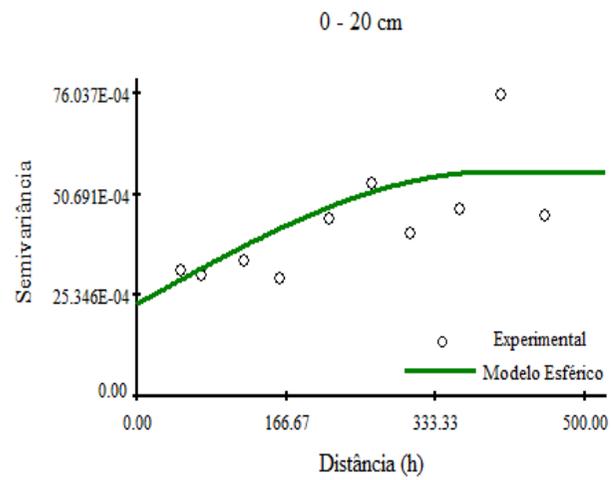
$D_s$  ( $\text{g cm}^{-3}$ )

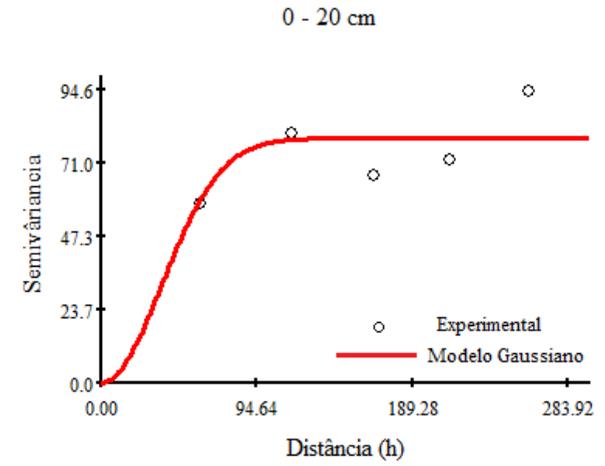
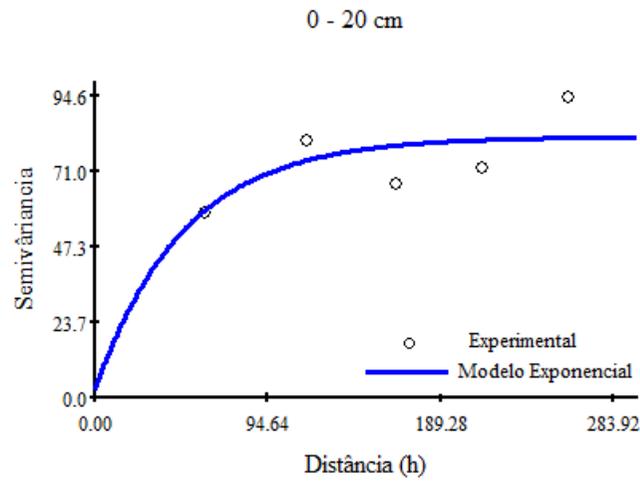
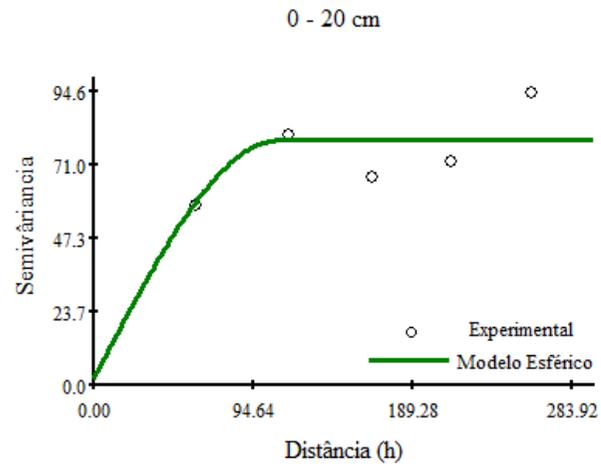
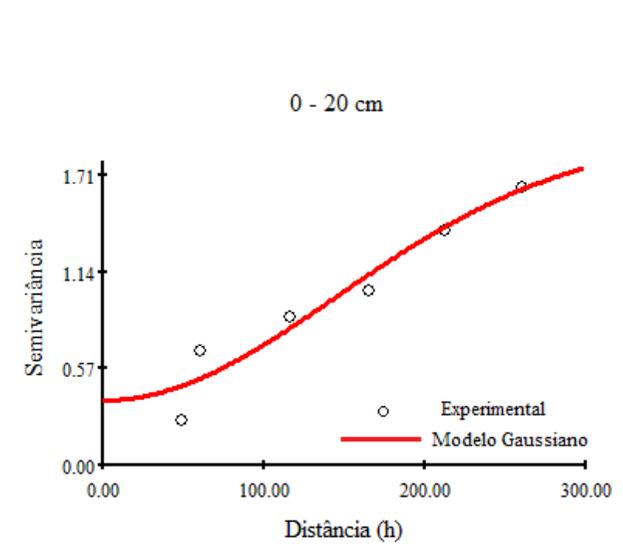
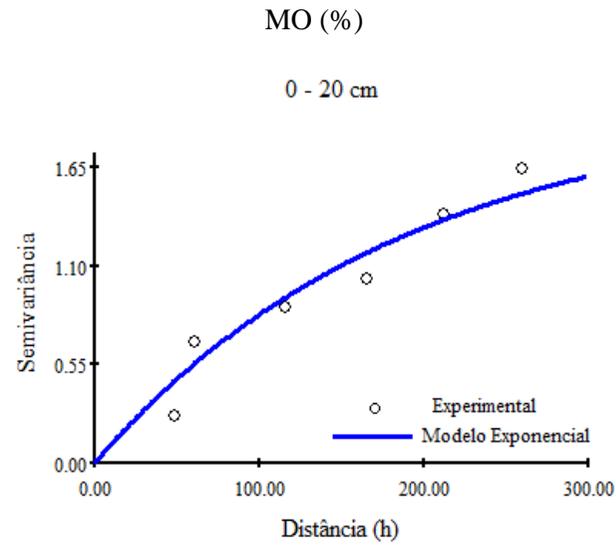
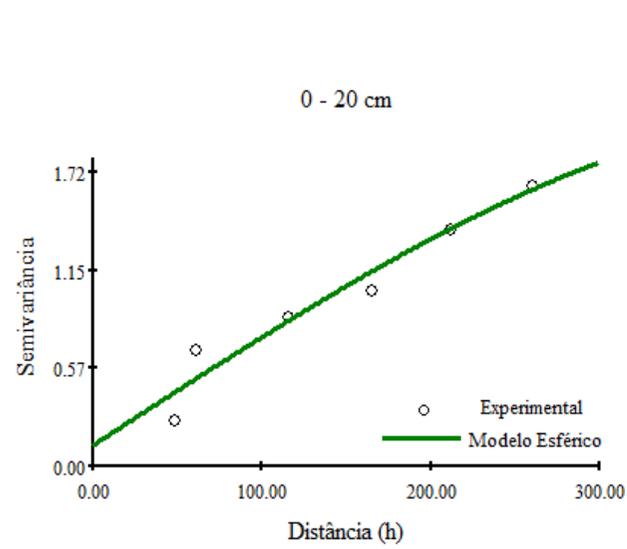


$D_p$  ( $\text{g cm}^{-3}$ )

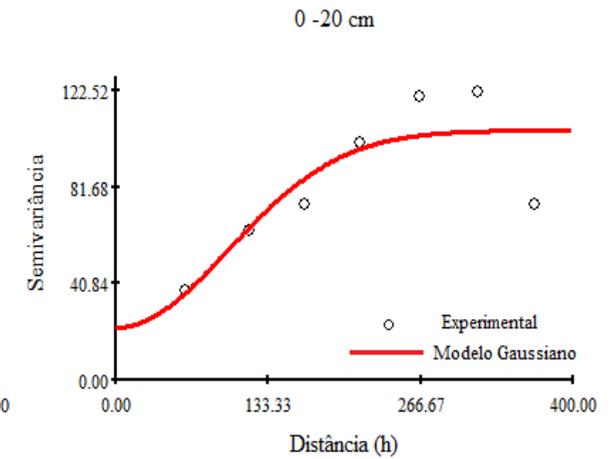
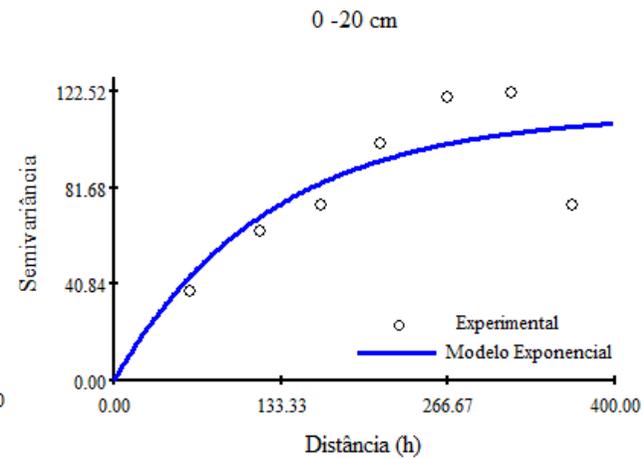
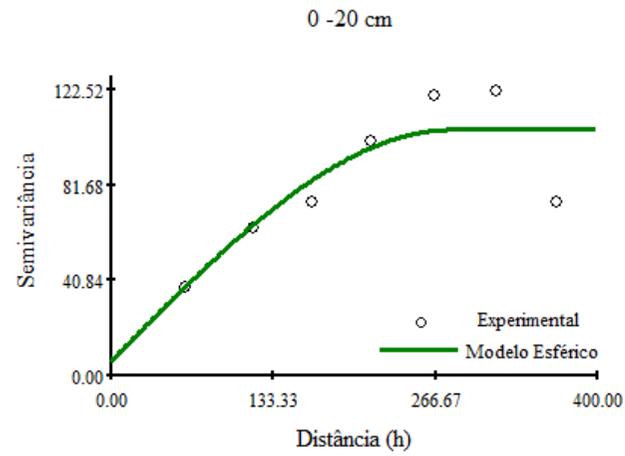


VTP (%)

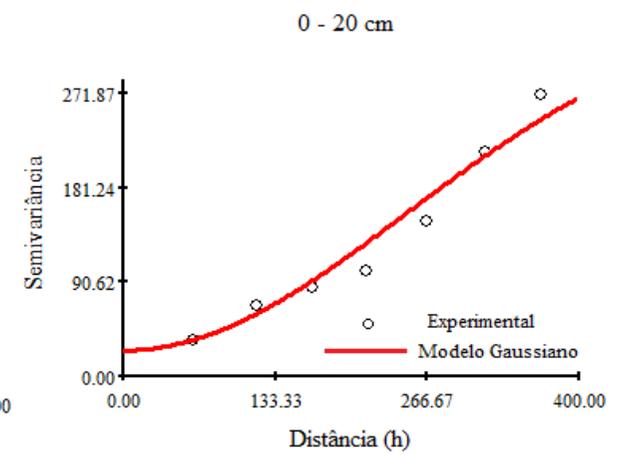
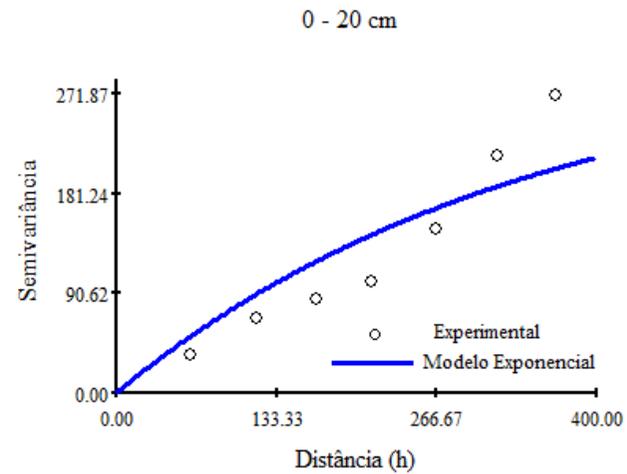
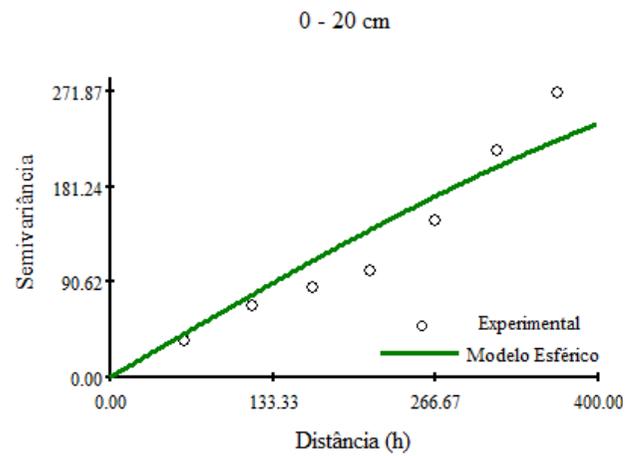
 $\mu$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )



## Argila (%)

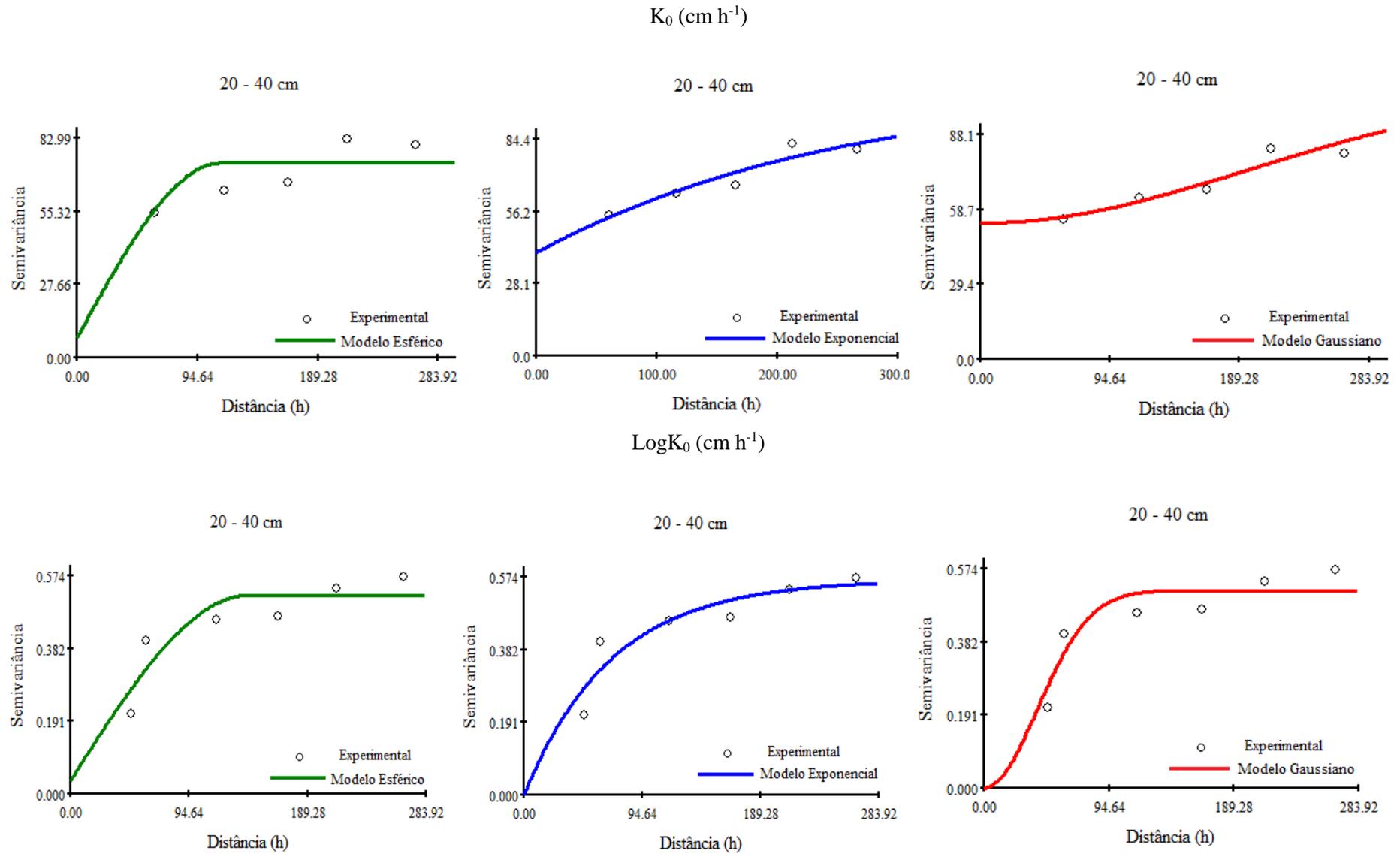


## Silte (%)

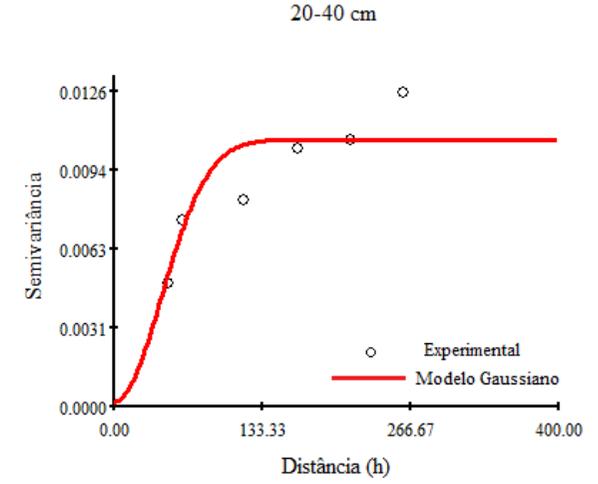
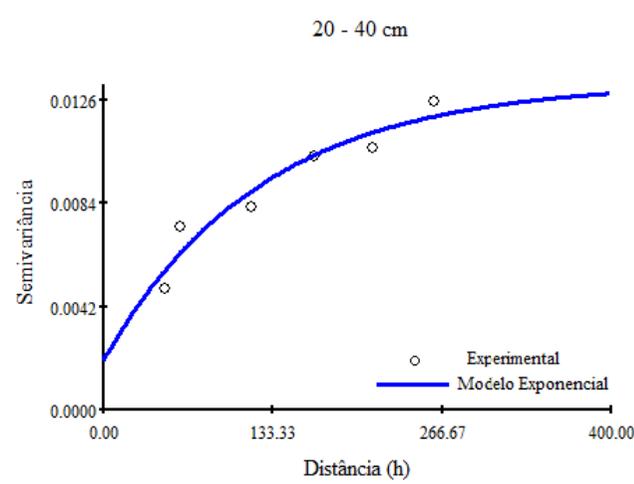
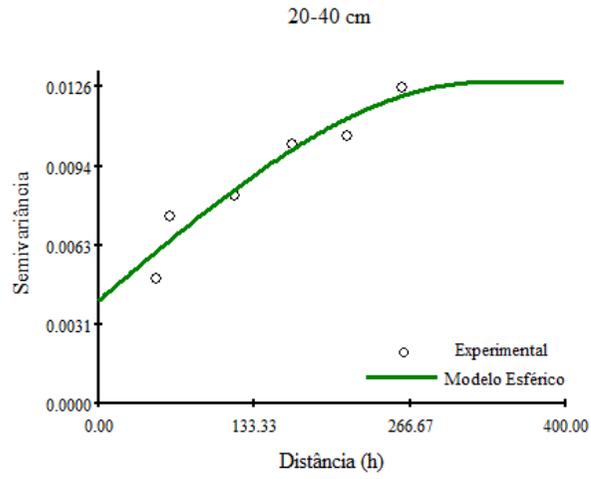


Fonte: Da autora (2022).

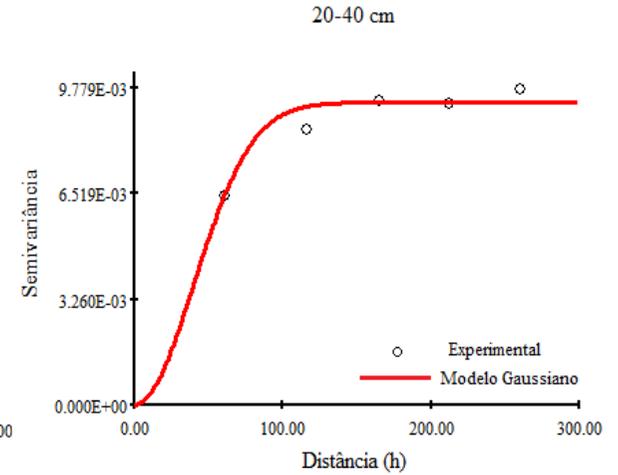
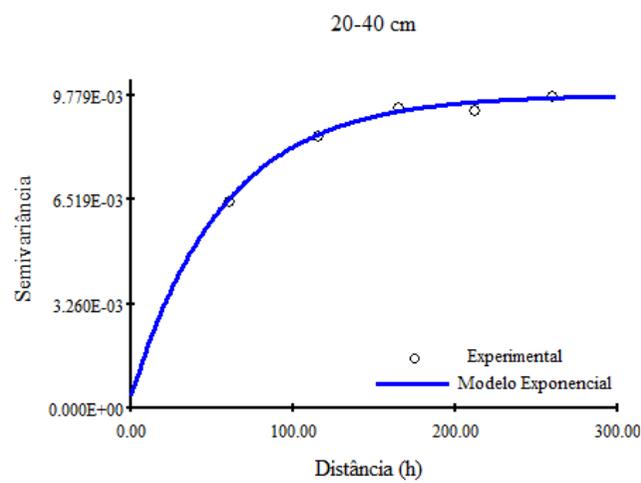
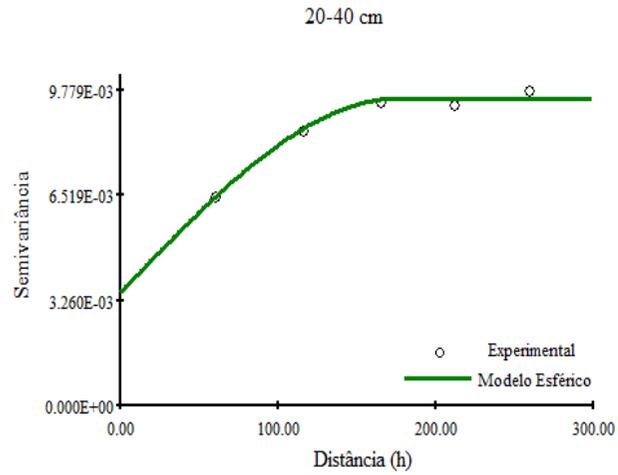
Figura 21 - Semivariogramas ajustados para os atributos físico-hídricos da camada 20 - 40 cm.



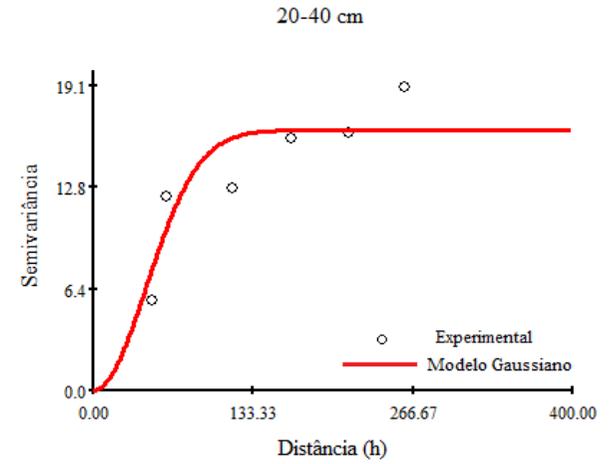
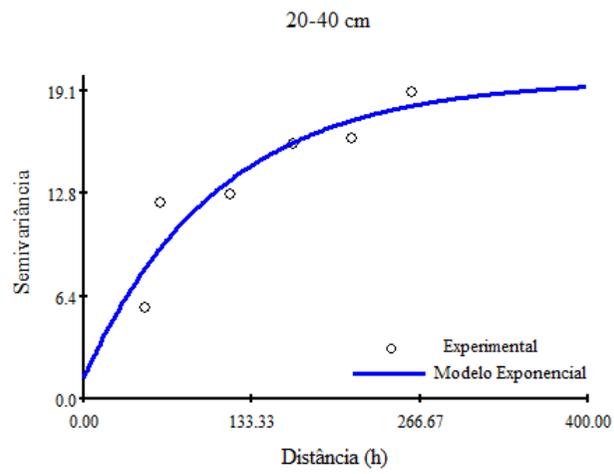
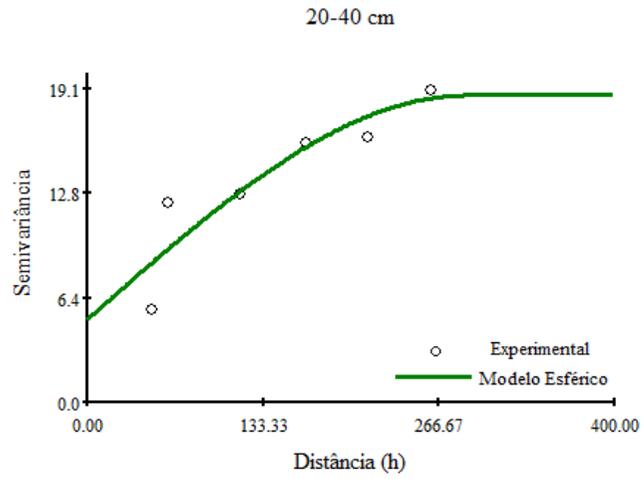
$D_s$  ( $g\ cm^{-3}$ )



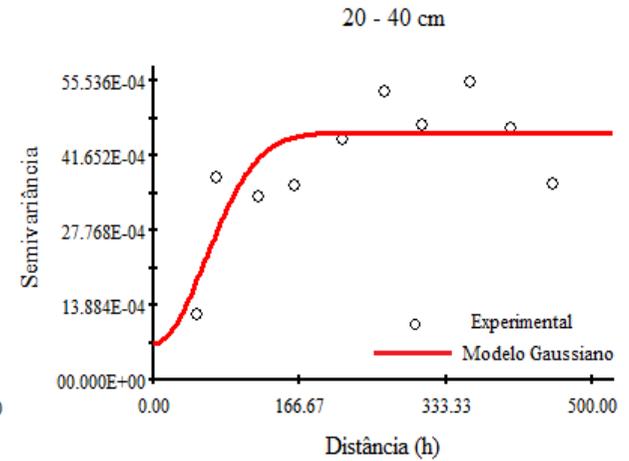
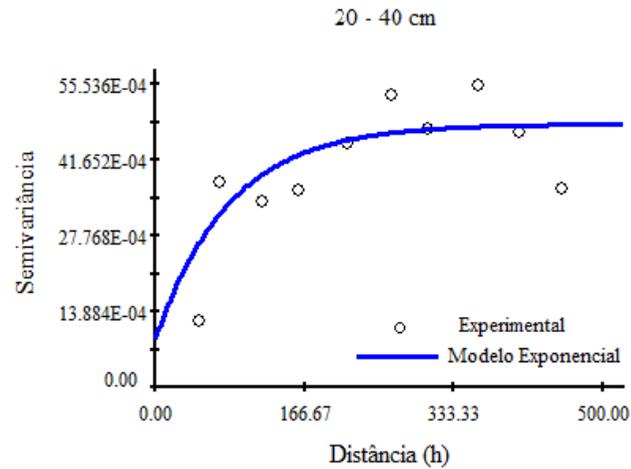
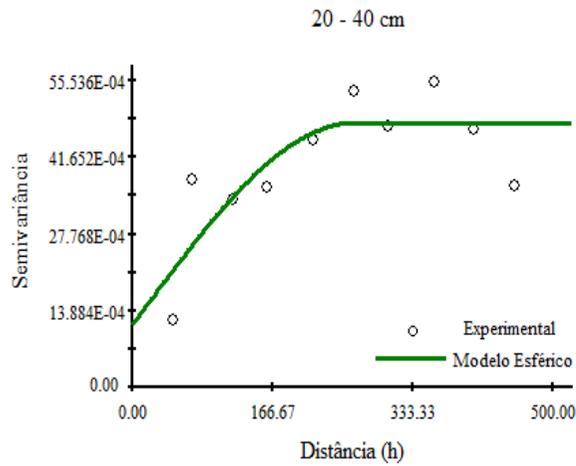
$D_p$  ( $g\ cm^{-3}$ )



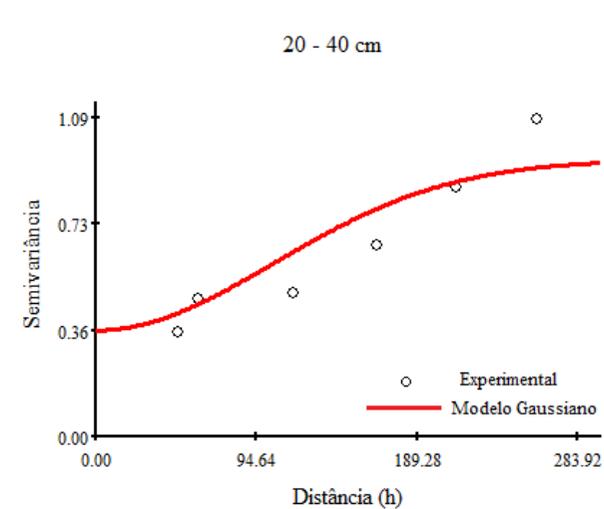
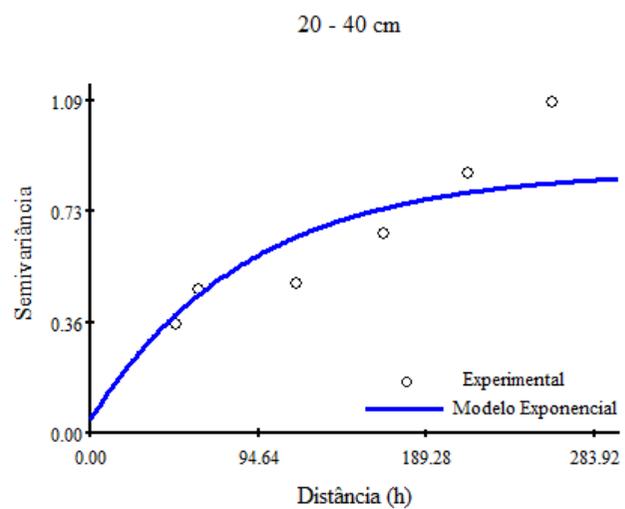
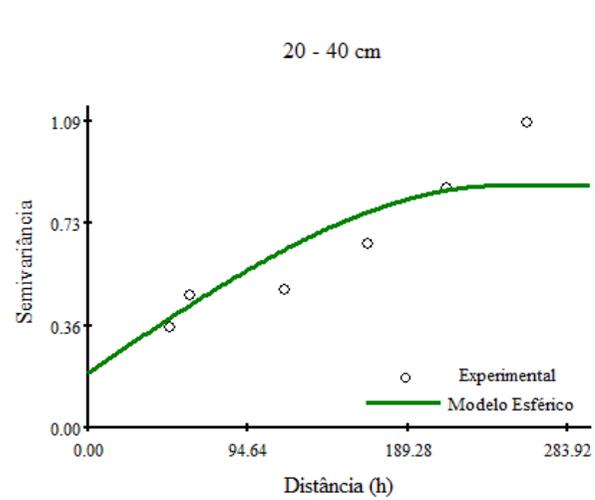
VTP (%)



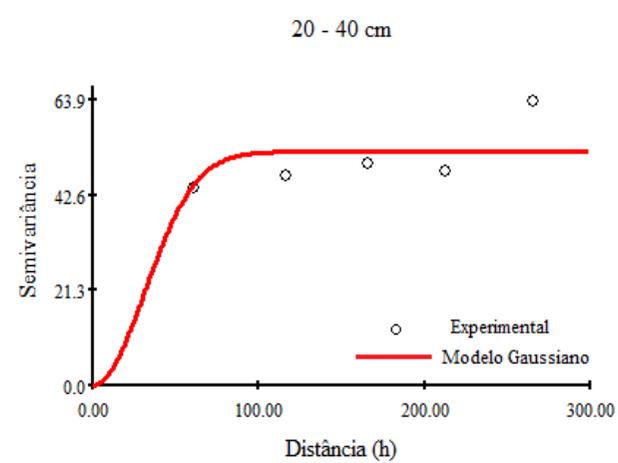
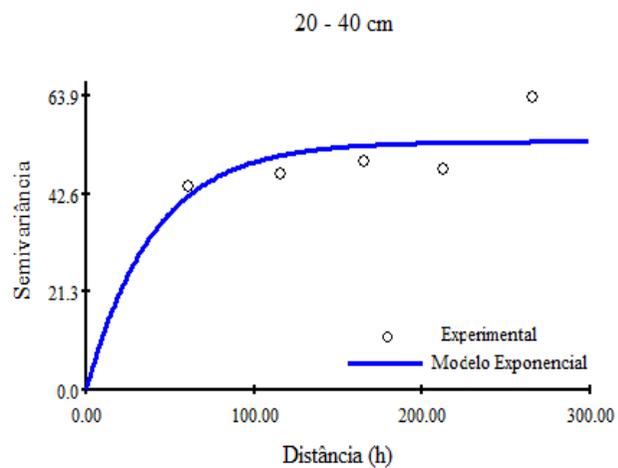
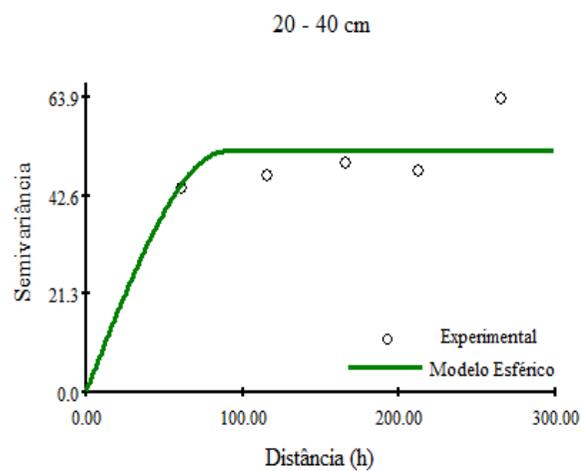
$\mu$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )



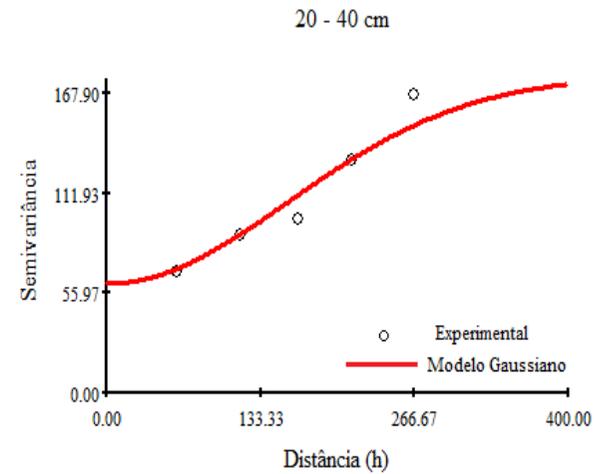
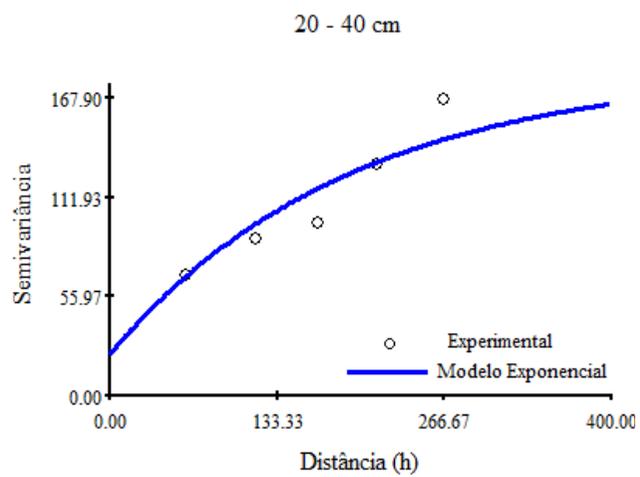
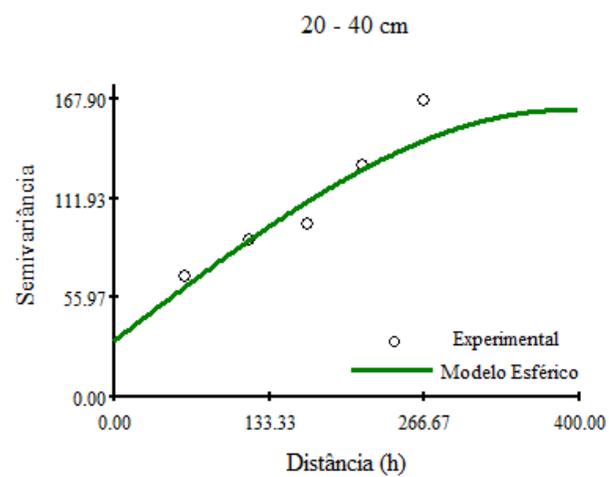
## MO (%)



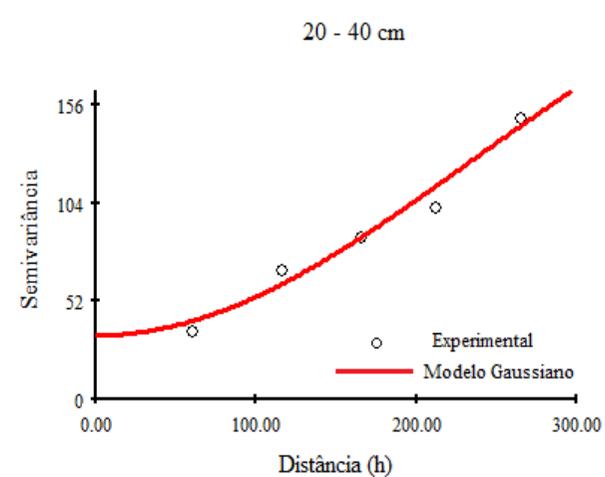
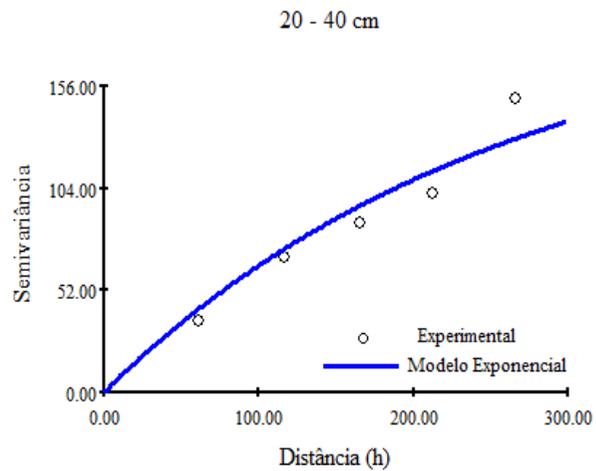
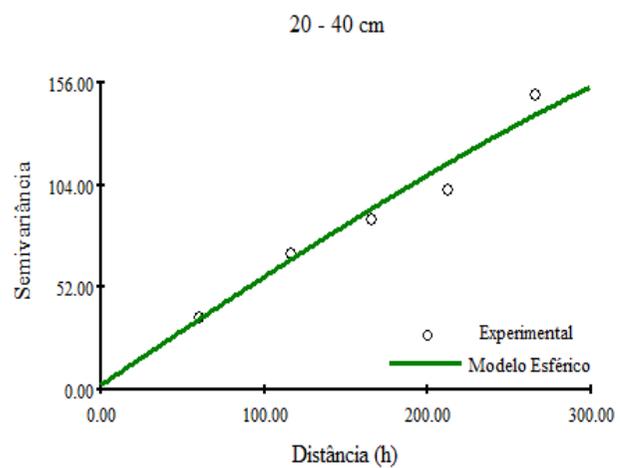
## Areia (%)



## Argila (%)



## Silte (%)



Fonte: Da autora (2022).