

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Funções de pedotransferência na caracterização da distribuição espacial da
condutividade hidráulica do solo saturado**

Rômulo Félix Nunes

Pelotas, 2019

Rômulo Félix Nunes

**Funções de pedotransferência na caracterização da distribuição espacial da
condutividade hidráulica do solo saturado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Dr. Luis Carlos Timm

Coorientadora: Dr^a. Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N972f Nunes, Rômulo Félix

Funções de pedotransferência na caracterização da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado / Rômulo Félix Nunes ; Luis Carlos Timm, orientador ; Cláudia Liane Rodrigues de Lima, coorientadora. — Pelotas, 2019.

118 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Regressão linear múltipla. 2. Bacia hidrográfica. 3. Ksat. 4. Atributos topográficos. 5. Geoestatística. I. Timm, Luis Carlos, orient. II. Lima, Cláudia Liane Rodrigues de, coorient. III. Título.

CDD : 627

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figs Machado CRB: 10/1612

Rômulo Félix Nunes

Funções de pedotransferência na caracterização da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 29/08/2019

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Luis Carlos Timm (Presidente)

Doutor em Agronomia - Irrigação e Drenagem pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP

.....
Prof. Dr. Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria

.....
Prof. Dr. Leandro Sanzi Aquino

Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas

Agradecimentos

Primeiramente à minha família, minha mãe Angélica Beatriz Félix Nunes, meu pai Carlos Alberto Pereira Nunes, e meus irmãos Ramon, Douglas, Nicholas, Nathan, por todo apoio e incentivo.

À minha namorada Vanessa Maldaner, pela cumplicidade, apoio e incentivo nos momentos mais importantes dessa etapa.

À Universidade Federal de Pelotas por ter me proporcionado o emprego de professor substituto, me dando condições de realizar a pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, por ter proporcionado minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luis Carlos Timm, pela orientação, apoio, confiança e empenho dedicado à elaboração deste trabalho, e, à minha coorientadora Professora Doutora Cláudia Liane Rodrigues de Lima, por todo auxílio prestado, durante o período de realização deste curso de pós-graduação.

Agradeço a todos os professores do programa e aos técnicos do laboratório de física do solo da FAEM, pela dedicação e ensinamentos.

Aos meus amigos e colegas do mestrado em Recursos Hídricos e em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, Leonir, Maurício, Luana, Rodrigo, Miguel, Stéfan e Eliana por todo apoio.

A todos, aqui citados ou não, que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

“Na vida, não vale tanto o que temos, nem tanto importa o que somos. Vale o que realizamos com aquilo que possuímos e, acima de tudo, importa o que fazemos de nós!”

Chico Xavier

Resumo

NUNES, Rômulo Félix. **Funções de pedotransferência na caracterização da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado**. 2019. 118f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) é um atributo importante do ponto de vista da gestão de recursos hídricos e manejo e conservação do solo, pois rege o fluxo de água no solo, taxa de infiltração, escoamento superficial, transporte de solutos, entre outros processos ambientais. Entretanto, tem sido reportado na literatura que a K_{sat} apresenta uma alta variabilidade espacial, tanto em escala de parcelas experimentais quanto de bacia hidrográfica. Sendo assim, a identificação e quantificação da variabilidade espacial da K_{sat} tem sido alvo de estudos ligados à dinâmica da água no solo. Contudo, a determinação da variabilidade espacial da K_{sat} requer uma densa base de dados. Dessa forma, a aplicação de modelos matemáticos para estimar a K_{sat} usando atributos físicos-hídricos do solo (AFHS) e topográficos de baixo custo e de fácil determinação tem se tornado cada vez mais frequente. Nesse sentido, esse estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar funções de pedotransferência (FPTs) para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado em uma malha experimental, contendo 80 pontos com distribuição espacial irregular, estabelecida na sub-bacia hidrográfica Santa Rita (Pelotas, Rio Grande do Sul), bem como seu potencial em caracterizar a estrutura de variabilidade espacial da condutividade hidráulica por meio de ferramentas da geoestatística. Em cada ponto da malha experimental foram determinados os AFHS e topográficos, bem como a informação de uso e ocupação do solo. As FPTs foram desenvolvidas por meio da técnica de regressão linear múltipla e validadas a partir da aplicação de índices estatísticos e de ranqueamento proposto na literatura. Por meio de ferramentas geoestatísticas (modelagem variográfica e interpolação por krigagem ordinária) foi realizada a caracterização e o mapeamento da distribuição espacial dos dados de K_{sat} observados em campo e estimados pelas FPTs desenvolvidas para os solos da sub-bacia hidrográfica Santa Rita (SBHSR). As FPTs testadas já existentes na literatura não foram eficientes em estimar a K_{sat} para os solos da SBHSR. As FPTs que melhor descreveram a distribuição espacial da K_{sat} foram desenvolvidas a partir dos dados de densidade do solo, teor de argila, declividade e macroporosidade e dos dados de densidade do solo, teor de argila, teor de areia e elevação. Os atributos topográficos (declividade, aspecto e elevação) estiveram presentes como atributos preditores nas sete FPTs com melhores desempenhos. O uso e ocupação do solo também se mostrou um preditor adequado na estimativa de K_{sat} . Com base nesse estudo, foi possível concluir que as FPTs desenvolvidas para estimar a K_{sat} mostraram potencial para capturar a sua estrutura de dependência espacial. A Krigagem Ordinária indicou que a espacialização dos erros absolutos dos valores estimados de K_{sat} a partir da densidade do solo, teor de argila, macroporosidade e declividade foi a que apresentou os menores erros e o padrão de distribuição espacial mais similar em relação aos dados observados.

Palavras-chave: Regressão linear múltipla. Bacia hidrográfica. K_{sat} . Atributos topográficos. Geoestatística.

Abstract

NUNES, Rômulo Félix. **Pedotransfer functions to spatial distribution characterization of saturated soil hydraulic conductivity** 2019. 118f. Dissertation (Master's Degree in Water Resources) – Graduate Program in Water Resources, Center of Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

Saturated soil hydraulic conductivity (K_{sat}) is an important soil attribute for water resources management and soil management and conservation, because it governs soil water flow, infiltration rate, runoff, solute transport, among others environmental processes. However, it has been reported in the literature that K_{sat} has a high spatial variability for watershed scale measurements or even on small experimental plots areas. Thus, the identification and quantification of K_{sat} spatial variability has been the target of studies related to soil water dynamics. However, determining K_{sat} 's spatial variability requires a large dataset. Due this, the application of mathematical models to estimate K_{sat} using low-cost independents variables as topographic attributes or another soils hydro physics attributes (SHPA) has become increasingly common. The objective of this study was to develop and evaluate pedotransfer functions (PTFs) to estimate the saturated soil hydraulic conductivity in an experimental sampling grid, containing 80 points with irregular spatial distribution, established in the Santa Rita watershed (Pelotas, Rio Grande do Sul), as well their potential to characterize spatial variability structure of hydraulic conductivity using geostatistics tools. At each point of the experimental sample grid were determined the SHPA and topographic, as well as information on the land use. The PTFs were developed using multiple linear regression technique and validated through the application of statistical performance parameters and by a ranking proposed in the literature. Applying geostatistical tools (variographic modeling and interpolation by ordinary kriging) where performed the characterization and mapping of the spatial variability distribution of K_{sat} values observed in the field and estimated by PTFs developed for the soils of the Santa Rita watershed (SRW). The PTFs found in another studies and tested in this work were unable to estimate K_{sat} for SRW soils. The PTFs that best described the spatial distribution of K_{sat} were developed from soil bulk density, clay content, slope and macroporosity data and from soil bulk density, clay content, sand content and elevation data. Topographic attributes (slope, aspect and elevation) were present as predictive attributes among the seven best performing PTFs. Land use data also proved to be an adequate predictor of K_{sat} estimation. So, it was possible to conclude that the PTFs developed to estimate K_{sat} showed potential to capture K_{sat} spatial dependence structure in the watershed area. The Ordinary Kriging indicated that the spatialization of the absolute errors of the estimated K_{sat} values by the soil bulk density, clay content, macroporosity and slope presented the smallest errors and the most similar spatial distribution pattern in relation to the observed K_{sat} data.

Keywords: Multiple linear regressions. Watershed. K_{sat} . Topographic attributes. Geostatistics.

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema de semivariograma experimental e teórico e os parâmetros que o descrevem.....	32
Figura 2 - Semivariograma experimental e teórico.....	34
Figura 3 – Localização da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do Arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS. A: Delimitação geográfica do Brasil; B: Delimitação geográfica do estado do Rio Grande do Sul; C: Delimitação geográfica da cidade de Pelotas; D: Delimitação geográfica do sub-bacia Hidrográfica Santa Rita.....	38
Figura 4 – Mapa de distribuição das classes de solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do Arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.	39
Figura 5 - Divisão do banco de dados para desenvolvimento e validação de funções de pedotransferência.....	44
Figura 6 - Ordens das regressões lineares múltiplas (RLM) para desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimativa do logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$).....	45
Figura 7 - Avaliação da performance das funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas para a estimativa do logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$).	46
Figura 8 - Etapas das análises geoestatísticas.	49
Figura 9 - Mapa de uso e ocupação do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.	50
Figura 10 - Mapa de altitude da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.	51
Figura 11 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.	52
Figura 12 - Mapa de aspecto da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.	53
Figura 13 - Mapa de curvatura da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.	54
Figura 14 - Dispersão dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) referentes aos pontos amostrais.	56

Figura 15 - Boxplots referentes as séries de condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers.	56
Figura 16 - Dispersão dos teores de argila referentes aos pontos amostrais.....	58
Figura 17 - Boxplots referentes as séries de condutividade hidráulica do solo saturado nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers.	58
Figura 18 - Boxplots referentes às séries de condutividade hidráulica do solo saturado nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers.	59
Figura 19 - Dispersão dos dados de densidade do solo (Ds) referentes aos pontos amostrais.....	59
Figura 20 - Dispersão macroporosidade referentes aos 80 pontos amostrais.	60
Figura 21 - Boxplots referentes às séries de macroporosidade nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers. Ma. Nativa: Mata Nativa. C. Anual: Cultivo anual; C. Perene: cultivo perene; Ca. Nativo: Campo nativo.	61
Figura 22 - Dispersão dos teores de matéria orgânica referentes aos pontos amostrais.	61
Figura 23 - Boxplots demonstrando graficamente as medidas de posição e indicando a presença de outliers do valores observados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) e valores estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) pelas funções de pedotransferência desenvolvidas representadas pelos modelos (M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6 e M-7). O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers; Ln(Ksat):logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado; M-obs: <i>Boxplot</i> dos dados observados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado; M-1: <i>Boxplot</i> dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-1; M-2: <i>Boxplot</i> dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-2; M-3: <i>Boxplot</i> dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-3; M-4: <i>Boxplot</i> dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-4; M-5: <i>Boxplot</i> dos dados estimados de logaritmo neperiano da	

condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-5; M-6: <i>Boxplot</i> dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-6; M-7: <i>Boxplot</i> dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-7.....	71
Figura 24 - Semivariogramas teóricos e experimentais para os dados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) observados (A) e estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas M-1 (B), M-2 (C) e M-3 (D). Os valores acima dos pontos de semivariância são os pares de amostras utilizados para a determinação do mesmo.	73
Figura 25 - Semivariogramas teóricos e experimentais para os dados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas M-4 (A), M-5 (B), M-6 (C) e M-7 (D). Os valores acima dos pontos de semivariância são os pares de amostras utilizados para a determinação do mesmo.	74
Figura 26 - Distribuição espacial dos erros absolutos de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) referente às estimativas pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas para os solos da sub-bacia hidrográfica Santa Rita.....	78
Figura 27 - Distribuição espacial do logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) a partir dos dados observados e estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas.	80
Figura 28 - Distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), a partir dos dados observados e estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas.....	81

Lista de tabelas

Tabela 1 - Funções de pedotransferência (FPTs) publicadas na literatura para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}).	43
Tabela 2- Estatística descritiva dos diferentes atributos físico-hídricos do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita.	55
Tabela 3 – Valores de condutividade hidráulica do solo saturado médios, mínimos, máximos e percentual de pontos referentes ao uso e ocupação do solo.	57
Tabela 4 - Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk dos atributos transformados.	62
Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson dos atributos após normalização dos dados.....	63
Tabela 6 - Avaliação da performance das funções de pedotransferência publicadas na literatura testadas na sub-bacia hidrográfica Santa Rita.	65
Tabela 7 - Funções de pedotransferência desenvolvidas para estimar o logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado para os solos da sub-bacia hidrográfica Santa Rita.	66
Tabela 8 - Parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os dados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) observados e estimados pelas funções de pedotransferência desenvolvidas.	75

Sumário

1 Introdução	15
2 Objetivos	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 Hipóteses	19
4 Revisão da Literatura	20
4.1 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	20
4.2 Preditores básicos do solo.....	22
4.3 Atributos topográficos do solo	23
4.4 Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo	24
4.5 Funções de pedotransferência	25
4.6 Método de desenvolvimento de funções de pedotransferência	27
4.7 Métodos geoestatísticos.....	28
4.7.1 Modelagem variográfica	31
4.7.2 Grau de dependência espacial.....	34
4.7.3 Krigagem ordinária (KO).....	34
5 Materiais e métodos	37
5.1 Caracterização da área de estudo	37
5.2 Definição da malha experimental e tipo de solo.....	39
5.3 Uso e ocupação do solo	40
5.4 Relevo da sub-bacia hidrográfica Santa Rita.....	40
5.5 Análises laboratoriais	41
5.6 Análises estatísticas	42
5.7 Funções de pedotransferência publicadas na literatura	42
5.8 Desenvolvimento de funções de pedotransferência.....	43
5.9 Análises geoestatísticas.....	48
6 Resultados e discussão	50
6.1 Uso e ocupação do solo	50
6.2 Relevo da sub-bacia hidrográfica Santa Rita.....	51
6.3 Análise exploratória dos dados	54
6.4 Funções de pedotransferência publicadas na literatura	64
6.5 Desenvolvimento de funções de pedotransferência.....	66

6.6 Análise geoestatística.....	70
6.6.1 Análise gráfica dos dados observados e estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado.....	70
6.6.2 Caracterização da estrutura de dependência espacial	72
6.6.3 Espacialização dos erros de condutividade hidráulica do solo saturado estimados	76
6.6.4 Modelagem da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado.....	79
7 Conclusões	83
Referências	84

1 Introdução

Os atributos físico-hídricos do solo (AFHS) e topográficos possuem um papel fundamental na modelagem hidrológica em escala de bacia hidrográfica (DONGLI et al., 2017; SILVA et al., 2017), uma vez que influenciam o fluxo superficial e o movimento da água no solo, sendo fundamentais para o manejo da irrigação (AULER et al., 2017). Portanto, tais atributos do solo são de grande importância para apoiar a tomada de decisão sobre a gestão dos recursos hídricos na escala de bacias hidrográficas (BESKOW et al., 2016).

Contudo, os AFHS podem apresentar variações decorrentes das características intrínsecas da formação do solo, tanto ao longo do tempo quanto com relação ao espaço. A intensidade dessas variações em uma área depende das condições ambientais e de como essas influenciam os AFHS ao longo do tempo (DONGLI et al., 2017).

Dentre os AFHS, a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) é um atributo importante do ponto de vista da gestão de recursos hídricos e do manejo e conservação do solo, pois rege o fluxo de água no solo, a taxa de infiltração, o escoamento superficial, o transporte de solutos, entre outros processos ambientais (BECKER et al., 2018; NASRI et al., 2015). Entretanto, tem sido reportado na literatura que a K_{sat} apresenta uma alta variabilidade espacial, tanto em escala de parcelas experimentais quanto de bacia hidrográfica (ALMEIDA et al., 2018; MESQUITA; MORAES, 2004).

Dessa forma, a identificação e quantificação da variabilidade espacial da K_{sat} tem sido alvo de vários estudos ligados à dinâmica da água no solo, seja em estudos em pequena escala ou em escala de bacia hidrográfica. Contudo, a determinação da variabilidade espacial da K_{sat} requer uma densa base de dados. Sendo assim, a aplicação de modelos matemáticos para estimar a K_{sat} usando atributos físico-hídricos do solo e topográficos de baixo custo e de fácil determinação tem se tornado cada vez mais frequente (DONGLI et al., 2017; SILVA et al., 2017).

Nesse contexto, a estimativa da K_{sat} por meio de modelos matemáticos possui potencial para minimizar as questões acima levantadas. Os modelos empregados para essa finalidade foram denominados por Bouma (1989) como funções de pedotransferência (FPTs), ou seja, modelos que são usados para estimar atributos físico-hídricos do solo de difícil determinação (K_{sat} , curva de retenção de água no solo

etc.) a partir de outros atributos do solo de fácil e baixo custo de determinação (BOUMA, 1989; MCBRATNEY et al., 2002; PACHEPSKY; RAWLS, 2004; TOMASELLA; HODNETT, 1998).

Nos últimos anos, uma gama de FPTs foram desenvolvidas principalmente para estimar o conteúdo de água no solo, seja para pontos específicos da curva de retenção de água no solo (FPTs pontuais) ou para estimar os parâmetros de modelos matemáticos que descrevem a curva de retenção (FPTs paramétricas). Dentre elas, pode-se citar: Liao et al. (2011), que desenvolveram FPTs pontuais para estimar diferentes pontos da curva de retenção e paramétricas para estimar os parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980) para solos da província de Shandong, na China; e Ebrahim-zadeh et al. (2017), que desenvolveram FPTs paramétricas para estimar os parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980) para uma base de dados oriunda de cinco províncias do Irã. No Brasil também tem sido crescente o desenvolvimento de FPTs para estimar atributos físico-hídricos do solo. Reichert et al. (2010) desenvolveram FPTs pontuais para estimar diferentes pontos da curva de retenção para solos do Rio Grande do Sul e Lima (2016) desenvolveu FPTs para estimar o conteúdo de água no solo em diferentes potenciais para solos do perímetro irrigado no Pontal Sul, na cidade de Petrolina, em Pernambuco.

No entanto, o número de estudos publicados acerca da elaboração de FPTs para a estimativa da K_{sat} são menores quando comparados com os publicados para a estimativa da curva de retenção de água no solo. Dentre as FPTs publicadas na literatura para estimar a K_{sat} , tem-se as de Brakensiek et al. (1984), Campbell e Shiozawa (1994), Cosby et al. (1984), Dane e Puckett (1994), Julià et al. (2004), Puckett et al. (1985), Saxton et al. (1986), Vereecken et al. (1990), dentre outras.

Para o desenvolvimento das FPTs, tradicionalmente se tem utilizado atributos físicos de fácil determinação como preditores da K_{sat} , tais como: porosidade total, densidade do solo e teores de matéria orgânica, argila, silte e areia. No entanto, alguns autores desenvolveram FPTs combinando os atributos do solo acima mencionados e atributos topográficos (declividade, elevação, curvatura e aspecto) (LEIJ et al., 2004). Os atributos topográficos, na maioria das vezes, são obtidos a partir do modelo digital de elevação do terreno (MDE), portanto, são considerados atributos de aquisição fácil e rápida, sendo calculados com o advento do Sistema de Informações Geográficas (SIG) (MOORE et al., 1993).

Dentre os parâmetros gerados no MDE, a topografia do relevo, através da

variação da declividade, curvatura e aspecto, influencia diretamente nos padrões de fluxo de água (SIRTOLI et al., 2008). Dessa maneira, as alterações topográficas do relevo podem auxiliar no entendimento da variabilidade espacial da Ksat, pois condicionam o movimento e transporte de água (CASTIONE et al., 2015).

Além disso, ferramentas da geoestatística têm sido usadas para a identificação e quantificação da variabilidade espacial da Ksat (AQUINO et al., 2015; LIAO et al., 2011), uma vez que a geoestatística permite por meio de técnicas, como a krigagem ordinária, estimar valores em locais não amostrados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013) e modelar a distribuição espacial dos atributos do solo (ANNABI et al., 2017; FREITAS et al., 2015; OU et al., 2017; ZONTA et al., 2014). Destaca-se também que tem sido avaliado o potencial das FPTs em capturar a estrutura de variabilidade espacial da Ksat por meio de ferramentas da geoestatística (LIMA, 2016; NEBEL et al., 2010). Silva et al. (2017) utilizaram a geoestatística para modelar e mapear a variabilidade espacial dos dados estimados de Ksat por meio de FPTs.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos para caracterização da variabilidade espacial da Ksat em escala de propriedade rural ou parcelas experimentais (BECKER et al., 2018; PRICE et al., 2010; SILVA et al., 2017). Entretanto, ainda existem poucos estudos dessa natureza em escala de bacia hidrográfica (BH) no Brasil.

A bacia hidrográfica Arroio Moreira/Fragata (BHAMF) se localiza no sul do Rio Grande do Sul e é de extrema importância econômica e social para a região, em particular para os municípios de Pelotas, Morro Redondo e Capão do Leão. A BHAMF é formada por várias sub-bacias, dentre elas destaca-se a sub-bacia hidrográfica Santa Rita (SBHSR), por ser o objeto deste estudo. O estudo da variabilidade espacial da Ksat é importante para a SBHSR, visto que possui uma grande variedade de classes de solos. Dentre os diversos usos e ocupações da SBHSR, destaca-se a atividade leiteira e a agricultura familiar, além de áreas de cultivo perene, cultivo anual, campo nativo e mata nativa.

Sendo assim, a caracterização da variabilidade espacial da Ksat para a SBHSR, por meio do desenvolvimento de FPTs e técnicas geoestatísticas, possuem grande valia para entender o comportamento hídrico da região, permitindo ao gestor de recursos hídricos a incorporação dessa variabilidade em modelos hidrológicos na escala de bacias hidrográficas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar funções de pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado em uma malha experimental estabelecida na sub-bacia hidrográfica Santa Rita (Pelotas, Rio Grande do Sul), bem como seu potencial em caracterizar a estrutura de variabilidade espacial da condutividade hidráulica por meio de ferramentas da geoestatística.

2.2 Objetivos específicos

- i. Determinar os atributos físico-hídricos do solo (microporosidade, macroporosidade, porosidade total, distribuições granulométricas, teor de matéria orgânica e condutividade hidráulica do solo saturado), topográficos (elevação, declividade, curvatura e aspecto) e caracterizar o uso e ocupação dos solos em cada ponto da malha experimental estabelecida na sub-bacia hidrográfica Santa Rita;
- ii. Avaliar o impacto do uso e ocupação dos solos nos atributos físico-hídricos do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita;
- iii. Avaliar o desempenho de funções de Pedotransferência, já existentes na literatura, para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado;
- iv. Desenvolver funções de pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado, utilizando atributos físicos-hídricos do solo, atributos topográficos e informações referentes ao uso e ocupação do solo nos locais amostrados;
- v. Validar as funções de pedotransferência desenvolvidas para estimativa da condutividade hidráulica do solo (item iv), a partir de um subconjunto de valores medidos de condutividade hidráulica em cada ponto da malha experimental;
- vi. Caracterizar a estrutura de dependência espacial e mapear a distribuição do conjunto de dados medidos de condutividade hidráulica do solo saturado na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, por meio de ferramentas geoestatísticas e os estimados pelas funções de pedotransferência desenvolvidas.

3 Hipóteses

- i. As funções de pedotransferência desenvolvidas para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado por meio da combinação de atributos físico-hídricos do solo e topográficos para a sub-bacia hidrográfica Santa Rita são mais eficientes em relação às disponíveis na literatura;
- ii. A distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em escala de bacia hidrográfica pode ser caracterizada a partir das funções de pedotransferência desenvolvidas.

4 Revisão da Literatura

4.1 Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) representa de forma quantitativa o volume de água que adentra o solo em um determinado tempo e qualitativamente representa a facilidade com que a água se movimenta através do solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). O pioneiro a quantificar o movimento da água no solo foi Henry Darcy em 1856, por meio da utilização de colunas de areia saturada com água, determinando a chamada “Equação de Darcy”. Essa equação estabelece que a quantidade de água que atravessa por unidade de área e tempo o meio poroso saturado é proporcional ao gradiente de potencial total de água nesse meio, estando expressa na forma da Equação 1 (GONÇALVES; LIBARDI, 2013; SCHEIDEGGER, 1974).

$$Q = \frac{-K A (\Delta h)}{L} \quad (1)$$

Q representa o volume total do fluido percolante por unidade de tempo ($m^3 s^{-1}$), K é a condutividade hidráulica ($m s^{-1}$), A é a área da seção transversal (m^2), Δh é a carga hidráulica medida pela diferença de altura nos piezômetros (m) e L é a distância da trajetória do fluxo (m).

Destaca-se que no processo de infiltração de água no solo, parte da água infiltrada pode ser percolada, retida nos poros ou escoada superficialmente e que a taxa de infiltração do solo diminui com o decorrer do tempo, até atingir um valor constante que equivale a K_{sat} (JULIÀ et al., 2004; LIBARDI, 2012). Nesse sentido, a K_{sat} é um atributo de extrema importância do ponto de vista da modelagem hidrológica, recarga de aquíferos, transporte de solutos, sedimentos e escoamento superficial e a sua grandeza influencia processos que integram o entendimento do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica (ALVARENGA et al., 2011; BECKER et al., 2018; DONGLI et al., 2017; NASRI et al., 2015). Além disso, a determinação da K_{sat} pode ser complexa, devido a mesma ser uma variável integradora, sofrendo influência de outros atributos do solo (MESQUITA; MORAES, 2004).

Diversos fatores podem influenciar na Ksat, dentre eles destaca-se o arranjo de macroporos, que influencia diretamente, devido as suas medidas serem provenientes do mesmo espaço poroso. Além da macroporosidade, a estrutura e a textura do solo (frações das distribuições granulométricas) influenciam na Ksat. Diversos estudos revelam uma correlação negativa da Ksat com o teor de argila e positiva com o teor de areia no solo (CARSEL; PARRISH, 1988; HUANG et al., 2016; JABRO, 1996; JORDA et al., 2015; ZIMMERMANN et al., 2006). Porém, Baiamonte et al. (2017) afirmam não ser clara a relação direta desses dois atributos, visto que um solo argiloso bem estruturado pode apresentar uma Ksat atingindo a mesma grandeza que solo arenoso sem estrutura. Para Becker et al. (2018), as mudanças estruturais do solo tiveram um maior impacto nos resultados da Ksat.

De acordo com Cosby et al. (1984), solos argilosos apresentam menores valores de Ksat quando comparados com solos arenosos, devido aos solos argilosos estarem associados a uma maior retenção de água no solo, enquanto os solos arenosos se associam a um maior número de macroporos, com o fluxo gravitacional sofrendo menos impedimento. De acordo com Wagner et al. (2001) e Becker et al. (2018), as distribuições granulométricas do solo não tiveram impacto significativo nos valores de Ksat. Portanto, por depender da estrutura e textura e ainda pelo fato das práticas de cultivo contribuírem com a alteração da estrutura do solo, o que impacta diretamente nos valores apresentados em campo, a variabilidade espacial da Ksat pode alcançar várias ordens de grandeza em locais próximos (ALMEIDA et al., 2018; BERTOL et al., 2004; HU et al., 2009; MENEZES et al., 2006; MESQUITA; MORAES, 2004; SALEMI et al., 2013; OZALP et al., 2015).

Alguns fatores podem estar associados a variabilidade espacial da Ksat. Além da macroporosidade e distribuição granulométrica do solo, associam-se a compactação direta, devido aos equipamentos pesados em áreas com atividades agrícolas, e o teor de matéria orgânica e estrutura do solo relacionados aos diferentes usos e ocupações do solo, podendo alterar atributos físicos do solo, como densidade do solo, volume e distribuição dos poros e estabilidade de agregados, influenciando, assim, os valores de Ksat (BERTOL et al., 2004; PRICE et al., 2010).

De acordo com Mesquita e Moraes (2004), a Ksat decresce com o aumento da densidade do solo. Portanto, é menor a quantidade de macroporos em relação aos microporos, refletindo a importância da continuidade dos macroporos para o fluxo de água na saturação e esse comportamento é relatado por diversos estudos (AGNESE

et al., 2011; DONGLI et al., 2017). A densidade de fluxo de água em um poro é proporcional ao quadrado do seu diâmetro. Assim sendo, a presença de megaporos pode afetar o valor de K_{sat} , resultando em valores discrepantes (MESQUISTA; MORAES, 2004).

As características estruturais e texturais do solo são influenciadas pelos diferentes usos, coberturas e manejos que ocorrem no solo, impactando no comportamento da K_{sat} . A conversão de floresta e mata nativa para campo de cultivo pode causar um aumento na densidade do solo, que por sua vez aumenta o escoamento superficial e diminui a infiltração e a K_{sat} (BONELL et al., 2010; PRICE et al., 2010). Baiamonte et al. (2017) concluíram que os solos de pastagem apresentam K_{sat} consideravelmente mais baixa que solos de floresta (mata). Muitos estudos relatam essas diferenças entre K_{sat} em solos de mata e solos de pastagem (GODSEY; ELSENBEER, 2002; ZIMMERMANN et al., 2006). Entretanto, Zhou et al. (2008) não encontraram diferenças significativas entre a K_{sat} nos diferentes usos do solo. Todavia, esse comportamento pode ser devido ao local não ter sido exposto ao pisoteio de animais e máquinas pesadas.

Solos de mata nativa geralmente apresentam baixa densidade e alto valor de K_{sat} , porosidade total e macroporosidade, como resultado de uma maior cobertura vegetal e quantidade de matéria orgânica e crescimento de raízes (LEE; FOSTER, 1991).

Presume-se ainda que os atributos físico-hídricos do solo (AFHS), associados a fatores do solo que operam em diferentes escalas, tenham relação com atributos topográficos do relevo (BECKER et al., 2018; DONGLI et al., 2017). Pachepsky, Timlin e Rawls (2001) e Tomer et al. (2006) evidenciam a influência dos atributos topográficos na K_{sat} . Em contrapartida, Leij et al. (2004) não encontraram relações significativas entre a K_{sat} e os atributos topográficos do solo, sendo eles: elevação, inclinação, aspecto e curvatura tangente. De acordo com Baiamonte et al. (2017), além dos atributos topográficos do relevo, os diferentes usos e ocupações do solo podem ser utilizados em conjunto com os AFHS para descrever a K_{sat} .

4.2 Preditores básicos do solo

As práticas de manejo podem modificar significativamente a estrutura do solo, alterando as propriedades físicas básicas e, conseqüentemente, a dinâmica da água

no solo (PRICE et al., 2010). Então, é de fundamental relevância a análise dos atributos do solo, tais como: densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), distribuições granulométricas do solo (teores de argila, silte e areia) e teor de matéria orgânica (MO).

A Ds é um atributo físico do solo bastante dinâmico, pois depende fortemente de condições estruturais do solo, que por sua vez são influenciadas por diversos fatores, tais como o pisoteio de animais e o manejo agrícola (ZHOU et al., 2008). No entanto, por ser um atributo de fácil determinação, a Ds está presente como atributo preditor em diversos estudos de desenvolvimento de funções de pedotransferência (FPTs) (AULER et al., 2017; LIMA, 2016; NASRI et al., 2015; VEREECKEN et al., 1990).

A concentração das distribuições granulométricas estão amplamente disponíveis em estudos relacionados ao solo. Em FPTs, a sua utilização varia em diferentes classes texturais, entretanto, são comumente encontradas nos estudos com as distribuições dos grãos em tamanho argila, silte e areia (CAMPBELL; SHIOZAWA, 1994; COSBY et al., 1984; DANE; PUCKETT, 1994; JULIÀ et al., 2004; PATIL; SINGH, 2016; PUCKETT et al., 1984; PUCKETT et al., 1985; SAXTON et al., 1986; SHWETTA; PRASANNA, 2018). A porosidade também está evidenciada como atributo preditor de FPTs em diversos estudos, quando combinada com as distribuições granulométricas (SWETHA; PRASANA, 2018; VEREECKEN et al., 1990). O teor de matéria orgânica também é frequentemente utilizado em combinação com as distribuições granulométricas para desenvolvimento de FPTs para estimar a Ksat (JORDA et al., 2015; LIAO et al., 2011), densidade do solo (VEREECKEN et al., 1990) e porosidade (SWETHA; PRASANA, 2018).

4.3 Atributos topográficos do solo

Os atributos topográficos do relevo são informações do terreno que podem ser extraídas a partir do modelo digital de elevação (MDE) (MOORE et al., 1993), nas quais destaca-se elevação, declividade, curvatura e aspecto. As relações entre os atributos físico-hídricos do solo e os atributos topográficos vêm sendo cada vez mais estudadas por auxiliarem no estudo da variabilidade da distribuição espacial de características do solo (BECKER et al., 2018).

Diversos estudos evidenciam a influência dos atributos topográficos na Ksat

(CASTELLINI et al., 2016; LEIJ et al., 2004; PACHEPSKY et al., 2001; TIMLIN; RAWLS, 2001; TOMER et al., 2006). Dentre eles, destacam-se Baiamonte et al. (2017), que concluíram que atributos topográficos, como a elevação e a declividade, impactam nos valores de Ksat, sendo que ambas obtiveram relações parecidas na estimativa da Ksat. Dongli et al. (2017) corroboram com a afirmativa supracitada em seu estudo ao demonstrarem que a elevação teve a melhor correlação dentre os atributos topográficos estudados.

A curvatura é definida como a medida da taxa de variação do gradiente de potencial e é um atributo topográfico menos frequente no desenvolvimento de FPTs. No entanto, a curvatura é um importante atributo, sendo um dos controladores de fluxo de água superficial no solo e transporte de solutos em uma área (CHAGAS et al., 2013). Leij et al. (2004) demonstraram a viabilidade do uso dos atributos topográficos (elevação, declividade, aspecto e potencial de radiação solar) em conjunto com os atributos básicos do solo no desenvolvimento de FPTs.

4.4 Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo

A variabilidade espacial dos AFHS, devido à complexidade das interações dos processos pedogenéticos, tais como clima, relevo, organismos e diferentes usos e ocupações do solo, apresenta, em escalas distintas, diferentes padrões de distribuição espacial (BITENCOURT et al., 2018; REICHARDT; TIMM, 2020).

A caracterização dessa variabilidade espacial dos AFHS é importante para o entendimento e modelagem de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica (DONGLI et al., 2017). Nielsen e Wendroth (2003) afirmam que caracterização do padrão espacial dos AFHS possibilita a discretização de subáreas que poderão ser tratadas de uma forma individualizada.

Nesse contexto, a variabilidade espacial pode ser estudada com a utilização da estatística clássica, que considera as amostras independentes entre si, por meio das análises de séries Temporais/Espaciais, bem como da geoestatística que é baseada no fenômeno de dependência espacial (PAUL et al., 2018; REICHARDT; TIMM, 2016). Contudo, o estudo da caracterização da variabilidade espacial dos AFHS já vem sendo amplamente difundido na identificação de zonas de manejo (AQUINO et al., 2015; CARVALHO et al., 2014; CHIBA et al., 2010; MONTANARI et al., 2010; MONTANARI et al., 2015; ZONTA et al., 2014).

4.5 Funções de pedotransferência

As funções de pedotransferência (FPTs) são métodos empregados para estimar um atributo de difícil aquisição por meio de uma forma rápida e com alta acurácia de estimação (BOUMA, 1989; MCBRATNEY et al., 2002; PACHEPSKY; RAWLS, 2004; TOMASELLA; HODNETT, 1998). Os procedimentos para obter essas funções foram primeiramente discutidos por Lamp e Kneib (1981), que definiram as pedofunções, posteriormente, o termo “funções de transferência” foi introduzido por Bouma e Van Lanen (1987) para evitar associações equivocadas.

As FPTs podem ser compreendidas também como vetores estatísticos utilizados para estimar os AFHS de forma indireta (SILVA et al., 2017), empregando para isso atributos do solo disponíveis e de fácil aquisição, tais como frações de distribuições granulométricas, teor de carbono orgânico, densidade do solo, entre outros (BARROS et al., 2013; JANA; MOHANTY, 2012). Em escala de bacia hidrográfica é difícil quantificar com eficácia a variabilidade dos atributos do solo, devido ao tamanho da área amostral (MEDEIROS, 2012). Portanto, as FPTs surgem como uma ferramenta eficiente para estimar os AFHS e subsidiar o estudo da variabilidade espacial de forma rápida e econômica.

No Brasil têm sido crescente o desenvolvimento de FPTs para estimar AFHS, a saber: Arruda et al. (1987), Giarola et al. (2002), Medeiros et al. (2014), Oliveira et al. (2002), Reichert et al. (2009), Tomasella et al. (1998, 2000) e Ottoni et al. (2018) desenvolveram um estudo de criação de um banco de dados de solos brasileiros (HYBRAS) para o desenvolvimento e teste de FPTs pré-existentes, com base em uma gama de trabalhos publicados para estimação da retenção de água no solo.

As FPTs podem ser classificadas, conforme Wösten et al. (1995), em dois tipos: classes e contínuas. As FPTs de classes predizem atributos com base nas classes as quais o solo pertence e as FPTs contínuas predizem atributos como funções contínuas de variáveis medidas. Já Vereecken et al. (2010) propuseram em seu estudo a classificação das FPTs em outros dois tipos: paramétricas e pontuais. As FPTs paramétricas estimam os parâmetros empíricos que descrevem os dados observados dos atributos em estudo (COSBY et al., 1984; MCCUEN et al., 1981; VEREECKEN et al., 1989; WÖSTEN; VAN GENUCHTEN, 1988), enquanto as FPTs pontuais estimam o conteúdo de água em diferentes potenciais de água no solo (BRAKENSIEK, 1982; JONG; LOEBEL, 1982; RAWLS; PUCKETT et al., 1985).

Muitas FPTs desenvolvidas se baseiam em métodos de regressões estatísticas, onde as estimativas dos AFHS são baseadas em atributos contínuos do solo (COSBY et al., 1984; PACHEPSKY et al., 1982; PACHEPSKY; RAWLS, 2004; PUCKETT et al., 1985; RAWLS; BRAKENSIEK, 1985; VEREECKEN et al., 1989; WOSTEN et al., 1997; WOSTEN et al., 1999). Os atributos contínuos utilizados nas regressões são os atributos básicos do solo de fácil determinação, tais como frações de distribuições granulométricas, densidade do solo e teor de matéria orgânica (BOTULA et al., 2014; NASRI et al., 2015; NEBEL et al., 2010; PATIL; SINGH, 2015; SILVA et al., 2017).

Segundo Vereecken e Herbst (2004), as regressões estatísticas utilizadas no processo da relação entre variáveis possuem três objetivos: (i) planejamento e especificação do modelo de regressão a partir dos objetivos específicos; (ii) estimar um determinado atributo; e (iii) estimativa do atributo dependente a partir dos atributos independentes. Conforme Silva (2015), uma questão importante para um bom desenvolvimento de FPTs é a qualidade da base de dados utilizada no estudo. Quanto maior o número de amostras e melhor a qualidade dos atributos, mais representativo será o local avaliado e, conseqüentemente, menor será a incerteza da estimativa.

A Ksat têm sido um dos principais objetos de estudo das FPTs em decorrência de sua alta variabilidade espacial. Dentre os estudos estimando a Ksat, pode-se destacar Brakensiek et al. (1984), utilizando como atributos preditores a porosidade total e os teores de argila e areia do solo. Cosby et al. (1984) desenvolveram uma FPT a partir de 1448 amostras de solo referentes à 23 estados dos Estados Unidos e utilizaram como atributos preditores os teores de argila e areia do solo. Puckett et al. (1985) utilizaram 42 amostras de solos oriundos da planície costeira do Alabama e utilizaram como atributo preditor somente o teor de argila do solo. Saxton et al. (1986) utilizaram 230 amostras de solo encontradas em Rawls et al. (1982) e utilizaram como atributos preditores os teores de argila e areia do solo. Vereecken et al. (1990) utilizaram 127 amostras de solo na Bélgica para o desenvolvimento da FPT e utilizaram como atributos preditores a densidade do solo, os teores de argila, areia e matéria orgânica do solo. Campbell e Shiozawa (1994) utilizaram as mesmas 42 amostras de solo do Alabama de Puckett et al. (1985), no entanto, os atributos preditores utilizados no desenvolvimento da FPT foram os teores de argila e areia do solo. Dane e Puckett (1994) desenvolveram a FPT utilizando 577 amostras de solo na costa do Alabama e utilizaram como atributo preditor o teor de argila. Julià et al. (1994)

desenvolveram as FPTs utilizando um banco de dados de 2178 dados coletados na Península Ibérica da Espanha, desenvolvido por Trueba et al. (2000), e utilizaram como atributos preditores os teores de argila, areia e matéria orgânica.

Além de estimar os AFHS (AQUINO et al., 2015; CARVALHO et al., 2014; CHIBA et al., 2010; MONTANARI et al., 2010; MONTANARI et al., 2015; ZONTA et al., 2014), as FPTs são capazes de capturar e descrever a estrutura da dependência espacial dos AFHS (NEBEL et al., 2010; ROMANO, 2004). Técnicas geoestatísticas têm sido utilizadas como meio de avaliação de desempenho de FPTs ao capturar com precisão a estrutura da dependência espacial dos AFHS, por meio da modelagem variográfica (NEBEL et al., 2010; HUANG et al., 2016; PRINGLE et al., 2007; ROMANO; SANTINI, 1997). Romano e Santini (1997) e Nebel et al. (2010) testaram FPTs pré-existent na literatura e as avaliaram por meio da caracterização da variabilidade espacial do conteúdo de água no solo e destacam que a FPT que teve melhor capacidade de estimar o conteúdo de água no solo não foi a mesma que teve a melhor capacidade de reproduzir a variabilidade espacial do atributo. Lima (2016) estudou o comportamento da variabilidade espacial dos dados de umidade observados em campo e estimados por FPTs e a maioria das FPTs desenvolvidas não apresentaram boa acurácia nas estimativas, sendo que os dados estimados apresentaram menor variabilidade que os dados observados em campo. Huang et al. (2016) caracterizaram a variabilidade e a distribuição espacial da Ksat estimada por FPTs em seu estudo. E Zhao et al. (2016) desenvolveram FPTs para a estimativa da Ksat por meio de regressão linear múltipla e a melhor FPT foi composta pela densidade do solo e os teores de argila e silte.

4.6 Método de desenvolvimento de funções de pedotransferência

A regressão linear múltipla (RLM), como método de desenvolvimento de FPTs, possui a vantagem de ser uma metodologia simples que busca estabelecer uma relação linear entre atributos independentes (atributos preditores) e o atributo dependente, sendo esse o atributo que se deseja estimar (NEYSHABOURI et al., 2014).

Existem diversas metodologias para selecionar os atributos preditores. Soares (2013) desenvolveu FPTs pontuais por meio da técnica de RLM para estimar os pontos da curva de retenção de água no solo em 13 bancos de dados, utilizando o

procedimento *stepwise* como meio de seleção de atributos preditores. Julià et al. (2004) utilizaram a estatística como meio de seleção de atributos preditores por meio da análise de correlação de *Pearson*. Esses últimos autores selecionaram como atributos preditores para o desenvolvimento de FPTs os atributos físicos que apresentaram as maiores correlações com o atributo que se desejava estimar em solos da região espanhola da Península Ibérica, a partir de uma base de dados com 2178 observações.

O desenvolvimento de FPTs para a estimativa dos AFHS por meio de RLM vem sendo cada vez mais difundido em vários países (BOTULA et al. 2014; LIAO et al. 2011). No Brasil, Medeiros (2012) aplicou a técnica de RLM no desenvolvimento de FPTs para estimar os parâmetros do modelo de Van Genuchten nos municípios de Nova Ipixuna, Parauapebas e Pacajá, no estado do Pará. E Lima (2016) aplicou a técnica de RLM no desenvolvimento de FPTs para estimar o conteúdo de água no solo para solos no município de Petrolina, no estado do Pernambuco, a partir de um banco de dados com 121 observações. Na Venezuela, as equações de regressão linear múltipla foram desenvolvidas para estimar o conteúdo de água no solo para um banco de dados de solos representativos das Planícies Ocidentais por Delgado e Barreto (1988) e solos aluviais representativos da bacia do Lago de Valência por Pineda e Vilorio (1997). Zhao et al. (2016) desenvolveram FPTs por meio da técnica de RLM para estimar a Ksat em solos representativos de um Platô na China.

4.7 Métodos geoestatísticos

A geoestatística é o ramo da estatística no qual se estuda e caracteriza as variáveis aleatórias que possuem estrutura ou correlação espacial. Portanto, leva-se em consideração as posições espaciais das variáveis nas modelagens. Conforme Matheron (1962), a geoestatística representa fenômenos naturais, nos quais seus atributos variam em função do espaço e/ou tempo.

Portanto, a análise geoestatística permite capturar a existência de dependência espacial entre observações, tornando-se uma ferramenta importante na caracterização da variabilidade espacial dos AFHS (CARVALHO et al., 2002; VIEIRA, 2000; VIEIRA et al., 2002). A análise geoestatística tem se mostrado uma excelente ferramenta na caracterização da variabilidade espacial e no mapeamento da distribuição espacial de atributos do solo, por meio da estimativa dos atributos em

locais desconhecidos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Os métodos que seguem os princípios da geoestatística estão fundamentados na teoria das variáveis regionalizadas (VR's), conforme proposto por Matheron (1963). Os fenômenos naturais podem assumir dois aspectos contraditórios, aleatórios (ou processo estocástico) e estruturados (ou processo determinístico). O aspecto aleatório representa a possibilidade de algumas variáveis assumirem quaisquer valores seguindo a lei de distribuição de probabilidade, já no aspecto estruturado as variáveis assumem valores de forma estruturada, seguindo uma certa lei no espaço, não envolvendo qualquer interpretação probabilística (ANDRIOTTI, 2013).

A variação espacial de uma VR, conforme Burrough et al. (2015), é expressa pela soma de três componentes: (i) componente estrutural, que está associado a um valor médio ou tendência constante; (ii) componente aleatória, que é espacialmente correlacionado ou estruturado, variação da variável regionalizada; e (iii) ruído ou erro residual, correspondendo à erros de medições e inferências, sendo espacialmente não correlacionado. Portanto, a variação da variável regionalizada é descrita por uma função aleatória (FA), ou seja, um conjunto infinito de VA's constituem as chamadas FA's (ANDRIOTTI, 2013), sendo que as VA's podem assumir ainda, dentro do conjunto FA, componentes aleatórios e estruturados (VR's) (HUIJBRETS, 1975). Uma VR ($Z(x)$) é uma VA que assume diferentes valores $z(x)$, de acordo com a sua posição georreferenciada x em alguma região (JOURNEL; HUIJBRETS, 1978), ou seja, a VR pode ser considerada uma realização particular da VA em uma localização no espaço específica e para as variáveis serem aplicadas ao estudo geoestatístico, hipóteses restritivas devem ser aceitas.

A hipótese de estacionariedade permite contornar a não repetibilidade no tempo pela recorrência no espaço, pois em um processo estacionário o seu desenvolvimento no espaço ocorre de maneira relativamente homogênea. Sendo assim, para atender a estacionariedade, a variável em estudo é homogênea estatisticamente, independente da origem adotada (ANDRIOTTI, 1988). Já a não-estacionariedade não possui a homogeneidade estatística e depende da origem adotada (GARCIA, 2015). Sendo assim, duas hipóteses que devem ser atendidas são:

(i) Estacionariedade de 1ª ordem: caracteriza-se como uma variável aleatória que possua esperança matemática constante, independentemente de sua origem no espaço e, conseqüentemente, possua a mesma média para toda região em estudo. Além disso, admite-se que a média amostral é igual à média populacional

(REICHARDT; TIMM, 2020);

(ii) Estacionariedade de 2ª ordem: se o segundo momento em relação à origem é constante, tem-se então que, além da média, a variância é constante, independente da origem no espaço ou no tempo (MATHERON, 1963).

As hipóteses de estacionariedade devem ser atendidas com o objetivo de identificar tendências (*Trend*). Após a identificação, o *trend* deve ser removido para satisfazer as condições de estacionariedade. A presença de *trends* e heterogeneidade da VR em determinadas direções causam uma deriva, ou seja, a esperança matemática não é constante em todo o campo de estudo, caracterizando uma FA não-estacionária (ANDRIOTTI, 2013). Após atendida a estacionariedade de 2ª ordem, infere-se a existência de variância.

Em suma, um processo é considerado estacionário quando o seu grau de variação é relativamente homogêneo no espaço e/ou tempo. A estacionariedade é um dos princípios que sustentam a geoestatística. Pode-se representar o processo aleatório, conforme a Equação 2, seguindo Oliver e Webster (2014).

$$Z(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad (2)$$

$Z(x)$ é um processo (função) randômico, μ é a média do processo, considerado estacionário, e $\varepsilon(x)$ é um processo intrinsecamente estacionário com média zero. A covariância $C(h)$ entre duas variáveis aleatórias $[Z(x), Z(x+h)]$ é dada por meio da Equação 3.

$$C(h) = E[Z(x), Z(x + h)] \quad (3)$$

Que é equivalente a Equação 4.

$$C(h) = E[\{Z(x) - \mu\}\{Z(x + h) - \mu\}] = E[Z(x)Z(x + h) - \mu^2] \quad (4)$$

Nas equações acima, h (denominado de *lag* em inglês) é a distância de separação entre os pares de observações de $Z(x)$ e $Z(x + h)$ medidos nos locais x e $x+h$. E denota a esperança matemática.

4.7.1 Modelagem variográfica

A estrutura dos fenômenos espacializados é refletida por uma função intrínseca denominada de semivariograma e é definida como a variância do erro de estimação do atributo desconhecido em $(x+h)$ com auxílio do ponto dado em (x) (ANDRIOTTI, 2013). A função semivariograma mede as semivariâncias de pares de amostras separados por uma distância h (OLIVER; WEBSTER, 2014) e pode ser determinada em uma direção espacial predefinida (STURARO, 2015).

A função semivariância pode ser entendida como a estimativa da semivariância experimental em função da distância de separação entre os pares de observações de uma dada variável medida em x e $x+h$. E pode ser entendida como a diferença quadrática média entre todos os pares de dados do componente, sendo expressa matematicamente por meio da Equação 5 (ANDRIOTTI, 2003; TRIPATHI et al., 2015; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(x+h) - z(x)]^2}{2n(h)} \quad (5)$$

A Equação 5 foi proposta por Matheron (1963), por isso é chamada na literatura de estimador clássico de Matheron, onde $n(h)$ é o número de pares de observações da variável Z $[z(x), z(x+h)]$ e h é a distância de separação entre os pares de observações $n(h)$, medidos em x e $x+h$. Frequentemente, quando se trabalha com dados de solo, podem-se ajustar aos pontos de semivariograma experimental três modelos (funções) teóricos (Gaussiano, Exponencial e Esférico). A partir do ajuste do modelo ao semivariograma experimental, obtém-se os parâmetros alcance (a), patamar (c_0+C), contribuição (C) e efeito pepita (c_0), conforme Figura 1 (REICHARDT; TIMM, 2020).

a priori da variável estudada. Caso isso ocorra, o semivariograma não será representativo.

A contribuição (C) é a componente estrutural, ou seja, é a porção da variância explicada pela continuidade espacial e numericamente representa a diferença entre o patamar (c_0+C) e o efeito pepita (c_0) (REICHARDT; TIMM, 2020).

Em suma, essa modelagem variográfica possibilita interpretar os atributos do solo com base na sua estrutura de dependência espacial, possibilitando entender a continuidade espacial (ALMEIDA et al., 2017). O comportamento da estrutura de dependência espacial dos conjuntos de dados pode ser avaliado pelo cálculo do semivariograma experimental, o qual é ajustado ao semivariograma teórico.

A modelagem do semivariograma é realizada por meio do ajuste de uma função ou curva atenuada entre os pontos de semivariância experimental, de modo que a curva ajustada represente os principais padrões de continuidade espacial do fenômeno em estudo (SOARES, 2014). O modelo teórico ajustado deve ser o mais próximo possível do semivariograma experimental que descreve o fenômeno no campo (REICHARDT; TIMM, 2020). O ajuste é um processo dito supervisionado, pois é realizado por tentativa e erro, dependendo da experiência do pesquisador (BENTO, 2018; OLIVER; WEBSTER, 2014).

Além disso, pelo fato do estimador de Matheron (Equação 5) ser baseado na média dos quadrados das diferenças entre os pares de observações, valores anômalos situados nos extremos de uma distribuição assimétrica poderão gerar erros sistemáticos (SOARES, 2014). O ajuste do modelo de semivariograma deve ser realizado de tal maneira que a função matemática represente continuamente o comportamento dos pontos de semivariância experimental. A seguir é apresentado um exemplo de um ajuste de semivariograma teórico ao semivariograma experimental (Figura 2) (REICHARDT; TIMM, 2020).

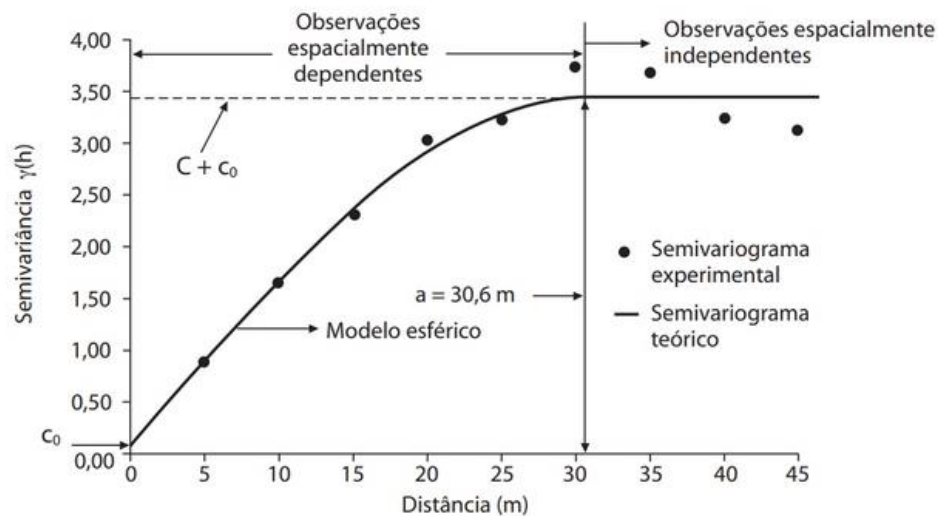


Figura 2 - Semivariograma experimental e teórico.
 c_0 : Efeito pepita; $C+c_0$: Patamar; a : alcance.
 Fonte: Reichardt e Timm (2020)

4.7.2 Grau de dependência espacial

O grau de dependência espacial (GDE) é calculado a partir do semivariograma modelado, seguindo a metodologia proposta por Cambardella et al. (1994):

$$GDE = \frac{c_0}{c_0 + C} \cdot 100\% \quad (6)$$

O GDE representa o percentual de variância não explicada, representado pelo efeito pepita. Conforme Cambardella et al. (1994), valores de GDE menores que 25% significam que a variável apresenta um grau forte de dependência espacial, entre 25 e 75% indicam que a variável apresenta um grau moderado de dependência espacial e maiores que 75% indicam que a variável possui um grau fraco de dependência espacial. Aquino et al. (2014) afirmam que menor será a variância da estimativa e maior será a confiança do valor estimado quando o GDE da variável for classificado como forte.

4.7.3 Krigagem ordinária (KO)

A krigagem ordinária (KO) é considerada uma boa metodologia de interpolação de dados, que utiliza dados tabular e a posição geográfica desses para calcular as

interpolações. A KO baseia-se no princípio da Primeira Lei de Geografia de Tobler, onde unidades de análise mais próximas entre si são mais parecidas do que unidades mais afastadas. De maneira sucinta, a KO utiliza funções matemáticas para acrescentar pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições mais distantes, criando assim os novos pontos interpolados com base nessas combinações lineares de dados.

A KO é um método de estimativa local, resultante da combinação linear dos valores em sua vizinhança dentro de um raio de influência determinado pela modelagem variográfica, no qual tem valor igual ao alcance. O valor no qual deseja-se estimar (x_0) é determinado através da Equação 7 (REICHARDT; TIMM, 2020).

$$Z_{ko}^*(x_0) = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

$Z_{ko}^*(x_0)$ é definido como a estimativa de uma variável Z em um local não amostrado x_0 do domínio, representando a posição em que é realizada a estimativa. $Z(x_i)$ é definido como uma variável aleatória que assume diferentes valores observados de Z em função da posição (x_i) dentro da área experimental. Já λ_i são os pesos ou ponderadores associados a cada valor observado $z(x_i)$ usado na estimativa de $Z_{ko}^*(x_0)$.

A KO considera os parâmetros ajustados na modelagem variográfica para a realização da estimação (TRIPATHI et al., 2015). Portanto, na estimativa, somente as observações da variável que estão dentro do raio de influência definido pelo alcance atribuirão peso no estimador (ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Destaca-se que a variância da krigagem reflete a configuração espacial dos pontos na malha amostral e não a incerteza da estimativa, possuindo um caráter homocedástico (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Portanto, se uma malha amostral possui a mesma configuração espacial entre as amostras e as mesmas distâncias de pontos que se deseja estimar (mesma geometria), independente da variabilidade local das amostras, a técnica produzirá de forma rigorosa a mesma variância de estimação (SOARES, 2014).

A aplicação da krigagem ordinária pode auxiliar os agricultores nas práticas de manejo e conservação do solo e da água, nas aplicações de produtos agrícolas para correção do solo e na verificação de padrões da variabilidade espacial dos atributos do solo (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos utilizando técnicas geoestatísticas para quantificar e mapear a distribuição espacial dos atributos do solo. Huang et al. (2016) estudaram a estrutura de dependência espacial da Ksat por meio do semivariograma, encontrando um GDE fraco para a Ksat. O padrão de distribuição espacial da Ksat foi mapeado por meio da krigagem ordinária.

Almeida et al. (2018) caracterizaram a variabilidade espacial da Ksat sob diferentes manejos no município de Cruz das Almas, Bahia. Papanicolaou et al. (2015) verificaram diferentes padrões de distribuição espacial da Ksat para diferentes usos e ocupação do solo, usando técnicas geoestatísticas em uma sub-bacia hidrográfica no sudeste dos Estados Unidos. Guimarães et al. (2016) avaliaram a eficiência da malha amostral na identificação da estrutura de dependência espacial da Ksat, por meio da modelagem variográfica no município de Viçosa, Minas Gerais. Lima (2016) aplicou a análise geoestatística para avaliar a estrutura de dependência espacial dos valores de conteúdo de água no solo estimados por FPTs, verificando diferenças entre os valores observados e estimados no município de Petrolina, Pernambuco. Tuchtenhagen (2018) caracterizou a variabilidade espacial e modelou as distribuições espaciais dos indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos solos na SBHSR. Soares (2018) caracterizou a variabilidade espacial de alguns atributos físico-hídricos do solo e de teores de carbono orgânico em uma bacia hidrográfica de aproximadamente 80 ha no município de Canguçu, Sul do Rio Grande do Sul. E Carvalho et al. (2002) quantificaram a variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes preparos no município de Santo Antônio de Goiás, Goiás.

5 Materiais e métodos

5.1 Caracterização da área de estudo

A sub-bacia hidrográfica Santa Rita (SBHSR), localizada na Bacia Hidrográfica do Arroio Moreira/Fragata (BHAMF), Pelotas, Rio Grande do Sul, possui aproximadamente 10,54km² (Figura 3). Encontra-se nas coordenadas planas 355168,619 L e 6495482,457 N, no sistema de projeção UTM, Zona 22S, Datum SIRGAS 2000, com uma altitude média de 108,80m. A BHAMF possui um papel fundamental no ponto de vista econômico e social para a região sul do Rio Grande do Sul, em particular para os municípios de Pelotas, Morro Redondo e Capão do Leão. A BHAMF é formada por diversas sub-bacias, cada uma com características e especificidades diferentes no que se refere ao uso e ocupação e técnicas de manejo dos recursos naturais que as compõem. Dentre as sub-bacias que compõem a BHAMF, destaca-se a sub-bacia hidrográfica Santa Rita (SBHSR), sendo o objeto desse estudo.

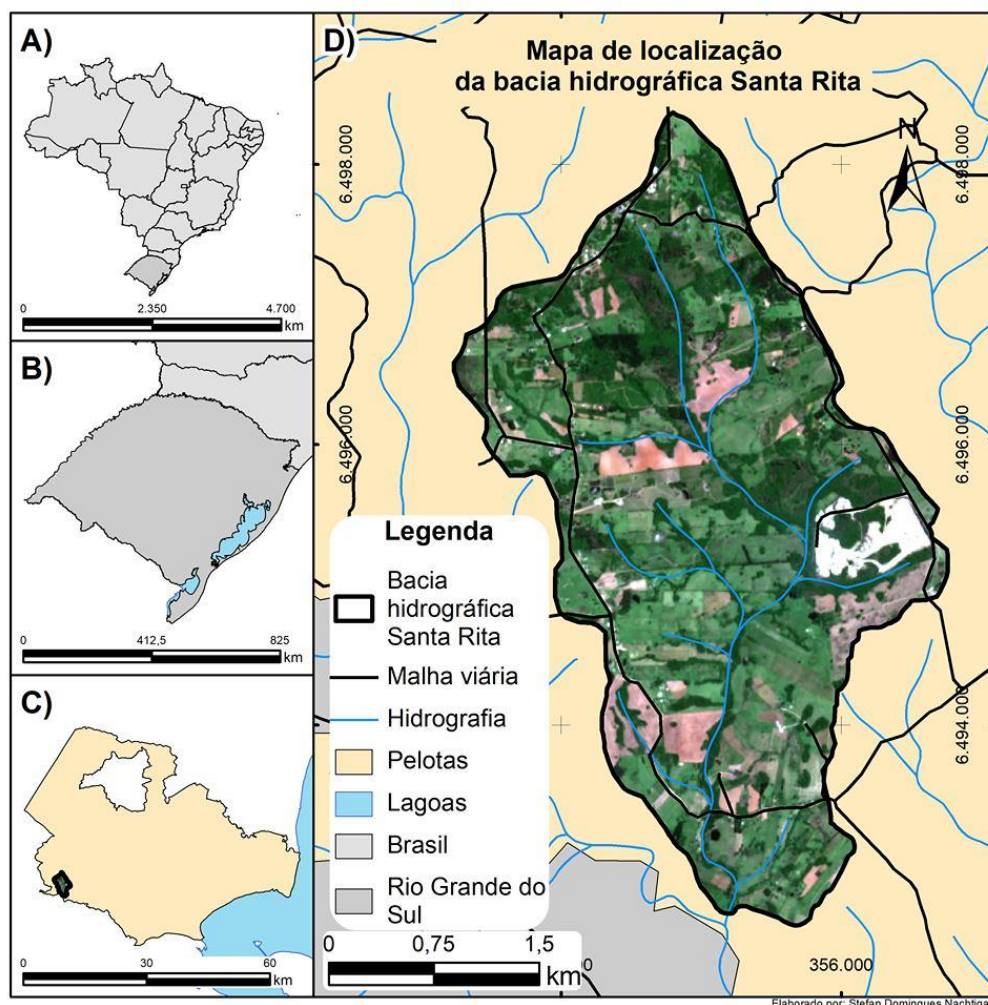


Figura 3 – Localização da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do Arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.

A: Delimitação geográfica do Brasil; B: Delimitação geográfica do estado do Rio Grande do Sul; C: Delimitação geográfica da cidade de Pelotas; D: Delimitação geográfica do sub-bacia Hidrográfica Santa Rita.

A caracterização geomorfológica do município de Pelotas, formada pelas unidades morfológicas denominadas de planície costeira e escudo cristalino Sul-Riograndense, é consequência do passado geológico do município que, segundo Rosa (1985), foi coberto pelo mar e pelo processo de erosão dos morros, resquícios de montanhas que existiam há bilhões de anos nessa região.

Com relação as altitudes do relevo de Pelotas, essas aumentam de Sudeste (área urbana) para Noroeste (área rural), apresentando uma amplitude altimétrica de zero com relação ao nível do mar à 400m (ROSA, 1985). O município de Pelotas apresenta um clima subtropical úmido, com temperatura média anual de 17,6°C. Os ventos são predominantemente do quadrante leste e sofrem influência das massas de ar Tropical Atlântica e a umidade relativa do ar fica em torno de 80% (GRUPELLI, 2003).

5.2 Definição da malha experimental e tipo de solo

Para o estabelecimento da malha experimental (grid) e a obtenção das coordenadas UTM de cada ponto (nó do grid), utilizou-se o software ArcGIS (ESRI, 2014). A demarcação de cada ponto na área experimental foi realizada com equipamento de sistema de posicionamento global (GPS) modelo GARMIN etrex 30. A malha experimental estabelecida na SBHSR contém 80 pontos com distribuição espacial irregular, sendo o menor distanciamento entre pontos de 300m (Figura 4). Os dados (observações) foram coletados durante um período de aproximadamente 15 meses, incluindo as quatro estações do ano, alternando períodos secos e chuvosos.

O mapa de solos da SBHSR foi desenvolvido com base nas informações disponibilizadas por Cunha e Silveira (1996), as quais foram digitalizadas a fim de gerar as informações digitais das classes de solo (Figura 4).

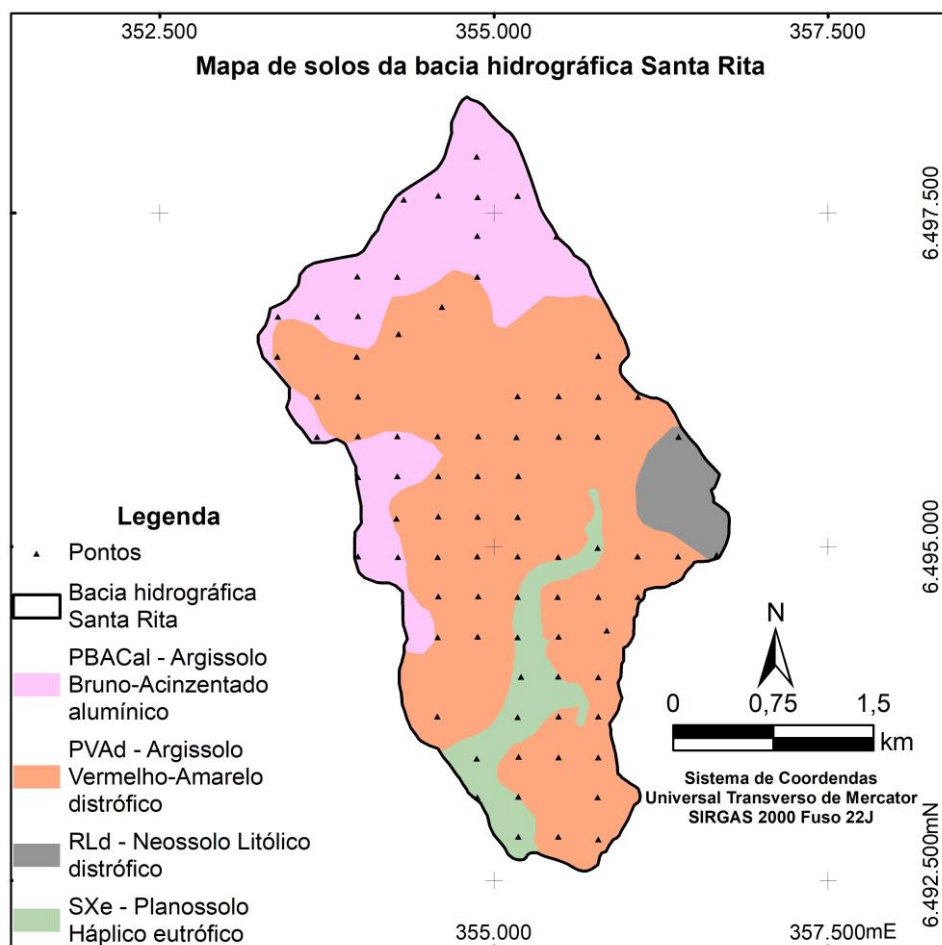


Figura 4 – Mapa de distribuição das classes de solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do Arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS. Fonte: Cunha e Silveira (1996)

A SBHSR possui variadas unidades pedológicas, sendo que os solos com maior representatividade são: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) (63,97%); Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado (RLd1) (4,26%); Argissolo Bruno-Acinzentado (PBACal) (24,10%); e Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico (SXe3) (7,77%) (CUNHA; SILVEIRA,1996). Então, grande parte da SBHSR é composta por argissolos distróficos.

5.3 Uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi desenvolvido no software ArcGIS (ESRI, 2014) e gerado com coordenadas planas em SIRGAS 2000 a partir de uma imagem do sensor Sentinel 2, por meio do site Earth Explorer e com resolução espacial de 10m. Após, a imagem foi georreferenciada e as informações do uso e ocupação do solo foram previamente obtidas em campo para os 80 pontos amostrais. Posteriormente, para a classificação dos pixels de informação foi utilizada a função *isocluster*, na qual são identificados os pontos com informações espectrais das bandas 2, 3, 4 e 8 (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) e agrupados em classes predefinidas.

5.4 Relevo da sub-bacia hidrográfica Santa Rita

Para o desenvolvimento do modelo digital de elevação do terreno (MDE), utilizou-se o software ArcGIS (ESRI, 2014). Foi utilizado o sistema de coordenadas Universal Transverso de Mercator, SIRGAS 2000, Fuso 22S. O mapa de altitude foi desenvolvido com base no MDE disponibilizado pelo Earth Explorer com uma resolução espacial de 30m. A partir do MDE foram obtidos, também, os mapas de declividade, aspecto e curvatura do relevo. O mapa de declividade foi definido de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos de 2018. O mapa de aspecto foi obtido por meio da função *Aspect* na caixa de ferramentas de análises espaciais do ArcGIS. O mapa de curvatura foi desenvolvido por meio da função *Curvature* na caixa de ferramentas de análises espaciais e gerado com base no modelo digital de elevação SRTM.

5.5 Análises laboratoriais

Em cada um dos 80 pontos da malha experimental estabelecida foram coletadas três amostras de solo com estrutura preservada na camada de solo entre 0,075-0,125m, usando anéis volumétricos com dimensões de 0,05m de altura x 0,05m de diâmetro para determinação da Ksat, seguindo a metodologia de Libardi (2005); densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro), seguindo a metodologia proposta pela Embrapa (2011). A Ksat foi determinada antes da macroporosidade em laboratório. A porosidade total foi determinada a partir de uma mesa de tensão adaptada com tensão de 0,60m de coluna d'água. As amostras em triplicatas tiveram como objetivo a determinação de um valor médio entre as três observações do atributo medido.

Foi coletada também, em cada ponto da malha experimental, uma amostra com estrutura não preservada, com auxílio de uma pá de corte. Posteriormente, as amostras com estrutura não preservada foram colocadas em tabuleiros de madeira para a secagem ao ar até atingirem o ponto de friabilidade, quando ocorre uma facilidade de ruptura da amostra de solo ao ser comprimida. Após atingir o ponto de friabilidade, as amostras foram peneiradas em uma malha de 2mm para a determinação da densidade de partículas (Dp) (FORSYTHE, 1975), frações das distribuições granulométricas (teores de argila, silte e areia, conforme o sistema de classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo) pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986), e teor de matéria orgânica (MO) seguindo a metodologia de Embrapa (2011) a partir de uma adaptação de Girotto (2007). Foram realizadas três repetições de laboratório das análises de solo com estrutura não preservada, com o objetivo de encontrar um valor médio entre as três observações. Ocorreu a presença de fragmentos grosseiros em sete pontos da malha experimental, sendo cinco em solos de campo nativo, um em solo de mata nativa e um em solo sob cultivo anual (milho).

As análises laboratoriais dos AFHS foram realizadas no Laboratório de Física do solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPeI), já a análise química de teor de matéria orgânica foi feita no Laboratório de Química do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas (FAEM-UFPeI).

5.6 Análises estatísticas

Os AFHS e topográficos da SBHSR (APÊNDICE A) foram submetidos a uma análise exploratória dos dados, por meio da estatística descritiva clássica (medidas de tendência central, medidas de dispersão, medidas de posição, medidas de forma e teste de normalidade) (REICHARDT; TIMM, 2020). As medidas de tendência central (média e mediana) permitem verificar se os dados possuem uma tendência a normalidade, já as medidas de dispersão (desvio-padrão, variância e coeficiente de variação) inferem acerca da magnitude da variabilidade dos dados (ARAÚJO et al., 2017). O coeficiente de variação (CV) é analisado seguindo a metodologia proposta por Warrick e Nielsen (1980), que consideram: baixa variabilidade para $CV < 12\%$, intermediária variabilidade para CV de 12 a 60% e alta variabilidade para $CV > 60\%$. Medidas de posição (quartis) e outras medidas, tais como mínimo e máximo, também são determinadas para subsidiar a caracterização inicial dos dados.

A normalidade dos dados é verificada por meio do teste proposto por Shapiro-Wilk (1965), analisando o P-Valor ($P \geq 0,05$). Foi escolhido o teste de Shapir-Wilk para averiguar a normalidade devido ao número de amostras ser inferior a 100. Posterior ao teste de Shapiro-Wilk, os atributos que apresentaram tendência a não normalidade foram submetidos a transformações, a fim de normalizar as suas distribuições. Utilizou-se transformações logarítmica de base 10 ($\log(x)$), logarítmica neperiana ($\ln(x)$) e a raiz quadrada ($\text{SQR}(x)$).

Após a análise estatística univariada dos dados normalizados, os mesmos foram submetidos a análise bivariada junto à Ksat por meio da determinação dos coeficientes de correlação de Pearson, com o intuito de verificar quais atributos possuem correlação com a Ksat. O nível de significância foi de 5%. Foram analisados os P-valores das correlações, sendo que a correlação é significativa quando o P-valor $\leq 0,05$ (5%).

Foram utilizados gráficos de caixa (*boxplot*) para verificação da amplitude dos dados dos AFHS em função da variação dos diferentes usos e ocupação do solo.

5.7 Funções de pedotransferência publicadas na literatura

Existem uma gama de FPTs publicadas na literatura e ao desenvolver uma FPT espera-se que ela consiga abranger o maior número possível de classes de solo.

Nesse sentido, foram selecionadas 11 FPTs publicadas na literatura para estimar a Ksat dos solos da SBHSR, utilizando como critério de seleção das FPTs a utilização de atributos preditores de fácil determinação.

Os testes foram realizados utilizando as FPTs desenvolvidas por Puckett et al. (1985), Dane e Puckett (1994), Cosby et al. (1984), Campbell e Shiosawa (1994), Saxton et al. (1986), Brakensiek et al. (1984), Julià et al. (2004) e Vereecken et al. (1990), conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Funções de pedotransferência (FPTs) publicadas na literatura para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat).

FPT	Autores
T-1	Puckett et al. (1985)
T-2	Dane e Puckett (1994)
T-3	Cosby et al. (1984)
T-4	Campbell e Shiozawa (1994)
T-5	Saxton et. al. (1986)
T-6	Brakensiek et. al. (1984)
T-7	Julià et al. (2004)
T-8	Julià et al. (2004)
T-9	Julià et al. (2004)
T-10	Julià et al. (2004)
T-11	Vereecken et al. (1990)

5.8 Desenvolvimento de funções de pedotransferência

Para o desenvolvimento das FPTs, primeiramente foi definido o atributo predito (Ksat) no qual deseja-se estimar e os atributos preditores (atributos físico-hídricos do solo e topográficos). Foram selecionados para o desenvolvimento das FPTs, como atributos preditores, os atributos de fácil determinação e os atributos que apresentaram as maiores correlação com a Ksat.

O banco de dados foi dividido em dois subconjuntos de dados pelo método *Hold-out*, com o intuito de diminuir o viés dos modelos (RASCHKA, 2018). O primeiro subconjunto de dados, contendo 57 pontos (APÊNDICE B), foi utilizado para o desenvolvimento das FPTs e o segundo subconjunto de dados, contendo 23 pontos (APÊNDICE C), foi utilizado para a validação das FPTs desenvolvidas (Figura 5). Para cada subconjunto, os dados foram escolhidos de forma aleatoriamente casualizados.

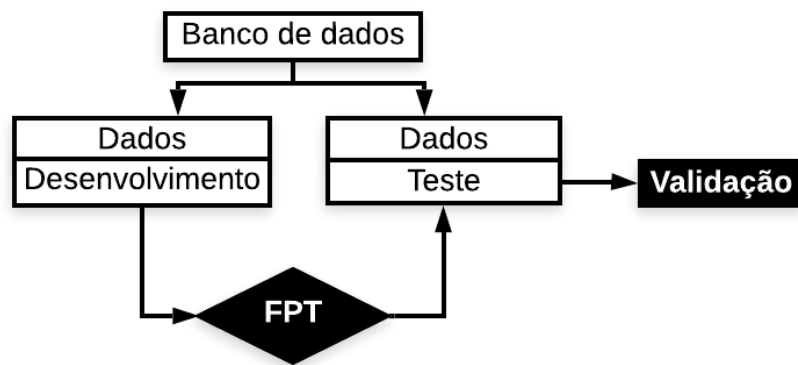


Figura 5 - Divisão do banco de dados para desenvolvimento e validação de funções de pedotransferência.

As FPTs foram desenvolvidas por meio da técnica de regressão linear múltipla (RLM), seguindo a metodologia proposta por Kutner et al. (2005), conforme representa a Equação 8.

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \dots + a_nX_n \quad (8)$$

Y denota o atributo dependente que se deseja estimar (predito). X_1 , X_2 , X_3 , X_n são os atributos independentes (preditores). E a_1 , a_2 , a_3 , a_n são os valores dos coeficientes de regressão obtidos da adequação da equação ao conjunto de dados de treinamento.

O atributo predito para todas regressões desenvolvidas foi o logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) e os atributos preditores utilizadas no modelo foram o logaritmo da macroporosidade ($\log(\text{Macro})$), densidade do solo (D_s), logaritmo do teor de argila ($\log(\text{ARG})$), teor de silte (SIL), teor de areia (ARE), logaritmo do teor de matéria orgânica ($\log(\text{MO})$), uso e ocupação do solo (USO), logaritmo da elevação ($\log(\text{Elev})$), raiz quadrada da declividade ($\text{SQR}(\text{Decl})$), Aspecto (ASP) e Curvatura (Curv).

O uso e ocupação do solo, por se tratar de uma variável qualitativa, foi transformada em variável categórica com o seu valor variando de 1 a 4. Primeiramente, determinou-se a média da K_{sat} para cada tipo de uso e ocupação, identificado em campo (Mata nativa, Cultivo anual, Cultivo perene e Campo nativo). Após, a partir da magnitude das médias de K_{sat} referentes aos diferentes usos e ocupação, foram atribuídos os índices em ordem crescente, por exemplo, as amostras correspondentes ao uso e ocupação que apresentaram a menor média de K_{sat}

correspondem ao índice categórico 1, já as amostras que correspondem ao uso e ocupação com a maior média de Ksat encontrada correspondem ao índice categórico 4.

Após a escolha dos atributos preditores, testou-se todos os cenários contendo todas as dimensões existentes entre os atributos preditores para o desenvolvimento de FPTs por RLM. Iniciou-se analisando as FPTs de 1ª ordem, nas quais o $\ln(K_{sat})$ é estimado em função de apenas um atributo preditor. Logo após foram realizadas regressões utilizando combinações de dois atributos preditores, caracterizando FPTs de 2ª ordem e assim sucessivamente, até obter FPTs de 6ª ordem, utilizando 6 atributos preditores (Figura 6).

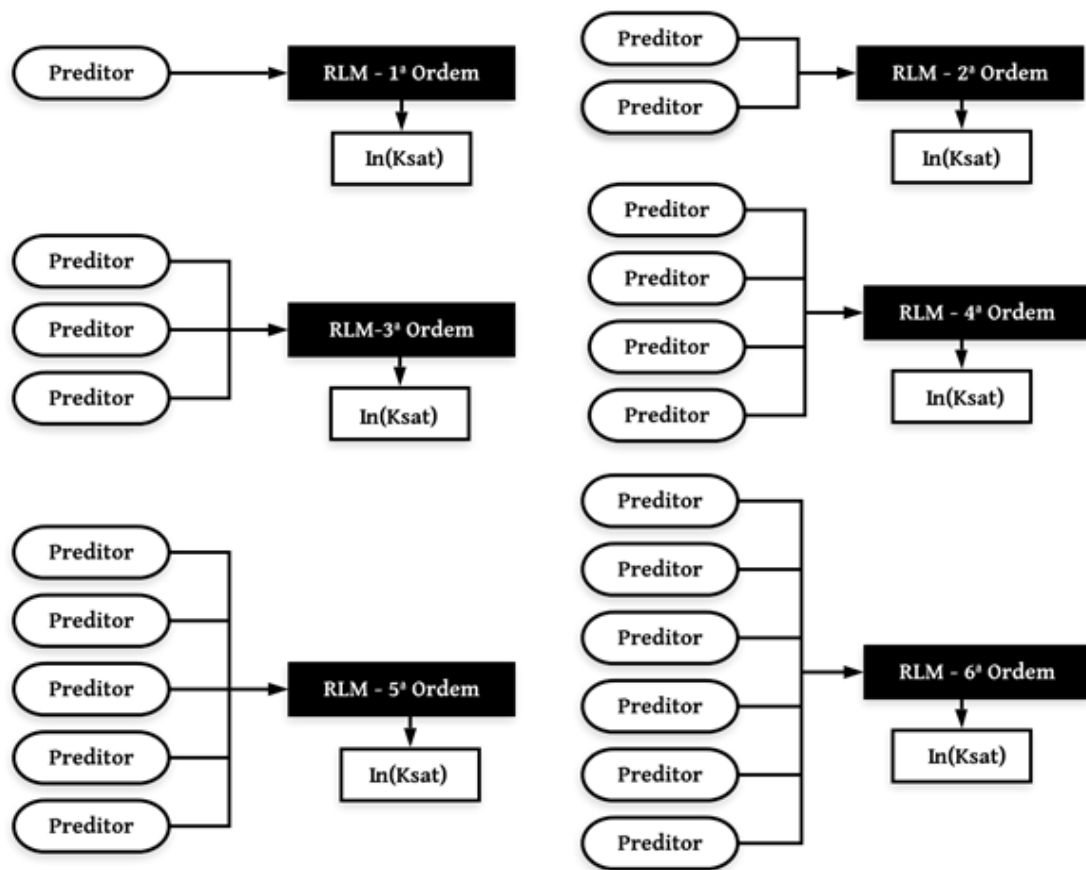


Figura 6 - Ordens das regressões lineares múltiplas (RLM) para desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimativa do logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$)

A validação das FPTs desenvolvidas (Figura 7) foi realizada utilizando o subconjunto de dados separados para teste. Realizou-se a estimativa do $\ln(K_{sat})$ para cada FPT desenvolvida. Os valores de $\ln(k_{sat})$ estimados pela FPT foram validados junto aos valores observados em campo de $\ln(K_{sat})$, por meio dos indicadores

estatísticos: erro médio, raiz quadrada do erro médio, coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e *Rank* proposto por Cornelis et al. (2001). Cabe destacar que as mesmas métricas estatísticas, com exceção do *Rank* de Cornelis et al. (2001), foram aplicadas para a avaliação das FPTs publicadas na literatura.

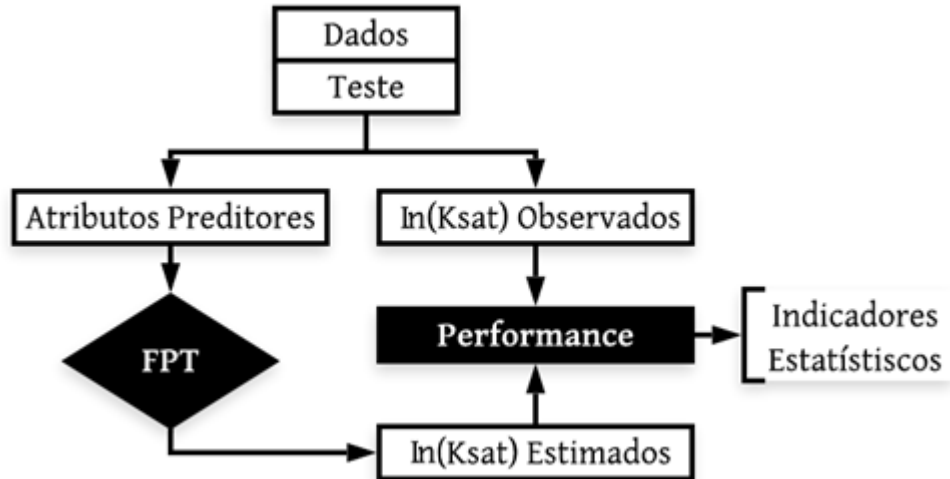


Figura 7 - Avaliação da performance das funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas para a estimativa do logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$).

O erro médio (EM) (Equação 9) indica a diferença média entre os valores observados em campo e estimados (TRIPATHI et al., 2015). Sendo que quanto mais próximo de zero, menor é o erro entre as séries de dados.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{N} \quad (9)$$

N é o número de pontos amostrais. E_i é o valor estimado do atributo pela FPT. E O_i é o valor observado do atributo no campo.

Já a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Equação 10) indica o quão próximo o modelo prevê os valores observados em campo (TRIPATHI et al., 2015). Onde quanto menor for o valor do RMSE, melhor o modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{N}} \quad (10)$$

N é o número de pontos amostrais. E_i é o valor estimado do atributo pela FPT. E O_i é o valor observado do atributo no campo.

O coeficiente de correlação (r) (Equação 11) avalia a associação entre duas variáveis (atributos observados e estimados), variando de -1 a 1, sendo esses extremos a correlação perfeita. O sinal indica direção positiva ou negativa da relação entre os atributos observados e estimados, sugerindo a força da relação eles. Um valor zero de coeficiente de correlação de Pearson indica que não há relação linear entre os atributos.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{E_i - \bar{E}}{Se} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{So} \right) \quad (11)$$

n representa o número de pares de observações, E_i é o valor estimado do atributo pela FPT, O_i é o valor observado do atributo no campo, $\bar{E}$ é a média dos valores estimados do atributo pela FPT, $\bar{O}$ é a média dos valores observados do atributo no campo, Se é o desvio padrão dos valores estimados do atributo pela FPT e So é o desvio padrão dos valores observados do atributo no campo.

O R^2 (Equação 12) é uma medida da qualidade do ajuste obtido entre os valores observados e estimados e indica a quantidade de variabilidade nos dados, que é explicada pelo modelo de regressão ajustado. Quando R^2 é igual a 1 tem-se o ajuste perfeito e quando o valor é 0 não há relação entre os valores observados e estimados analisados.

$$R^2 = (r)^2 \quad (12)$$

O *Rank* (CORNELIS et al., 2001) é determinado com base nos indicadores estatísticos EM, RMSE e R^2 . Os indicadores resultantes das FPTs foram classificados de acordo com os valores mínimos absolutos de EM e RMSE e o maior valor de R^2 . Após, o desempenho dos indicadores foi avaliado, considerando o valor 1 como critério de avaliação para selecionar a FPT de melhor desempenho e 7 para a FPT de pior desempenho. A soma dos desempenhos referentes aos indicadores foi classificada em ordem crescente, sendo o valor 1 a FPT que apresentou a menor soma (melhor desempenho) e 7 a maior soma (pior desempenho).

5.9 Análises geoestatísticas

Os dados observados em campo e estimados por meio das FPTs desenvolvidas foram submetidos a uma análise gráfica, através da confecção de *boxplots*, com o objetivo de averiguar a amplitude dos valores de $\ln(K_{sat})$ estimados pelas FPTs desenvolvidas.

As análises geoestatísticas, tais como modelagem variográfica e a estimativa por krigagem ordinária, foram realizadas com auxílio do *software* de modelagem geoestatística da Universidade de Stanford (SGeMS). O SGeMS é um pacote informático de código aberto para caracterizar o comportamento de atributos espacialmente relacionadas, fornecendo aos profissionais de geoestatística uma interface amigável e um amplo acesso aos algoritmos geoestatísticos, permitindo, ainda, a inserção e criação de novos algoritmos.

A modelagem variográfica foi realizada a fim de caracterizar a estrutura de dependência espacial dos valores de $\ln(K_{sat})$ observados em campo e dos valores de $\ln(K_{sat})$ estimados por meio das FPTs desenvolvidas. A krigagem ordinária foi aplicada com o objetivo de realizar a espacialização dos erros absolutos dos valores estimados de K_{sat} a partir das FPTs desenvolvidas, bem como a modelagem (mapeamento) da distribuição espacial dos dados de K_{sat} observados em campo e estimados a partir das FPTs desenvolvidas.

Após o desenvolvimento das FPTs foram realizadas as estimativas de $\ln(K_{sat})$ para as 80 localidades estabelecidas pela malha experimental (100% do dados), utilizando as mesmas. Com o mesmo número de dados $\ln(K_{sat})$ observados em campo e estimados pelas FPTs desenvolvidas (M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6 e M-7), foram realizadas a caracterização da estrutura de dependência espacial da $\ln(K_{sat})$ dos modelos por meio da modelagem variográfica, a partir da geração da função de semivariância (Equação 5, p. 31).

Realizou-se os ajustes dos parâmetros geoestatísticos: efeito pepita, contribuição, alcance e função de ajuste. Os dados de $\ln(K_{sat})$ observados em campo e estimados pelas FPTs desenvolvidas foram comparados a partir dos parâmetros geoestatísticos supracitados, dos patamares (efeito pepita somado com contribuição) e o GDE (Equação 6, p. 34).

O erro absoluto em cada ponto da malha experimental foi determinado por meio do valor absoluto das diferenças entre os valores de K_{sat} observados em campo e os

valores de Ksat estimados a partir das FPTs desenvolvidas. Após, realizou-se a espacialização dos erros absolutos obtidos, por meio da estimativa por krigagem ordinária (Equação 7, p. 35). A espacialização dos erros absolutos tem como finalidade avaliar de forma comparativa a FPT que obteve o menor erro de estimativa para toda a área da SBHSR.

O mapeamento da distribuição espacial do $\ln(Ksat)$ observado e $\ln(Ksat)$ estimado pelas FPTs foram realizados por meio da estimativa por krigagem ordinária (Equação 7, p. 35). Os mapas de distribuição espacial foram submetidos a uma *backtransformation*, com a finalidade de retornar a grandeza real da Ksat em $mm\ h^{-1}$. Os modelos (mapas) de distribuição espacial da Ksat estimados pelas FPTs foram comparados com o modelo de Ksat observado no campo. As etapas das análises geoestatísticas realizadas nesse estudo podem ser vistas na Figura 8.

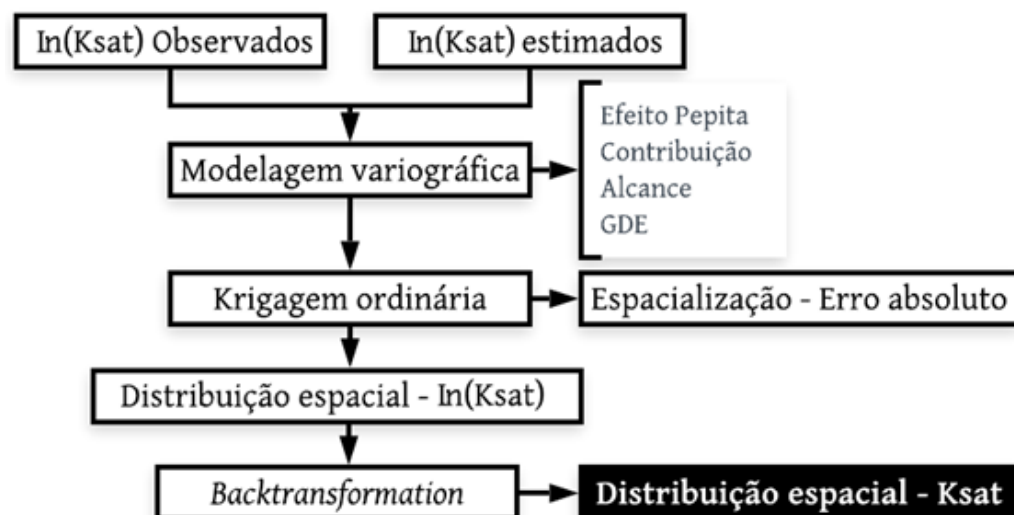


Figura 8 - Etapas das análises geoestatísticas.

6 Resultados e discussão

6.1 Uso e ocupação do solo

O uso e a ocupação dos solos da área de estudo correspondente a SBHSR (Figura 9) possuem 20,74% da sua área correspondente a mata nativa; campo nativo corresponde a cerca de 28,44%; agricultura com cultivo de milho (cultura anual) corresponde a 11,13%; e pêssigo (cultura permanente) com 37,14%. Ainda, cerca de 2,50% da área possui área industrial, na qual existe atividade de mineração em funcionamento.

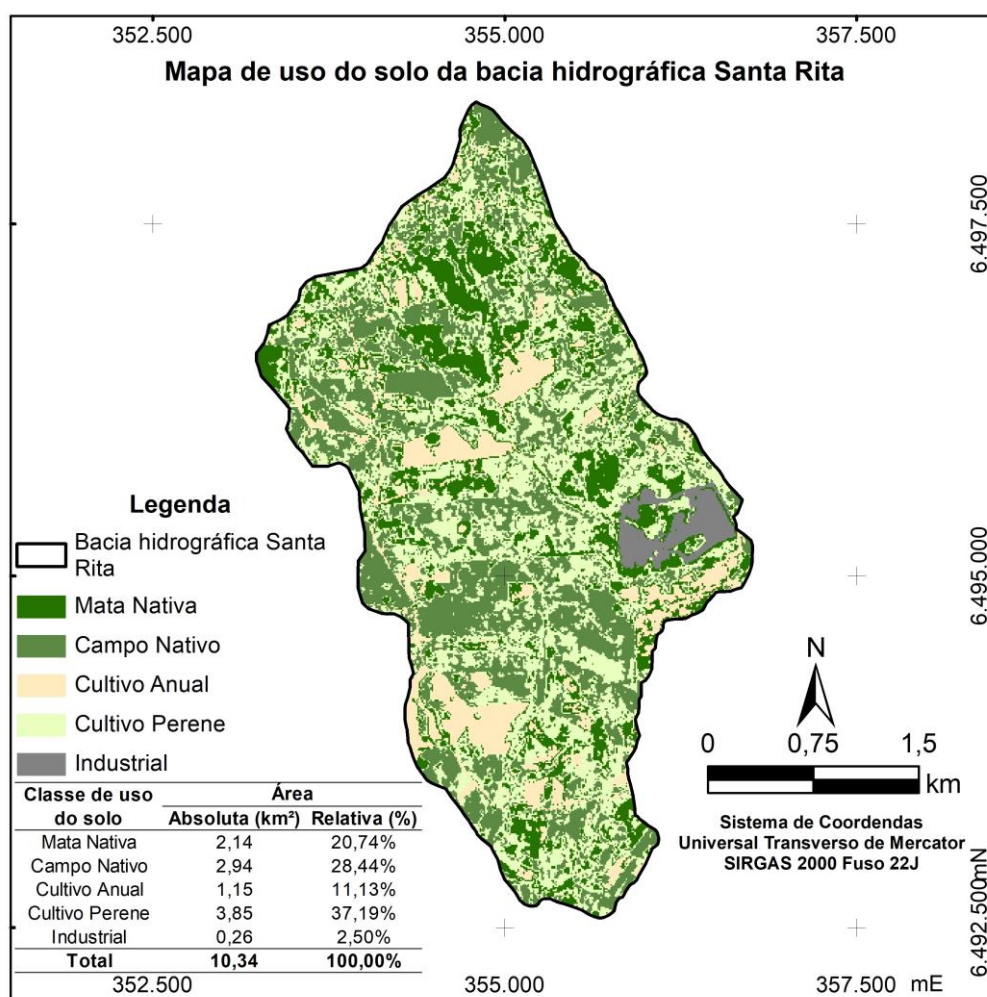


Figura 9 - Mapa de uso e ocupação do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.

6.2 Relevo da sub-bacia hidrográfica Santa Rita

A altitude máxima do relevo na SBHSR localizada na porção mais ao norte é de 228m e a altitude mínima localizada na porção mais ao sul é de 38m (Figura 10).

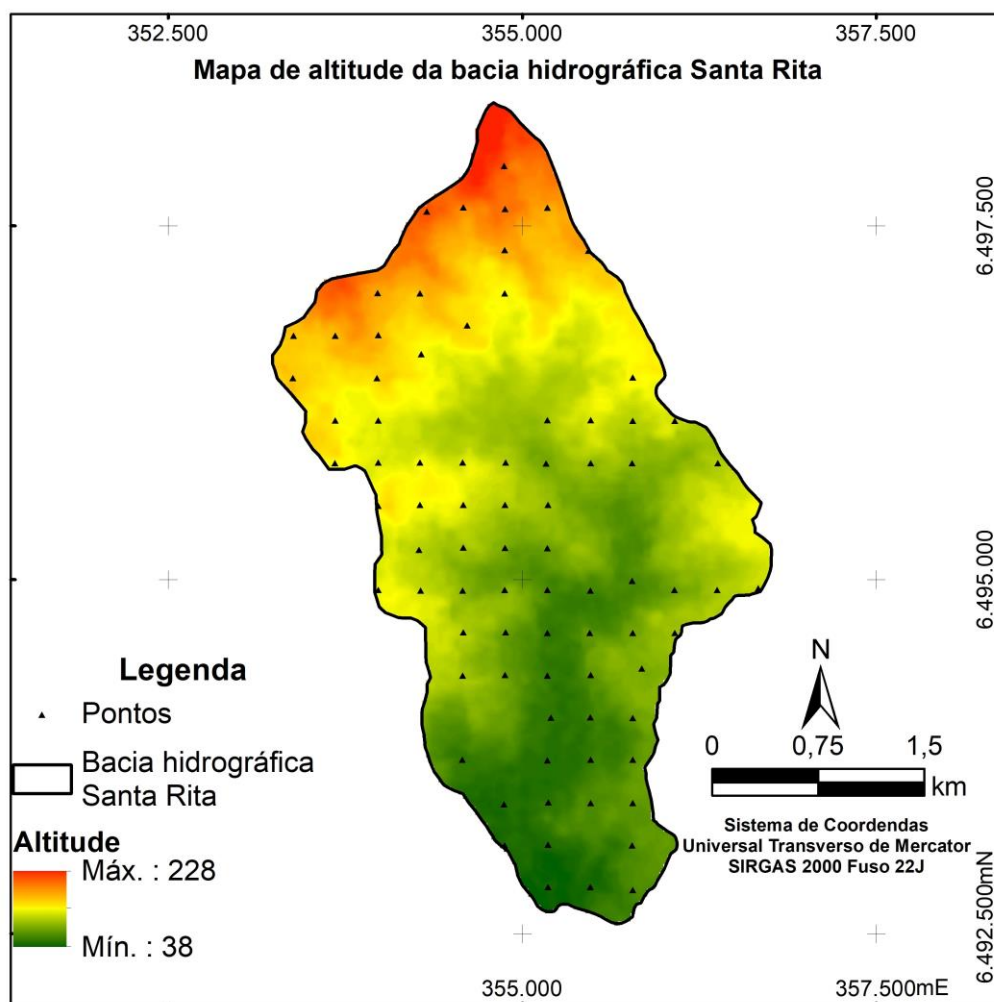


Figura 10 - Mapa de altitude da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.

Conforme demonstra a Figura 11, o relevo que predomina na SBHSR é ondulado (declividade de 8-20%), ocupando 49,71%. É seguido do relevo suave-ondulado (declividade de 3-8%), com 39,44% da área. Já o plano (declividade 0-3%) representa 6,24% da área. E o relevo forte ondulado (declividade de 20-45%) com 1,14% da área total. A área de mineração, por se tratar de solo construído, não foi considerada na avaliação.

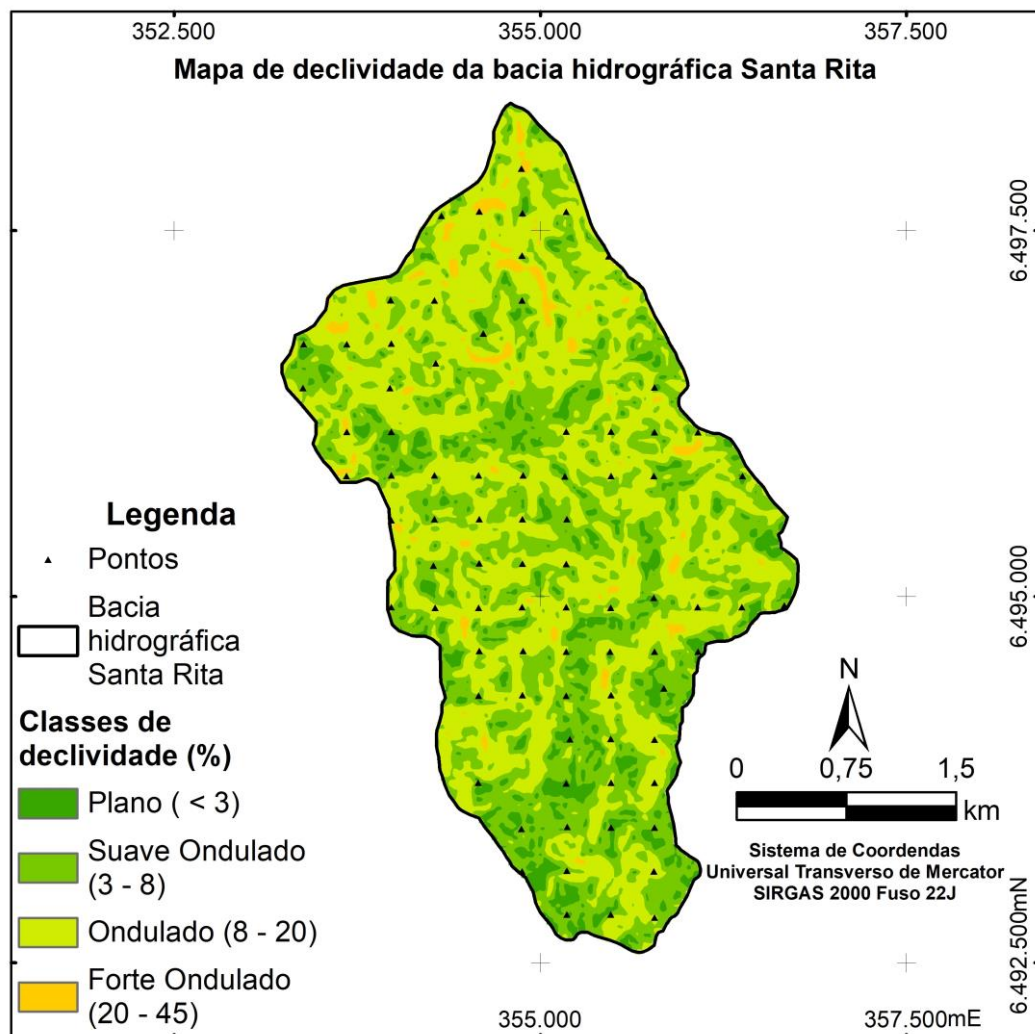


Figura 11 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.

O mapa de aspecto do relevo (Figura 12) demonstra que a região sudeste da SBHSR possui aspecto variando de Norte-Noroeste, enquanto a região oeste da SBHSR varia de leste-sudeste.

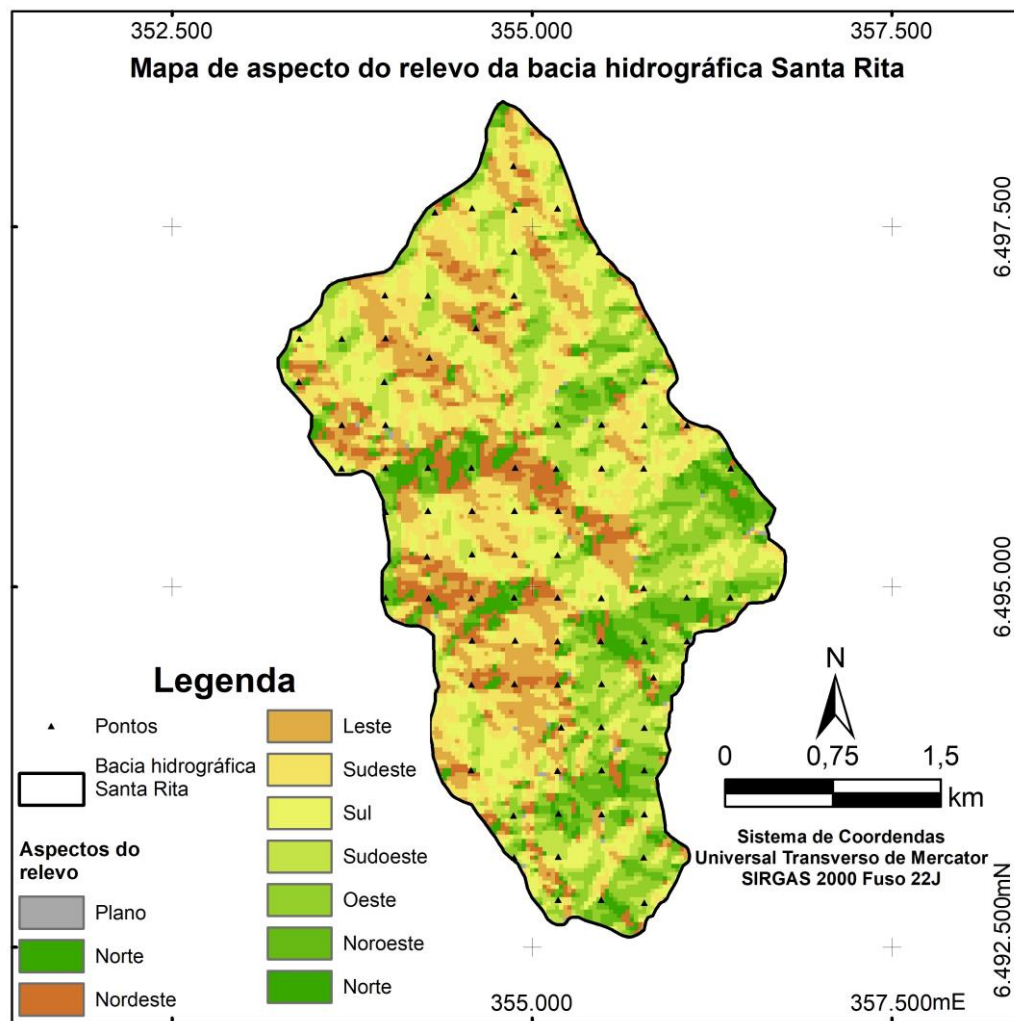


Figura 12 - Mapa de aspecto da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.

Os resultados do mapa de curvatura (Figura 13) são apresentados em valores negativos e positivos, sendo os valores negativos as superfícies côncavas, os positivos as superfícies convexas e os zeros são superfícies planas. A maior parte da SBHSR possui curvatura côncava, o que influencia diretamente o fluxo de água nas encostas, podendo interferir nos atributos físico-hídricos do solo, visto que as áreas com relevo convexo e côncavo possuem níveis diferentes de umidade.

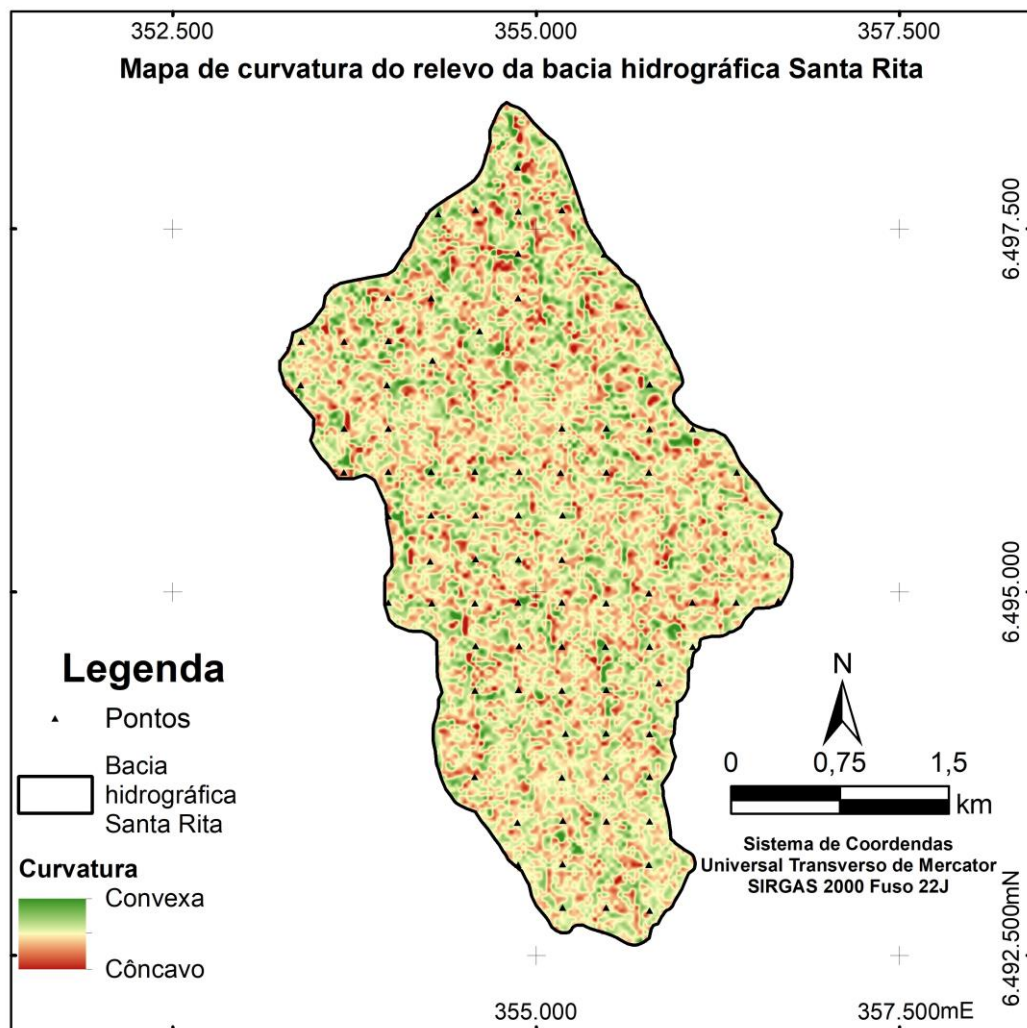


Figura 13 - Mapa de curvatura da sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.

6.3 Análise exploratória dos dados

A análise estatística descritiva, aplicada aos AFHS e atributos topográficos com o objetivo de analisar o comportamento dos dados e averiguar se os mesmos atendem as hipóteses restritivas para o desenvolvimento da FPTs, e análise geoestatística estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2- Estatística descritiva dos diferentes atributos físico-hídricos do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita.

Atributo	$\bar{X}$	Med	Mín	Máx	Var	C.V.	Ass.	Curt.	W	P
Ksat	68,83	27,02	1,10	919,00	18033,00	195,09	4,60	23,91	0,47	<0,005
ARG	19,73	17,02	5,82	44,53	66,92	41,47	1,11	0,77	0,90	<0,005
SIL	21,69	20,94	5,28	47,98	42,33	30,00	1,19	4,13	0,90	<0,005
ARE	58,58	60,45	29,00	88,90	110,78	17,97	-0,22	0,90	0,96	0,030
Ds	1,53	1,56	0,97	1,80	0,02	9,09	-0,96	1,88	0,95	<0,005
Micro	0,30	0,30	0,11	0,56	0,004	19,99	0,62	3,77	0,94	<0,005
Macro	0,09	0,07	0,02	0,29	0,003	61,56	1,29	1,43	0,88	<0,005
PT	0,39	0,39	0,29	0,59	0,003	12,89	0,66	1,41	0,97	0,03
MO	2,05	1,89	0,62	3,90	0,76	42,62	0,62	-0,46	0,95	<0,005
USO	2,54	2,00	1,00	4,00	0,89	37,07	0,58	-0,97	0,75	<0,005
Elev	104,08	101,00	45,00	202,00	1578,40	38,17	0,50	-0,54	0,96	0,010
Decl	4,77	4,67	0,50	15,31	8,09	59,56	1,14	1,84	0,93	<0,005
Curv	0,04	0,00	-1,44	0,84	0,19	1192,50	-0,45	0,60	0,97	0,060*
ASP	167,95	180,00	4,40	344,75	7209,60	50,56	0,00	-0,94	0,97	0,120*

Atributo do solo: ASP: Aspecto; Curv: Curvatura; Decl: Declividade (%); Elev: Elevação; USO: índice de uso e ocupação; MO: Matéria orgânica (%); PT: Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); Macro: Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); Micro: Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); Ds: densidade do solo (g cm^{-3}); Ksat: Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Parâmetros estatísticos: $\bar{X}$: Média; Med.: Mediana; Mín: Mínimo; Máx: Máximo; Var: Variância; CV (%): Coeficiente de Variação; Ass.: Coeficiente de Assimetria; Curt.: Coeficiente de Curtose; W: Valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; P(*): Tendência a normalidade, ou seja, : P-valor $\geq 0,05$ (5%). Número de amostras 80.

A Ksat (Tabela 2) apresentou um distanciamento entre seus valores de média (68,83 mm.h^{-1}) e mediana (27,02 mm.h^{-1}). Essa amplitude pode ter relação com a alta variabilidade intrínseca desse atributo (BAIAMONTE et al., 2017; MENEZES et al., 2006), não seguindo uma distribuição normal, como mostra o resultado do teste de Shapiro-wilk, indo de encontro aos resultados de Oliveira (2015) e Soares (2018).

A distribuição não normal da Ksat pode ser identificada, ainda, pelos coeficientes de assimetria (4,60) e curtose (23,91). A Figura 14 mostra a dispersão dos valores de Ksat, o qual apresenta dois valores discrepantes (919,23 mm h^{-1} e 695,51 mm h^{-1}), justificando o elevado coeficiente de dispersão (195,09%).

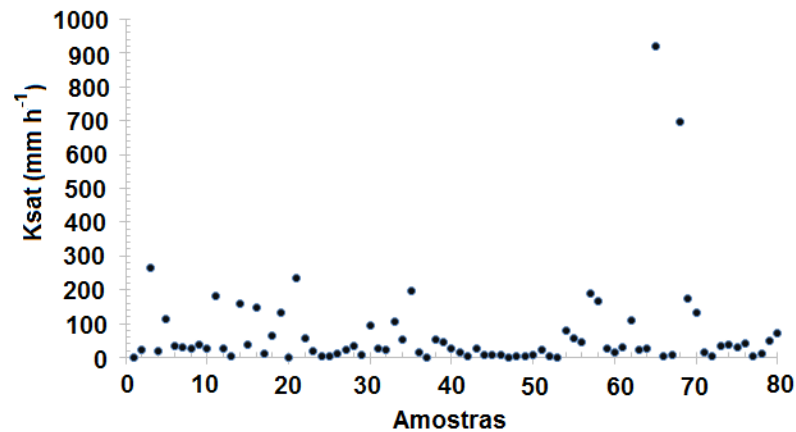


Figura 14 - Dispersão dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) referentes aos pontos amostrais.

A alta variabilidade da K_{sat} pode estar relacionada, também, com os diferentes usos e ocupações dos solos e as diferentes práticas de manejos encontradas na SBHSR, indo de encontro com os resultados de Hu et al. (2009). A variabilidade da K_{sat} pode ser verificada por meio dos *boxplots* para os diferentes usos e ocupação do solo, estratificados em mata nativa, cultivo anual, cultivo perene e campo nativo (Figura 15).

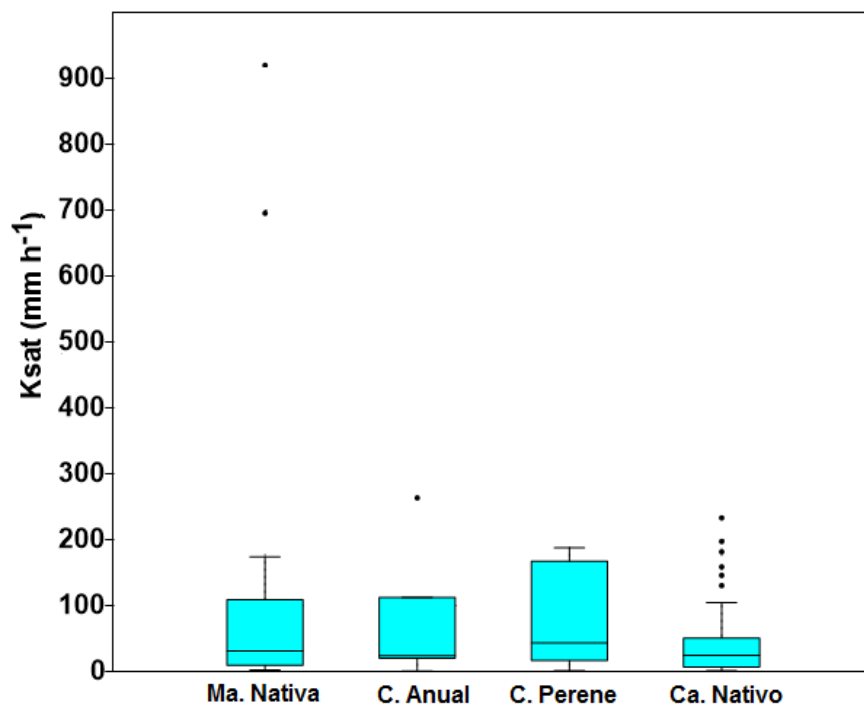


Figura 15 - Boxplots referentes as séries de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers. Ma. Nativa: Mata Nativa; C. Anual: Cultivo anual; C. Perene: cultivo perene; Ca. Nativo: Campo nativo.

Observa-se na Figura 15 que a maior amplitude dos valores de Ksat foi encontrada na mata nativa, seguida pelo cultivo anual, cultivo perene e campo nativo. Os valores médios, mínimos e máximos para cada uso e ocupação do solo estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de condutividade hidráulica do solo saturado médios, mínimos, máximos e percentual de pontos referentes ao uso e ocupação do solo.

Uso	$\bar{X}$	Mín	Máx	Percentual
Mata Nativa	120,98	2,39	919,93	25,00
Cultivo Anual (milho)	84,39	1,10	263,62	6,25
Cultivo Perene	72,62	1,57	188,05	10,00
Campo Nativo	44,34	1,16	233,31	58,75

$\bar{X}$: Média (mm h^{-1}); Mín: Mínimo (mm h^{-1}); Máx: Máximo (mm h^{-1}); Percentual (%)

A maior média para a Ksat foi encontrada na mata nativa ($120,98 \text{ mm h}^{-1}$) e a menor no campo nativo ($44,34 \text{ mm h}^{-1}$). Esses resultados podem ser explicados pelo fato de o solo sob mata nativa ser melhor estruturado, possuindo uma maior macroporosidade condicionada pelo desenvolvimento de raízes e maior teor de matéria orgânica (BAIAMONTE et al., 2017). Já em campo nativo há maior compactação e densidade do solo e, conseqüentemente, valores de macroporosidade e Ksat mais baixos (MAINURI; OWINO, 2013; ZIMMERMANN et al., 2006). Nas áreas de campo nativo da SBHSR havia presença de animais em geral, no entanto, com densidade de animais baixa. Com isso, pode-se identificar a contribuição do pisoteio animal para a redução da macroporosidade em algumas regiões da área em estudo, também constada por Balbinot et al. (2009), Moreira et al. (2014) e Ortigara et al. (2014).

O teor de argila apresentou valor mínimo de 5,82% e máximo de 44,53%. E se pode verificar uma alta dispersão dos dados na Figura 16, onde as amostras apresentam uma grande dispersão dos teores de argila, resultando em um coeficiente de variação alto (41,47%).

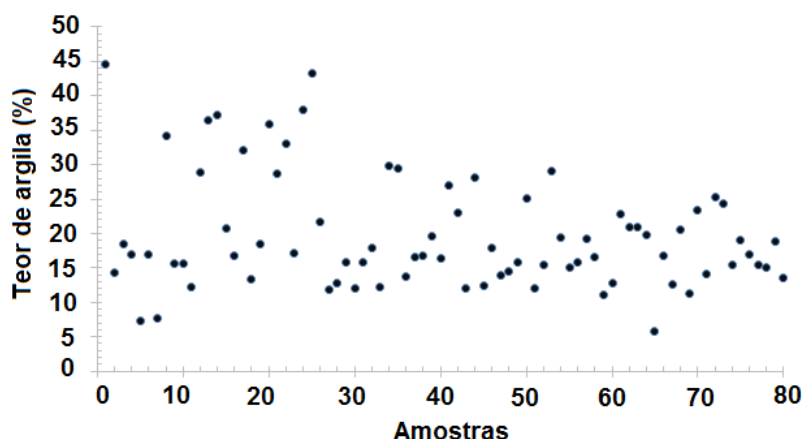


Figura 16 - Dispersão dos teores de argila referentes aos pontos amostrais.

A maior amplitude dos teores de argila foi encontrada sob o solo de cultivo anual. Entretanto, apenas 6,25% das amostras foram coletadas nesse uso, influenciando na variabilidade do teor de argila sob cultivo anual, evidenciada pelos *outliers* no *boxplot* apresentado na Figura 17. A mata nativa apresentou a menor amplitude dos teores de argila (Figura 17), corroborando para uma possível correlação negativa com a Ksat, indo de encontro com os resultados encontrados por Baiamonte et al. (2017), Carsel e Parrish (1988), Huang et al. (2016) e Zimmermann et al. (2006).

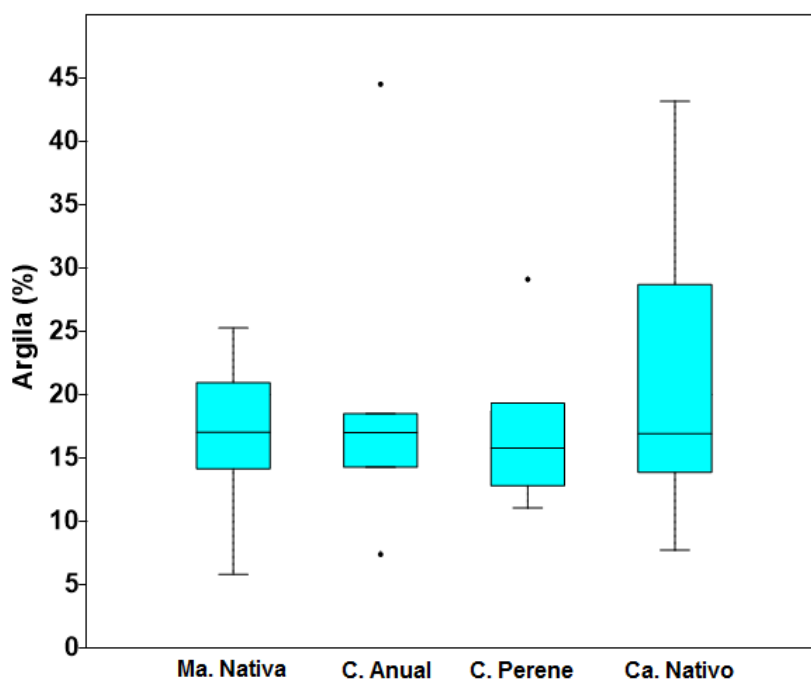


Figura 17 - Boxplots referentes as séries de condutividade hidráulica do solo saturado nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers.

Ma. Nativa: Mata Nativa; C. Anual: Cultivo anual; C. Perene: cultivo perene; Ca. Nativo: Campo nativo.

O teor de areia apresentou um coeficiente de variação moderado (17,97%) (WARRICK; NIELSEN, 1980) com os valores mínimo e máximo de 29,00% e 88,90%, respectivamente. Na Figura 18, observa-se que valores mais elevados de teor de areia foram encontrados em solo de mata, enquanto os menores valores foram encontrados em solos de campo nativo.

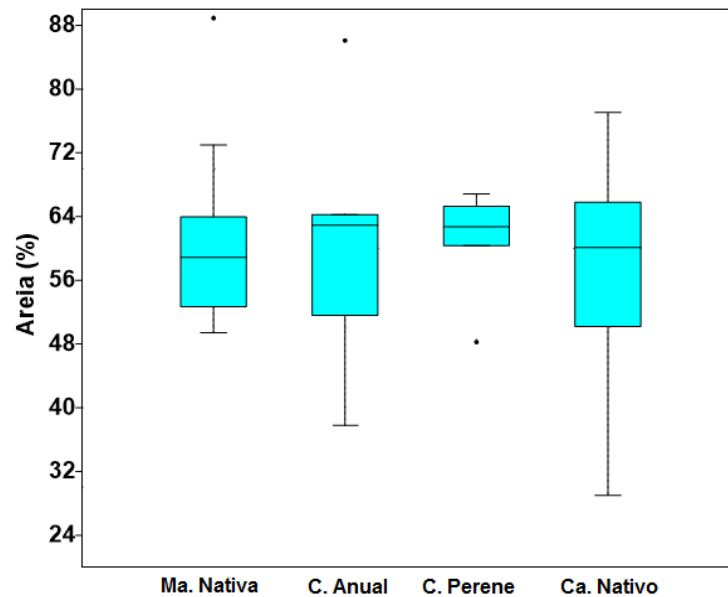


Figura 18 - Boxplots referentes às séries de condutividade hidráulica do solo saturado nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers.
Ma. Nativa: Mata Nativa; C. Anual: Cultivo anual; C. Perene: cultivo perene; Ca. Nativo: Campo nativo.

A dispersão dos dados de densidade do solo (Figura 19) demonstraram uma menor variabilidade, resultando em um baixo coeficiente de variação (<12%), apresentando média e mediana próximas ($1,53 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,56 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente).

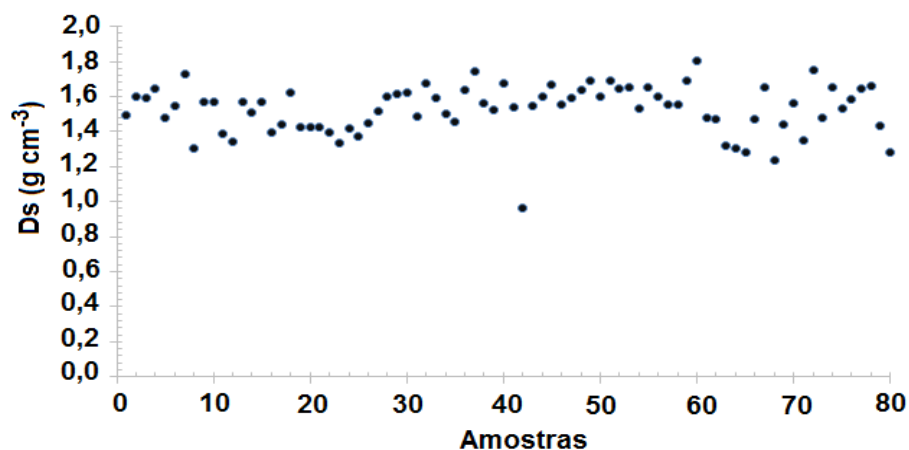


Figura 19 - Dispersão dos dados de densidade do solo (Ds) referentes aos pontos amostrais.

O teste de Shapiro-Wilk demonstrou que os dados de densidade do solo apresentam tendência a não normalidade, podendo ser justificada pelo ponto discrepante ($0,97 \text{ g cm}^{-3}$) demonstrado na Figura 19. As três repetições apresentaram baixa densidade do solo nesse ponto e esse valor de densidade ($0,97 \text{ g cm}^{-3}$) foi encontrado em um solo sob cultivo perene (Pomar de pêssago) com presença de trânsito de animais.

A microporosidade e a porosidade total apresentaram média e mediana iguais e coeficientes de variação moderados (19,99% e 12,89%, respectivamente). Já a macroporosidade apresentou valores distantes entre média e mediana ($0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente) e coeficiente de variação alto (61,56%), tendo uma tendência a não normalidade da distribuição dos dados, conforme foi averiguado pelo teste de Shapiro-Wilk. A não normalidade da macroporosidade pode estar associada à grande variabilidade dos dados, demonstrados na Figura 20.

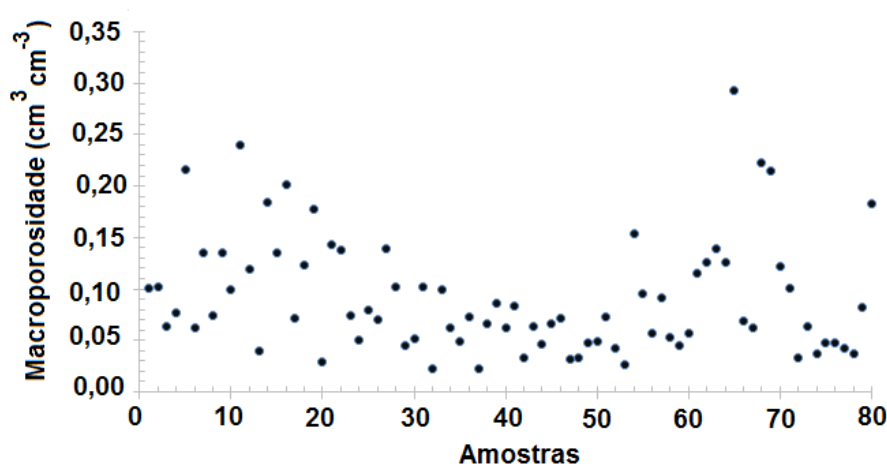


Figura 20 - Dispersão macroporosidade referentes aos 80 pontos amostrais.

Os valores mais elevados de macroporosidade (Figura 21) foram encontrados nos solos de mata nativa, estando de acordo com os resultados encontrados por Baiamonte et al. (2017). Observou-se uma maior amplitude dos dados em áreas de campo nativo, sendo que nesse uso encontrou-se os menores valores de macroporosidade, podendo estar associados ao pisoteio de animais (ORTIGARA et al., 2014; PRICE et al., 2010). Em solos sob pisoteio animal, os macroporos transformam-se em microporos devido à pressão gerada, aumentando a microporosidade e diminuindo a macroporosidade (BERTOL et al., 2004; BONELL et al., 2010; SALEMI et al., 2013).

Os solos de cultivo possuem macroporosidade mais baixa que os solos de

mata, devido a estarem expostos ao tráfego de maquinários, aumentando a compactação e reduzindo a quantidade de macroporos no solo (BERTOL et al., 2004; BONELL et al., 2010; SALEMI et al., 2013).

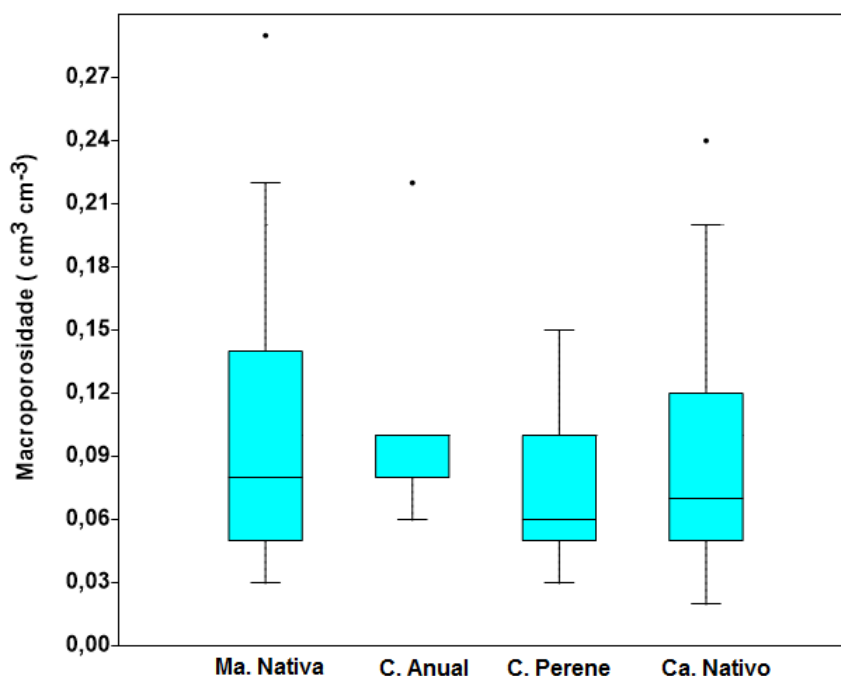


Figura 21 - Boxplots referentes às séries de macroporosidade nos diferentes usos do solo. O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers. Ma. Nativa: Mata Nativa. C. Anual: Cultivo anual; C. Perene: cultivo perene; Ca. Nativo: Campo nativo.

A matéria orgânica apresentou uma tendência a não normalidade e um alto coeficiente de variação (42,62%). Tal variação pode ser observada na Figura 22.

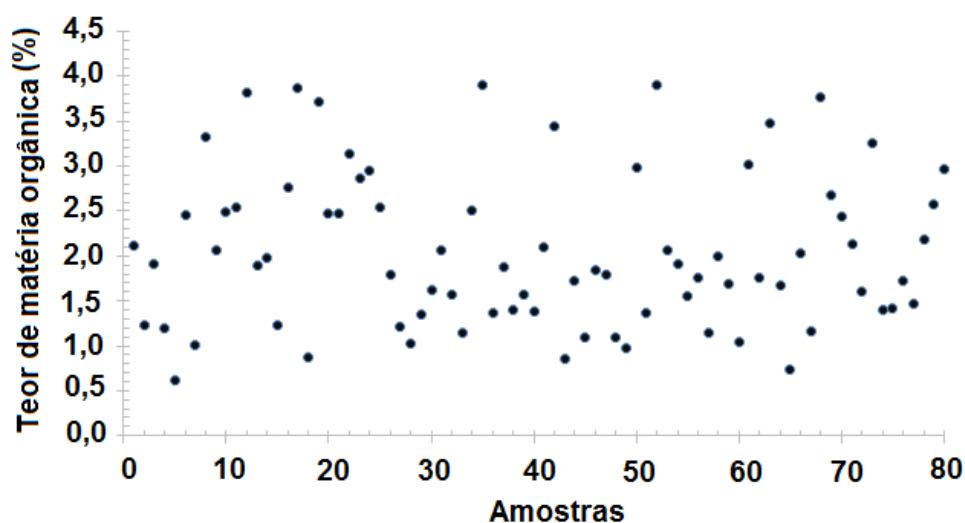


Figura 22 - Dispersão dos teores de matéria orgânica referentes aos pontos amostrais.

A elevação apresentou um alto coeficiente de variação (37,07%) e tendência a não normalidade. A declividade apresentou valores distantes entre média e mediana e coeficiente de variação alto (59,56%), apresentando tendência a não normalidade. A curvatura e o aspecto apresentaram tendência a normalidade, conforme os resultados do teste de Shapiro-Wilk. Entretanto, a curvatura e o aspecto apresentaram afastamento entre a média e a mediana e altos coeficientes de variação (1192,5% e 50,56%, respectivamente).

Após a análise exploratória, com exceções da curvatura e do aspecto, todos os outros atributos estudados apresentaram tendência a não normalidade. Para cada atributo foram realizadas diferentes tentativas de transformações dos dados (Raiz quadrada, Raiz quarta, Logarítmica e Logarítmica neperiana). A função logarítmica neperiana foi a que melhor se adequou à normalização da série de dados de Ksat. As séries de dados de macroporosidade, porosidade total, teor de argila, teor de matéria orgânica e elevação foram transformadas por meio da função logarítmica. Os dados de declividade foram normalizados utilizando a função raiz quadrada. Logo após, os dados transformados foram submetidos novamente ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e os resultados estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk dos atributos transformados.

Atributo	N	W	P
ln(Ksat)	80	0,98	0,20*
log(ARG)	80	0,97	0,09*
log(Macro)	80	0,99	0,62*
log(PT)	80	0,99	0,60*
log(MO)	80	0,98	0,38*
log(Elev)	80	0,98	0,14*
SQR(Decl)	80	0,99	0,77*

ln(Ksat): transformação logarítmica neperiana da condutividade hidráulica do solo saturado; log(ARG): transformação logarítmica do teor de argila; log(Macro): transformação logarítmica da macroporosidade; log(PT): transformação logarítmica da porosidade total; log(MO): transformação logarítmica do teor de matéria orgânica; log(Elev): transformação logarítmica da elevação; SQR(Decl): transformação raiz quadrada da declividade; W: Valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; P(*): Tendência a normalidade, ou seja, P-valor $\geq 0,05$ (5%).

A análise bivariada entre a ln(Ksat) e os AHFS e atributos topográficos, realizada por meio do coeficiente de correlação de Pearson, está apresentada na Tabela 5. As correlações do logaritmo neperiano da Ksat, com o logaritmo do teor de argila, teor de areia, densidade do solo, microporosidade, logaritmo da macroporosidade e logaritmo da porosidade total apresentaram significância estatística.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson dos atributos após normalização dos dados.

Atributo	ln(Ksat)
log(ARG)	-0,29*
SIL	-0,12
ARE	0,31*
Ds	-0,23*
Micro	-0,44*
log(Macro)	0,66*
log(PT)	0,25*
log(MO)	0,02
Uso	0,14
log(Elev)	0,11
SQR(Decl)	-0,01
Curv	-0,11
ASP	-0,11

ln(Ksat): transformação logarítmica neperiana da condutividade hidráulica do solo saturado; log(ARG): transformação logarítmica do teor de argila; SIL: teor de silte; ARE: teor de areia; Ds: densidade do solo; Micro: microporosidade; log(Macro): transformação logarítmica da macroporosidade; log(PT): transformação logarítmica da porosidade total; log(MO): transformação logarítmica do teor de matéria orgânica; Uso: uso e ocupação do solo; log(Elev): transformação logarítmica da elevação; SQR(Decl): transformação raiz quadrada da declividade; Curv: Curvatura; ASP: aspecto. (*): Significância, P-valor $\leq 0,05$ (5%).

O logaritmo da macroporosidade foi o atributo que apresentou a maior correlação positiva significativa com o logaritmo neperiano da Ksat (0,66), seguido pelo teor de areia e pelo logaritmo da porosidade total (0,31 e 0,25, respectivamente). Sendo assim, os valores de Ksat aumentam à medida que aumenta a macroporosidade, o teor de areia e a porosidade total. Linh et al. (2017) encontraram uma correlação significativa (ao nível de 1%) entre a macroporosidade e a Ksat de 0,58. Outros estudos relatam relações parecidas entre a macroporosidade e a Ksat (ALLETTO et al., 2010; SACCO et al., 2012). Constata-se, também, um aumento da Ksat com o aumento de teor de areia, sendo esse comportamento também amplamente relatado por diversos estudos (COSBY et al., 1984; DANE; PUCKETT, 1994; HUANG et al., 2016; JABRO et al., 1992; PUCKETT et al., 1985; SAXTON et al., 1985; ZIMMERMANN et al., 2006).

As maiores correlações significativas negativas foram com a microporosidade, logaritmo do teor de argila e densidade do solo (-0,44, -0,29, -0,23, respectivamente). A correlação negativa significa que a Ksat diminuiu com o aumento na porcentagem de teor de argila e diversos estudos relatam o mesmo (CARSEL; PARRISH, 1988; COSBY et al., 1984; JABRO, 1996; JORDA et al., 2015; SAXTON; RALWS, 2006; ZIMMERMANN et al., 2006).

Baiamonte et al. (2017) encontraram correlação significativa negativa de 0,38, resultado próximo ao aqui encontrado. Já a diminuição da Ksat com o aumento densidade do solo também está amplamente difundida em diversos estudos (AGENESE et al., 2011; DONGLI et al., 2017; PRICE et al., 2010) e isso pode ser atribuído ao processo de compactação do solo, onde os macroporos são transformados em microporos em áreas com exposição à maquinários e pisoteio de animais (BERTOL et al., 2004; BONELL et al., 2010; SALEMI et al., 2013).

6.4 Funções de pedotransferência publicadas na literatura

As FPTs pré-existent na literatura utilizadas para estimar a Ksat (mm h^{-1}), submetidas a avaliação de performance por meio da aplicação dos índices estatísticos RMSE, ME, r e R^2 , estão descritas na Tabela 6.

Como pode-se observar, todas as FPTs apresentaram elevados valores de RMSE, indicando que os valores de Ksat estimados pelas FPTs testadas obtiveram um grande afastamento dos valores de Ksat observados em campo (DALBIANCO, 2009). Os valores de ME indicam que houve grande diferença média entre os valores de Ksat observados e Ksat estimados em todas as FPTs, sendo que todas subestimaram os valores observados, exceto a FPT proposta por Vereecken et al. (1990), no entanto ocorreu uma superestimação, evidenciada pelo valor discrepante positivo do EM. Os valores de EM e RMSE para todas as FPTs testadas foram altos, demonstrando a incapacidade de estimativa dos modelos. Esses erros altos de estimativa podem ser atribuídos ao número restrito de amostras utilizado nesse estudo, visto que Ghanbarian et al. (2017), ao utilizar as mesmas FPTs publicadas na literatura para um subconjunto de 19822 amostras de solo, obtiveram em seu estudo valores de RMSE variando entre 0,56 e 1,27 e EM variando entre -0,001 e 0,96, ou seja, cerca de 100 vezes menor.

Tabela 6 - Avaliação da performance das funções de pedotransferência publicadas na literatura testadas na sub-bacia hidrográfica Santa Rita.

FPT	Preditores	RMSE	EM	r	R ²
T-1	$156,96(\text{Exp}(-0,1975(\text{ARG})))$	144,19	-61,80	0,41	0,17
T-2	$303,84(\text{Exp}(-0,144(\text{ARG})))$	133,61	-40,53	0,34	0,12
T-3	$25,41+(10^{-(0,6+(0,0126(\text{ARE}))-(0,0064(\text{ARG})))})$	139,84	-42,31	0,36	0,13
T-4	$54(\text{Exp}(-(0,07(\text{ARE}))-(0,167(\text{ARG}))))$	150,13	-68,79	0,02	0,00
T-5	$10(\text{Exp}(12,012-(0,0755(\text{ARE}))-3,895+0,03671(\text{ARE})-0,1103(\text{ARG})+0,00087546(\text{ARG}^2)))/(0,332-0,000751(\text{ARE})+0,1276(\text{Log}10(\text{ARG})))$	141,59	-57,42	0,44	0,20
T-6	$10(\text{Exp}((19,52348(\text{PT}))-8,96847-0,02821(\text{ARG}))+0,00018107(\text{ARE}^2))-0,0094125(\text{ARG}^2))-8,395215(\text{PT}^2))+0,077718(\text{ARE})(\text{PT})-0,00298(\text{ARE}^2)(\text{PT}^2))-0,019492(\text{ARG}^2)(\text{PT}^2))+0,0000173(\text{ARE}^2)(\text{ARG}))+0,02733(\text{ARG}^2)(\text{PT}))+0,0011434(\text{ARE}^2)(\text{PT}))-0,0000035(\text{ARG}^2)(\text{ARE})))$	139,41	-57,67	0,45	0,20
T-7	$10,28+0,449(\text{ARE})-0,507(\text{ARG})-0,202(\text{MO})$	138,63	-42,65	0,21	0,05
T-8	$1,5162(\text{Exp}(0,0452(\text{ARE})))$	136,46	-44,92	0,42	0,17
T-9	$0,92(\text{Exp}(0,0491(\text{ARE})))$	138,69	-50,23	0,43	0,18
T-10	$-4,994+0,56728(\text{ARE})-0,131(\text{ARG})-0,0127(\text{MO})$	138,88	-43,20	0,24	0,06
T-11	$0,417(\text{Exp}(20,62 - 0,96(\text{log}(\text{ARG}))-0,66(\text{log}(\text{ARE}))-0,46(\text{log}(\text{MO}))-8,43(\text{Ds})))$	9,90E+02	1,69E+02	0,07	0,01

T-1: FPT proposta por Puckett et al. (1985), T-2: FPT proposta por Dane e Puckett (1994); T-3: FPT proposta por Cosby et al. (1984); T-4: FPT proposta por Campbell e Shiozawa (1994); T-5: FPT proposta por Saxton et. al. (1986); T-6: FPT proposta por Brakensiek et. al. (1984); T-7: FPT A proposta por Julià et al. (2004); T-8: FPT B proposta por Julià et al. (2004); T-9: FPT C proposta por Julià et al. (2004); T-10: FPT D proposta por Julià et al. (2004) e T-11: FPT proposta por Vereecken et al. (1990). RMSE: raiz quadrada do erro médio; EM: erro médio; r: coeficiente de correlação; R²: coeficiente de determinação; Exp: função exponencial; ARG: teor de argila; ARE: teor de areia; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; MO: teor de matéria orgânica; log(MO): logaritmo da matéria orgânica.

Quanto aos coeficientes de correlação de Pearson e de determinação, as melhores FPTs foram as propostas por Brakensiek et al. (1984) e Saxton et al. (1986) (0,45, 0,20 e 0,44, 0,20, respectivamente), demonstrando, dentre as FPTs testadas, as que possuem a melhor qualidade dos ajustes. Entretanto, esses coeficientes possuem um valor baixo, assim como os resultados obtidos por Dalbianco (2009) ao testar as mesmas FPTs em seu estudo. A FPT proposta por Brakensiek et al. (1984) utilizou o teor de argila, teor de areia e a porosidade total como atributos preditores, enquanto a FPT proposta por Saxton et al. (1986) utilizou o teor de argila e o teor de areia como atributos preditores.

Sendo assim, as FPTs publicadas na literatura demonstraram um desempenho baixo para estimar a Ksat para os solos da SBHSR, sendo que a pior foi a proposta por Vereecken et al. (1990) utilizando o teor de argila, teor de areia, teor de matéria orgânica e densidade do solo como atributos preditores. Já a que demonstrou o maior ganho foi a proposta por Saxton et al. (1986). Embora a mesma tenha um desempenho razoavelmente mais baixo que a proposta por Brakensiek et al. (1984), o seu uso possui a vantagem de utilizar somente as frações das distribuições granulométricas para estimar a Ksat. Porém, de modo geral, as FPTs desenvolvidas a partir de solos de outras regiões geográficas não se adequaram as condições físico-hídricas da sub-bacia em estudo (REICHERT et al., 2010).

6.5 Desenvolvimento de funções de pedotransferência

As FPTs desenvolvidas com melhores desempenhos seguindo a metodologia de Cornelis et al. (2001) estão apresentadas na Tabela 7. Durante o desenvolvimento dessa pesquisa, uma série de FPTs foram desenvolvidas, com inúmeras combinações de AFHS e atributos topográficos como preditores. Outras 100 FPTs desenvolvidas foram escolhidas e estão disponíveis no APÊNDICE D.

Tabela 7 - Funções de pedotransferência desenvolvidas para estimar o logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado para os solos da sub-bacia hidrográfica Santa Rita.

Modelo	Preditores	RMSE	EM	R ²	Rank
M-1	$6,72426 + 3,03396(\log(\text{Macro}))$	1,19 (1)	0,40 (2)	0,70 (1)	(1)
M-2	$9,19193 - 0,14262(\text{Ds}) - 1,99568(\log(\text{ARG})) + 0,02043(\text{SQR}(\text{Decl})) + 2,83659(\log(\text{Macro}))$	1,19 (2)	0,38 (1)	0,60 (2)	(2)
M-3	$11,6902 - 2,83435(\text{Ds}) - 3,45905(\log(\text{ARG})) + 0,16997(\text{SQR}(\text{Decl}))$	1,57 (3)	0,44 (4)	0,22 (5)	(3)
M-4	$11,6274 - 2,69068(\text{Ds}) - 3,30179(\log(\text{ARG}))$	1,58 (4)	0,44 (3)	0,22 (7)	(4)
M-5	$11,0712 - 2,72679(\text{Ds}) - 3,37184(\log(\text{ARG})) + 0,18351(\text{SQR}(\text{Decl})) + 0,12720(\text{USO})$	1,58 (7)	0,46 (5)	0,22 (6)	(7)
M-6	$5,92855 - 3,41857(\text{Ds}) - 0,50416(\log(\text{ARG})) + 0,05870(\text{ARE}) - 6,829\text{E-}04(\text{ASP})$	1,58 (5)	0,58 (7)	0,27 (3)	(5)
M-7	$5,05411 - 3,07093(\text{Ds}) + 0,04520(\text{ARE}) - 1,70011(\log(\text{ARG})) + 1,26885(\log(\text{Elev}))$	1,58 (6)	0,55 (6)	0,25 (4)	(6)

M: Modelos de função de pedotransferência para estimar o logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EM: erro médio; R²: coeficiente de determinação; Rank: ranqueamento de Cornelis; Log(Macro): logaritmo da macroporosidade; Ds: densidade do solo; Log(ARG): logaritmo do teor de argila; SQR(Decl): raiz quadrada da declividade; USO: uso e ocupação do solo; ARE: teor de areia; ASP: Aspecto; Log(Elev): logaritmo da elevação.

Os dados de logaritmo neperiano da Ksat estimados pelas FPTs M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6 e M-7 estão disponíveis no APÊNDICE E.

Dentre as FPTs desenvolvidas, a que apresentou melhor desempenho, seguindo o *Rank* proposto por Cornelis et al. (2001) para estimar o logaritmo neperiano da Ksat dos solos da SBHSR, foi a M-1, seguida pelas FPTs M-2, M-3, M-4, M-6, M-7 e M-5. A FPT M-1, desenvolvida a partir da macroporosidade, obteve o melhor desempenho, explicando 70% da variabilidade dos dados observados, obtendo o menor erro médio dos valores estimados e o melhor ajuste entre dos dados estimados e observados, com coeficiente de correlação de 0,88. Essa alta correlação é esperada, visto que a medida da Ksat e da macroporosidade do solo são provenientes do mesmo espaço poroso (MESQUITA; MORAES, 2004).

Por conseguinte, a densidade do solo, o logaritmo do teor de argila e a raiz quadrada da declividade, junto ao logaritmo da macroporosidade como atributos redutores (M-2), explicaram 60% da variabilidade dos dados, obtendo uma raiz quadrada do erro médio igual ao M-1, porém, houve uma pequena redução no ajuste entre os dados estimados e observados. No entanto, observa-se a inclusão da declividade, que é um atributo topográfico primário no controle de processos essenciais à formação do solo, afetando as características físico-hídricas do ambiente (SIRTOLI et al., 2008). A declividade é um dos atributos topográficos que frequentemente têm sido estudadas na inclusão do desenvolvimento de FPTs (LEIJ et al., 2004).

Ao retirar o logaritmo da macroporosidade, utilizando-se apenas a densidade do solo, o logaritmo do teor de argila e a raiz quadrada da declividade como atributos preditores (M-3), houve uma redução de 38% na explicação da variabilidade dos dados observados pelo modelo. Essa perda ocorre devido a macroporosidade ser o atributo que possui a maior correlação física com a Ksat (MESQUITA; MORAES, 2004). Observa-se que a utilização da macroporosidade como atributo preditor melhorou significativamente o desempenho do modelo quando combinada com os atributos preditores da FPT M-3. No entanto, a sua determinação requer a utilização em laboratório de uma mesa de tensão, tendo a aquisição mais complexa dentre os AFHS e atributos topográficos abordados nesse estudo.

As FPTs M-3 e M-4 apresentaram desempenhos muito próximos, quanto a raiz quadrada do erro médio e ao seu coeficiente de correlação de *Pearson*. A FPT M-3 utilizou como preditores a densidade do solo, o logaritmo do teor de argila e a raiz

quadrada da declividade, já a FPT M-4 utilizou como preditores a densidade do solo e o logaritmo do teor de argila. Sendo assim, a melhora do desempenho da FPT M-3, comparado à FPT M-4, pode ser atribuída à inclusão da raiz quadrada da declividade, evidenciando um pequeno efeito da declividade na raiz quadrada do erro médio.

A FPT M-4, utilizando somente a densidade do solo e o logaritmo do teor de argila como atributos preditores, apresentou o quarto melhor desempenho, seguido pela M-6, adicionando o teor de areia e o aspecto, pela M-7, adicionando o teor de areia e o logaritmo da elevação e a M-5, adicionando a declividade e o uso e ocupação do solo.

As FPTs desenvolvidas demonstraram ser mais eficientes que as FPTs disponíveis na literatura para os solos da SBHSR, confirmando a primeira hipótese desse estudo.

Ao analisar os atributos preditores em comum das FPTs desenvolvidas, percebe-se que a densidade do solo e o logaritmo do teor de argila se mostraram os principais atributos, estando presente em todas as FPTs, com exceção da M-1. Esses dois atributos estão frequentemente presentes em FPTs desenvolvidas na literatura (DANE; PUCKETT, 1994; PUCKETT et al., 1985; SAXTON et al., 1986; SWETHA; PRASANNA, 2018; ZHAO et al., 2016).

Além da declividade, a elevação e o aspecto estiveram presentes como atributos preditores nas melhores FPTs desenvolvidas. Entretanto, as FPTs nas quais fazem parte demonstraram desempenho inferior as FPTs desenvolvidas apenas com os atributos físicos do solo. Leij et al. (2004) relatam que a influência da topografia na Ksat é indireta, sendo que a maior parte da variabilidade que pode ser explicada pelos atributos topográficos podem também ser explicadas pelos atributos físicos do solo.

O índice de uso e ocupação do solo também esteve presente em uma das melhores FPTs desenvolvidas nesse estudo (M-5). A informação de uso e ocupação do solo pode ser importante na quantificação da Ksat. Papanicolaou et al. (2015) verificaram diferentes padrões de distribuição espacial da Ksat associados a diferentes usos e ocupação do solo, pois espera-se encontrar em áreas não cultivadas um volume de macroporos maior em relação às cultivadas, aumentando a Ksat, como é o caso de estudo desenvolvido por Albuquerque et al. (2001).

O uso de atributos topográficos e o uso e ocupação do solo no desenvolvimento de FPTs para estimar a Ksat ainda é pouco difundido, porém, para os atributos topográficos existem alguns estudos que evidenciam a relação na estimativa da Ksat

e a viabilidade do uso em técnicas de estimativa, como em FPTs. Baiamonte et al. (2017) encontraram relações entre a declividade e a elevação com a Ksat, enquanto Leij et al. (2004) encontraram somente correlação positiva entre a declividade e a Ksat. Portanto, embora somente a declividade tenha apresentado melhora no desempenho das FPTs, os atributos topográficos e o uso e ocupação do solo demonstraram-se úteis no desenvolvimento de FPTs quando combinadas com os AFHS, pois a determinação desses atributos não possuem custos. Dongli et al. (2017) apresentaram FPTs desenvolvidas a partir da regressão linear múltipla, utilizando uma combinação de atributos físicos e atributos topográficos para estimativa do logaritmo neperiano da Ksat.

Pachepsky e Rawl (2003) e Pachepsky et al. (2006) comprovam que a Ksat possui uma grande relação com as distribuições granulométricas dos solos. Em contrapartida, Becker et al. (2018) e Wagner et al. (2001) afirmam em seus estudos que a textura do solo não tem impacto predominante sobre a Ksat. Baiamonte et al. (2017) relataram baixos valores de Ksat para solos argilosos relativamente sem estrutura, enquanto altos valores de Ksat para solos argilosos com estrutura e solos arenosos sem estrutura. Segundo Becker et al. (2018), apesar da textura não impactar significativamente na Ksat para sua área de estudo, mudanças estruturais do solo impactam nos resultados da Ksat. Além disso, Becker et al. (2018) revelaram que os atributos topográficos extraídos por sensoriamento remoto podem fornecer informações úteis para estimar a Ksat.

Muitos estudos revelam a importância e o impacto do uso e ocupação do solo na Ksat. Zimmermann et al. (2006) revelam que o uso do solo tem um impacto substancial em processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, por exemplo, espera-se que em áreas de pastagem, em comparação com áreas de floresta, tenha menor macroporosidade, taxa de infiltração e Ksat, resultados também confirmados por Baiamonte et al. (2017) e Price, Jackson e Parker (2010). Já Mainuri e Owino (2013) revelam que o uso do solo tem impacto na estabilidade dos agregados do solo e conseqüentemente na Ksat. Portanto, a influência da topografia nos atributos físico-hídricos e na Ksat é indireta. Entretanto, a maior parte da variabilidade que pode ser explicada pelos atributos topográficos, podem também ser explicadas pelos atributos físicos do solo (LEIJ et al. 2004).

De acordo com Buttle e House (1997), a variabilidade espacial da Ksat pode ser governada pela diversidade de tamanho, geometria e distribuição de macroporos,

que são os espaços porosos significativamente maiores que os da matriz do solo e áreas de floresta ou mata nativa, que contém abundantes macroporos, devido a atividade de fauna e alta densidade radicular. Mesquita e Moraes (2004) afirmam que as práticas culturais adotadas alterando a estrutura do solo influenciam diretamente a Ksat. A influência das práticas culturais e de manejo podem ser mais intensas do que a influência dos processos de gênese e formação da estrutura dos solos.

6.6 Análise geoestatística

6.6.1 Análise gráfica dos dados observados e estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado

Os *boxplots* referentes aos 80 valores observados em campo de logaritmo neperiano da Ksat e dos 80 valores de logaritmo neperiano da Ksat estimados pelas FPTs M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6 e M-7 foram gerados com o intuito de comparar graficamente a forma da distribuição e a amplitude dos dados de $\ln(K_{sat})$ (Figura 23).

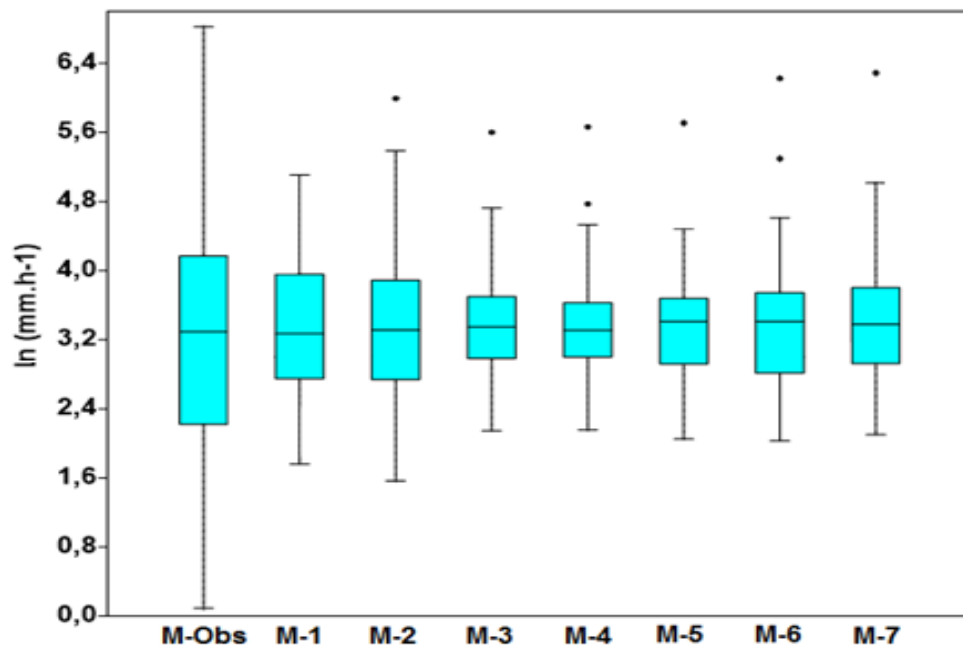


Figura 23 - Boxplots demonstrando graficamente as medidas de posição e indicando a presença de outliers dos valores observados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) e valores estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) pelas funções de pedotransferência desenvolvidas representadas pelos modelos (M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6 e M-7). O traço no interior da caixa representa a mediana e os pontos representam os outliers; $\ln(K_{sat})$:logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado; M-obs: *Boxplot* dos dados observados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado; M-1: *Boxplot* dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-1; M-2: *Boxplot* dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-2; M-3: *Boxplot* dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-3; M-4: *Boxplot* dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-4; M-5: *Boxplot* dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-5; M-6: *Boxplot* dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-6; M-7: *Boxplot* dos dados estimados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado pela FPT M-7.

Na Figura 23, pode-se verificar que todas as FPTs desenvolvidas superestimaram os valores mais baixos e subestimaram os valores mais altos de logaritmo neperiano da K_{sat} , diminuindo assim a amplitude dos dados. As FPTs M-2, M-6 e M-7, respectivamente, foram as que obtiveram maior amplitude dos dados estimados. A análise dos *boxplots* é interessante, pois para a modelagem da distribuição espacial do logaritmo neperiano da K_{sat} são utilizados os dados estimados pelas FPTs como dados de entrada na estimativa. Portanto, se a amplitude dos dados for menor que a amplitude dos dados observados, o resultado da modelagem da distribuição espacial também terá a sua distribuição com amplitude

menor. Visto isso, a perda de amplitude pode ser prejudicial à distribuição espacial do logaritmo neperiano da Ksat. Becker et al. (2018) relatam que as FPTs aplicadas em seu estudo subestimaram os valores mais altos de Ksat e superestimaram os valores mais baixos, obtendo uma amplitude muito menor em relação aos dados observados em campo.

6.6.2 Caracterização da estrutura de dependência espacial

As modelagens dos semivariogramas realizadas por meio de modelos teóricos esféricos ajustados aos pontos de semivariâncias dos semivariogramas experimentais estão apresentadas nas figuras 24 (A a D) e 25 (A a D) e os parâmetros de ajuste efeito pepita (c_0), contribuição (C), alcance (A), coeficiente de Cambardella e grau de dependência espacial (GDE) na Tabela 8.

As figuras 24 (A a D) e 25 (A a D) demonstram os pontos de semivariância (vermelhos) espaçados de um incremento de 300m (*lag* = distância mínima entre as amostras). Os valores descritos em cada ponto de semivariância são os números de pares de amostras utilizados para realização da mesma. Nota-se que para cada distância incremental, o número de pares de amostras não varia nos diferentes ajustes, mesmo com a diferença entre os parâmetros de ajuste.

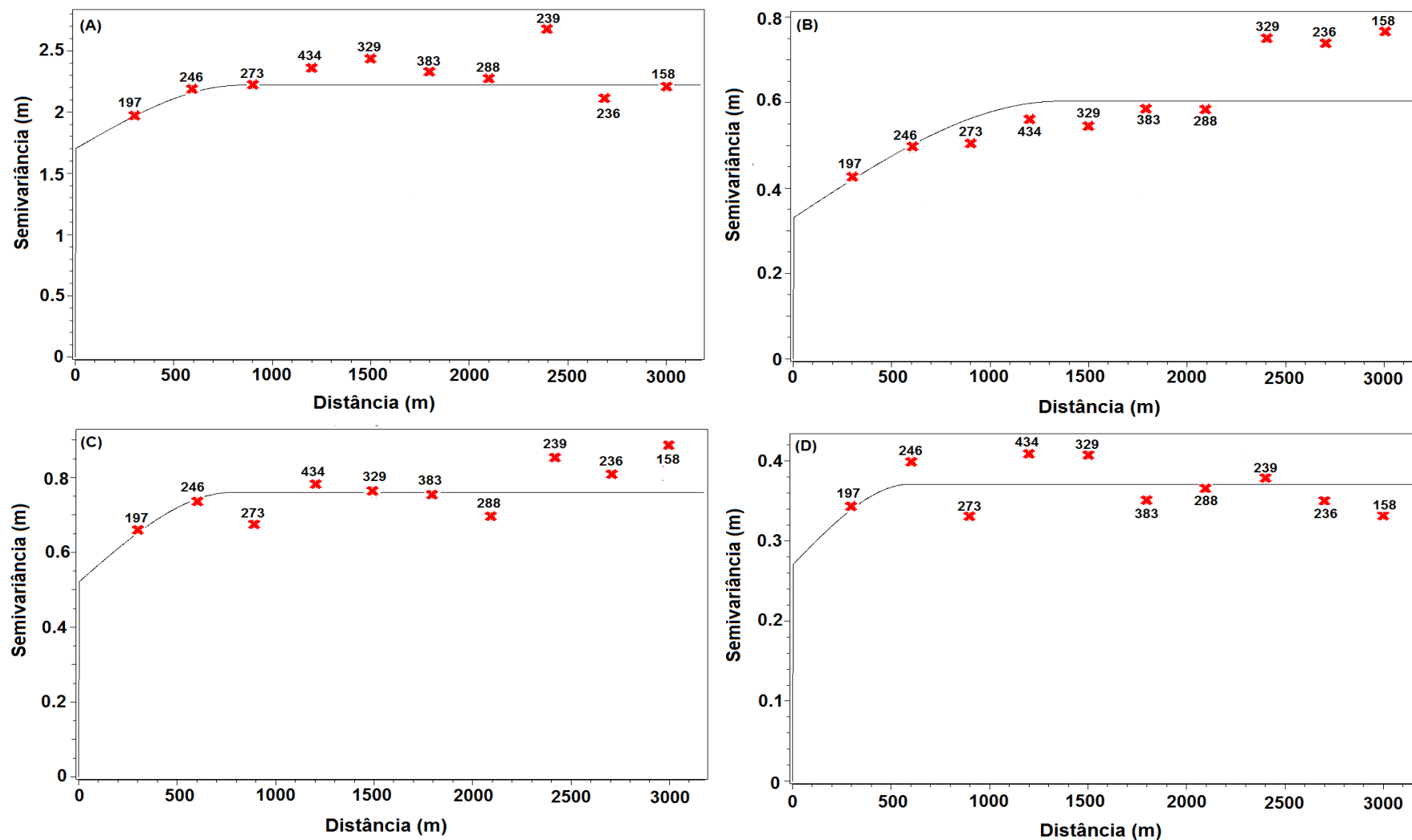


Figura 24 - Semivariogramas teóricos e experimentais para os dados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) observados (A) e estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas M-1 (B), M-2 (C) e M-3 (D). Os valores acima dos pontos de semivariância são os pares de amostras utilizados para a determinação do mesmo.

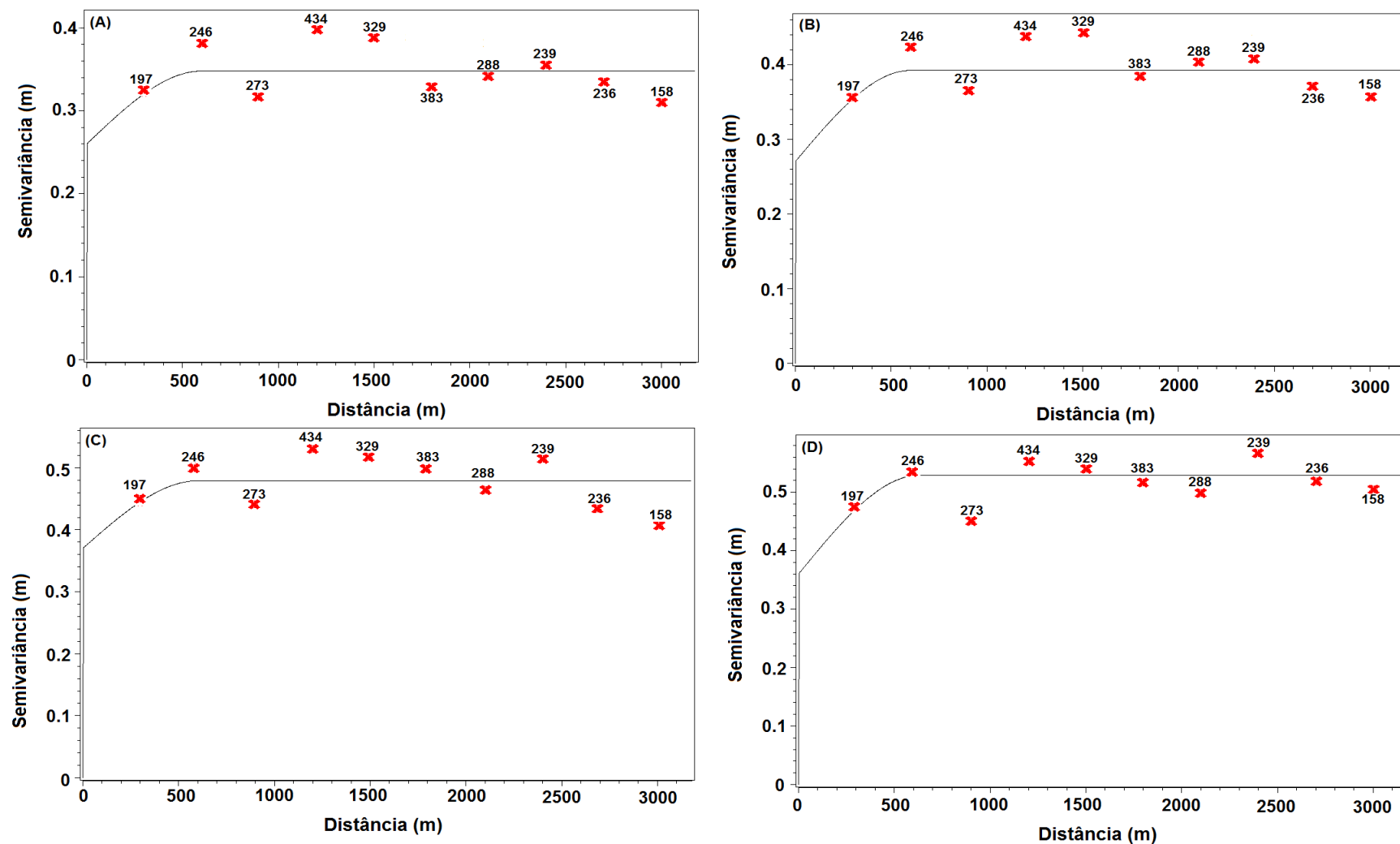


Figura 25 - Semivariogramas teóricos e experimentais para os dados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas M-4 (A), M-5 (B), M-6 (C) e M-7 (D). Os valores acima dos pontos de semivariância são os pares de amostras utilizados para a determinação do mesmo.

Tabela 8 - Parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os dados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) observados e estimados pelas funções de pedotransferência desenvolvidas.

Modelo	C_0	C	A	Função	Cambardella	GDE
$\ln(K_{sat})_{Obs}$	1,700	0,519	840,0	Esférica	0,77	Fraco
$\ln(K_{sat})_{M-1}$	0,330	0,273	1350,0	Esférica	0,55	Moderado
$\ln(K_{sat})_{M-2}$	0,520	0,240	780,0	Esférica	0,68	Moderado
$\ln(K_{sat})_{M-3}$	0,270	0,101	600,0	Esférica	0,73	Moderado
$\ln(K_{sat})_{M-4}$	0,260	0,088	600,0	Esférica	0,75	Fraco
$\ln(K_{sat})_{M-5}$	0,270	0,122	600,0	Esférica	0,69	Moderado
$\ln(K_{sat})_{M-6}$	0,370	0,109	600,0	Esférica	0,77	Fraco
$\ln(K_{sat})_{M-7}$	0,360	0,169	630,0	Esférica	0,68	Moderado

$\ln(K_{sat})_{Obs}$: logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado observados em campo; $\ln(K_{sat})_{M-1}$: : logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado estimados pela FPT M-1; $\ln(K_{sat})_{M-2}$: : logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado estimados pela FPT M-2; $\ln(K_{sat})_{M-3}$: : logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado estimados pela FPT M-3; $\ln(K_{sat})_{M-4}$: : logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado estimados pela FPT M-4; $\ln(K_{sat})_{M-5}$: : logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado estimados pela FPT M-5; $\ln(K_{sat})_{M-6}$: : logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado estimados pela FPT M-6; $\ln(K_{sat})_{M-7}$: : logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado estimados pela FPT M-7; Parâmetros geoestatísticos: c_0 : Efeito pepita; C: Contribuição; a: Alcance (m); GDE: Grau de dependência espacial.

Os dados de logaritmo neperiano da K_{sat} observados em campo apresentaram 840,0m de alcance e dependência espacial fraca, com coeficiente de Cambardella de 0,77. Nota-se que todas as FPTs desenvolvidas apresentaram o patamar (c_0+C) inferior ao patamar dos dados de logaritmo neperiano da K_{sat} observados em campo, que corresponde à variância dos dados a priori. A FPT M-1 superestimou o alcance (1350m), enquanto as FPTs M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, e M-7 subestimaram o alcance. Porém, a FPT M-6 apresentou o mesmo valor do coeficiente de Cambardella et. al. (1994), caracterizando o mesmo grau de dependência espacial dos valores observados (fraco). Entretanto, com exceções das FPTs M-1, M-2 e M-7, com alcances de 1350m, 780m e 630m, respectivamente, todas as outras FPTs apresentaram alcances iguais (600m). O GDE foi fraco para os dados de logaritmo neperiano da K_{sat} observados e estimados pelas FPTs M-4 e M-6 e moderados para os dados estimados pelas FPTs M-1, M-2, M-3, M-5 e M-7.

Huang et al. (2016) também encontraram um grau de dependência espacial fraco para a K_{sat} , no entanto, o alcance capturado foi de 158m. Já Soares (2018) encontrou um grau de dependência espacial moderado, com alcance de 131m. Os alcances muito inferiores ao encontrado nesse estudo para a K_{sat} (840m nos dados observados) se devem à escala da SBHSR, a qual possui uma amostragem com espaçamento mínimo de 300m.

As FPTs desenvolvidas subestimaram a variância *a priori* dos dados. Lima (2016) relata que os dados estimados de conteúdo de água no solo pelas FPTs apresentaram uma variabilidade menor em relação aos dados originais na modelagem variográfica. De acordo com Nebel et al (2010), as médias e variâncias estimadas foram diferentes dos dados observados em campo e a FPT que teve o melhor desempenho preditivo não foi a mesma que melhor reproduziu a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo observado no campo. Becker et al. (2018) afirmam que a variabilidade global da Ksat estimada pelas FPTs é menor que a variabilidade da Ksat observada em campo em todas as classes de solos estudadas. Ainda segundo Becker et al. (2018), essa subestimação pode ser devido a menor variabilidade espacial dos atributos preditores (frações de distribuições granulométricas, densidade do solo e teor de matéria orgânica). Essa diminuição na amplitude dos dados reflete em uma variância relativamente menor dos dados estimados em relação aos dados observados (ROMANO; SANTINI, 1997).

No entanto, a FPT M-2 foi a que apresentou o alcance mais próximo ao alcance dos dados observados em campo. Embora ocorra diferenças entre valores observados e estimados pelas FPTs, a distribuição espacial do atributo pode ser modelada gerando padrões de distribuição espacial semelhantes aos padrões dos dados observados (LIMA, 2016; NEBEL et al., 2010).

6.6.3 Espacialização dos erros de condutividade hidráulica do solo saturado estimados

As Figuras 26 (A a G) demonstram os erros absolutos da Ksat (mm h^{-1}) referentes às FPTs desenvolvidas para os solos da SBHSR.

Observa-se nos mapas de erros absolutos espacializados, que no mapa 26 B, referente à FPT utilizando a densidade do solo, o logaritmo do teor de argila, a raiz quadrada da declividade e o logaritmo da macroporosidade como atributos preditores foram os que apresentaram os menores erros absolutos espacializados.

Nota-se que a FPT M-2, que apresentou uma área com menores erros espacializados, foi a que representou a estrutura de dependência espacial mais próxima aos dados observados. No entanto, não foi a FPT desenvolvida que apresentou o melhor desempenho seguindo a metodologia de Cornelis et al. (2001).

Percebe-se nas Figuras 26 (A a G) que os maiores erros espacializados de Ksat estão no Planossolo e no Argissolo próximo ao Neossolo (Figura 4, p. 39). Isso pode ter ocorrido devido à utilização de poucas amostras de solos coletadas nessas duas regiões da sub-bacia hidrográfica Santa Rita. Já os menores erros foram encontrados no Argissolo vermelho, devido à maior quantidade de dados oriundos desse solo no desenvolvimento das funções.

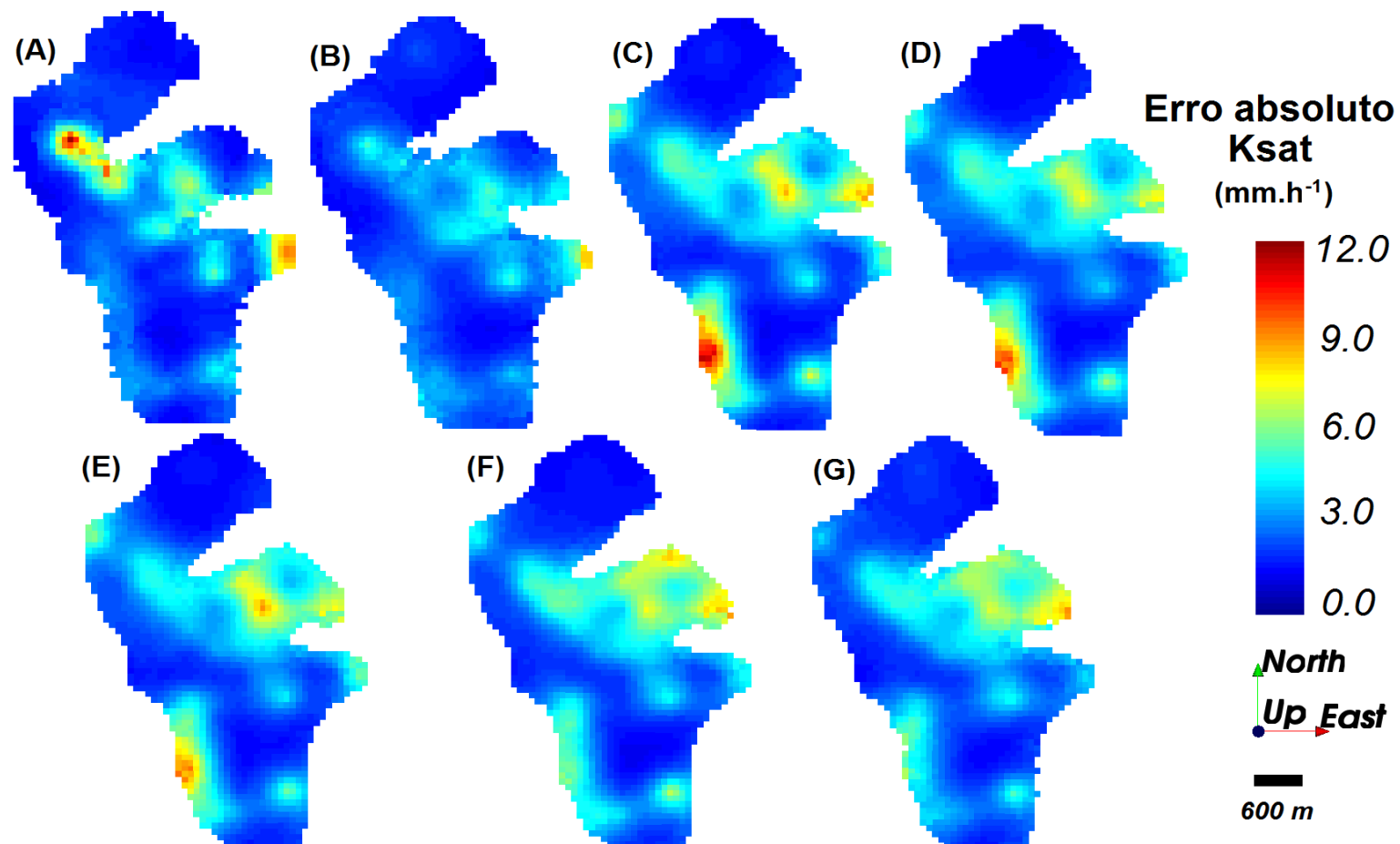


Figura 26 - Distribuição espacial dos erros absolutos de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) referente às estimativas pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas para os solos da sub-bacia hidrográfica Santa Rita.

A:Espacialização dos erros absolutos gerados pela FPT M-1; B:Espacialização dos erros absolutos gerados pela FPT M-2; C:Espacialização dos erros absolutos gerados pela FPT M-3; D:Espacialização dos erros absolutos gerados pela FPT M-4; E: Espacialização dos erros absolutos gerados pela FPT M-5; F:Espacialização dos erros absolutos gerados pela FPT M-6; G:Espacialização dos erros absolutos gerados pela FPT M-7.

6.6.4 Modelagem da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado

As Figuras 27 (A a H) demonstram a distribuição espacial do logaritmo neperiano da K_{sat} observados em campo e estimados pelas FPTs desenvolvidas. Embora muitos estudos apresentem estudos de variabilidade da K_{sat} em sua forma transformada ($\ln(K_{sat})$), do ponto de vista de gestão dos recursos hídricos é importante caracterizar a distribuição espacial em sua grandeza original (mm h^{-1}). Sendo assim, a distribuição espacial da K_{sat} resultante dos dados observados e estimados pelas FPTs estão demonstradas nas Figuras 28 (A a H). De acordo com Pringle et al. (2007), as FPTs estimam valores que são distribuídos no espaço, portanto, para a sua avaliação é necessário considerar os aspectos espaciais.

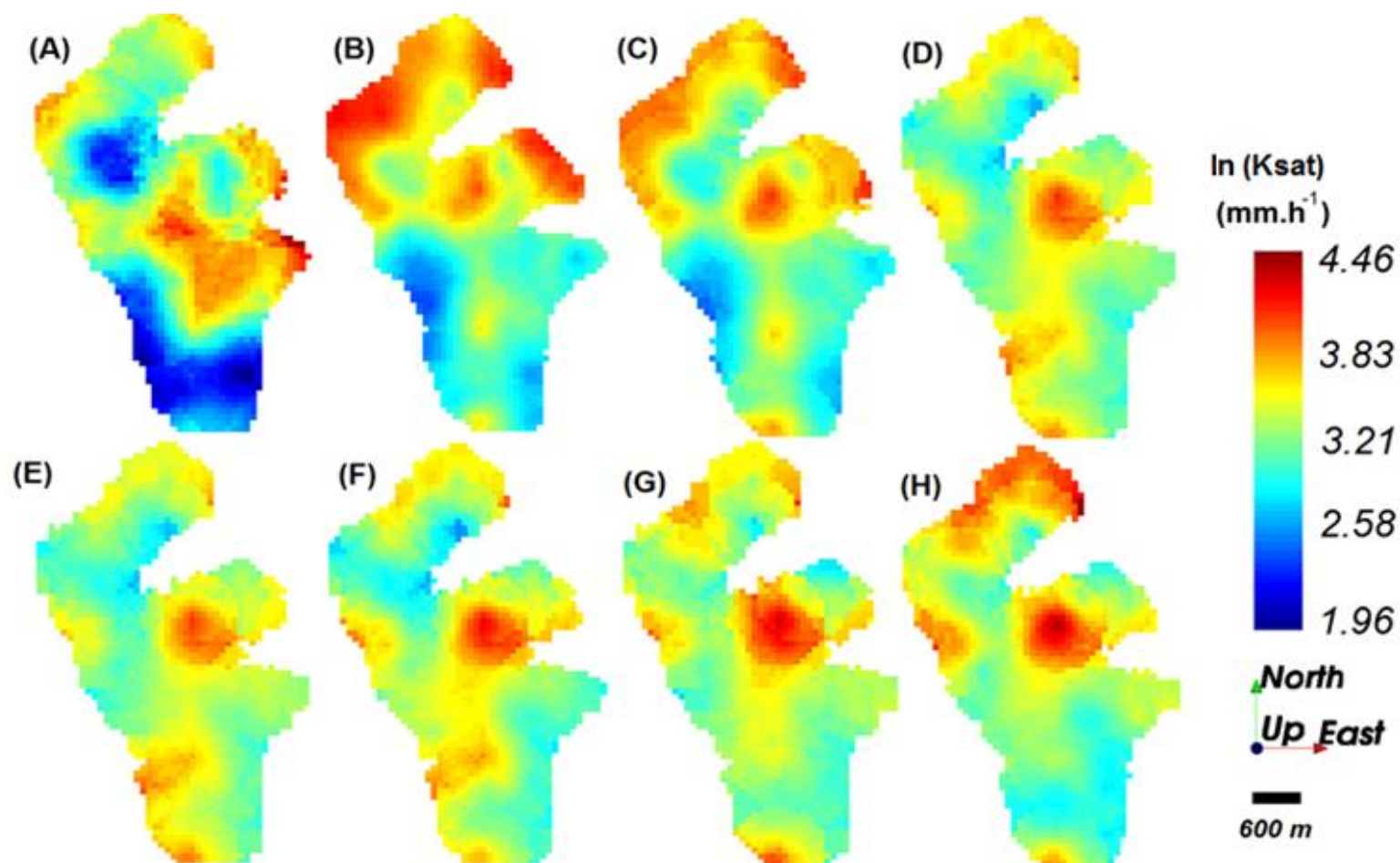


Figura 27 - Distribuição espacial do logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado ($\ln(K_{sat})$) a partir dos dados observados e estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas.

A: Distribuição espacial modelado a partir dos dados observados; B: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-1; C: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-2; D: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-3; E: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-4; F: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-5; G: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-6; H: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-7.

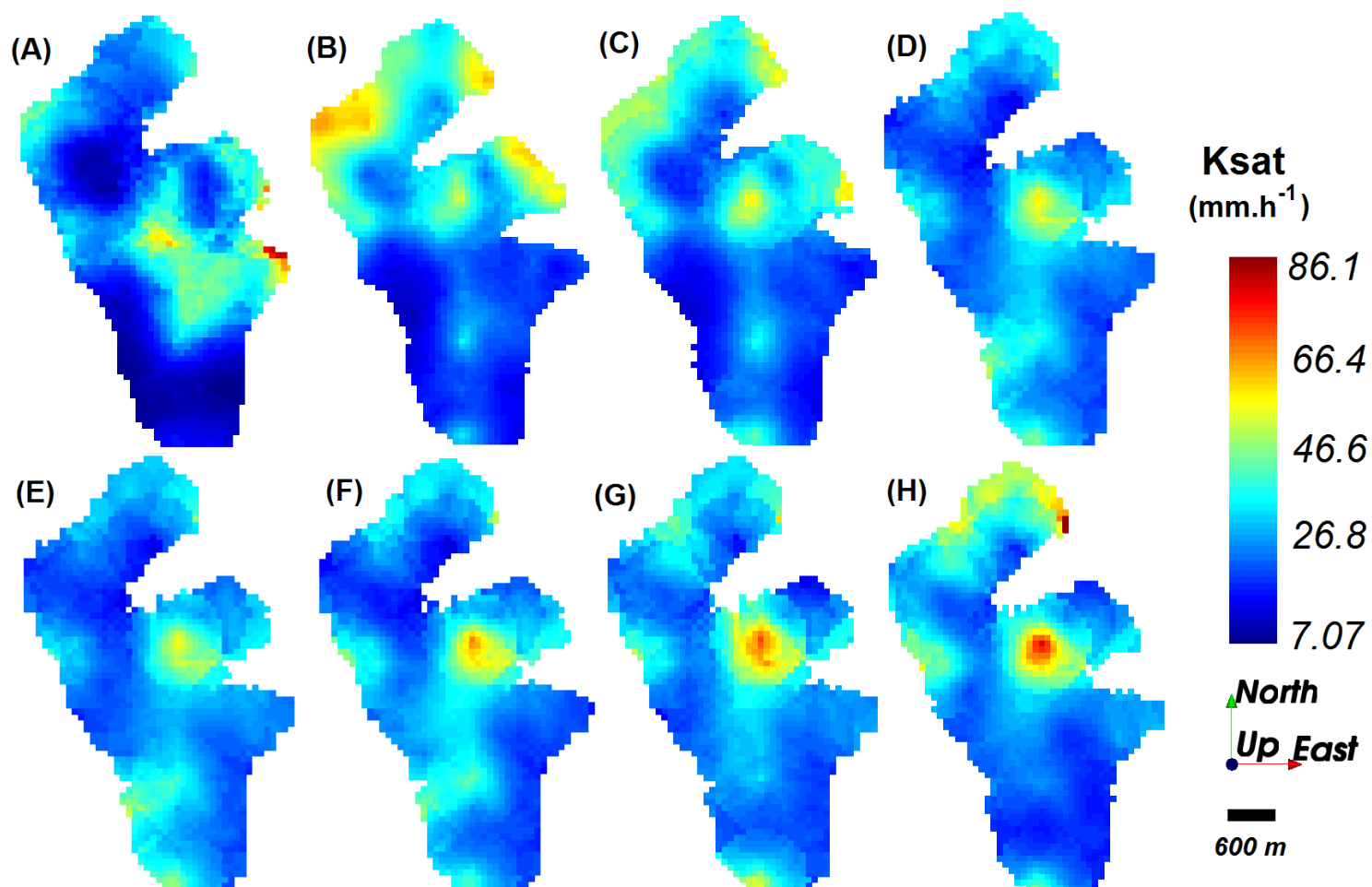


Figura 28 - Distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), a partir dos dados observados e estimados pelas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas.

A: Distribuição espacial modelado a partir dos dados observados; B: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-1; C: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-2; D: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-3; E: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-4; F: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-5; G: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-6; H: Distribuição espacial modelado a partir dos dados estimados pela FPT M-7.

Os dados de Ksat estimados pelas FPTs M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6 e M-7 estão disponíveis no APÊNDICE F.

A distribuição espacial da Ksat a partir da FPT M-2 foi a que mais se aproximou da distribuição espacial dos dados observados em campo, obtendo os menores erros absolutos espacializados, sendo que a FPT M-2 foi desenvolvida utilizando a densidade do solo, o logaritmo do teor de argila, a raiz quadrada da declividade e o logaritmo da macroporosidade. Portanto, esse resultado era esperado, visto que a Ksat possui relação direta com a macroporosidade (MESQUITA; MORAES, 2004).

A FPT que melhor descreveu a distribuição espacial da Ksat, considerando somente os atributos de fácil obtenção, excluindo os dados oriundos da macroporosidade, foi a M-7. A FPT M-7 foi desenvolvida utilizando como preditores a densidade do solo, o teor de areia, o logaritmo do teor de argila e o logaritmo da elevação. Os atributos em comum entre as duas FPTs foram a densidade do solo e o teor de argila. Portanto, a distribuição espacial da Ksat pode ser caracterizada a partir das FPTs desenvolvidas, confirmando a segunda hipótese desse estudo.

Como pode-se observar, grande parte da SBHSR possui coloração azul no mapa (Figura 28), evidenciando uma baixa Ksat. Ao analisar o mapa de uso e ocupação da SBHSR (Figura 9, p. 50), verifica-se que 28,44% representa solo de campo nativo, 11,13% sob cultivo anual e 37,19% sob cultivo perene, obtendo assim, cerca de 76,8% da ocupação por usos, os quais possuem a tendência de Ksat mais baixa em relação ao solo de mata nativa, que representa 20,74% da área. Em áreas não cultivadas, espera-se um maior volume de macroporos em relação às áreas cultivadas, obtendo assim uma maior Ksat, como é o caso de estudo desenvolvido por Albuquerque et al. (2001).

7 Conclusões

Com base nesse estudo, foi possível concluir que os atributos que apresentaram correlação significativa com a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foram o logaritmo da macroporosidade, a microporosidade, o teor de areia, o logaritmo do teor de argila, o logaritmo da porosidade total e a densidade do solo. A macroporosidade foi o atributo que melhor se correlacionou estatisticamente com a K_{sat} . Essa relação é refletida posteriormente no desempenho das funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas. Os atributos topográficos e o uso e ocupação do solo não demonstraram correlação significativa com a K_{sat} .

Os diferentes usos e ocupações encontrados na sub-bacia hidrográfica Santa Rita (SBHSR) influenciaram nos valores de K_{sat} , bem como os atributos físicos estruturais do solo que, por sua vez, influenciam na K_{sat} .

As FPTs, já existentes na literatura, testadas não foram capazes de estimar a K_{sat} para os solos da SBHSR, apresentando elevados erros médios e raiz dos erros médios e baixos coeficientes de correlação e determinação.

As FPTs que melhor descreveram a distribuição espacial da K_{sat} foram desenvolvidas a partir dos dados de densidade do solo, teor de argila, declividade e macroporosidade e dos dados de densidade do solo, teor de argila, teor de areia e elevação. Embora os atributos topográficos não tenham tido correlação significativa com a K_{sat} , a declividade, o aspecto e a elevação estiveram presentes como atributos preditores dentre as sete FPTs com melhores desempenhos. O uso e ocupação do solo também se mostrou um preditor adequado na estimativa de K_{sat} .

As FPTs desenvolvidas para estimar a K_{sat} mostraram potencial para capturar a sua estrutura de dependência espacial. Entretanto, os valores estimados de K_{sat} por meio das FPTs desenvolvidas apresentaram menor variabilidade, resultando na subestimação da variância dos dados observados.

A Krigagem Ordinária indicou que a espacialização dos erros absolutos dos valores estimados de K_{sat} a partir da densidade do solo, teor de argila, macroporosidade e declividade foi a que apresentou os menores erros em relação aos dados observados. Além disso, o padrão de distribuição espacial dos valores estimados de K_{sat} a partir da densidade do solo, teor de argila, macroporosidade e declividade foi a mais similar ao padrão de variabilidade dos dados observados.

Referências

- AGNESE, C.; BAGARELLO, V.; BAIAMONTE, G.; IOVINO, M. Comparing physical quality of forest and pasture soils in a Sicilian watershed. 2011. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, p. 1958-1970, 2011.
- ALBUQUERQUE, J. A. et al. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 963-975, nov./dez. 2005.
- ALLETTO, L.; COQUET, Y.; ROGER-ESTRADE, J. Two-dimensional spatial variation of soil physical properties in two tillage systems. **Soil Use And Management**, v. 26, n. 4, p. 432-444, 14 set. 2010.
- 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, 18 jun. 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, out. 2011.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Introdução à Geoestatística**. Porto Alegre: Estudos Tecnológicos - Acta Geológica Leopoldensia, 1988.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. Porto Alegre: Editora Unisinos. 2003.
- ANNABI, M. et al. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. **Catena**, v. 153, p.157-167, jun. 2017.
- AQUINO, R. E. et al. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 38, n. 2, p. 397-406, 2014.
- AQUINO, R. E. et al. USE OF SCALED SEMIVARIOGRAMS IN THE PLANNING SAMPLE OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES IN SOUTHERN AMAZONAS, BRAZIL. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 21-30, fev. 2015.
- ARAÚJO, Diego C. dos 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, jan. 2018.
- ARRUDA, F. B.; ZULLO Jr., J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 11-15, 1987.

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; PINEDA, M. C. Influence of physical attributes and pedotransfer function for predicting water retention in management systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 11, p. 746-751, nov. 2017.

BAIAMONTE, G. et al. Factors Influencing Point Measurement of Near-surface Saturated Soil Hydraulic Conductivity in a Small Sicilian Basin. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 3, p. 970-982, 9 mar. 2017.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas, **Ciência Rural**, v. 39, p. 1925-1933, 2009.

BARROS, A. H. C.; VAN LIER, J.; MAIA, A. H. N.; SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate waterretention parameters of soils in Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 379-391, 2013.

BECKER, R.; GEBREMICHAEL, M.; MÄRKER, M. Impact of soil surface and subsurface properties on soil saturated hydraulic conductivity in the semi-arid Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, USA. **Geoderma**, v. 322, p. 112-120, jul. 2018.

BENTO, D. F. **Caracterização da variabilidade espacial do carbono orgânico e dos estoques de carbono em solos da região Centro-Oeste do Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 155-163, fev. 2004.

BESKOW, S. et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrol Sci J**, v. 61, p. 2567-2578, 2016.

BITENCOURT, D. G. B. et al. Geostatistical mapping of soil organic carbon using isotropic and anisotropic models considering soil mapping units represented at different scales. In: **21 Word Congress of Soil Science**, Rio de Janeiro, 2018.

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, set. 2010.

BOTULA, Y. D.; VAN RANST, E.; CORNELIS, W. M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. 2014. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 38, n. 3, p. 679-698,

BOUMA, J. Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation. **Advances In Soil Science**, p. 177-213, 1989.

BOUMA, J.; VAN LANEN, J. A. J. Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities. In: BEEK, K. J. et al. (eds.). **Quantified land evaluation**. Netherlands: Earth Science Publications N.6 ITC Publ. Enschede, 1987. p. 106-110.

BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J.; STEPHENSON, G. R. Modifying SCS Hydrologic Soil Groups and Curve Numbers for Rangeland Soils. **ASAE Paper**, n. 84203, 1984.

BURROUGH. P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford-UK: Oxford University Press, 2015.

BUTTLE, J. M.; HOUSE, D. A. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin, **Journal Of Hydrology**, v. 203, n. 1-4, p. 127-142, dez. 1997.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal, Madison**, v. 47, n. 5, p. 1501-1511, Set. 1994.

CAMPBELL, G. S.; SHIOZAWA, S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: VAN GENUCHTEN, M. T. et al. (Eds.). **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. Riverside-CA: University of California, 1994. p. 317-328.

CARSEL, R. F.; PARRISH, R. S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. **Water Resources Research**, v. 24, n. 5, p. 755-769, mai. 1988.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; 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, ago. 2002.

CASTIONE, G. A. F. et al. Variabilidade espacial da textura do solo em área irrigada por pivô central em diferentes posições na paisagem. **Revista Agro@mbiente Online**, v. 9, n. 3, p. 219-226, 7 out. 2015.

CASTELLINI, M.; NIEDDA, M.; PIRASTRU, M.; VENTRELLA, D. Temporal changes of soil physical quality under two residue management systems. **Soil Use and Management**, v. 30, p. 423-434, 2014.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; BHERING, S. B. Relação entre atributos do terreno, material de origem e solos em uma área no noroeste do estado do Rio de Janeiro. **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, p. 147-162, abr. 2013.

CHIBA, M. K.; GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial e temporal de plantas daninhas em Latossolo Vermelho argiloso sob semeadura direta. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 4, p. 735-742, 1 dez. 2010.

CORNELIS, W. M.; RONSYN, J.; VAN MEIRVENNE, M.; HARTMANN, R. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 65, p. 638-648, 2001.

COSBY, B. J. et al. A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p. 682-690, jun. 1984.

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

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Capão do Leão**. EMBRAPA-CPACT (Documentos, 12/96). Pelotas: Ed. UFPel, 1996.

DANE, J. H.; PUCKETT, W. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: VAN GENUCHTEN, M. T. et al. (Eds.), **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. Riverside-CA: University of California, 1994. p. 389-403.

DALBIANO, L. **VARIABILIDADE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA RURAL**. 2009. 116f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DELGADO, F.; BARRETO, L. Una aproximación matemática para la elaboración de curvas de retención de humedad en suelos representativos de los Llanos Occidentales. **Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología**, v. 6, n. 1-2, p. 45-50, 1988.

DONGLI, S. et al. Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. **Geoderma**, v. 286, p. 15-24, jan. 2017.

EBRAHIM-ZADEH, G. et al. Investigating the correlation between soil tensile strength curve and soil water retention curve via modeling. **Soil And Tillage Research**, v. 167, p. 9-29, abr. 2017.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise do Solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 2011.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGIS. Sistema de Informação Geográfica para área de trabalho de computador, versão 10.1. 2014.

FORSYTHE, W. **Física de suelos**. Costa Rica: IICA, 1975.

FREITAS, A. S. et al. Spatial distribution of Yellow Sigatoka Leaf Spot correlated with soil fertility and plant nutrition. **Precision Agriculture**, v. 17, n. 1, p. 93-107, 16 jul. 2015.

GAETAN C.; GUYON X. **Spatial statistics and modeling**. New York: Springer, 2009.

GARCIA, L. et al. Caracterização de solos com terra preta: estudo de caso em um sítio tupi-guarani pré-colonial da Amazônia oriental. **Revista de Arqueologia**, v. 28, n. 1, p. 52-81, 1 jul. 2015.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986.

GHANBARIAN, B.; TASLIMITEHRANI, V.; PACHEPSKY, Y. A. Accuracy of sample dimension-dependent pedotransfer functions in estimation of soil saturated hydraulic conductivity. **Catena**, v. 149, p. 374-380, fev. 2017.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 885-893, 2002.

GIROTTTO, E. **Cobre e zinco no solo sob uso intensivo de dejetos líquidos de suínos**, 2007. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

GODSEY, S.; ELSENBEEER, H. The soil hydrologic response to forest regrowth: a case study from southwestern Amazonia. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 7, p. 1519-1522, 2002.

GONÇALVES, A. D. M. 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, out. 2013.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997.

GRUPELLI, J. L.; ARAÚJO, N.; CHAPA, S. R. Interrelação entre precipitação e parâmetros meteorológicos para Pelotas- RS. In: **XII Congresso de Iniciação Científica e V Encontro de Pós-Graduação**, Pelotas, 2003.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: UFU, 2004

GUIMARÃES, W. D. et al. Spatial variability of the physical attributes of soil under pasture. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247-255, 2016.

HENGL, T. **A Practical Guide Geoestatistical Mapping**. 2009.

HU W.; SHAO M.; WANG Q.; FAN J.; HORTON R. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. **Geoderma**, v. 149, p. 355-366, 2009.

HUANG, M. et al. Characterizing the spatial variability of the hydraulic conductivity of reclamation soils using air permeability. **Geoderma**, v. 262, p. 285-293, jan. 2016.

- HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. (Eds.). **Display and analysis of spatial data**. New York: J. Wiley, 1975. p. 38-53.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.
- JABRO, J. D. VARIABILITY OF FIELD-SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN A HAGERSTOWN SOIL AS AFFECTED BY INITIAL WATER CONTENT. **Soil Science**, v. 161, n. 11, p. 735-739, nov. 1996.
- JANA, R. B.; MOHANTY, B. P. On topographic controls of soil hydraulic parameter scaling at hillslope scales. **Water Resour**, 2012.
- JONG, R.; LOEBEL, K., Empirical relations between soil componentes and water retention at 1/3 and 15 atmospheres. **Can. J. Soil.**, v. 62, p. 343-350, 1982.
- JORDA, H. et al. Using boosted regression trees to explore key factors controlling saturated and near-saturated hydraulic conductivity. **European Journal Of Soil Science**, v. 66, n. 4, p. 744-756, 29 abr. 2015.
- JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. H. J. **Mining geoeststatistics**. New York: Academic Press Inc., 1978.
- 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, dez. 2004.
- KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J., LI, W. **Applied linear statistical models**. 5. ed. Vol. 6. New York: McGraw-Hill, 2005.
- LAMP, J.; KNEIB, W. Zur Quantitativen Erfassung und Bewertung von Pedofunktionen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. **Berlin**, v. 32, p. 695-711, 1981.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1131-1140, 2007.
- LEE, K. E.; FOSTER, R. C. Soil fauna and soil structure. **Soil Research**, v. 29, n. 6, p. 745-774, 1991.
- LEIJ, F. J.; ROMANO, N.; PALLADINO, M.; SCHAAP, M. G.; COPPOLA, A. Topographical attributes to predict soil hydraulic properties along a hillslope transect. **Water Resources Research**, v. 40, p. 1-15, 2004.
- LIAO, K. et al. Assessing Soil Water Retention Characteristics and Their Spatial Variability Using Pedotransfer Functions. **Pedosphere**, v. 21, n. 4, p. 413-422, ago. 2011.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2012.

LINH, T. B. et al. Temporal Variation of Hydro-Physical Properties of Paddy Clay Soil under Different Rice-Based Cropping Systems. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 5, p. 1752-1762, 12 mai. 2017.

LIMA, G. S. **Caracterização físico-hídrica do solo do perímetro irrigado Pontal Sul por funções de pedotransferência**. 2016. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

MAINURI, Z. G.; OWINO, J. O. Effects of land use and management on aggregate stability and hydraulic conductivity of soils within River Njoro Watershed in Kenya. **International Soil And Water Conservation Research**, v. 1, n. 2, p. 80-87, set. 2013.

MARTÍNEZ, L. J.; ZINCK, J. A. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. **Soil And Tillage Research**, v. 75, n. 1, p. 3-18, jan. 2004.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Vol. 14. Paris: Technip, 1962.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, El Paso, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

MCBRATNEY, A. B. et al. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, n. 1-2, p. 41-73, set. 2002.

MCCUEN, R. H.; RAWLS, W. L.; BRAKENSIEK, D. L. Statistical analysis of the Brooks-Corey and Green-Ampt parameters across soil texture. **Water Resour. Res.** v. 17, p. 1005-1013, 1981.

MEDEIROS, J. C. **Funções de pedotransferência em estudos do funcionamento hídrico do solo da região sudeste do estado do Pará**. 2012. 120f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2012.

MEDEIROS, J. C. et al. Assessment of pedotransfer functions for estimating soil water retention curves for the amazona region, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 730-743, 2014.

MESQUITA, M. G. B. 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, jun. 2004.

MENEZES, S. M.; SAMPAIO, F. M. T.; RIBEIRO, K. D. Estudo da condutividade hidráulica relacionada com alguns parâmetros físicos do solo. In: **XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica/ IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas/ III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia**, Curitiba, 2006. p. 149-153.

MONTANARI, R. et al. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1811-1822, dez. 2010. F

MONTANARI, R. et al. VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DE SORGO E DE ATRIBUTOS DO SOLO NA REGIÃO DO ECÓTONO CERRADO-PANTANAL, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 385-396, abr. 2015.

MOORE, I. D. et al. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 57, n. 2, p.443-451, 1993.

MOREIRA W. H. et al. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1315-1326, 2014.

NASRI, B.; FOUCHÉ, O.; TORRI, D. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. **Catena**, v. 131, p.9 9-108, ago. 2015.

NEBEL, Á. L. C. et al. Funções de pedotransferência relacionadas à variabilidade espacial da retenção de água em solos de várzea. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 34, n. 3, p. 669-680, 2010.

NIELSEN, D. R.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics**: Sampling field soil and their vegetation. Reiskirchen: Catena Verlag, 2003.

OLIVEIRA, L. B. et al. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 315-323, mar./abr. 2002.

OLIVEIRA, L. M. **Relação entre atributos do solo aplicando a abordagem em Espaço de Estados em duas bacias hidrográficas na região Sul do Rio Grande do Sul**. 2015. 78f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

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

ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F. B.; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 38, p. 619-626, 2014.

OTTONI, M. V. et al. Hydrophysical Database for Brazilian Soils (HYBRAS) and Pedotransfer Functions for Water Retention. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, p. 1-17, 2018.

OU, Y. et al. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors - A case study of the Black Soil Region of Northeastern China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 245, p. 22-31, jul. 2017.

OZALP, M.; YUKSEL, E. E.; YUKSEK, T. Soil Property Changes After Conversion from Forest to Pasture in Mount Sacinka, Artvin, Turkey. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 4, p. 1007-1017, 11 mar. 2015

PACHEPSKY, Y. A.; TIMLIN, D. J.; RAWLS, W. J. Soil Water Retention as Related to Topographic Variables. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1787-1795, 2001.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Soil structure and pedotransfer functions. **European Journal Of Soil Science**, v. 54, n. 3, p. 443-452, set. 2003.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J.; LIN, H. S. Hydropedology and pedotransfer functions. **Geoderma**, v. 131, n. 3-4, p. 308-316, abr. 2006.

PAPANICOLAOU, A. N. et al. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity at the hillslope scale: Understanding the role of land management and erosional effect. **Geoderma**, v. 243-244, p. 58-68, abr. 2015.

PAUL, O. O.; SEKHON, B. S.; SHARMA, S. Spatial variability and simulation of soil organic carbon under different land use systems: geostatistical approach. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 4, p. 1389-1398, 2 mai. 2018.

PHAM, T. G.; NGUYEN, H. T.; KAPPAS, M. Assessment of soil quality indicators under different agricultural land uses and topographic aspects in Central Vietnam. **International Soil And Water Conservation Research**, v. 6, n. 4, p. 280-288, dez. 2018.

PATIL, N. G.; SINGH, S. K. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties: A Review. **Pedosphere**, v. 26, n. 4, p. 417-430, ago. 2016.

PAUL, O. O.; SEKHON, B. S.; SHARMA, S. Spatial variability and simulation of soil organic carbon under different land use systems: geostatistical approach. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 4, p. 1389-1398, 2 mai. 2018.

PINEDA, C.; VILORIA, J. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la Cuenca del Lago de Valencia. **Venesuelos**, v. 5, n. 1-2, p. 39-45, 1997.

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, mar. 2010.

PRINGLE, M. J. et al. Spatial evaluation of pedotransfer functions using wavelet analysis. **Journal Of Hydrology**, v. 333, n. 2-4, p. 182-198, fev. 2007.

PUCKETT, W. E.; DANE, J. H.; HAJEK, B. F. Physical and Mineralogical Data to Determine Soil Hydraulic Properties1. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 49, n. 4, p. 831-836, 1985.

RASCHKA, S. **Model Evaluation, Model Selection, and Algorithm Selection in Machine Learning**. Cornell University, 2018.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties. Trans. **American Society of Agronomy**, v. 25, p. 1316-1320, 1982.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: JONES, E. B.; WARD, T. J. (eds.) **Watershed Management in the Eighties**. New York: Proc. Irrig. Drain. Div., ASCE, 1985. p. 239-299.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Soil, Plant and Atmosphere: Concepts, Processes and Applications**. Switzerland: Springer Nature, 2020.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop. production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, mar. 2009.

REICHERT, J. M. et al. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1547-1560, dez. 2009.

REMY, N. **Geostatistical Earth Modeling Software: User's Manual**. May 2004.

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. 5, p. 1-12, mai. 2011.

ROMANO, N.; SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal Of Hydrology**, v. 202, n. 1-4, p. 137-157, dez.1997.

ROSA, M. **Geografia de Pelotas**. Pelotas: Editora da Universidade Federal de Pelotas, 1985.

SACCO, D. et al. Seasonal variation of soil physical properties under different water managements in irrigated rice. **Soil And Tillage Research**, v. 118, p. 22-31, jan. 2012.

SALEMI, L. F. et al. Land-use change in the Atlantic rainforest region: Consequences for the hydrology of small catchments. **Journal Of Hydrology**, v. 499, p. 100-109, ago. 2013.

SAXTON, K. E. et al. Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 50, n. 4, p. 1031-1036, 1986.

SCHEIDEGGER, A. E. **The Physics of Flow through Porous Media**. Toronto: University of Toronto Press, 1974.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika Trust**, London, v. 52, p. 591-609, 3/4 Dez. 1965.

SHWETHA, P.; PRASANNA, K. Pedotransfer Functions for the Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity for Some Indian Sandy Soils. **Eurasian Soil Science**, v. 51, n. 9, p. 1042-1049, set. 2018.

SIRTOLI, A. E. et al. ATRIBUTOS DO RELEVO DERIVADOS DE MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO E SUAS RELAÇÕES COM SOLOS. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 3, p. 317-329, 24 jun. 2008.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Coleção ensino ciência da tecnologia. 3. Ed. Portugal, 2014.

SOARES, F. C. **Uso de diferentes metodologias na geração de Funções de Pedotransferência para retenção de água em solos do Rio Grande do Sul**. 200f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SOARES, M. F. **Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu – RS**. 2018. 103f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

STURARO, J. R. **Apostila de geoestatística básica**. São Paulo: UNESP, 215. Disponível:
<<http://igce.rc.unesp.br/Home/Departamentos47/geologiaaplicada/apostila-basica.pdf>> Acesso em 26 out. 2019.

SILVA, D. F. **Mapeamento Geoestatístico dos Parâmetros NSPT e Torque Máximo de Solos em Parte da Bacia do Ribeirão Cambezinho em Londrina/PR**. Londrina, 2008.

SILVA, A. F. et al. Simulação sequencial de atributos diagnósticos do solo. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 19, n. 5, p. 418-425, 2015.

SILVA, A. C. et al. An Assessment of Pedotransfer Function Performance for the Estimation of Spatial Variability of Key Soil Hydraulic Properties. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 9, p. 1-10, 2017.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 327-338, 2000.

TOMER, M. D. et al. Surface-Soil Properties and Water Contents across Two Watersheds with Contrasting Tillage Histories. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 620-630, 2006.

TRIPATHI, R. et al. Characterizing spatial variability of soil properties in salt affected coastal India using geostatistics and kriging. **Arabian Journal Of Geosciences**, v. 8, n. 12, p. 10693-10703, 1 jul. 2015.

TRUEBA, C.; MILLAN, R.; SCHMID, T.; LAGO, C.; ROQUERO, C.; MAGISTER, M. **Base de datos de propiedades edafológicas de los suelos espanoles**. Madrid: CIEMAT, 2000.

TUCHTENHAGEN, I. K. **Variabilidade espacial de indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, Pelotas/RS**. 2018. 105f. Tese (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

VEREECKEN, H.; FEYEN, J.; MAES, J. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. **Soil Science**, v. 148, p. 389-403, 1989.

VEREECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J. ESTIMATING UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY FROM EASILY MEASURED SOIL PROPERTIES. **Soil Science**, v. 149, n. 1, p. 1-12, jan. 1990.

VEREECKEN, H.; HERBST, M. Statistical regression. In: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (Eds.). **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology Developments in Soil Science**, Amsterdam, v. 30, p. 3-18, 2004.

VEREECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone J.**, v. 9, p. 1-26, 2010.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. V. 1. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R. et al. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ, V. et al. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. V. 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 1-45.

XU, C. et al. Enhancing pedotransfer functions (FPTs) using soil spectral reflectance data for estimating saturated hydraulic conductivity in southwestern China. **Catena**, v. 158, p. 350-356, nov. 2017.

WAGNER, B. et al. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. **Geoderma**, v. 102, n. 3-4, p. 275-297, ago. 2001.

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

WÖSTEN, J. H. M.; VAN GENUCHTEN, M. T. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. **Soil Sci Soc. Am J.**, v. 52, p. 1762-1770, 1988.

WÖSTEN, J. H. M.; FINKE, P. A.; JANSEN, M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 66, p. 227-237, 1995.

WÖSTEN, J. H. M. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (eds.). **Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science**, Elsevier, v. 25, p. 221-245, 1997.

WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A.; NEMES, A.; BAS C. L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 90, p. 169-185, 1999.

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

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H.; MORAES, J. M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. **Forest Ecology And Management**, v. 222, n. 1-3, p. 29-38, fev. 2006.

ZONTA, J. H. et al. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 595-602, jun. 2014.

ZHAO, C. et al. Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China. **Catena**, v. 143, p. 1-6, ago. 2016.

ZHOU, X.; LIN, H. S.; WHITE, E. A. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. **Catena**, v. 73, n. 2, p. 180-188, abr. 2008.

Apêndices

APÊNDICE A – Banco de dados referente aos 80 pontos amostrais dos atributos físico-hídricos do solo e topográficos utilizados neste estudo

Norte (utm)	Leste (utm)	ksat	ARG	SIL	ARE	Ds	Micro	Macro	PT	MO	Uso	Elev	Decl	Curv	ASP
353976,58	6496425,15	1,10	44,53	17,67	37,80	1,50	0,35	0,10	0,38	2,12	1,00	148,00	7,19	0,36	247,83
353681,28	6496126,23	23,98	14,28	21,47	64,25	1,60	0,25	0,10	0,35	1,23	1,00	137,00	11,75	0,72	87,61
356669,73	6494940,65	263,62	18,51	18,59	62,90	1,59	0,33	0,06	0,40	1,92	1,00	111,00	1,75	-0,12	188,13
355186,93	6493426,63	20,53	17,00	31,40	51,60	1,65	0,26	0,08	0,33	1,19	1,00	53,00	3,23	-0,12	4,40
355183,45	6492828,77	112,72	7,40	6,50	86,10	1,48	0,23	0,22	0,45	0,62	1,00	45,00	1,98	0,72	270,00
354873,67	6497922,58	34,04	16,93	17,17	65,90	1,55	0,33	0,06	0,39	2,46	2,00	198,00	15,31	0,36	108,43
354585,31	6497630,88	29,23	7,74	15,21	77,05	1,73	0,19	0,13	0,32	1,00	2,00	180,00	12,92	-0,60	181,08
354880,81	6497620,24	27,19	34,28	32,67	33,05	1,30	0,43	0,07	0,50	3,33	2,00	189,00	0,50	0,00	180,00
355179,75	6497627,20	37,38	15,64	19,81	64,55	1,57	0,26	0,13	0,39	2,07	2,00	166,00	7,07	-0,60	155,22
354877,26	6497328,52	25,70	15,68	17,77	66,55	1,57	0,28	0,10	0,38	2,50	2,00	165,00	4,95	-0,12	180,00
355469,89	6497324,96	181,77	12,18	18,57	69,25	1,39	0,20	0,24	0,44	2,54	2,00	168,00	2,99	0,00	155,56
354279,29	6497022,61	24,69	28,92	16,63	54,45	1,34	0,34	0,12	0,46	3,83	2,00	155,00	10,07	-0,48	223,03
354877,07	6497022,69	5,43	36,38	22,42	41,20	1,57	0,41	0,04	0,45	1,90	2,00	130,00	3,23	0,12	175,60
353385,67	6496723,86	159,05	37,16	14,99	47,85	1,51	0,27	0,18	0,45	1,98	2,00	155,00	2,74	0,12	174,81
353681,26	6496723,73	36,95	20,82	21,73	57,45	1,57	0,28	0,14	0,42	1,23	2,00	158,00	4,90	-0,36	225,00
353983,65	6496727,39	146,11	16,74	15,76	67,50	1,40	0,24	0,20	0,44	2,77	2,00	155,00	6,01	-1,44	80,54
354613,76	6496796,40	11,84	32,07	17,28	50,65	1,44	0,36	0,07	0,43	3,88	2,00	144,00	3,77	0,00	66,80
353382,26	6496425,06	64,71	13,38	19,82	66,80	1,62	0,26	0,12	0,38	0,88	2,00	152,00	4,76	-0,48	27,90
355781,35	6496428,59	130,63	18,44	44,96	36,60	1,43	0,27	0,18	0,45	3,72	2,00	132,00	2,24	0,00	263,66
353983,70	6496126,19	1,50	35,98	21,67	42,35	1,43	0,39	0,03	0,42	2,48	2,00	121,00	1,49	-0,36	180,00
355179,68	6496126,37	233,31	28,72	18,68	52,60	1,42	0,27	0,14	0,41	2,47	2,00	100,00	5,47	0,24	251,57

Norte (utm)	Leste (utm)	ksat	ARG	SIL	ARE	Ds	Micro	Macro	PT	MO	Uso	Elev	Decl	Curv	ASP
356080,40	6496122,61	56,61	33,07	25,23	41,70	1,40	0,32	0,14	0,45	3,14	2,00	115,00	3,72	0,24	93,81
353983,70	6495827,44	20,48	17,08	31,42	51,50	1,33	0,42	0,07	0,49	2,87	2,00	119,00	2,80	-0,24	45,00
354279,26	6495827,60	2,33	37,96	11,84	50,20	1,42	0,37	0,05	0,42	2,96	2,00	128,00	5,64	0,48	344,74
354581,67	6495827,55	2,31	43,18	14,02	42,80	1,37	0,35	0,08	0,43	2,53	2,00	119,00	6,78	0,72	303,11
354884,35	6495827,48	13,12	21,79	14,96	63,25	1,44	0,31	0,07	0,38	1,79	2,00	104,00	4,56	-0,24	40,60
354880,64	6495528,68	22,39	11,85	17,35	70,80	1,51	0,24	0,14	0,38	1,22	2,00	104,00	5,64	0,12	195,26
355179,86	6494927,68	34,05	12,85	21,35	65,80	1,60	0,24	0,10	0,35	1,03	2,00	67,00	6,11	0,48	75,96
355482,30	6494923,90	7,59	15,74	20,06	64,20	1,62	0,31	0,05	0,35	1,34	2,00	63,00	4,95	0,36	180,00
355778,04	6494993,00	94,76	12,12	24,83	63,05	1,62	0,29	0,05	0,35	1,62	2,00	65,00	2,24	-0,48	186,34
356076,74	6494927,57	26,33	15,87	23,53	60,60	1,49	0,27	0,10	0,37	2,07	2,00	80,00	4,95	-0,48	233,13
356379,39	6494927,46	24,19	17,92	24,43	57,65	1,67	0,29	0,02	0,32	1,58	2,00	103,00	4,71	0,36	273,01
355179,88	6494625,23	104,54	12,19	18,61	69,20	1,59	0,28	0,10	0,38	1,14	2,00	56,00	6,25	-0,72	108,43
355478,84	6494625,10	51,17	29,79	24,06	46,15	1,50	0,35	0,06	0,42	2,50	2,00	72,00	7,95	0,00	29,74
355781,47	6494625,32	197,51	29,44	24,06	46,50	1,45	0,37	0,05	0,42	3,90	2,00	83,00	1,79	0,24	303,69
356080,42	6494625,18	15,16	13,65	15,10	71,25	1,63	0,28	0,07	0,35	1,36	2,00	98,00	0,78	0,12	251,57
354581,76	6494322,71	1,70	16,58	24,57	58,85	1,74	0,30	0,02	0,33	1,88	2,00	101,00	4,39	0,60	73,61
354880,65	6494326,29	51,02	16,84	20,71	62,45	1,56	0,31	0,07	0,38	1,40	2,00	76,00	6,88	-0,96	68,96
355485,91	6494326,45	46,79	19,54	23,06	57,40	1,53	0,34	0,09	0,43	1,58	2,00	76,00	5,69	0,72	214,38
355845,96	6494371,93	26,10	16,42	23,13	60,45	1,67	0,32	0,06	0,38	1,39	2,00	85,00	1,89	-0,60	113,20
355781,43	6494024,13	15,50	27,00	22,95	50,05	1,54	0,32	0,08	0,40	2,11	2,00	75,00	7,36	-0,48	230,44
354578,26	6493728,85	3,68	23,02	47,98	29,00	0,97	0,56	0,03	0,59	3,45	2,00	57,00	3,17	0,00	38,66
355485,83	6493728,95	27,16	12,00	26,40	61,60	1,54	0,31	0,06	0,37	0,85	2,00	59,00	5,20	0,12	272,73
355781,33	6493728,76	7,05	28,22	20,84	50,98	1,60	0,32	0,05	0,37	1,72	2,00	71,00	5,26	-0,12	311,19
354872,91	6493414,32	6,34	12,40	27,50	60,10	1,66	0,28	0,07	0,35	1,10	2,00	49,00	2,97	-0,12	270,00

Norte (utm)	Leste (utm)	ksat	ARG	SIL	ARE	Ds	Micro	Macro	PT	MO	Uso	Elev	Decl	Curv	ASP
355485,90	6493422,81	9,22	17,97	26,73	55,30	1,55	0,32	0,07	0,39	1,84	2,00	66,00	0,50	-0,36	180,00
355781,39	6493422,93	1,16	13,87	20,83	65,30	1,59	0,33	0,03	0,36	1,79	2,00	74,00	2,04	0,00	194,04
354877,25	6493124,15	3,11	14,53	25,02	60,45	1,64	0,31	0,03	0,35	1,09	2,00	49,00	1,79	0,48	236,31
355183,21	6493127,83	3,38	15,75	18,10	66,15	1,69	0,27	0,05	0,32	0,97	2,00	48,00	3,45	0,48	201,04
355777,92	6493124,13	7,10	25,11	21,04	53,85	1,60	0,35	0,05	0,40	2,99	2,00	69,00	7,18	0,36	254,05
355482,35	6492828,95	23,61	11,97	20,08	67,95	1,69	0,27	0,07	0,34	1,37	2,00	46,00	3,23	-0,36	327,53
355781,55	6492807,57	3,37	15,38	20,72	63,90	1,65	0,29	0,04	0,33	3,90	2,00	104,00	4,67	0,00	57,99
355485,78	6496126,34	1,57	29,12	22,63	48,25	1,65	0,32	0,03	0,34	2,06	3,00	121,00	2,97	0,60	270,00
353677,65	6495824,04	79,65	19,34	15,36	65,30	1,53	0,26	0,15	0,41	1,91	3,00	132,00	10,55	-0,12	181,33
354279,26	6495528,54	58,23	15,02	20,73	64,25	1,65	0,26	0,10	0,36	1,55	3,00	129,00	3,99	0,72	150,26
354585,38	6495226,40	43,81	15,80	21,05	63,15	1,60	0,30	0,06	0,36	1,75	3,00	101,00	4,76	0,36	207,90
354880,67	6495226,24	188,05	19,20	19,00	61,80	1,56	0,28	0,09	0,37	1,15	3,00	86,00	7,39	0,36	115,71
355179,68	6495222,73	167,68	16,63	23,02	60,35	1,56	0,32	0,05	0,38	2,00	3,00	80,00	5,34	-0,24	193,39
355482,45	6494027,65	25,19	11,07	22,08	66,85	1,69	0,28	0,05	0,33	1,70	3,00	62,00	4,67	0,72	212,01
355179,85	6493725,28	16,80	12,82	24,48	62,70	1,80	0,25	0,06	0,30	1,03	3,00	51,00	0,78	-0,12	108,43
354326,94	6497599,88	30,67	22,77	19,68	57,55	1,48	0,30	0,12	0,42	3,02	4,00	202,00	3,45	0,12	111,04
354289,55	6496593,41	109,38	20,86	15,24	63,90	1,47	0,29	0,13	0,42	1,76	4,00	132,00	4,97	-0,24	84,29
353980,22	6497026,09	21,58	20,96	26,44	52,60	1,32	0,34	0,14	0,47	3,49	4,00	168,00	3,57	0,36	123,69
355781,40	6496122,76	26,87	19,75	18,00	62,25	1,30	0,30	0,13	0,43	1,67	4,00	106,00	1,75	-0,12	171,87
355169,70	6495821,84	919,93	5,82	5,28	88,90	1,28	0,11	0,29	0,40	0,74	4,00	84,00	1,11	0,00	243,43
355485,79	6495823,89	2,39	16,75	24,40	58,85	1,47	0,33	0,07	0,40	2,03	4,00	95,00	9,03	-0,36	150,64
355777,66	6495823,96	7,08	12,62	20,53	66,85	1,66	0,26	0,06	0,33	1,16	4,00	91,00	3,17	-0,36	128,66
356383,01	6495824,07	695,51	20,56	28,94	50,50	1,24	0,22	0,22	0,44	3,78	4,00	105,00	3,23	0,72	32,47
353983,80	6495521,60	174,41	11,26	15,74	73,00	1,44	0,19	0,21	0,41	2,68	4,00	139,00	3,57	0,36	236,31
354585,35	6495528,85	131,93	23,48	20,52	56,00	1,56	0,30	0,12	0,43	2,44	4,00	118,00	6,56	0,24	109,80

Norte (utm)	Leste (utm)	ksat	ARG	SIL	ARE	Ds	Micro	Macro	PT	MO	Uso	Elev	Decl	Curv	ASP
355183,30	6495528,61	16,47	14,16	22,89	62,95	1,35	0,32	0,10	0,42	2,14	4,00	97,00	2,13	0,00	125,54
354273,33	6495210,40	3,62	25,28	25,32	49,40	1,75	0,26	0,03	0,29	1,60	4,00	106,00	3,79	-0,12	78,69
353983,76	6494927,49	34,98	24,37	18,78	56,85	1,48	0,38	0,06	0,44	3,27	4,00	124,00	5,53	0,36	296,57
354282,77	6494924,01	38,72	15,43	31,87	52,70	1,65	0,30	0,04	0,34	1,40	4,00	115,00	8,60	0,12	23,63
354581,73	6494923,90	31,31	19,00	17,05	63,95	1,53	0,33	0,05	0,38	1,42	4,00	94,00	6,41	0,24	74,36
354877,22	6494927,44	39,79	17,04	17,66	65,30	1,59	0,34	0,05	0,39	1,72	4,00	88,00	9,36	0,84	299,93
354585,36	6494628,90	3,62	15,38	20,72	63,90	1,65	0,29	0,04	0,33	1,46	4,00	104,00	4,67	0,00	57,99
354884,31	6494628,79	9,51	15,03	22,02	62,95	1,66	0,36	0,04	0,39	2,18	4,00	79,00	6,19	0,12	151,39
355179,64	6494322,78	48,70	18,80	30,90	50,30	1,43	0,38	0,08	0,47	2,58	4,00	58,00	2,89	-0,12	59,04
355204,13	6494026,79	73,16	13,62	32,28	54,10	1,28	0,28	0,18	0,46	2,97	4,00	55,00	1,40	-0,24	135,00

Ksat: condutividade hidráulica do solo saturado; ARG: teor de argila; SIL: teor de silte; ARE: teor de areia; Ds: densidade do solo; Micro: microporosidade; Macro: macroporosidade; PT: porosidade total; MO: teor de matéria orgânica; Uso: índice de uso e ocupação do solo; Elev: elevação; Decl: declividade; Curv: curvatura; ASP: aspecto.

APÊNDICE B – 57 pontos amostrais referentes aos 75% dos dados sorteados aleatoriamente para o desenvolvimento de funções de pedotransferência

Norte (utm)	Leste (utm)	ln(Ksat)	log(ARG)	SIL	ARE	Ds	Micro	log(Macro)	log(PT)	log(MO)	USO	log(Elev)	SQR(Decl)	Curv	ASP
354873,67	6497922,58	3,53	1,23	17,17	65,90	1,55	0,33	-1,21	-0,41	0,39	2,00	2,30	3,91	0,36	108,43
354326,94	6497599,88	3,42	1,36	19,68	57,55	1,48	0,30	-0,94	-0,38	0,48	4,00	2,31	1,86	0,12	111,04
354880,81	6497620,24	3,30	1,54	32,67	33,05	1,30	0,43	-1,13	-0,30	0,52	2,00	2,28	0,70	0,00	180,00
354289,55	6496593,41	4,69	1,32	15,24	63,90	1,47	0,29	-0,90	-0,38	0,25	4,00	2,12	2,23	-0,24	84,29
354877,26	6497328,52	3,25	1,20	17,77	66,55	1,57	0,28	-1,00	-0,42	0,40	2,00	2,22	2,22	-0,12	180,00
355469,89	6497324,96	5,20	1,09	18,57	69,25	1,39	0,20	-0,62	-0,35	0,41	2,00	2,23	1,73	0,00	155,56
353980,22	6497026,09	3,07	1,32	26,44	52,60	1,32	0,34	-0,86	-0,33	0,54	4,00	2,23	1,89	0,36	123,69
354279,29	6497022,61	3,21	1,46	16,63	54,45	1,34	0,34	-0,92	-0,34	0,58	2,00	2,19	3,17	-0,48	223,03
354877,07	6497022,69	1,69	1,56	22,42	41,20	1,57	0,41	-1,40	-0,35	0,28	2,00	2,11	1,80	0,12	175,60
353681,26	6496723,73	3,61	1,32	21,73	57,45	1,57	0,28	-0,87	-0,38	0,09	2,00	2,20	2,21	-0,36	225,00
353983,65	6496727,39	4,98	1,22	15,76	67,50	1,40	0,24	-0,70	-0,36	0,44	2,00	2,19	2,45	-1,44	80,54
354613,76	6496796,40	2,47	1,51	17,28	50,65	1,44	0,36	-1,15	-0,37	0,59	2,00	2,16	1,94	0,00	66,80
353382,26	6496425,06	4,17	1,13	19,82	66,80	1,62	0,26	-0,91	-0,42	-0,06	2,00	2,18	2,18	-0,48	27,90
353976,58	6496425,15	0,09	1,65	17,67	37,80	1,50	0,35	-0,99	-0,42	0,33	1,00	2,17	2,68	0,36	247,83
355781,35	6496428,59	4,87	1,27	44,96	36,60	1,43	0,27	-0,75	-0,35	0,57	2,00	2,12	1,50	0,00	263,66
353681,28	6496126,23	3,18	1,15	21,47	64,25	1,60	0,25	-0,99	-0,45	0,09	1,00	2,14	3,43	0,72	87,61
355781,40	6496122,76	3,29	1,30	18,00	62,25	1,30	0,30	-0,90	-0,37	0,22	4,00	2,03	1,32	-0,12	171,87
353677,65	6495824,04	4,38	1,29	15,36	65,30	1,53	0,26	-0,81	-0,38	0,28	3,00	2,12	3,25	-0,12	181,33
353983,70	6495827,44	3,02	1,23	31,42	51,50	1,33	0,42	-1,13	-0,31	0,46	2,00	2,08	1,67	-0,24	45,00
354581,67	6495827,55	0,84	1,64	14,02	42,80	1,37	0,35	-1,10	-0,36	0,40	2,00	2,08	2,60	0,72	303,11
355777,66	6495823,96	1,96	1,10	20,53	66,85	1,66	0,26	-1,21	-0,49	0,07	4,00	1,96	1,78	-0,36	128,66
356383,01	6495824,07	6,54	1,31	28,94	50,50	1,24	0,22	-0,65	-0,36	0,58	4,00	2,02	1,80	0,72	32,47
353983,80	6495521,60	5,16	1,05	15,74	73,00	1,44	0,19	-0,67	-0,39	0,43	4,00	2,14	1,89	0,36	236,31

Norte (utm)	Leste (utm)	ln(Ksat)	log(ARG)	SIL	ARE	Ds	Micro	log(Macro)	log(PT)	log(MO)	USO	log(Elev)	SQR(Decl)	Curv	ASP
354279,26	6495528,54	4,06	1,18	20,73	64,25	1,65	0,26	-1,02	-0,45	0,19	3,00	2,11	2,00	0,72	150,26
354585,35	6495528,85	4,88	1,37	20,52	56,00	1,56	0,30	-0,91	-0,37	0,39	4,00	2,07	2,56	0,24	109,80
355183,30	6495528,61	2,80	1,15	22,89	62,95	1,35	0,32	-1,00	-0,37	0,33	4,00	1,99	1,46	0,00	125,54
354273,33	6495210,40	1,29	1,40	25,32	49,40	1,75	0,26	-1,47	-0,53	0,21	4,00	2,03	1,95	-0,12	78,69
354585,38	6495226,40	3,78	1,20	21,05	63,15	1,60	0,30	-1,24	-0,45	0,24	3,00	2,00	2,18	0,36	207,90
354880,67	6495226,24	5,24	1,28	19,00	61,80	1,56	0,28	-1,04	-0,44	0,06	3,00	1,93	2,72	0,36	115,71
355179,68	6495222,73	5,12	1,22	23,02	60,35	1,56	0,32	-1,28	-0,42	0,30	3,00	1,90	2,31	-0,24	193,39
354282,77	6494924,01	3,66	1,19	31,87	52,70	1,65	0,30	-1,43	-0,47	0,15	4,00	2,06	2,93	0,12	23,63
355179,86	6494927,68	3,53	1,11	21,35	65,80	1,60	0,24	-0,99	-0,46	0,01	2,00	1,83	2,47	0,48	75,96
355482,30	6494923,90	2,03	1,20	20,06	64,20	1,62	0,31	-1,35	-0,45	0,13	2,00	1,80	2,22	0,36	180,00
355778,04	6494993,00	4,55	1,08	24,83	63,05	1,62	0,29	-1,28	-0,46	0,21	2,00	1,81	1,50	-0,48	186,34
356076,74	6494927,57	3,27	1,20	23,53	60,60	1,49	0,27	-0,99	-0,43	0,32	2,00	1,90	2,22	-0,48	233,13
356379,39	6494927,46	3,19	1,25	24,43	57,65	1,67	0,29	-1,64	-0,50	0,20	2,00	2,01	2,17	0,36	273,01
356669,73	6494940,65	5,57	1,27	18,59	62,90	1,59	0,33	-1,20	-0,40	0,28	1,00	2,05	1,32	-0,12	188,13
354585,36	6494628,90	1,29	1,19	20,72	63,90	1,65	0,29	-1,38	-0,48	0,17	4,00	2,02	2,16	0,00	57,99
355478,84	6494625,10	3,94	1,47	24,06	46,15	1,50	0,35	-1,21	-0,38	0,40	2,00	1,86	2,82	0,00	29,74
355781,47	6494625,32	5,29	1,47	24,06	46,50	1,45	0,37	-1,31	-0,38	0,59	2,00	1,92	1,34	0,24	303,69
354581,76	6494322,71	0,53	1,22	24,57	58,85	1,74	0,30	-1,64	-0,48	0,27	2,00	2,00	2,09	0,60	73,61
354880,65	6494326,29	3,93	1,23	20,71	62,45	1,56	0,31	-1,18	-0,42	0,15	2,00	1,88	2,62	-0,96	68,96
355485,91	6494326,45	3,85	1,29	23,06	57,40	1,53	0,34	-1,07	-0,37	0,20	2,00	1,88	2,39	0,72	214,38
355845,96	6494371,93	3,26	1,22	23,13	60,45	1,67	0,32	-1,20	-0,42	0,14	2,00	1,93	1,37	-0,60	113,20
355204,13	6494026,79	4,29	1,13	32,28	54,10	1,28	0,28	-0,74	-0,34	0,47	4,00	1,74	1,18	-0,24	135,00
355482,45	6494027,65	3,23	1,04	22,08	66,85	1,69	0,28	-1,34	-0,49	0,23	3,00	1,79	2,16	0,72	212,01
355781,43	6494024,13	2,74	1,43	22,95	50,05	1,54	0,32	-1,08	-0,39	0,32	2,00	1,88	2,71	-0,48	230,44
354578,26	6493728,85	1,30	1,36	47,98	29,00	0,97	0,56	-1,48	-0,23	0,54	2,00	1,76	1,78	0,00	38,66

Norte (utm)	Leste (utm)	ln(Ksat)	log(ARG)	SIL	ARE	Ds	Micro	log(Macro)	log(PT)	log(MO)	USO	log(Elev)	SQR(Decl)	Curv	ASP
355179,85	6493725,28	2,82	1,11	24,48	62,70	1,80	0,25	-1,25	-0,52	0,01	3,00	1,71	0,89	-0,12	108,43
355485,83	6493728,95	3,30	1,08	26,40	61,60	1,54	0,31	-1,19	-0,43	-0,07	2,00	1,77	2,28	0,12	272,73
355781,33	6493728,76	1,95	1,45	20,84	50,98	1,60	0,32	-1,33	-0,43	0,24	2,00	1,85	2,29	-0,12	311,19
354872,91	6493414,32	1,85	1,09	27,50	60,10	1,66	0,28	-1,18	-0,46	0,04	2,00	1,69	1,72	-0,12	270,00
355186,93	6493426,63	3,02	1,23	31,40	51,60	1,65	0,26	-1,12	-0,48	0,08	1,00	1,72	1,80	-0,12	4,40
354877,25	6493124,15	1,14	1,16	25,02	60,45	1,64	0,31	-1,48	-0,46	0,04	2,00	1,69	1,34	0,48	236,31
355183,45	6492828,77	4,72	0,87	6,50	86,10	1,48	0,23	-0,67	-0,35	-0,21	1,00	1,65	1,41	0,72	270,00
355482,35	6492828,95	3,16	1,08	20,08	67,95	1,69	0,27	-1,14	-0,46	0,14	2,00	1,66	1,80	-0,36	327,53
355781,55	6492807,57	3,37	1,25	21,92	60,30	1,67	0,32	-1,45	-0,45	0,05	2,00	1,81	2,44	0,00	225,00

ln(Ksat): logaritmo neperiano condutividade hidráulica do solo saturado; log(ARG): logaritmo do teor de argila; ARE: teor de areia; SIL: teor de silte; Ds: densidade do solo; Micro: microporosidade; log(Macro): logaritmo da macroporosidade; log(PT): logaritmo da porosidade total; log(MO): logaritmo do teor de matéria orgânica; USO: índice de uso e ocupação do solo; log(Elev): logaritmo da elevação; SQR(Decl): raiz quadrada da declividade; Curv: curvatura; ASP:aspecto.

APÊNDICE C – 23 pontos amostrais referentes aos 25% dos dados sorteados aleatoriamente para o desenvolvimento de funções de pedotransferência

Norte (utm)	Leste (utm)	ln(Ksat)	log(Clay)	SIL	ARE	Ds	Micro	log(Macro)	log(PT)	log(MO)	USO	log(Elev)	SQR(Decl)	Curv	ASP
354585,31	6497630,88	3,38	0,89	15,21	77,05	1,73	0,19	-0,87	-0,49	0,00	2,00	2,26	3,59	-0,60	181,08
355179,75	6497627,20	3,62	1,19	19,81	64,55	1,57	0,26	-0,87	-0,41	0,32	2,00	2,22	2,66	-0,60	155,22
353385,67	6496723,86	5,07	1,57	14,99	47,85	1,51	0,27	-0,74	-0,35	0,30	2,00	2,19	1,65	0,12	174,81
353983,70	6496126,19	0,41	1,56	21,67	42,35	1,43	0,39	-1,53	-0,38	0,39	2,00	2,08	1,22	-0,36	180,00
355179,68	6496126,37	5,45	1,46	18,68	52,60	1,42	0,27	-0,85	-0,39	0,39	2,00	2,00	2,34	0,24	251,57
355485,78	6496126,34	0,45	1,46	22,63	48,25	1,65	0,32	-1,59	-0,46	0,31	3,00	2,08	1,72	0,60	270,00
356080,40	6496122,61	4,04	1,52	25,23	41,70	1,40	0,32	-0,86	-0,34	0,50	2,00	2,06	1,93	0,24	93,81
354279,26	6495827,60	0,84	1,58	11,84	50,20	1,42	0,37	-1,30	-0,37	0,47	2,00	2,11	2,37	0,48	344,74
354884,35	6495827,48	2,57	1,34	14,96	63,25	1,44	0,31	-1,15	-0,42	0,25	2,00	2,02	2,14	-0,24	40,60
355169,70	6495821,84	6,82	0,76	5,28	88,90	1,28	0,11	-0,53	-0,40	-0,13	4,00	1,92	1,05	0,00	243,43
355485,79	6495823,89	0,87	1,22	24,40	58,85	1,47	0,33	-1,16	-0,40	0,31	4,00	1,98	3,01	-0,36	150,64
354880,64	6495528,68	3,11	1,07	17,35	70,80	1,51	0,24	-0,86	-0,42	0,08	2,00	2,02	2,37	0,12	195,26
353983,76	6494927,49	3,55	1,39	18,78	56,85	1,48	0,38	-1,19	-0,36	0,51	4,00	2,09	2,35	0,36	296,57
354581,73	6494923,90	3,44	1,28	17,05	63,95	1,53	0,33	-1,32	-0,42	0,15	4,00	1,97	2,53	0,24	74,36
354877,22	6494927,44	3,68	1,23	17,66	65,30	1,59	0,34	-1,32	-0,41	0,23	4,00	1,94	3,06	0,84	299,93
354884,31	6494628,79	2,25	1,18	22,02	62,95	1,66	0,36	-1,44	-0,41	0,34	4,00	1,90	2,49	0,12	151,39
355179,88	6494625,23	4,65	1,09	18,61	69,20	1,59	0,28	-1,00	-0,42	0,06	2,00	1,75	2,50	-0,72	108,43
356080,42	6494625,18	2,72	1,14	15,10	71,25	1,63	0,28	-1,14	-0,46	0,13	2,00	1,99	0,89	0,12	251,57
355179,64	6494322,78	3,89	1,27	30,90	50,30	1,43	0,38	-1,09	-0,33	0,41	4,00	1,76	1,70	-0,12	59,04
355485,90	6493422,81	2,22	1,25	26,73	55,30	1,55	0,32	-1,15	-0,41	0,26	2,00	1,82	0,70	-0,36	180,00
355781,39	6493422,93	0,15	1,14	20,83	65,30	1,59	0,33	-1,49	-0,44	0,25	2,00	1,87	1,43	0,00	194,04
355183,21	6493127,83	1,22	1,20	18,10	66,15	1,69	0,27	-1,33	-0,50	-0,01	2,00	1,68	1,86	0,48	201,04
355777,92	6493124,13	1,96	1,40	21,04	53,85	1,60	0,35	-1,31	-0,40	0,48	2,00	1,84	2,68	0,36	254,05

ln(Ksat): logaritmo neperiano condutividade hidráulica do solo saturado; log(ARG): logaritmo do teor de argila; ARE: teor de areia; SIL: teor de silte; Ds: densidade do solo; Micro: microporosidade; log(Macro): logaritmo da macroporosidade; log(PT): logaritmo da porosidade total; log(MO): logaritmo do teor de matéria orgânica; USO: índice de uso e ocupação do solo; log(Elev): logaritmo da elevação; SQR(Decl): raiz quadrada da declividade; Curv: curvatura; ASP: aspecto.

APÊNDICE D – Funções de pedotransferência desenvolvidas para os solos da sub-bacia hidrográfica Santa Rita

FPT	Preditores	RMSE	ME	r	R ²
1	$-1.97569 + 0.07721(\text{ARE}) + 3.27748(\log(\text{MO}))$	1,76	0,65	0,28	0,08
2	$4.90628 - 3.46648(\text{Ds}) + 0.06479(\text{ARE})$	1,60	0,63	0,51	0,27
3	$8.28162 - 4.55311(\log(\text{ARG})) + 3.05849(\log(\text{MO}))$	1,72	0,42	0,23	0,05
4	$-1.97569 + 3.27748(\log(\text{MO})) + 0.07721(\text{ARE})$	201,73	-74,01	0,33	0,11
5	$1.05813 - 1.90592(\text{Ds}) + 2.34934(\log(\text{MO})) + 0.07932(\text{ARE})$	1,67	0,65	0,45	0,20
6	$1.81864 - 2.06515(\log(\text{ARG})) + 3.56008(\log(\text{MO})) + 0.05526(\text{ARE})$	201,71	-74,09	0,35	0,12
7	$-1.69707 + 3.29442(\log(\text{MO})) - 0.16748(\text{SQR}(\text{Decl})) + 0.07835(\text{ARE})$	201,69	-74,01	0,42	0,18
8	$4.06269 + 0.49941(\log(\text{Elev})) + 0.16856(\text{USO}) - 1.38174(\text{Ds})$	1,71	0,50	0,37	0,14
9	$3.66506 - 1.61630(\text{Ds}) - 1.66979(\log(\text{ARG})) + 2.71887(\log(\text{MO})) + 0.06125(\text{ARE})$	1,67	0,59	0,41	0,17
10	$1.12157 - 1.90622(\text{Ds}) - 0.21316(\text{Curv}) + 2.29838(\log(\text{MO})) + 0.07859(\text{ARE})$	1,67	0,65	0,45	0,20
11	$1.10526 - 1.81116(\text{Ds}) + 2.40752(\log(\text{MO})) - 0.11899(\text{SQR}(\text{Decl})) + 0.08003(\text{ARE})$	1,68	0,66	0,44	0,19
12	$-28.0930 + 3.02784(\log(\text{MACRO})) + 10.9183(\log(\text{ARG})) + 0.26474(\text{ARE}) + 0.25267(\text{SIL})$	1,35	0,23	0,65	0,42
13	$3.75264 - 1.61409(\text{Ds}) - 0.21816(\text{Curv}) - 1.68430(\log(\text{ARG})) + 2.66993(\log(\text{MO})) + 0.06034(\text{ARE})$	1,67	0,59	0,41	0,17
14	$3.54107 - 1.63293(\text{Ds}) + 0.39784(\log(\text{Elev})) - 1.94283(\log(\text{ARG})) + 2.51748(\log(\text{MO})) + 0.05703(\text{ARE})$	1,65	0,58	0,42	0,18
15	$3.62317 - 5.119\text{E-}04(\text{ASP}) - 1.60174(\text{Ds}) - 1.61489(\log(\text{ARG})) + 2.70395(\log(\text{MO})) + 0.06187(\text{ARE})$	1,66	0,58	0,42	0,17
16	$-18.8915 + 10.1922(\log(\text{ARG})) + 14.1282(\log(\text{PT})) - 13.4062(\text{MICRO}) + 0.24251(\text{ARE}) + 0.22988(\text{SIL})$	1,28	0,34	0,79	0,62
17	$-24.9478 + 9.18345(\log(\text{ARG})) + 1.22274(\log(\text{MO})) + 0.24660(\text{ARE}) + 2.66935(\log(\text{MACRO})) + 0.22476(\text{SIL})$	1,39	0,27	0,63	0,39
18	$-27.3568 + 10.7211(\log(\text{ARG})) + 0.27071(\text{ARE}) + 2.58955(\log(\text{MACRO})) + 3.05683(\log(\text{PT})) + 0.24958(\text{SIL})$	1,36	0,27	0,65	0,42
19	$7.37772 + 1.48426(\text{Ds}) + 0.00293(\text{SIL}) - 3.04342(\log(\text{ARG})) + 2.29149(\log(\text{MO})) + 2.82231(\log(\text{MACRO}))$	1,27	0,36	0,73	0,53
20	$-31.5235 + 0.00138(\text{ASP}) + 0.28759(\text{ARE}) + 0.27761(\text{SIL}) + 11.9999(\log(\text{ARG})) + 3.06428(\log(\text{MACRO}))$	1,38	0,25	0,62	0,39
21	$1.39877 + 1.548\text{E-}04(\text{ASP}) - 0.33626(\text{Curv}) + 0.84711(\log(\text{Elev})) - 0.09069(\text{SQR}(\text{Decl})) + 0.18447(\text{USO})$	1,74	0,51	0,24	0,06
22	$-27.154 - 0.56779(\text{Ds}) + 10.9349(\log(\text{ARG})) + 2.74167(\log(\text{MACRO})) + 0.26449(\text{ARE}) - 1.13324(\text{Micro}) + 0.25036(\text{SIL})$	1,34	0,24	0,67	0,45
23	$-29.33 + 12.0002(\log(\text{arg})) + 3.18487(\log(\text{Macro})) + 0.28061(\text{ARE}) - 0.00801(\text{MICRO}) + 0.26516(\text{SIL}) - 0.57927(\log(\text{Elev}))$	1,36	0,24	0,63	0,40

FPT	Preditores	RMSE	ME	r	R ²
24	-29.7058+11.6052(log(ARG))+0.27823(ARE)-0.08736(USO)+3.05566(log(MACRO))-0.35168(MICRO)+0.26685(SIL)	1,37	0,20	0,62	0,38
25	2.86071-3.18914(Ds)+0.06447(ARE)+0.74729(log(Elev))+0.06252(USO)	1,59	0,63	0,52	0,27
26	2.93786-3.24548(Ds)+0.06550(ARE)+0.79983(log(Elev))	1,59	0,62	0,52	0,27
27	5.0724 - (1.43069Ds+(0.11215log(MO)+(0.17967USO)	1,72	0,50	0,33	0,11
28	1.42599+0.74341(log(ELEV))+0.19037(USO)-0.34319(CURV)	1,74	0,50	0,25	0,06
29	2.89089+0.21308(USO)-0.35183(Curv)-0.02099(SQR(Decl))	1,75	0,51	0,23	0,05
30	2.85201+0.21360(USO)-3.848E-05(ASP) -0.35300(CURV)	1,75	0,51	0,23	0,05
31	(1.39877+(0.84711log(Elev))-(0.09069SQR(Decl))+(0.18447USO) +(0.0001548ASP) -(0.33626CUrv))	1,74	0,51	0,24	0,06
32	5.26718-0.63902(Ds)+0.03264(ARE)+2.54373(log(MACRO))	1,23	0,49	0,80	0,64
33	5.58071-0.54446(Ds)+0.03041(ARE)-0.22912(log(Elev))+0.07847(USO)+2.60573(log(MACRO))	1,21	0,50	0,82	0,67
34	5.66421-0.62798(Ds)+0.03188(ARE)-0.15848(log(Elev))+2.59305(log(Macro))	1,22	0,49	0,80	0,64
35	-27.6176 + 9.50197 (logARG) +0.20861(SIL) + 0.24673(ARE)	1,89	0,41	-0,08	0,01
36	1.05813 -1.90592(Ds) + 0.07932(ARE) + 2.34934(log(MO)	1,67	0,65	0,45	0,20
37	11.6274-2.69068(Ds)-3.30179(log(ARG))	1,58	0,44	0,46	0,22
38	3.47892 - (3.54722*log(ARG))+ (2.18907*log(ELEV))	1,67	0,43	0,34	0,11
39	6.49113 -(2.54474*log(ARG))+(0.03689*SQR(Decl))	1,69	0,45	0,30	0,09
40	6.5509-(2.52205*log(ARG)-(0.33937*Curv))	1,69	0,45	0,29	0,09
41	6.6455-(2.50594*log(ARG)-(7.923E-04*ASP))	1,68	0,43	0,31	0,10
42	5.9889-(2.43023*log(ARG))+(0.17464 *USO))	1,69	0,48	0,32	0,10
43	-1.99478+(0.04710*ARE)+(1.32539*logELEV)	1,70	0,58	0,36	0,13
44	1.09085+(0.044452*ARE)-(0.14491*sqrDecl)	1,72	0,58	0,33	0,11
45	0.86571+(0.04337*ARE)-(0.31419*CURV)	1,71	0,58	0,33	0,11
46	0.99857+(0.04416*ARE)-(0.00118*ASP)	1,69	0,55	0,36	0,13
47	0.5123+(0.0422*ARE)+(0.16477*USO)	1,71	0,61	0,36	0,13
48	5.43151-(1.40398*Ds)+(0.29158*logMO)	1,74	0,47	0,26	0,07

FPT	Preditores	RMSE	ME	r	R ²
49	4.33028-(1.45715*Ds)+(0.63397*logELEV)	1,71	0,47	0,36	0,13
50	2.11855+(0.76773 * logMO)+(0.5250 * logelev)	1,81	0,47	-0,18	0,03
51	1.37018 +(0.77428logELEV) +(0.18352*USO)	1,75	0,50	0,20	0,04
52	5.90777-1.63676(Ds)-0.02081(sqrDecl)	1,71	0,48	0,37	0,14
53	5.84275-1.61561(Ds)-0.31783(CURV)	1,71	0,47	0,37	0,14
54	5.93463-(1.61238*Ds)-6.744E-04(ASP)	1,70	0,46	0,40	0,16
55	5.23647-(1.52288*Ds)+(0.18226*USO)	1,71	0,50	0,36	0,13
56	6.53651-2.51968(logARG)	1,69	0,45	0,30	0,09
57	0.83719+0.04368(ARE)	1,71	0,59	0,33	0,11
58	5.88194-(1.64828*Ds)	1,71	0,48	0,38	0,15
59	3.09467+(1.02068*logMO)	1,82	0,48	-0,27	0,07
60	1.50218+(0.93790*logelev)	1,77	0,47	0,08	0,01
61	3.52157-(0.07455*SQRDecl)	1,78	0,48	-0,05	0,00
62	3.37747-(0.33714*curv)	1,76	0,48	0,10	0,01
63	3.51535 -(9.362E-04*ASP)	1,76	0,45	0,13	0,02
64	2.84663 +(0.20854*USO)	1,76	0,51	0,17	0,03
65	6.00153-3.45142(Ds)+0.05785(ARE)-0.56934(log(ARG))	1,59	0,60	0,51	0,26
66	2.30323-(0.74998*logARG)+(0.03466*ARE)	1,70	0,56	0,33	0,11
67	5.87954-(3.43777*Ds)+(0.05897*ARE)-(0.05897*logARG)-(0.03367*SQRDecl)	1,86	1,15	0,52	0,27
68	5.64653-(3.35000*Ds)+(0.05724*ARE)-(0.51532*logARG)-(0.01888*SQRDecl)+(0.08288*USO)	1,59	0,61	0,51	0,26
69	4.98343-(3.43608*Ds)+(0.06497*ARE)-(0.06445*SQRDecl)	1,60	0,62	0,51	0,26
70	3.58006-(1.60779*Ds)+(0.06205*ARE)-(1.60930*logARG)-(0.02387*SQRDecl)+(2.71715*logMO)	1,67	0,59	0,41	0,17
71	1.93356 -(0.45705*logARG)+(0.03885*ARE)-(0.11594*SQRDecl)	1,71	0,57	0,33	0,11
72	11.6902-(2.83435*Ds)-(3.45905*logARG)+(0.16997*SQRDecl)	1,57	0,44	0,47	0,22

FPT	Preditores	RMSE	ME	r	R ²
73	7.85951-(0.47188*Ds)+(0.01516*ARE)-(1.32565*logARG)-(0.02225*SQRDecl)+(2.65311*logMACRO)	1,21	0,43	0,78	0,60
74	6.72426+(3.03396*logMACRO)	1,19	0,40	0,83	0,70
75	5.05411-(3.07093*Ds)+(0.04520*ARE)-(1.70011*logARG)+(1.26885*logELEV)	1,58	0,55	0,50	0,25
76	5.71072 -(3.35628*Ds)+(0.05659*ARE)-(0.05659*logARG)+(0.08410*USO)	1,93	1,25	0,53	0,28
77	6.04861-(8.85354*MICRO)	1,53	0,48	0,57	0,32
78	5.56378+(5.37851*logPT)	1,71	0,49	0,34	0,11
79	3.82589-(0.02022*SIL)	1,76	0,55	0,35	0,12
80	5.92855-(3.41857*Ds)-(0.50416*logARG)+(0.05870*ARE)-(6.829E-04*ASP)	1,58	0,58	0,52	0,27
81	6.05721-(3.40830*Ds)-(0.61132*logARG)+(0.05681*ARE)-(0.26688*CURV)	1,59	0,60	0,50	0,25
82	6.00532-(3.40281*Ds)-(0.57542*logARG)+(0.05730*ARE)-(0.01423*SQRDecl)-(0.26518*CURV)	1,59	0,60	0,50	0,25
83	4.70042-(3.35006*Ds)+(0.06365*ARE)-(0.05186*SQRDecl)+(0.08113*USO)	1,60	0,63	0,51	0,26
84	11.0712-(2.72679*Ds)-(3.37184*logARG)+(0.18351*SQRDecl)+(0.12720*USO)	1,58	0,46	0,46	0,22
85	-29.5525+(10.4657*logARG)+(0.21744*SIL)+(0.26329*ARE)-(0.20973*SQRDecl)	1,91	0,43	-0,12	0,01
86	-26.6161+(9.12747*logARG)+(0.20084*SIL)+(0.23847*ARE)+(0.04981*USO)	1,88	0,43	-0,06	0,00
87	3.58006-(1.60779*Ds)+(0.06205*ARE)-(1.60930*logARG)-(0.02387*SQRDecl)+(2.71715*logMO)	1,67	0,59	0,41	0,17
88	3.59251-(1.60590*Ds)+(0.06227*ARE)-(1.61331*logARG)-(0.02559*SQRDecl)-(0.01001*USO)+(2.73569*logMO)	1,67	0,59	0,41	0,17
89	5.75622-(3.30552*Ds)+(0.05534*ARE)-(0.61235*logARG)+(0.00274*SQRDecl)+(0.09048*USO)-(0.27633*CURV)	1,60	0,61	0,50	0,25
90	5.74685-(3.30468*Ds)+(0.05544*ARE)-(0.60545*logARG)+(0.09030*USO)-(0.27598*CURV)	1,60	0,61	0,50	0,25
91	4.63418-(3.30702*Ds)+(0.06297*ARE)-(0.03694*SQRDecl)+(0.08818*USO)-(0.26744*CURV)	1,60	0,63	0,51	0,26
92	1.87385-(0.63078*logARG)+(0.03462*ARE)-(0.05724*SQRDecl)+(0.16544*USO)-(0.32655*CURV)	1,70	0,58	0,35	0,12
93	-28.1565+(9.94370*logARG)+(0.20768*SIL)+(0.25242*ARE)-(0.19442*SQRDecl)+(0.03291*USO)-(0.05746 *CURV)	1,89	0,44	-0,09	0,01
94	5.72620 -(3.39363*Ds)-(0.36285*logARG)+(0.06059*ARE)-(0.05398*SQRDecl)-(7.464E-04*ASP)	1,58	0,59	0,51	0,26
95	4.70209 -(3.02109*Ds)-(1.52465*logARG)+(0.04763*ARE)-(0.08722*SQRDecl)+(1.31716*logELEV)	1,58	0,56	0,50	0,25
96	7.69108 -(0.41049*Ds)-(1.37322*logARG)+(0.01351*ARE)+(0.07030*USO)+(2.64496*logMACRO)	1,20	0,44	0,79	0,62
97	7.65735 -(0.40755*Ds)-(1.34849 *logARG)+(0.01385*ARE)+(0.06967*USO)+(2.64467*logMACRO)-(0.00986*SQRDecl)	1,20	0,44	0,79	0,62

FPT	Preditores	RMSE	ME	r	R ²
98	5.07403-(1.45860*D _s)+(0.04485*logMO)+(0.02250*SQRDecl)+(0.18899*USO)-(0.33582*CURV)	1,70	0,50	0,38	0,15
99	5.72121-(3.29940*D _s)-(0.56691*logARG)+(0.05607*ARE)-(0.00576*SQRDecl)+(0.08362*USO)-(2.450E-04*ASP)-(0.26796*CURV)	1,59	0,60	0,51	0,26
100	4.75940-(2.95972*D _s)-(1.56989*logARG)+(0.04564*ARE)-(0.05609*SQRDecl)+(0.04880*USO)-(0.26204*CURV)+(1.23860*logELEV)	1,59	0,56	0,49	0,24

RMSE: raiz quadrada do erro médio; EM: erro médio; r: coeficiente de determinação; R²: coeficiente de determinação; log(ARG): logaritmo do teor de argila; ARE: teor de areia; SIL: teor de silte; D_s: densidade do solo; Micro: microporosidade; log(Macro): logaritmo da macroporosidade; log(PT): logaritmo da porosidade total; log(MO): logaritmo do teor de matéria orgânica; USO: índice de uso e ocupação do solo; log(Elev): logaritmo da elevação; SQR(Decl): raiz quadrada da declividade; Curv: curvatura; ASP: aspecto.

APÊNDICE E – Dados de logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado referentes aos 80 pontos observados em campo e aos 80 pontos estimados pelas funções de pedotransferência desenvolvidas para a sub-bacia hidrográfica Santa Rita

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
354873,67	6497922,58	3,53	3,06	3,17	3,71	3,40	3,67	3,80	4,10
354326,94	6497599,88	3,42	3,88	3,65	3,12	3,16	3,31	3,49	3,73
354585,31	6497630,88	3,38	4,08	4,78	4,32	4,03	4,27	3,96	4,57
354880,81	6497620,24	3,30	3,29	2,75	2,81	3,06	2,73	2,52	2,83
355179,75	6497627,20	3,62	4,08	4,17	3,56	3,46	3,51	3,64	3,94
354289,55	6496593,41	4,69	3,99	3,84	3,34	3,32	3,53	3,93	3,88
354877,26	6497328,52	3,25	3,68	3,79	3,48	3,46	3,42	3,74	4,02
355469,89	6497324,96	5,20	4,84	5,10	4,29	4,30	4,19	4,59	4,89
353980,22	6497026,09	3,07	4,12	3,97	3,70	3,71	3,87	3,75	3,96
354279,29	6497022,61	3,21	3,92	3,53	3,38	3,20	3,33	3,65	3,70
354877,07	6497022,69	1,69	2,49	1,93	2,15	2,25	2,11	2,07	2,12
353385,67	6496723,86	5,07	4,49	3,79	2,26	2,38	2,22	2,67	2,69
353681,26	6496723,73	3,61	4,09	3,92	3,07	3,06	3,02	3,13	3,39
353983,65	6496727,39	4,98	4,61	4,63	3,91	3,82	3,84	4,44	4,51
354613,76	6496796,40	2,47	3,24	2,77	2,73	2,78	2,68	3,17	3,10
353382,26	6496425,06	4,17	3,96	4,17	3,57	3,55	3,51	3,72	3,95
353976,58	6496425,15	0,09	3,71	2,92	2,20	2,16	2,05	2,03	2,12
355781,35	6496428,59	4,87	4,44	4,36	3,52	3,61	3,44	2,38	2,86
353681,28	6496126,23	3,18	3,72	3,92	3,74	3,51	3,57	3,58	3,79
353983,70	6496126,19	0,41	2,08	1,57	2,47	2,65	2,41	2,62	2,58
355179,68	6496126,37	5,45	4,16	3,73	3,01	2,99	2,96	3,25	3,12
355485,78	6496126,34	0,45	1,91	1,56	2,24	2,35	2,33	2,19	2,32
355781,40	6496122,76	3,29	3,99	3,89	3,74	3,84	3,90	4,35	4,23

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
356080,40	6496122,61	4,04	4,11	3,56	2,81	2,85	2,75	2,77	2,68
353677,65	6495824,04	4,38	4,26	4,16	3,45	3,26	3,53	3,75	3,80
353983,70	6495827,44	3,02	3,30	3,38	3,94	3,97	3,84	3,75	3,83
354279,26	6495827,60	0,84	2,79	2,21	2,60	2,59	2,56	2,99	2,95
354581,67	6495827,55	0,84	3,38	2,66	2,58	2,53	2,54	2,71	2,62
354884,35	6495827,48	2,57	3,24	3,10	3,33	3,32	3,27	4,00	3,76
355169,70	6495821,84	6,82	5,11	5,99	5,60	5,66	5,71	6,23	6,29
355485,79	6495823,89	0,87	3,21	3,31	3,80	3,63	3,99	3,64	3,63
355777,66	6495823,96	1,96	3,06	3,37	3,49	3,54	3,68	3,55	3,61
356383,01	6495824,07	6,54	4,75	4,58	3,94	3,96	4,10	3,97	3,86
353983,80	6495521,60	5,16	4,70	5,03	4,30	4,29	4,46	4,61	4,87
354279,26	6495528,54	4,06	3,63	3,75	3,28	3,30	3,35	3,36	3,56
354585,35	6495528,85	4,88	3,95	3,70	2,96	2,90	3,17	3,11	3,09
354880,64	6495528,68	3,11	4,12	4,45	4,09	4,01	4,01	4,23	4,34
355183,30	6495528,61	2,80	3,69	3,90	4,13	4,19	4,28	4,34	4,31
354273,33	6495210,40	1,29	2,25	2,00	2,21	2,29	2,44	2,09	2,10
354585,38	6495226,40	3,78	2,95	3,09	3,38	3,36	3,45	3,42	3,50
354880,67	6495226,24	5,24	3,56	3,51	3,30	3,20	3,38	3,51	3,34
355179,68	6495222,73	5,12	2,84	2,95	3,45	3,41	3,51	3,40	3,34
353983,76	6494927,49	3,55	3,10	2,88	3,10	3,07	3,30	3,30	3,38
354282,77	6494924,01	3,66	2,37	2,58	3,40	3,26	3,61	2,76	2,96
354581,73	6494923,90	3,44	2,73	2,74	3,36	3,29	3,56	3,75	3,57
354877,22	6494927,44	3,68	2,71	2,82	3,46	3,30	3,67	3,52	3,51
355179,86	6494927,68	3,53	3,72	3,99	3,73	3,65	3,67	3,70	3,54
355482,30	6494923,90	2,03	2,64	2,80	3,35	3,33	3,29	3,45	3,24

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
355778,04	6494993,00	4,55	2,84	3,19	3,60	3,69	3,53	3,41	3,38
356076,74	6494927,57	3,27	3,72	3,82	3,70	3,66	3,63	3,64	3,60
356379,39	6494927,46	3,19	1,76	1,86	2,98	2,99	2,94	2,78	2,95
356669,73	6494940,65	5,57	3,09	3,07	3,02	3,16	2,83	3,41	3,45
354585,36	6494628,90	1,29	2,55	2,73	3,29	3,28	3,49	3,41	3,43
354884,31	6494628,79	2,25	2,36	2,58	3,33	3,27	3,54	3,25	3,21
355179,88	6494625,23	4,65	3,68	4,00	3,85	3,76	3,79	3,93	3,67
355478,84	6494625,10	3,94	3,07	2,67	2,81	2,71	2,77	2,73	2,37
355781,47	6494625,32	5,29	2,75	2,36	2,71	2,86	2,65	2,74	2,63
356080,42	6494625,18	2,72	3,27	3,49	3,28	3,48	3,20	3,78	3,85
354581,76	6494322,71	0,53	1,76	1,91	2,90	2,92	2,85	2,77	2,84
354880,65	6494326,29	3,93	3,14	3,22	3,47	3,37	3,41	3,59	3,38
355179,64	6494322,78	3,89	3,43	3,40	3,52	3,57	3,70	3,31	3,01
355485,91	6494326,45	3,85	3,48	3,42	3,30	3,26	3,25	3,28	3,15
355845,96	6494371,93	3,26	3,07	3,14	2,98	3,12	2,92	3,07	3,03
355204,13	6494026,79	4,29	4,48	4,68	4,33	4,43	4,48	4,06	3,84
355482,45	6494027,65	3,23	2,65	3,10	3,64	3,62	3,71	3,39	3,37
355781,43	6494024,13	2,74	3,45	3,11	2,84	2,76	2,80	2,73	2,54
354578,26	6493728,85	1,30	2,23	2,17	4,54	4,53	4,42	3,61	3,31
355179,85	6493725,28	2,82	2,93	3,20	2,90	3,12	2,96	2,81	2,63
355485,83	6493728,95	3,30	3,10	3,48	3,97	3,91	3,90	3,54	3,51
355781,33	6493728,76	1,95	2,68	2,33	2,53	2,53	2,49	2,51	2,33
354872,91	6493414,32	1,85	3,16	3,47	3,48	3,54	3,41	3,03	2,94
355186,93	6493426,63	3,02	3,34	3,37	3,07	3,13	2,89	2,71	2,43
355485,90	6493422,81	2,22	3,24	3,22	3,07	3,31	2,99	3,11	2,96

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
355781,39	6493422,93	0,15	2,19	2,48	3,47	3,57	3,40	3,61	3,55
354877,25	6493124,15	1,14	2,23	2,47	3,26	3,38	3,19	3,13	2,93
355183,21	6493127,83	1,22	2,70	2,84	3,08	3,13	3,02	3,29	2,95
355777,92	6493124,13	1,96	2,76	2,52	2,78	2,71	2,74	2,75	2,54
355183,45	6492828,77	4,72	4,70	5,39	4,73	4,77	4,49	5,30	5,02
355482,35	6492828,95	3,16	3,27	3,61	3,48	3,52	3,41	3,37	3,21
355781,55	6492807,57	3,37	2,34	2,41	3,04	3,00	3,00	2,96	2,82

M: Modelos de função de pedotransferência para estimar o logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EM: erro médio; R²: coeficiente de determinação

APÊNDICE F - Dados de condutividade hidráulica do solo saturado referentes aos 80 pontos observados em campo e aos 80 pontos estimados pelas funções de pedotransferência desenvolvidas para os solos da sub-bacia hidrográfica Santa Rita

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
354873,67	6497922,58	34,04	21,25	23,80	40,95	29,97	39,43	44,91	60,23
354326,94	6497599,88	30,67	48,27	38,38	22,55	23,65	27,34	32,69	41,59
354585,31	6497630,88	29,23	59,40	118,77	75,21	56,54	71,39	52,49	96,60
354880,81	6497620,24	27,19	26,95	15,65	16,63	21,27	15,34	12,46	16,95
355179,75	6497627,20	37,38	59,18	64,54	35,21	31,82	33,31	38,20	51,29
354289,55	6496593,41	109,38	54,09	46,48	28,19	27,54	34,20	50,98	48,22
354877,26	6497328,52	25,70	39,79	44,04	32,58	31,70	30,64	42,20	55,83
355469,89	6497324,96	181,77	126,90	164,70	72,77	73,77	66,05	98,02	133,08
353980,22	6497026,09	21,58	61,82	53,21	40,42	40,97	48,04	42,65	52,20
354279,29	6497022,61	24,69	50,54	34,14	29,30	24,47	27,87	38,67	40,26
354877,07	6497022,69	5,43	12,06	6,89	8,56	9,48	8,26	7,95	8,36
353385,67	6496723,86	159,05	89,45	44,33	9,60	10,83	9,20	14,39	14,75
353681,26	6496723,73	36,95	59,85	50,48	21,52	21,37	20,44	22,89	29,71
353983,65	6496727,39	146,11	100,93	102,31	49,95	45,83	46,38	84,67	90,92
354613,76	6496796,40	11,84	25,65	15,91	15,32	16,12	14,54	23,90	22,19
353382,26	6496425,06	64,71	52,45	64,92	35,64	34,80	33,48	41,46	52,05
353976,58	6496425,15	1,10	40,70	18,57	9,04	8,64	7,77	7,62	8,31
355781,35	6496428,59	130,63	85,11	78,33	33,78	36,84	31,18	10,78	17,51
353681,28	6496126,23	23,98	41,09	50,24	42,14	33,36	35,47	36,05	44,25
353983,70	6496126,19	1,50	8,04	4,80	11,77	14,09	11,10	13,78	13,18
355179,68	6496126,37	233,31	64,03	41,62	20,34	19,80	19,30	25,72	22,71
355485,78	6496126,34	1,57	6,73	4,78	9,37	10,47	10,26	8,95	10,14
355781,40	6496122,76	26,87	53,92	48,85	41,97	46,54	49,30	77,72	68,68

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
356080,40	6496122,61	56,61	61,02	35,06	16,54	17,36	15,64	16,02	14,64
353677,65	6495824,04	79,65	70,49	64,34	31,43	25,93	34,17	42,48	44,79
353983,70	6495827,44	20,48	27,22	29,32	51,21	53,18	46,75	42,35	46,04
354279,26	6495827,60	2,33	16,31	9,11	13,52	13,34	12,97	19,83	19,10
354581,67	6495827,55	2,31	29,38	14,29	13,24	12,58	12,73	15,09	13,79
354884,35	6495827,48	13,12	25,42	22,14	27,96	27,74	26,24	54,68	43,03
355169,70	6495821,84	919,93	165,20	400,78	270,84	288,19	301,79	505,47	538,48
355485,79	6495823,89	2,39	24,69	27,44	44,64	37,67	54,27	37,91	37,56
355777,66	6495823,96	7,08	21,27	28,98	32,84	34,37	39,63	34,80	36,78
356383,01	6495824,07	695,51	115,13	97,70	51,53	52,37	60,59	53,17	47,67
353983,80	6495521,60	174,41	109,45	152,94	73,79	72,89	86,73	100,50	130,65
354279,26	6495528,54	58,23	37,58	42,63	26,49	27,02	28,41	28,67	35,22
354585,35	6495528,85	131,93	52,10	40,25	19,23	18,14	23,77	22,41	21,90
354880,64	6495528,68	22,39	61,73	85,57	59,65	55,06	55,29	69,01	76,62
355183,30	6495528,61	16,47	40,16	49,29	61,88	65,98	72,28	76,38	74,56
354273,33	6495210,40	3,62	9,52	7,41	9,13	9,87	11,45	8,07	8,17
354585,38	6495226,40	43,81	19,11	21,92	29,33	28,89	31,42	30,50	33,08
354880,67	6495226,24	188,05	35,27	33,42	27,23	24,65	29,46	33,52	28,31
355179,68	6495222,73	167,68	17,12	19,09	31,40	30,17	33,60	29,98	28,21
353983,76	6494927,49	34,98	22,26	17,73	22,15	21,46	27,11	27,24	29,29
354282,77	6494924,01	38,72	10,72	13,15	29,93	26,09	36,95	15,85	19,31
354581,73	6494923,90	31,31	15,35	15,49	28,74	26,74	35,11	42,69	35,63
354877,22	6494927,44	39,79	15,09	16,81	31,71	26,98	39,08	33,62	33,45
355179,86	6494927,68	34,05	41,31	54,23	41,79	38,64	39,27	40,51	34,42
355482,30	6494923,90	7,59	14,06	16,49	28,49	27,91	26,93	31,46	25,62

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
355778,04	6494993,00	94,76	17,05	24,39	36,72	40,01	34,05	30,41	29,51
356076,74	6494927,57	26,33	41,27	45,63	40,48	38,96	37,75	38,02	36,62
356379,39	6494927,46	24,19	5,81	6,39	19,75	19,86	18,86	16,07	19,05
356669,73	6494940,65	263,62	21,99	21,44	20,46	23,54	16,89	30,28	31,45
354585,36	6494628,90	3,62	12,82	15,34	26,76	26,57	32,67	30,41	30,86
354884,31	6494628,79	9,51	10,59	13,15	28,07	26,39	34,45	25,78	24,69
355179,88	6494625,23	104,54	39,64	54,74	47,08	43,09	44,12	51,06	39,28
355478,84	6494625,10	51,17	21,45	14,48	16,56	15,07	15,97	15,36	10,71
355781,47	6494625,32	197,51	15,61	10,62	15,08	17,51	14,17	15,44	13,82
356080,42	6494625,18	15,16	26,42	32,65	26,64	32,54	24,64	43,84	47,13
354581,76	6494322,71	1,70	5,81	6,76	18,11	18,53	17,35	15,96	17,13
354880,65	6494326,29	51,02	23,08	25,11	32,00	29,21	30,31	36,17	29,39
355179,64	6494322,78	48,70	30,81	29,90	33,78	35,65	40,34	27,42	20,26
355485,91	6494326,45	46,79	32,62	30,50	27,19	25,97	25,72	26,62	23,38
355845,96	6494371,93	26,10	21,58	23,13	19,72	22,57	18,57	21,60	20,80
355204,13	6494026,79	73,16	88,60	107,30	76,19	84,08	87,88	57,70	46,55
355482,45	6494027,65	25,19	14,13	22,20	38,28	37,43	40,86	29,71	29,18
355781,43	6494024,13	15,50	31,35	22,32	17,10	15,82	16,47	15,29	12,64
354578,26	6493728,85	3,68	9,30	8,76	93,90	92,73	83,47	37,12	27,37
355179,85	6493725,28	16,80	18,82	24,51	18,13	22,59	19,35	16,65	13,93
355485,83	6493728,95	27,16	22,19	32,33	53,07	50,03	49,30	34,43	33,51
355781,33	6493728,76	7,05	14,58	10,32	12,55	12,61	12,11	12,30	10,27
354872,91	6493414,32	6,34	23,49	32,19	32,51	34,36	30,41	20,67	18,97
355186,93	6493426,63	20,53	28,23	29,22	21,59	22,97	17,98	14,95	11,31
355485,90	6493422,81	9,22	25,57	25,15	21,57	27,36	19,94	22,50	19,36

Norte (utm)	Leste (utm)	M-obs	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7
355781,39	6493422,93	1,16	8,96	11,92	32,13	35,60	29,83	36,96	34,67
354877,25	6493124,15	3,11	9,31	11,77	25,95	29,49	24,22	22,91	18,66
355183,21	6493127,83	3,38	14,89	17,08	21,65	22,82	20,53	26,95	19,16
355777,92	6493124,13	7,10	15,75	12,38	16,10	15,03	15,55	15,69	12,67
355183,45	6492828,77	112,72	110,41	218,38	112,76	118,22	88,91	199,75	151,06
355482,35	6492828,95	23,61	26,32	36,85	32,38	33,83	30,36	29,20	24,87
355781,55	6492807,57	29,07	10,36	11,10	20,88	20,06	20,01	19,39	16,73

M: Modelos de função de pedotransferência para estimar o logaritmo neperiano da condutividade hidráulica do solo saturado; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EM: erro médio; R²: coeficiente de determinação