

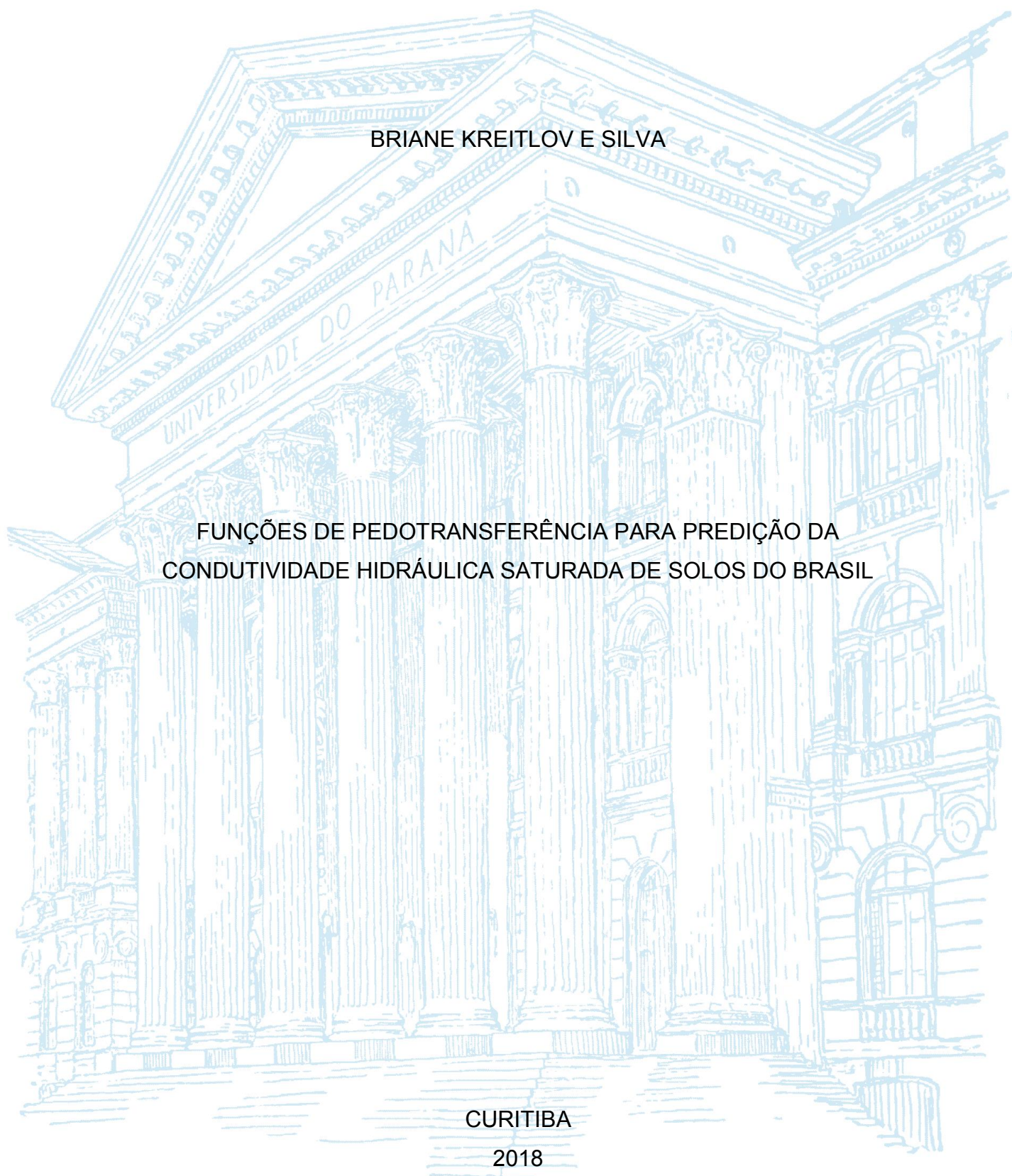
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRIANE KREITLOV E SILVA

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA PREDIÇÃO DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE SOLOS DO BRASIL

CURITIBA

2018



BRIANE KREITLOV E SILVA

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA PREDIÇÃO DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE SOLOS DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. D.Sc. Robson André Armindo.

CURITIBA

2018

SI586f Silva, Briane Kreitlov e
Funções de pedotransferência para predição da condutividade
hidráulica saturada de solos do Brasil / Briane Kreitlov e Silva. -
Curitiba, 2018.
43 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo.

Orientador: Robson André Armindo

1. Solos - Permeabilidade. 2. Solos - Propriedades. 3.
Hidráulica. 4. Porosidade. I. Armindo, Robson André. II. Título. III.
Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.434

Sistema de Bibliotecas/UFPR, Biblioteca de Ciências Agrárias
Bibliotecário Douglas Alex Jankoski – CRB 9/1167

TERMO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **Briane Kreitlov e Silva**, intitulada: “**Funções de pedotransferência para predição da condutividade hidráulica saturada de solos do Brasil**”, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição da candidata, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 03 de março de 2017.

Prof. Dr. Robson André Armindo, Presidente

Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, Iº. Examinador

Prof. Dr. Quirijn de Jong van Lier, IIº. Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, meus guias e protetores;

Aos meus pais, Luis Fernando da Silva e Elisandre Caroline Kreitlov e ao meu irmão, Breno Kreitlov e Silva pelo apoio e paciência;

Ao meu orientador prof. Robson André Armindo pela oportunidade de aprendizado e crescimento;

Aos meus familiares: Luiz Carlos Kreitlov, Mitilde Reis Kreitlov, Maria Regina da Silva Gabarron, Mario Costa Gabarron, Eliizene Carla Kreitlov, Carlos Alberto de Moraes Spinosa;

Aos meus colegas que se tornaram amigos: Karllas Freitas Stival, Marcieli Machado Manfio, Letícia Gonçalves Maduro, Eduardo Maciel Haitzmann dos Santos, Maria Eliza Turek, Daniela Baumann e Alessandra Calegari da Silva;

Aos membros do Núcleo de Atividades de Engenharia de Biossistemas – NAEB: prof Matheus, Clayton, Liana.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo;

À minha família na fé: Pai Caetano de Oxossi, Fernanda, Eduardo, Érica, Paola e Marina.

Aos outros, dou o direito de ser como são. A mim, dou o dever de ser
cada dia melhor. (CHICO XAVIER)

RESUMO

O conhecimento da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) é muitas vezes necessário em estudos que tem como objetivo o monitoramento do fluxo de água no solo. Dois métodos laboratoriais para determinação de K_s são geralmente aplicados nesses estudos, são eles o permeâmetro de carga constante e de carga decrescente. Para casos onde a obtenção de K_s em laboratório ou em campo se faz demorada ou insatisfatória, a função de pedotransferência (FPT) pode ser utilizada para estimar a K_s valendo-se de propriedades do solo de fácil medição. Comumente nas FPTs, textura, umidade do solo na saturação, densidade do solo seco e porosidade total são utilizadas como dados de entrada, porém existem alguns estudos relacionando o teor de matéria orgânica do solo e parâmetros da curva de retenção da água com essa variável de interesse. Teve-se por objetivo neste trabalho relacionar as propriedades do solo, levantadas em campo e em base de dados, com a K_s . FPTs encontradas na literatura foram testadas e recalibradas, bem como novas FPT para solos do Brasil, com a finalidade de melhorar a correlação dessas propriedades com a K_s . Para os solos estudados, a utilização do teor de matéria orgânica se tornou inviável. FPTs mais simples, baseadas apenas em textura mostraram melhor resultado, porém devido à alta variabilidade espacial de K_s sua correlação com as demais propriedades do solo ainda necessita ser aprimorada.

Palavras-chave: correlação, propriedades do solo, condutividade hidráulica do solo saturado.

ABSTRACT

The knowledge of the hydraulic conductivity of the saturated soil (K_s) is often necessary in studies that have as objective the monitoring of the flow of water in the soil. Two laboratory methods for determination of K_s are generally applied in these studies, they are the constant load permeameter and the decreasing load. For cases where obtaining K_s in the laboratory or in the field is delayed or unsatisfactory, the pedotransfer function (FPT) can be used to estimate the K_s using easy-to-measure soil properties. Commonly in the FPTs, texture, soil moisture at saturation, dry bulk density and total porosity are used as input data, however there are some studies relating soil organic matter content and water retention curve parameters with this variable interest. The objective of this work was to relate the soil properties, raised in the field and in the database, with the FPTs found in the literature were tested and recalibrated, as well as new FPT for soils of Brazil, with the purpose of improving the correlation of these properties with K_s . For the soils studied, the use of the organic matter content became unfeasible. FPTs based on texture only showed better results, but due to the high spatial variability of K_s their correlation with other soil properties still needs to be improved.

Key words: correlation, soil properties, hydraulic conductivity of saturated soil.

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	10
2 CAPÍTULO I. ASPECTOS SOBRE FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA PREDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO. 12	
2.1 RESUMO	12
2.2 ABSTRACT	12
2.3 INTRODUÇÃO	12
2.4 DESENVOLVIMENTO	14
2.4.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO, K_s	14
2.4.2 FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA (PTF) PARA K_s	15
2.5 CONCLUSÕES	18
2.6 REFERÊNCIAS	19
3 CAPITULO II. VALIDAÇÃO E OBTENÇÃO DE NOVAS FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A PREDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRAULICA DO SOLO SATURADO	22
3.1 RESUMO	22
3.2 ABSTRACT	22
3.3 INTRODUÇÃO	23
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL, AMOSTRAGEM E BASE DE DADOS	24
3.4.2 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HIDRÁULICOS E BASE DE DADOS UTILIZADA	25
3.4.3 ANÁLISES DE REGRESSÃO MULTIVARIADA DAS PTFs	26
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3.6 CONCLUSÃO	36
3.7 REFERÊNCIAS	36
4 CONCLUSÃO GERAL	38
5 REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO GERAL

Quando realizou um experimento de filtragem de água em colunas de areias para abastecimento de água, Darcy (1856) acabou realizando o primeiro estudo de movimento de água em meios porosos. Nesse estudo, o coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo saturado (K_s) foi definido como uma constante de proporcionalidade que compõe a equação que descreve o deslocamento vertical de água em colunas de areia homogênea, sob condições de saturação (Prevedello e Armindo, 2015).

A permeabilidade, ou condutividade, hidráulica do solo saturado traduz a facilidade do meio em permitir a passagem de água. Considerando-se as mesmas condições de temperatura e pressão da água, K_s deve ser constante para o mesmo solo tendo relação direta com as propriedades físicas do solo.

A condutividade é dependente da umidade do solo (θ) (Hurtado et al., 2005), sendo expressa como a função condutividade hidráulica do solo não saturado [$K(\theta)$]. Com essa função, que é dependente de K_s , torna-se possível levantar informações sobre o movimento da água no solo (Vereecken et al., 1990; Mesquita e Moraes, 2004; Ramos et al., 2011).

Assim, a obtenção de $K(\theta)$ é de grande importância em trabalhos relacionados à água no solo com aplicações na agricultura, saneamento, hidrologia, entre outros. Estudos de fluxos e recarga em aquíferos aluviais, como o realizado por Montenegro e Montenegro (2006), são exemplos mais específicos de aplicação.

A variabilidade espacial de K_s é dependente, até certo ponto, da geometria, distribuição e diversidade no tamanho dos poros do solo, influenciando a análise de modelos hidrológicos (Buttle e House, 1997). Dada a complexidade, tanto de levantamento a campo de K_s , quanto dos inúmeros métodos e condições de contorno para sua determinação, alguns estudos buscam facilitar sua obtenção estimando seus valores por meio de funções de pedotransferência (PTFs).

A padronização do termo PTF foi proposta por Bouma (1989), unificando as expressões que obtinham como resultado uma informação que se precisava, normalmente difícil de ser obtida a campo ou em laboratório, a partir de informações facilmente levantadas.

Diversas são as PTFs encontradas na literatura (Cosby et al., 1984; Braeknsiek et al., 1984; Saxton et al., 1986; Puckett et al., 1985; Vereecken et al.,

1990; Dane e Puckett, 1994; Campbell e Shiozawa, 1994; Wösten et al., 1999; Wösten et al., 2001; Ferrer-Julià, 2004) porém há diversidade nos dados de entrada dessas PTFs, mostrando a dificuldade na predição de K_s . Ressalta-se que muitas PTFs utilizadas foram obtidas para solos de outros países, como Estados Unidos da América e Espanha, representando distintos comportamentos.

Teve-se como objetivo neste trabalho desenvolver novas PTFs para solos do Brasil e calibrar para solos do Brasil PTFs já existentes de outros países, ressaltando as relações existentes entre K_s e as propriedades físicas dos solos brasileiros.

2 CAPÍTULO I. ASPECTOS SOBRE FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA PREDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO.

- REVISÃO DE LITERATURA -

2.1 RESUMO

Para a realização de trabalhos que visem monitorar ou modelar o fluxo tridimensional de água no solo faz-se necessário o conhecimento do valor da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s). Para sua obtenção existem métodos de campo (por ex., método do poço), laboratoriais (permeômetros de carga constante e carga decrescente), que fazem uso de amostras não deformadas de solo, e métodos de estimativa (funções de pedotransferência). A utilização do permeômetro de carga constante (PCC) se aplica em regime não transiente de fluxo sendo recomendado para amostras de solos razoavelmente permeáveis, enquanto o permeômetro de carga decrescente (PCD) se aplica em regime de fluxo transiente sendo recomendado para amostras pouco permeáveis. Para contornar situações onde não é possível a medição de K_s , são utilizadas as funções de pedotransferência (PTFs), que a partir de propriedades do solo de fácil obtenção estima o valor K_s . Sendo assim teve-se por objetivo realizar o levantamento bibliográfico de PTFs para diversos tipos de solos, e observar quais são as variáveis de entrada nessas diferentes funções.

Palavras-chave: permeabilidade hidráulica do solo saturado; propriedades físico-hidráulicas do solo; modelagem.

2.2 ABSTRACT

It is necessary to know the value of the saturated soil hydraulic conductivity (K_s) for the accomplishment of works that aim modeling or monitoring three-dimensional flow of water within the soil. Field (e.g., well), laboratory (constant head and falling head permeameters) methods (which make use of undisturbed soil samples), and estimation methods (pedotransfer functions) are available for obtaining the value of K_s . Usually, constant head permeameter is applied on a non-transient flow regime and is recommended for samples gathered from reasonably permeable soils, while the falling head permeameter is applied on a transient flow being recommended for low permeable samples. We utilize pedotransfer functions (PTFs), which estimate K_s from easily obtained soil properties, in order to cover situations that are not possible to measure K_s . Thus, this work aimed to carry out a bibliographic survey of PTFs from a widely types of soil observing which are the input variables in these different functions.

Keywords: saturated soil hydraulic permeability; soil properties; modeling.

2.3 INTRODUÇÃO

O primeiro estudo sobre movimento da água no solo foi realizado por Henry Darcy (1856), um engenheiro hidráulico francês, quando realizou um experimento de filtragem de água por meios porosos para fim de abastecimento de água. Nesse trabalho, observou-se o deslocamento vertical de água em colunas de areia

homogênea, sob condições de saturação, definindo-se a constante de proporcionalidade (K_s), da equação $q = -K_s \cdot V_{hAB}$, como coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo saturado, também conhecido como condutividade hidráulica do solo saturado (Prevedello e Armindo, 2015). Nessa equação, q é a densidade de fluxo ($L T^{-1}$) e V_{hAB} o gradiente hidráulico entre os pontos A e B em questão ($L L^{-1}$).

Segundo Mesquita e Moraes (2004) e Bernardes (2005), a condutividade hidráulica do solo está relacionada, de modo geral, aos fluxos de água no solo, influenciando os processos de escoamento superficial, infiltração e armazenamento de água no solo, perdas de fertilizantes e de solo por erosão, perdas de substâncias químicas por lixiviação, conservação do solo, transporte de gases, calor e nutrientes, sendo também importante em dimensionamentos de projetos de irrigação e drenagem.

A partir de medições de K_s e parâmetros da curva de retenção, pode-se estimar a função condutividade hidráulica não saturada [$K(\theta)$] e obter informações sobre o movimento de água nos solos (Vereecken et al., 1990; Mesquita e Moraes, 2004; Ramos et al., 2011). Tal estimativa se deve ao fato de que a condutividade hidráulica é altamente dependente do conteúdo de água no solo (θ) e seu valor decresce acentuadamente com a diminuição de θ ou do potencial mátrico da água na matriz do solo (Bernardes, 2005).

A condutividade é influenciada pela composição mineralógica, tamanho e distribuição das partículas e poros do solo e pelas propriedades físico-química dos fluidos que percolam o perfil de solo (Fiorin, 2008). Tendo em vista a ampla utilização da condutividade hidráulica em estudos ambientais e sua medição ser demorada e onerosa, funções de pedotransferência são utilizadas para sua estimativa (Ghanbarian-Alavijeh et al., 2010).

Bouma (1989) introduziu a expressão função de pedotransferência (PTF) para padronizar outros termos que eram utilizados com o significado de transformar dados que possuímos em dados que precisamos. Neste trabalho objetivou-se discutir as características das PTFs registradas na literatura para diferentes solos observando a dependência entre K_s e os demais atributos físicos do solo.

2.4 DESENVOLVIMENTO

2.4.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO, K_s

Darcy (1856) definiu a constante de proporcionalidade K_s entre a densidade de fluxo e o gradiente hidráulico como coeficiente de permeabilidade hidráulica. Já Libardi (2012) descreve que K_s representa a facilidade que a água tem ao penetrar em certa porção do meio poroso, movida pela força do gradiente de potencial total da água entre dois pontos no solo (A e B), sendo obtida por $K_s = q / \nabla h_{AB}$, em que K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado ($L T^{-1}$), q é a densidade de fluxo ($L T^{-1}$) e ∇h_{AB} é o gradiente hidráulico entre o ponto A e B ($L L^{-1}$).

A K_s é uma propriedade hidráulica do solo afetada pela geometria de todos os poros preenchidos por água, sendo, portanto, dependente da forma, quantidade, distribuição e continuidade dos poros (Mesquita e Moraes, 2004; Gonçalves e Libardi, 2013). Para Silva e Kato (1997), em locais onde a macroporosidade é reduzida, também é observada a redução nos valores de K_s , o que exerce influência no escoamento superficial.

Barbosa et al. (2004) realizaram medições de K_s em um Latossolo Vermelho eutroférico que recebeu tratamento de lodo de esgoto por dois anos consecutivos para estudo de infiltração de dejetos no solo. Os autores observaram aumento da condutividade hidráulica onde houve maior dose de esgoto aplicada (12 Mg ha^{-1}). A maior concentração de lodo no solo ao longo do tempo permitiu maior agregação resultando em maior macroporosidade.

Os métodos de determinação direta da K_s podem ser divididos em laboratoriais e de campo. Nos métodos laboratoriais são utilizadas amostras não deformadas na condição de saturação do solo valendo-se dos permeâmetros. Os permeâmetros podem ser de carga constante, $K_s = q / \nabla h_{AB}$, ou carga decrescente, $K_s = (L/t) \cdot \ln[(h_{l(t=0)} + L) / (h_{l(t=t)} + L)]$, em que L é o comprimento da amostra cilíndrica de solo (L), t é o tempo (T), $h_{l(t=0)}$ e $h_{l(t=t)}$ são as cargas hidráulicas no topo da amostra nos tempos $t=0$ e $t=t$, respectivamente (L).

No trabalho de Marques et al. (2008) foram comparados os dois métodos de obtenção da K_s para solos da Amazônia. Os autores concluíram que o permeâmetro de carga constante foi o mais apropriado para os Latossolos avaliados, que variaram da textura média a muito argilosa, observando que K_s variou mais com as variações

das propriedades físicas do solo e posição do relevo do que pelas variações das coberturas vegetais.

A K_s pode ser estimada a partir de outros dados como textura, porosidade, teor de matéria orgânica, entre outros (Pachepsky e Park, 2015). Os autores apresentaram PTFs para estimativa de K_s para amostras de 4 a 10 cm de comprimento ou diâmetro dividindo o banco de dados em alta e baixa densidade do solo para cada fração textural de solo. Essa divisão refletiu em diferenças nos efeitos da estrutura do solo e, conseqüentemente, na K_s podendo ser também utilizada em locais onde existem menores bancos de dados.

2.4.2 FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA (PTF) PARA K_s

Segundo Wösten et al. (2001), pode-se prever a K_s diretamente a partir de propriedades do solo, como a porosidade efetiva ou a retenção de água no solo. Em trabalhos de caracterização hidrodinâmica de solo, são necessários inúmeros ensaios de campo e laboratório, tornando o estudo dispendioso e demorado (Souza et al., 2008). Esse último fato tem motivado o uso dos métodos indiretos de determinação de K_s , sendo o mais frequente o das funções de pedotransferência (PTFs).

As PTFs utilizam propriedades do solo medidas rotineiramente, com maior facilidade e menor custo, para a estimativa de outras propriedades do mesmo solo de mais difícil mensuração (McBratney et al., 2002). Para Wösten et al. (2001) ela é uma ferramenta poderosa para prever propriedades físicas e químicas dos solos, como os valores de fósforo remanescente no solo e a densidade relativa, ou grau de compactação do solo (Cagliari et al., 2011; Marcolin e Klein, 2011).

A primeira PTF foi proposta por Briggs e McLane (1907) e depois aprimorada por Briggs e Shantz (1912) para o teor de água no ponto de murchamento permanente, a partir de dados de granulometria. O uso dessas funções surgiu no estágio inicial do desenvolvimento da ciência quantitativa do solo, quando foi observada a relação entre as propriedades e processos do solo, em que a utilização de propriedades de mais fácil obtenção possibilita a estimativa das demais propriedades (Shein e Arkhangel'Skaya, 2006).

Prevedello e Loyola (2002) desenvolveram o programa computacional denominado *Splintex 1.0* para estimativa de K_s a partir de pontos da curva granulométrica e dos valores da porcentagem acumulada de areia, silte e argila, utilizando-se dos dados do experimento de Rodas (1970).

No trabalho de Julià et al. (2004) foram estudadas cinco PTFs distintas já existentes na literatura para uma área da Península Ibérica na Espanha (eqs. 1 a 5, TABELA 1) e outra (eq. 6, TABELA 1), obtida por Ferrer-Julià (2003) para todas as classes de solo. Os autores concluíram que o teor de areia foi a variável mais significativa na estimativa da K_s . Por outro lado, Sobieraj et al. (2001), utilizando-se das mesmas cinco PTFs baseadas em textura (eqs. 1 a 5, TABELA 1) não conseguiram reproduzir satisfatoriamente os valores observados de K_s . Entretanto, dois outros modelos (eqs. 6 e 7, TABELA 1) baseados na densidade do solo seco e na porosidade obtiveram desempenhos mais satisfatórios.

TABELA 1 - PTFs ENCONTRADAS NA LITERATURA GERADAS COM DADOS SEM MATÉRIA ORGÂNICA

Autores	PTF	eq.
Cosby et al. (1984)	$K_s \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = 25,4 + 10^{(-0,6 + 0,012 \cdot \text{Areia} - 0,0064 \cdot \text{Argila})}$	(1)
Puckett et al. (1985)	$K_s \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = 156,9 \cdot e^{(-0,1975 \cdot \text{Argila})}$	(2)
Saxton et al. (1986)	$K_s \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = 10 \cdot e^{\left\{ 1,1 - 0,0755 \cdot \text{Areia} + \left[\frac{-3,895 + 0,03671 \cdot \text{Areia} - 0,1103 \cdot \text{Argila} + 0,00087546 \cdot (\text{Argila})^2}{0,33 - 0,000751 \cdot \text{Areia} + 0,176 \cdot \log_{10}(\text{Argila})} \right] \right\}}$	(3)
Campbell e Shiozawa (1994)	$K_s \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = 54 \cdot e^{(-0,07 \cdot \text{Areia} - 0,167 \cdot \text{Argila})}$	(4)
Dane e Puckett (1994)	$K_s \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = 303,84 \cdot e^{(-0,144 \cdot \text{Argila})}$	(5)
Ferrer-Julià (2003)	$K_s \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = 0,920 \cdot e^{(0,0491 \cdot \text{Areia})}$	(6)
Brakensiek et al. (1984)	$K_s \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = 10 \cdot e^a$ $a = 19,52348 \cdot \alpha - 8,96847 - 0,028212 \cdot \text{Argila} + 0,00018107 \cdot \text{Areia}^2 - 0,0094125 \cdot \text{Argila}^2 - 8,395215 \cdot \alpha^2 + 0,077718 \cdot \text{Areia} \cdot \alpha - 0,00298 \cdot \text{Areia}^2 \cdot \alpha^2 - 0,019492 \cdot \text{Argila}^2 \cdot \alpha^2 + 0,0000173 \cdot \text{Areia}^2 \cdot \text{Argila} + 0,02733 \cdot \text{Argila}^2 \cdot \alpha + 0,001434 \cdot \text{Areia}^2 \cdot \alpha - 0,0000035 \cdot \text{Argila}^2 \cdot \text{Areia}$	(7)

em que areia, porcentagem de areia (%); argila, porcentagem de argila (%); α : porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). FONTE: O autor (2017).

Normalmente as PTFs fazem uso de textura e densidade do solo seco como variáveis de entrada para obtenção da K_s , porém alguns trabalhos começaram a adicionar, aos dados de entrada, o valor da matéria orgânica (OM), mesmo sabendo-se previamente da influência dela nas demais propriedades do solo (Martín et al., 2016). Nemes et al. (2005) analisaram PTFs que requeriam a OM como parâmetro de

entrada (eqs. 8 a 11, TABELA 2) encontrando correlação negativa entre K_s e OM para os solos analisados com diversos teores de OM.

TABELA 2 - PTFs ENCONTRADAS NA LITERATURA COM MATÉRIA ORGÂNICA

Autores	PTF	eq.
Vereecken et al. (1990)	$\ln(K_s) = 20,62 - 0,96 \cdot \ln(\text{Argila}) - 0,66 \cdot \ln(\text{Areia}) - 0,46 \cdot \ln(\text{OM}) - 8,43 \cdot \rho_b$	(8)
Wösten et al. (1999)	$\ln(K_s) = 7,75 + 0,0352 \cdot \text{Silte} + 0,93 \cdot (\text{TOPSOIL}) - 0,967 \cdot \rho_b^2$ $- 0,000484 \cdot \text{Argila}^2 - 0,000322 \cdot \text{Silte}^2 + 0,001 \cdot \text{Silte}^{-1}$ $- 0,0748 \cdot \text{OM}^{-1} - 0,643 \cdot \ln(\text{Silte}) - 0,01398 \cdot \rho_b \cdot \text{Argila}$ $- 0,1673 \cdot \rho_b \cdot \text{OM} + 0,02986 \cdot (\text{TOPSOIL}) \cdot \text{Argila}$ $- 0,03305 \cdot (\text{TOPSOIL}) \cdot \text{Silte}$	(9)
Wösten et al. (2001) (1) para solos arenosos	$\ln(K_s) = 45,8 - 14,34 \cdot \rho_b + 0,001481 \cdot \text{Silte}^2 - 27,5 \cdot \rho_b^{-1}$ $- 0,891 \cdot \ln(\text{Silte}) - 0,34 \cdot \ln(\text{OM})$	(10)
Wösten et al. (2001) (2) para solos siltosos e argilosos	$\ln(K_s) = - 42,6 + 8,71 \cdot \text{OM} + 61,9 \cdot \rho_b - 20,79 \cdot \rho_b^2$ $- 0,2107 \cdot \text{OM}^2 - 0,01622 \cdot \text{Argila} \cdot \text{OM}$ $- 5,382 \cdot \rho_b \cdot \text{OM}$	(11)

em que K_s (cm d-1); argila é a porcentagem de argila (%); areia, a porcentagem de areia (%); silte é a porcentagem de silte (%); om: matéria orgânica (%); pb: densidade do solo (kg dm-3); (topsoil): profundidade de coleta, apresenta valor 1 se for coleta superficial e valor 0 se for subsuperficial. FONTE: o autor (2017).

Papanicolaou et al. (2015) apresentaram mapas de três encostas do sudoeste de Iowa, EUA, com diferentes práticas de gestão agrícola e observaram a correlação entre K_s e os teores de nitrogênio, carbono, areia, silte, argila, densidade do solo seco, pH e capacidade de troca de cátions. Dentre os atributos estudados, a K_s apresentou correlação de Pearson positiva entre o teor de areia ($r \approx 0,60$).

Pela grande variabilidade espacial de K_s , sua descrição para pontos próximos entre si se torna desafiadora, devido a heterogeneidade das propriedades e horizontes do solo, fazendo com que algumas regiões sejam mais ou menos favoráveis ao fluxo de água (Sobieraj et al., 2004).

Tóth et al. (2015) utilizaram dois índices para analisar as PTFs realizadas para solos da Europa, que avaliam a diferença entre o valor observado e o valor estimado pelas PTFs. São esses, o valor da Raiz Quadrada do Erro Médio, $RMSE = \{[\sum (O_i - E_i)^2]/n\}^{0,5}$, e o Erro Médio Absoluto, $EMA = (\sum |O_i - E_i|)/n$, em que n é o número de

medições, E_i o i -ésimo valor estimado e O_i o i -ésimo valor observado. Outros índices podem ser utilizados na avaliação de modelos, por exemplo, no trabalho de Abdelbaki (2015) foram utilizados para comparação entre valores estimados e observados a Relação do Erro Médio Geométrico (GMER) e o Desvio Padrão da Razão do Erro Geométrico (GS DER).

O coeficiente de Pearson (r), também utilizado em trabalhos que buscam validação de modelos, é o indicador do grau de correlação entre as variáveis em estudo (Figueiredo Filho e Silva Junior, 2009). Segundo os autores, r é uma medida de variância compartilhada entre duas variáveis. O valor do índice r varia entre -1 e 1. Se for negativo indica que as variáveis analisadas apresentam valores inversamente proporcionais, ocorrendo o oposto para correlações positivas. Quando o índice é igual a -1 ou 1 tem-se a correlação perfeita, e quando é igual a 0 demonstra-se que não há correlação linear entre as variáveis. Segundo Cohen (1988), valores de r entre 0,10 a 0,29 indicam baixa correlação, entre 0,30 a 0,49 indicam média correlação e valores entre 0,50 e 1 indicam alta correlação.

Diversas outras PTFs que descrevem a K_s são encontradas na literatura, contudo as que foram aqui citadas serão objeto de estudo e aplicação no Capítulo 2.

2.5 CONCLUSÕES

A quantificação da condutividade hidráulica do solo saturado se faz necessária em casos que o estudo do fluxo da água e transporte de solutos no solo são visados, como projetos de irrigação e modelagem em bacias hidrográficas. O uso dos métodos diretos de laboratório, seja PCC ou PCD, para muitas amostras é dispendioso e demanda muito tempo. Assim, PTFs para predição da K_s por meio de propriedades de fácil obtenção são frequentemente utilizadas. As variáveis de entrada dessas funções são diferentes, divergindo entre autores e regiões. Dessa forma, a indefinição de quais propriedades descrevem melhor o comportamento de K_s no solo incentiva a busca por PTFs específicas para classes de solos brasileiros, já que a maioria delas foi gerada para outras regiões, demonstrando a necessidade de PTFs para solos do Brasil.

2.6 REFERÊNCIAS

Abdelbaki A.M. Using automatic calibration method for optimizing the performance of Pedotransfer functions of saturated hydraulic conductivity. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, v. 7, p. 653-662, julho, 2015.

Barbosa G.M.C.; Tavares Filho J.; Fonseca I.C.B. Condutividade hidráulica saturada e não saturada de Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Londrina, v. 28, p. 403-407, 2004.

Bernardes R.S. **Condutividade hidráulica de três solos da região norte fluminense**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2005.

Bouma J. Using soil survey data or quantitative land evaluation. In **Soil Science**, Nova Iorque, 1989.177-213.

Brakensiek D.L.; Rawls W.J.; Stephenson G.R. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. **American Society of Agricultural Engineering**. PNR:84-203, 1984.

Briggs L.J.; McLane J.W. **The moisture equivalent of soils**. Washington: USDA, 1907.

Briggs L.J.; Shantz H.L. The wilting coefficient and its indirect measurement. **The University of Chicago press Journals**, Chicago, v. 53, n. 1, p. 20-37, jan, 1912.

Cagliari J.; Veronez M.R.; Alves M.E. Remaining phosphorus estimated by pedotransfer function. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Caxias do Sul, v. 35, p. 203-212, dez, 2011.

Campbell G.S.; Shiozawa S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: van Genuchten M.Th et al., editors. **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. University of California: Riverside, 1994. p.317– 328.

Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale: Erlbaum, 1988.

Cosby B.J.; Hornberger G.M.; Clapp R.B.; Ginn T.R. A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, v. 20, p. 682– 690, 1984.

Dane J.H.; Puckett W. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: van Genuchten M.Th et al., editors. **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. University of California: Riverside, 1994. p.389– 403.

Darcy, H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856.

Ferrer-Julià M. Análisis de nuevas funciones de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección. **CEDEX — Ministerio de Fomento**, Col. Cuadernos de investigación, C-48. 2003.

Figueiredo Filho D.B.; Silva Junior J.A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**. 2009; 18:115-146.

Fiorin T.T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções** 116 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

Ghanbarian-Alavijeh B.; Liaghat A.M.; Sohrabi S. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil physical properties using neural networks model. **International Journal of Environmental**, Karaj, v. 4, n. 2 p. 58-63, 2010.

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, p. 1174-1184, 2013.

Julià M.F.; Monreal T.E.; Jiménez A.S.C.; Meléndez E.G. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, Salamanca, v. 123, p. 257-277, abr, 2004.

Libardi P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

Marcolin C.D.; Klein V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

Marques J.D.O.; Teixeira W.G.; Reis A.M.; Cruz Junior O.F.; Martins G.C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

Martín M.A.; Reyes M.; Taguas F.J. Estimating soil bulk density with information metrics of soil texture. **Geoderma**, Madrid, v. 287, p. 66-70, set, 2016.

Mesquita M.G.B.F.; Moraes S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 963-969, mai-jun, 2004.

McBratney A.B.; Minasny B.; Cattle S.R.; Vervoort R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Sydney, v. 109, p. 41-73, dez, 2002.

Nemes A.; Rawls W.J.; Pachepsky Y.A. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1330-1337, jun, 2005.

Pachepsky Y.; Park Y. Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, Beltsville, v. 79, p. 1094-1100, jul, 2015.

Papanicolaou A.N.; Elhakeem M.; Wilson C.G.; Burras C.L.; West L.T.; Lin H.; Clark B.; Oneal B.E. 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, dez, 2015.

Prevedello C.L.; Armindo R.A. **Física do solo com problemas resolvidos 2nd ed. Revisada e Ampliada**. Curitiba: Celso Luiz Prevedello; 2015.

Prevedello C.L.; Loyola J.M.T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. 2002, São Paulo. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**; 2002; São Paulo. ABMS, 2002. p.467-472.

Puckett W.E.; Dane J.H.; Hajek B.H. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 831–836, 1985.

Ramos T.; Gonçalves M.C.; Martins J.C.; Pires F.; Pereira L.S. Propriedades hidráulicas do solo para as diferentes classes texturais. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 34, n. 2, p. 252-264, 2011.

Rodas A. **Determinación de la conductividad hidráulica em muestras de suelo inalterada**. Lima: CENDRET; 1970.

Saxton K.E.; Rawls W.L.; Rosenberger J.S.; Papendick R.I. Estimating generalized soil – water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1031– 1036, 1986.

Shein E.V.; Arkhangel'Skaya T.A.S. Pedotransfer functions: state of the art, problems and outlooks. **Eurasian Soil Science**, Moscou, v. 39, n. 10, p. 1090-1099, ago, 2006.

Silva C.L.; Kato E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 213-220, 1997.

Sobieraj J.A.; Elsenbeer H.; Vertessy R.A. Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modeling storm flow generation. **Journal of Hydrology**, Cincinnati, v. 251, p. 202-220, 2001.

Sobieraj J.A.; Elsenbeer H.; Cameron G. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. **Catena**, Cincinnati, v. 55, p. 49-77, abr, 2004.

Souza E.S.; Antonino A.C.D.; Jaramillo R.A.; Netto A.M.; Montenegro S.M.G.L.; Silva E.B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Serra Talhada, v. 32, p. 1795-1804, ago, 2008.

Tóth B.; Weynants M.; Nemes A.; Makó A.; Billas G.; Tóth G. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. **European Journal of Soil Science**, v. 66, p. 266-238, jan, 2015.

Vereecken H.; Maes J.; Feyen J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, Leuven, v. 149, n. 1, p. 1-12, jan, 1990.

Wösten J.H.M.; Lilly A.; Nemes A.; Bas C.L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, Wageningen, v. 90, p.169–185, out, 1999.

Wösten J.H.M.; Pachepsky Y.A.; Rawls W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, Wageningen, v. 251, p .123-150, 2001.

3 CAPITULO II. VALIDAÇÃO E OBTENÇÃO DE NOVAS FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A PREDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRAULICA DO SOLO SATURADO

3.1 RESUMO

A obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) é demorada e onerosa. Assim, alguns estudos propõem o uso de funções que apresentem K_s como variável dependente, quando se possui dados de fácil obtenção, sendo denominadas funções de pedotransferência (PTFs). As PTFs para K_s normalmente apresentam como valor de entrada teores de areia, silte e argila, densidade do solo seco, porosidade total e umidade na saturação. Entretanto, PTFs que também requerem o teor de matéria orgânica (OM) do solo e parâmetros da curva de retenção são também encontradas. Neste trabalho desenvolveram-se novas PTFs comparando-as com PTFs da literatura. Para fins práticos, a utilização do teor de OM se fez desnecessária tendo em vista sua demorada na obtenção laboratorial bem como seu efeito nos demais atributos físicos já utilizados como parâmetros de entrada nas PTFs. Verificou-se para a base de dados avaliada que a OM influenciou as demais propriedades do solo não melhorando assim a correlação das PTFs com os dados observados. Ademais, modelos que utilizaram atributos do solo de mais fácil obtenção, como textura, porosidade e densidade, apresentaram maior correlação e menores erros sistemáticos. Contudo, K_s continua sendo uma propriedade de difícil estimativa devido sua alta variabilidade espacial e alta divergência de métodos e condições de contorno para sua determinação.

Palavras-chave: modelagem; teor de matéria orgânica; atributos hidráulicos do solo.

3.2 ABSTRACT

Laboratory or field measurement of saturated hydraulic conductivity (K_s) is time consuming, sometimes expensive and their boundary conditions are not specific many times when one speaks of 'a considerable volume of water' in the use of constant head permeameter. Therefore, some studies are about to propose mathematical models for

obtaining K_s as response to measured-soil K_s . When we have in hand data that of easier obtention, they can be used in pedotransfer functions (PTFs). PTFs that usually present as input values of sand, silt, and clay, dry bulk density, total porosity, and saturated moisture. However, some authors are modeling functions that seek for organic matter content (OM) as input. In this work the comparison among PTFs from literature and novel-modeled PTFs was carried out. It was also observed that the use of OM in the examined data was unnecessary due to its laboratorial delay and their own reflection in bulk density as well as total porosity.

Keywords: saturated hydraulic conductivity; organic matter content; soil physical attributes.

3.3 INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) é considerada um parâmetro de extrema importância quando trabalhos de deslocamento de água no solo são realizados (Marques et al., 2008). Comumente, estuda-se a variabilidade espacial das propriedades do solo notando-se que a K_s é normalmente dependente espacialmente da umidade volumétrica de saturação (Souza et al., 2008).

Os modelos de simulação dos processos do solo têm sido desenvolvidos para melhorar a compreensão desses bem como servir de ferramenta para avaliação de problemas agrícolas e ambientais (McBratney et al., 2002).

Vários autores utilizam funções de pedotransferência (PTFs) para predição da K_s , como Cosby et al. (1984), Puckett et al. (1985), Julià et al. (2004), entre outros, obtendo resultados considerados satisfatórios. Como exemplo, Pachepsky e Park (2015) estudaram PTFs utilizando o agrupamento de valores da densidade do solo seco e concluíram que sua utilização foi vantajosa em ambientes com falta de dados, como regiões onde há falta de pontos coletados.

Entretanto, Vereecken et al. (1990) apontaram que estimativas de K_s não podem ser realizadas a partir de simples propriedades do solo, como textura, densidade e carbono orgânico total. Segundo os autores, a adição de informações detalhadas sobre a composição estrutural do solo não melhora a estimativa de K_s . PTFs que utilizam o teor de matéria orgânica do solo (OM) são utilizadas, mesmo sabendo-se da sua relação com as demais propriedades, como a relação inversa entre teor de carbono orgânico e densidade do solo seco em profundidade, observada no trabalho de Silva et al. (2006).

Autores como Wösten et al. (2001) estudaram a influência da OM na K_s concluindo que textura, densidade e OM devem ser bem detalhadas e explicadas para

que se tenham boas estimativas. Devido à hipótese de que PTFs modeladas com atributos de fácil determinação são eficientes na estimativa de K_s , teve-se por objetivo, neste trabalho, examinar as PTFs encontradas na literatura utilizando dados amostrados em solos brasileiros, bem como modifica-las e gerar novas funções, analisando as relações existentes entre a K_s e as propriedades do solo avaliadas.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

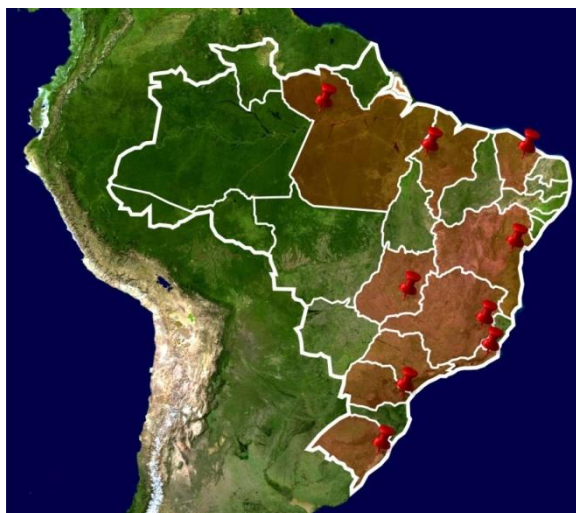
3.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL, AMOSTRAGEM E BASE DE DADOS

A amostragem do presente trabalho foi realizada em duas áreas experimentais do Centro de Ensino Aplicado em Ciências Agrárias (CEAA), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizado no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba-PR, entre as coordenadas geográficas $-25^{\circ}22'38''$ e $-25^{\circ}24'46''$ de latitude Sul, $-49^{\circ}09'05''$ e $-49^{\circ}06'40''$ de longitude Oeste, com altitude média de 920 m, sendo o clima classificado como Temperado Mesotérmico (Cfb), de acordo com a classificação de Köppen (IAPAR, 2011).

A primeira área de amostragem é utilizada para cultura de milho no verão e aveia no inverno, enquanto a segunda possui um pomar de videiras. Em ambas as áreas foram coletadas manualmente 10 amostras não deformadas, em anéis metálicos de dimensões 4,6 cm de diâmetro por 3,5 de altura, na profundidade de 0-10 cm bem como amostras deformadas para análise granulométrica de cada ponto amostral.

Ademais, uma base de dados de diversos estados brasileiros foi utilizada (FIGURA 1), obtendo-se assim um total de 447 dados.

FIGURA 1 - MAPA DO BRASIL COM DESTAQUE NOS ESTADOS COMPREENDIDOS PELO BANCO DE DADOS.



FONTE: o autor (2017)

3.4.2 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HIDRÁULICOS E BASE DE DADOS UTILIZADA

As análises dos atributos físico-hidráulicos foram realizadas no Núcleo de Atividades em Engenharia de Biosistemas (NAEB) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Foi utilizado o método do densímetro de Boyoucos para determinação da textura do solo, obtendo-se as concentrações de areia, silte e argila, para posterior cálculo das porcentagens das frações texturais do solo (Gee e Or, 2002). Após obtenção das porcentagens, e com o auxílio do Diagrama triangular das classes texturais dos solos, recomendado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), realizou-se a determinação da classe textural do solo.

Para a determinação da densidade do solo seco (ρ_b) foram coletadas amostras indeformadas em anéis metálicos de volume interno V_t e, posteriormente, levadas em estufa a 105 °C por 48 h para obtenção da massa de sólidos (m_s), $\rho_b = m_s / V_t$. Para a determinação da densidade das partículas (ρ_p) foi realizada a metodologia do balão volumétrico com álcool obtendo-se o volume das partículas do solo (V_s), $\rho_p = m_s / V_s$. A porosidade total do solo (α) foi obtida por meio da expressão $\alpha = 1 - (\rho_b / \rho_p)$.

As amostras indeformadas foram preparadas e permaneceram saturando por capilaridade até que a massa úmida não mais variasse. Nos ensaios com o permeâmetro de carga constante (PCC), cronometrou-se o tempo (t) referente ao volume de água coletado (V) em cada amostra cilíndrica de área de secção transversal

(S) determinando-se a condutividade hidráulica do solo saturado pela expressão: $K_s = -V / [S \cdot t \cdot (\Delta h / \Delta z)]$ em que a K_s é a condutividade hidráulica na saturação do solo, Δh e Δz são respectivamente a diferença de potencial hidráulico e a diferença de altura entre as extremidades da amostra. Além das análises laboratoriais realizadas, uma base de 402 dados de teor de areia, argila e silte, ρ_b , ρ_p , α , θ_s e OM para diversas regiões do Brasil foi utilizada. Ressalta-se que dos 402 dados, apenas 256 apresentam valores de OM.

3.4.3 ANÁLISES DE REGRESSÃO MULTIVARIADA DAS PTFs

As PTFs registradas na literatura (TABELA 1) foram analisadas a partir dos resultados do teor de areia, argila e silte, ρ_b , ρ_p , α , θ_s e OM. Essas PTFs foram escolhidas pela facilidade nos dados de entrada e por terem sido comparadas em mais de uma literatura citada. Em segunda análise, as constantes dessas PTFs, definidas pelos respectivos autores (eqs. 1 a 11), foram ajustadas por regressão não linear valendo-se do método dos mínimos quadrados, denominando-as de funções modificadas, e, posteriormente, formuladas novas PTFs para predição de K_s . Foram utilizados 135 pontos para calibração das funções que não utilizam OM, restando 312 dados para validação. Para as PTFs que requerem a informação da OM utilizaram-se 82 pontos para calibração e 189 para validação. A formulação de novas PTFs teve por objetivo a busca pela(s) propriedade(s) do solo de maior correlação com a K_s . Os resultados de estimativa foram comparados aos valores observados de K_s para a escolha da PTF de melhor predição. Essa comparação foi realizada por meio da raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro médio absoluto (EMA) e da correlação de Pearson (r) entre os dados observados e estimados, avaliando-se os erros sistemáticos e aleatórios do processo de predição.

TABELA 1 - FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA (PTFs) AVALIADAS APRESENTADAS NA LITERATURA

Autores	PTF	eq.
Cosby et al. (1984)	$K_s = 25,4 + 10^{(-0,6 + 0,012 \cdot \text{Areia} - 0,0064 \cdot \text{Argila})}$	(1)
Puckett et al. (1985)	$K_s = 156,9 \cdot e^{(-0,1975 \cdot \text{Argila})}$	(2)

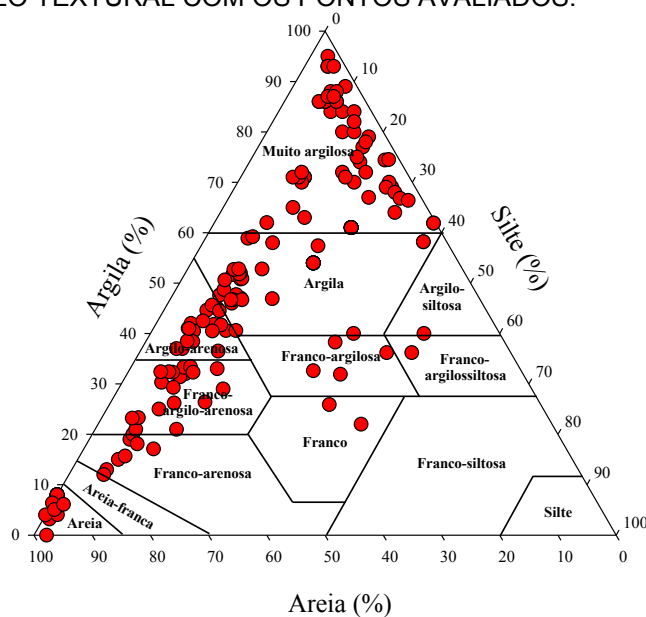
Autores	PTF	eq.
Saxton et al. (1986)	$K_s = 10 \cdot e^{\left\{ 1,1 - 0,0755 \cdot \text{Areia} + \left[\frac{-3,895 + 0,03671 \cdot \text{Areia} - 0,1103 \cdot \text{Argila} + 0,00087546 \cdot (\text{Argila})^2}{0,33 - 0,000751 \cdot \text{Areia} + 0,176 \cdot \log_{10}(\text{Argila})} \right] \right\}}$	(3)
Campbell e Shiozawa (1994)	$K_s = 54 \cdot e^{(-0,07 \cdot \text{Areia} - 0,167 \cdot \text{Argila})}$	(4)
Dane e Puckett (1994)	$K_s = 303,84 \cdot e^{(-0,144 \cdot \text{Argila})}$	(5)
Ferrer-Julia (2003)	$K_s = 0,920 \cdot e^{(0,0491 \cdot \text{Areia})}$	(6)
Brakensiek et al. (1984)	$K_s = 10 \cdot e^a$ $a = 19,52348 \cdot \alpha - 8,96847 - 0,028212 \cdot \text{Argila} + 0,00018107 \cdot \text{Areia}^2 - 0,0094125 \cdot \text{Argila}^2 - 8,395215 \cdot \alpha^2 + 0,077718 \cdot \text{Areia} \cdot \alpha - 0,00298 \cdot \text{Areia}^2 \cdot \alpha^2 - 0,019492 \cdot \text{Argila}^2 \cdot \alpha^2 + 0,0000173 \cdot \text{Areia}^2 \cdot \text{Argila} + 0,02733 \cdot \text{Argila}^2 \cdot \alpha + 0,001434 \cdot \text{Areia}^2 \cdot \alpha - 0,0000035 \cdot \text{Argila}^2 \cdot \text{Areia}$	(7)
Vereecken et al. (1990)	$\ln(K_s) = 20,62 - 0,96 \cdot \ln(\text{Argila}) - 0,66 \cdot \ln(\text{Areia}) - 0,46 \cdot \ln(\text{OM}) - 8,43 \cdot \rho_b$	(8)
Wösten et al. (1999)	$\ln(K_s) = 7,75 + 0,0352 \cdot \text{Silte} + 0,93 \cdot (\text{TOPSOIL}) - 0,967 \cdot \rho_b^2 - 0,000484 \cdot \text{Argila}^2 - 0,000322 \cdot \text{Silte}^2 + 0,001 \cdot \text{Silte}^{-1} - 0,0748 \cdot \text{OM}^{-1} - 0,643 \cdot \ln(\text{Silte}) - 0,01398 \cdot \rho_b \cdot \text{Argila} - 0,1673 \cdot \rho_b \cdot \text{OM} + 0,02986 \cdot (\text{TOPSOIL}) \cdot \text{Argila} - 0,03305 \cdot (\text{TOPSOIL}) \cdot \text{Silte}$	(9)
Wösten et al. (2001) (1) para solos arenosos	$\ln(K_s) = 45,8 - 14,34 \cdot \rho_b + 0,001481 \cdot \text{Silte}^2 - 27,5 \cdot \rho_b^{-1} - 0,891 \cdot \ln(\text{Silte}) - 0,34 \cdot \ln(\text{OM})$	(10)
Wösten et al. (2001) (2) para solos siltosos e argilosos	$\ln(K_s) = -42,6 + 8,71 \cdot \text{OM} + 61,9 \cdot \rho_b - 20,79 \cdot \rho_b^2 - 0,2107 \cdot \text{OM}^2 - 0,01622 \cdot \text{Argila} \cdot \text{OM} - 5,382 \cdot \rho_b \cdot \text{OM}$	(11)

em que argila é a porcentagem de argila (%); areia, a porcentagem de areia (%); silte é a porcentagem de silte (%); om: matéria orgânica (%); ρ_b : densidade do solo (kg dm^{-3}); ρ_p é densidade de partículas (kg dm^{-3}); α é porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); (topsoil): profundidade de coleta, apresenta valor 1 se for coleta superficial e valor 0 se for subsuperficial. nota: eqs. (1) a (7) em mm h^{-1} ; (8) a (11) em cm d^{-1} . FONTE: o autor (2017)

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na FIGURA 2 apresenta-se o triângulo textural com os teores de areia, silte e argila dos 447 dados observando-se baixa representatividade de solos siltosos. Um resumo estatístico dos dados avaliados é apresentado na TABELA 2.

FIGURA 2 - TRIÂNGULO TEXTURAL COM OS PONTOS AVALIADOS.



FONTE: o autor (2017)

TABELA 2 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS RESULTADOS AVALIADOS

Propriedades	Argila	Areia	Silte	OM	K_s	$\log(K_s)$	θ_s	A	ρ_b	ρ_p
	----- % -----				---- cm d ⁻¹ ----		-- m ³ m ⁻³ --		---- kg dm ⁻³ ----	
Média	42,6	42	14,9	2,51	241	1,88	0,523	0,487	1,322	2,63
D.P.	21	24,7	12,3	4,05	417	0,783	0,107	0,1	0,267	0,07
C.V. (%)	49,2	58,8	82,7	161,3	173	41,7	20,4	20,5	20,2	2,82
Mínimo	0	0,4	0	0,08	0,257	-0,59	0,293	0,292	0,26	2,50
Mediana	42,88	40,5	10,9	1,4	106	2,02	0,535	0,468	1,39	2,63
Máximo	96	97,8	53,9	40,3	3890	3,59	0,866	0,866	1,77	2,94
N	447	447	271	271	447	447	447	447	447	447

OM: teor de matéria orgânica; K_s : condutividade hidráulica do solo saturado; θ_s : umidade do solo saturado; α : porosidade total; ρ_b : densidade do solo seco; ρ_p : densidade de partículas; d.p.: desvio padrão; c.v.: coeficiente de variação; n: número de dados. FONTE: o autor (2017).

Tendo em vista o alto valor do CV para K_s (173 %) e sua distribuição não normal os dados foram transformados para distribuição log-normal diminuindo assim a variação nos dados (41,7 %). Observa-se na TABELA 3 uma correlação inexistente entre $\log(K_s)$ e θ_s ($r=-0,008$) demonstrando baixa dependência de K_s em relação a θ_s para essa base de dados. A fração areia apresentou maior r com $\log(K_s)$ corroborando com Julià et al. (2004), que também observaram maior influência do teor de areia na K_s . A correlação negativa entre a fração argila e $\log(K_s)$ foi também observada no trabalho de Hu et al. (2008), que investigaram a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas do solo em uma encosta íngreme na China. Por mais que a

correlação entre $\log(K_s)$ e OM tenha sido baixo (Cohen, 1988), ela não foi negativa, como a encontrada por Nemes et al. (2005).

TABELA 3 - VALORES DO ÍNDICE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (R) RELATIVOS ÀS PROPRIEDADES FÍSICO-HIDRÁULICAS DO SOLO AVALIADAS

	Argila	Areia	Silte	OM	$\log(K_s)$	θ_s	ρ_b	ρ_p	α
Argila	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Areia	-0,90	1	-	-	-	-	-	-	-
Silte	0,11	-0,53	1	-	-	-	-	-	-
OM	-0,09	-0,08	0,36	1	-	-	-	-	-
$\log(K_s)$	-0,22	0,22	-0,08	0,13	1	-	-	-	-
θ_s	0,49	-0,59	0,40	0,56	-0,008	1	-	-	-
ρ_b	-0,45	0,56	-0,41	-0,60	0,02	-0,82	1	-	-
ρ_p	0,08	0,01	-0,18	0,03	0,12	0,14	-0,56	1	-
A	0,45	-0,55	0,40	0,55	-0,04	0,86	-0,97	0,16	1

OM: teor de matéria orgânica; K_s : condutividade hidráulica do solo saturado; θ_s : umidade do solo saturado; α : porosidade total; ρ_b : densidade do solo seco; ρ_p : densidade de partículas. FONTE: o autor (2017).

Os valores de r , RSME e EMA para as PTFs sem modificação estão apresentados na TABELA 4. Observa-se que as PTFs da literatura não apresentam valores altos de correlação (r), destacando-se o valor obtido pelo programa *Splintex 1.0*, que faz uso das porcentagens acumuladas de areia, silte e argila, que são de fácil obtenção (Figura 3). A distribuição gráfica dos resultados está apresentada na Figura 3, juntamente com as funções de Cosby et al. (1984) e Ferrer-Julià (2003) tendo em vista os valores de correlação e erro obtidos com as PTFs. Por mais que a PTF de Cosby et al. (1984) tenha gerado menores erros que a do *Splintex*, a função não acompanhou adequadamente a variação dos dados observados (Figura 3A). A função de Ferrer-Julià (2003) apresentou comportamento semelhante ao *Splintex*, porém subestimando os valores em alguns pontos. As PTFs que não utilizam valor de OM foram mais eficientes do que as que fazem uso desse atributo (Vereecken et al.; 1990; Wösten et al., 1999; Wösten et al., 2001) (eqs. 8 a 11). Segundo Rawls et al. (2005), a informação da OM já influencia os valores das outras propriedades do solo, como sua correlação negativa com densidade do solo seco e positiva com porosidade do solo (Nemes et al., 2005).

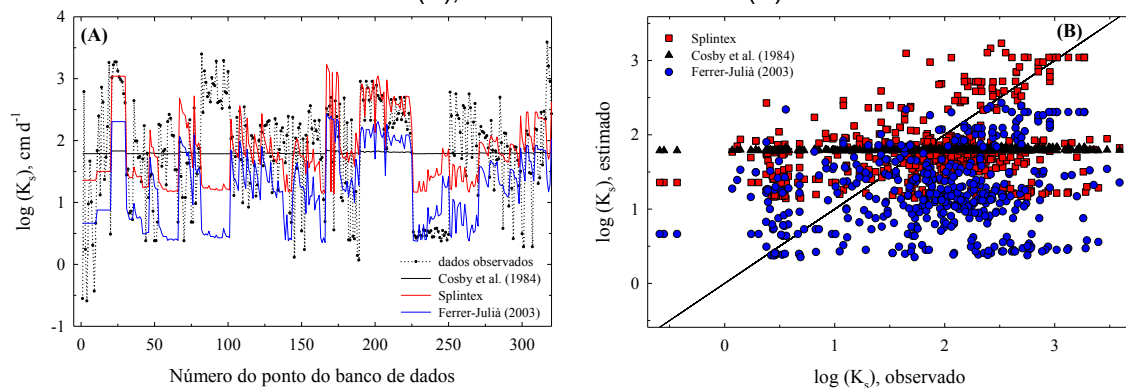
Os valores gerados pelo *Splintex 1.0* demonstraram a influência das frações areia, silte e argila sobre a K_s . A influência dos demais atributos de solos (ρ_b , ρ_p , θ_s , α e OM) examinados não foi avaliada uma vez que o modelo de Rodas (1970), presente no *Splintex 1.0*, é derivado apenas de informações texturais.

TABELA 4 - ÍNDICE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E ÍNDICES DE ERROS DE CADA FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA (PTF) TESTADA

PTF	r	N	---- log (cm d ⁻¹) ----	
			RMSE	EMA
Cosby et al. (1984)	0,28	447	0,783	0,635
Splintex 1.0	0,27	447	0,803	0,645
Ferrer-Julíà (2003)	0,22	447	1,05	0,861
Brakensiek et al. (1984)	0,22	447	1,68	1,30
Dane e Puckett (1994)	0,22	447	2,17	1,76
Wösten et al. (1999)*	0,21	271	2,35	1,83
Vereecken et al. (1990)*	-0,03	271	3,14	2,45
Puckett et al. (1985)	0,22	447	3,46	2,97
Campbell e Shiozawa (1994)	0,18	447	4,27	4,13
Saxton et al. (1986)	0,19	447	5,20	5,14
Wösten et al. (2001) (2)*	0,04	271	7,28	2,90
Wösten et al. (2001) (1)*	0,07	271	7,51	3,32

r : índice de correlação de pearson; N : número de dados; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EMA: erro médio absoluto. *comparação realizada com $\ln(k_s)$. FONTE: o autor (2017).

FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E ALGUMAS DAS FUNÇÕES ENCONTRADAS NA LITERATURA (A); REGRESSÃO LINEAR (B).



FONTE: o autor (2017)

As PTFs modificadas apresentaram valores de correlação maiores do que as não modificadas (TABELA 5), como esperado, tendo em vista o ajuste dos coeficientes das equações para 30% dos dados (calibração) e posterior validação das equações com os 70% restantes. A modificação das PTFs aumentou suas capacidades preditivas, e diferentemente das funções sem modificação, as que requerem o valor de OM geraram resultados com maior correlação, porém com alto erro sistemático, sendo melhor apenas que a função de Brakensiek et al. (1984). Comparando as funções que não utilizam a OM, a equação de Cosby et al. (1984)

modificada apresentou resultados com menor correlação e maior erro. Ademais, as equações de Puckett et al. (1985) bem como a função de Dane e Puckett (1994) geraram resultados de K_s com maiores valores de correlação ($r=0,24$) e menores valores de erros (RMSE = 0,930 e EMA=0,690). Ambas utilizam apenas o teor de argila como entrada, demonstrando a influência dessa variável na estimativa de K_s .

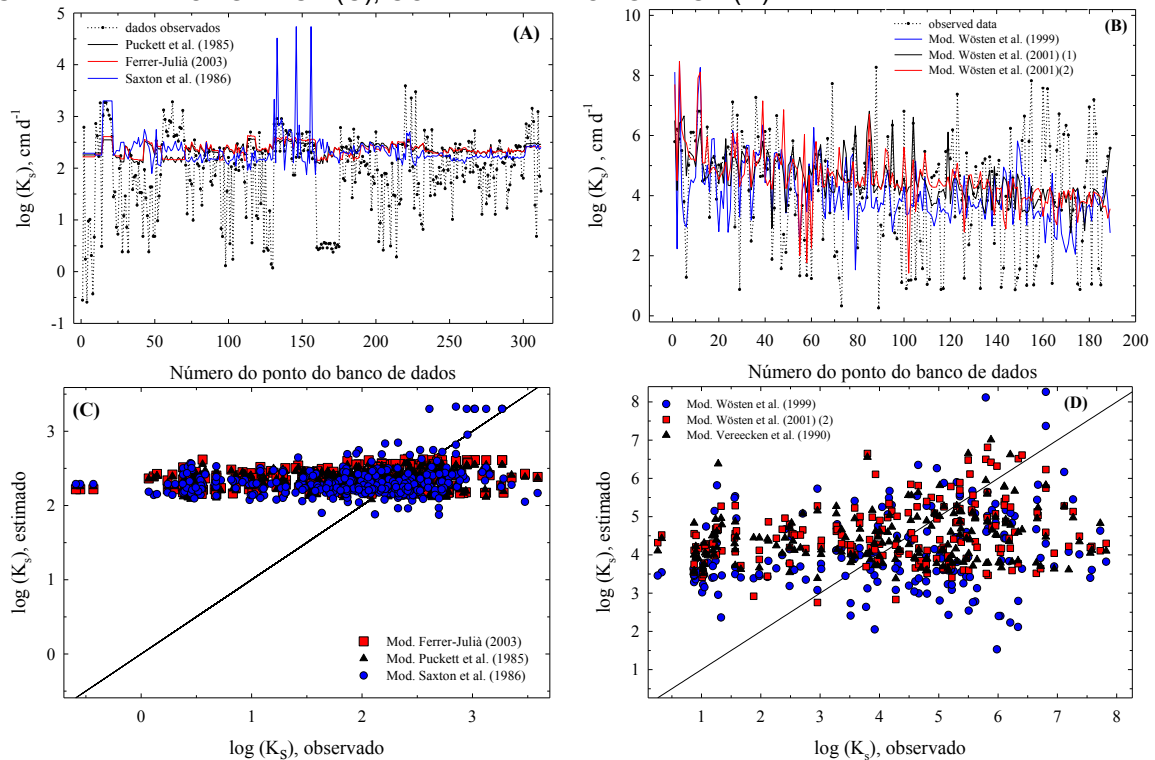
TABELA 5 - ÍNDICE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E ÍNDICES DE ERROS DE CADA FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA (PTF) MODIFICADA

<i>Equações modificadas</i>	<i>r</i>	<i>N</i>	<i>RMSE</i> ---- log (cm d ⁻¹) ----	<i>EMA</i>
Puckett et al. (1985)	0,24	312	0,930	0,690
Dane e Puckett (1994)	0,24	312	0,930	0,690
Campbell e Shiozawa (1994)	0,22	312	0,931	0,694
Ferrer-Julià (2003)	0,23	312	0,931	0,694
Saxton et al. (1986)	0,20	312	0,936	0,685
Cosby et al. (1984)	0,18	312	0,941	0,691
Wösten et al. (2001) (2)*	0,32	189	1,89	1,52
Wösten et al. (2001) (1)*	0,26	189	1,92	1,58
Vereecken et al. (1990)*	0,21	189	1,92	1,56
Wösten et al. (1999)*	0,22	189	1,99	1,67
Brakensiek et al. (1984)	0,12	312	5,07	3,35

r: índice de correlação de pearson; *N*: número de dados; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EMA: erro médio absoluto. *comparação realizada com $\ln(k_s)$. FONTE: o autor (2017).

Na Figura 4 está a distribuição dos resultados dos modelos modificados que não contemplam a OM (A e C) bem como os que contemplam essa informação (B e D). As regressões das PTFs de Puckett et al. (1985) e de Ferrer-Julià (2003) apresentaram o mesmo comportamento em torno da média. Contudo, o modelo de Saxton et al. (1986) se aproximou mais dos dados observados, porém com alguns pontos bem discrepantes do real, demonstrando que a utilização de mais propriedades do solo pode melhorar a resposta da PTF. Já com a inserção da OM nos dados de entrada, a função de Wösten et al. (2001) (2) foi a que apresentou maior precisão ($r=0,32$), entretanto com aumento significativo dos valores dos erros.

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E ALGUMAS DAS PTFs MODIFICADAS: SEM MATÉRIA ORGÂNICA (A); COM MATÉRIA ORGÂNICA (B). LINHAS DE REGRESSÃO LINEAR SEM MATÉRIA ORGÂNICA (C); COM MATÉRIA ORGÂNICA (D).



FONTE: o autor (2017)

Com o intuito de obter maior correlação e menores erros que os obtidos pelas PTFs modificadas da literatura, novas PTFs foram geradas e avaliadas (TABELA 6). Para a calibração das funções sem utilização de OM foram utilizados 135 pontos e para validação 312. Já para funções que utilizam OM utilizaram-se 82 pontos para calibração e 189 para validação. Em algumas PTFs utilizou-se apenas uma das propriedades do solo como informação de entrada (P1 a P7). As funções P1 e P2, as quais utilizam-se respectivamente dos teores de argila e areia, apresentaram correlação de 0,25 e 0,28, nessa sequência, demonstrando que 25% da resposta de K_s foi explicada pelo teor de argila e 28% pela areia.

Dentre as PTFs com combinações de duas a mais variáveis (P8 a P23) observa-se que as que utilizaram OM (P20 a P23) não apresentaram altos valores de precisão, ou seja, os valores obtidos estão dispersos, e baixos valores de erros em comparação aos demais correspondentes modelos testados (P8 a P19). Assim, corroborando com Nemes et al. (2005), outros estudos com dados de outros locais devem ser realizados para observar a correlação entre OM e K_s . Julià et al. (2004) verificaram que PTFs que utilizaram teores de argila, areia e OM geraram resultados

semelhantes quando comparadas as PTFs com apenas uma variável, o teor de areia, sugerindo a importância dessa última variável do solo na predição de K_s .

TABELA 6 - ÍNDICE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E ÍNDICES DE ERROS PARA AS PTFs GERADAS

<i>Equações propostas</i>	<i>r</i>	<i>N</i>	<i>RMSE</i> ---- log (cm d ⁻¹)----	<i>EMA</i>
P1 = f(Argila)	0,25	312	0,783	0,618
P2 = f(Areia)	0,28	312	0,779	0,610
P3 = f(MO)	0,20	189	0,839	0,684
P4 = f(θ_s)	0,12	312	0,809	0,629
P5 = f(α)	0,12	312	0,810	0,629
P6 = f(ρ_b)	0,07	312	0,810	0,629
P7 = f(ρ_p)	0,0002	312	0,810	0,643
P8 = f(ρ_b , α)	0,08	312	0,807	0,641
P9 = f(textura, ρ_b , α)	0,21	312	0,792	0,619
P10 = f(textura, ρ_b , ρ_p , α)	0,27	312	0,779	0,609
P11 = f(textura, ρ_b , θ_s)	0,20	312	0,832	0,635
P12 = f(textura, α)	0,21	312	0,819	0,650
P13 = f(textura, ρ_b , α)	0,32	312	0,787	0,597
P14 = f(Argila, θ_s)	0,32	312	0,793	0,605
P15 = f(Areia, ρ_b , α)	0,24	312	0,790	0,615
P16 = f(Argila, ρ_b)	0,02	312	1,33	1,05
P17 = f(Areia, ρ_b)	0,01	312	1,09	0,931
P18 = f(Argila, ρ_b , α)	0,24	312	0,788	0,616
P19 = f(Argila, α)	0,31	312	0,787	0,604
P20 = f(textura, ρ_b , ρ_p , α , OM)	0,11	189	1,222	0,959
P21 = f(textura, OM)	0,18	189	0,844	0,685
P22 = f(textura, θ_s , OM)	0,09	189	0,875	0,693
P23 = f(textura, ρ_b , OM)	0,15	189	0,884	0,712

r: índice de correlação de pearson; *N*: número de dados; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EMA: erro médio absolute; OM: teor de material orgânica; θ_s : umidade do solo saturado; α : porosidade; ρ_b : densidade do solo seco; ρ_p : densidade de partículas. FONTE: o autor (2017).

A PTF proposta que apresentou baixa exatidão, ou valor aproximado ao dado real, e uma baixa precisão foi a P16, em que argila e ρ_b foram utilizadas demonstrando que para a função proposta tais propriedades não influenciaram tanto a K_s , corroborando com Julià et al. (2004). Os autores afirmaram que, por mais que o teor de argila seja importante para a estimativa da K_s , devido ao seu papel na formação de agregados, mais variáveis com composição mineralógica e características texturais são necessárias para melhora na predição das FPTs. Mesmo que a P17 tenha

apresentado baixa precisão, sua exatidão foi maior quando comparada a P16, demonstrando predição de valores mais próximos aos observados.

Neste estudo, o $\log(K_s)$ não apresentou alta correlação com a θ_s , seja na correlação direta (TABELA 2) ou na função P4 (TABELA 6), sendo contrário ao obtido por Bernardes (2005), que afirmou encontrar alta dependência entre esses dois parâmetros. Entretanto, quando θ_s foi combinada com outro atributo de fácil obtenção, como na P11 e P14, ocorreu um acréscimo nos valores de correlação, demonstrando que somente a θ_s pode não ser a melhor representante de $\log(K_s)$. Quando combinado o uso das variáveis argila e areia com ρ_b e α como valores de entrada da PTF-P13, encontrou-se maior correlação ($r=0,32$) e também baixos erros (RMSE = 0,787 e EMA= 0,597). Semelhantemente, Evans et al. (2015) observaram que a melhor PTF para um aquífero foi a que possuía α como entrada. Propostas que utilizaram argila e θ_s (P14), e argila e α (P19), também apresentaram desempenhos satisfatórios e comparáveis ao da PTF-P13 (Tabela 7) com as distribuições de suas predições de K_s na Figura 6 (A e C).

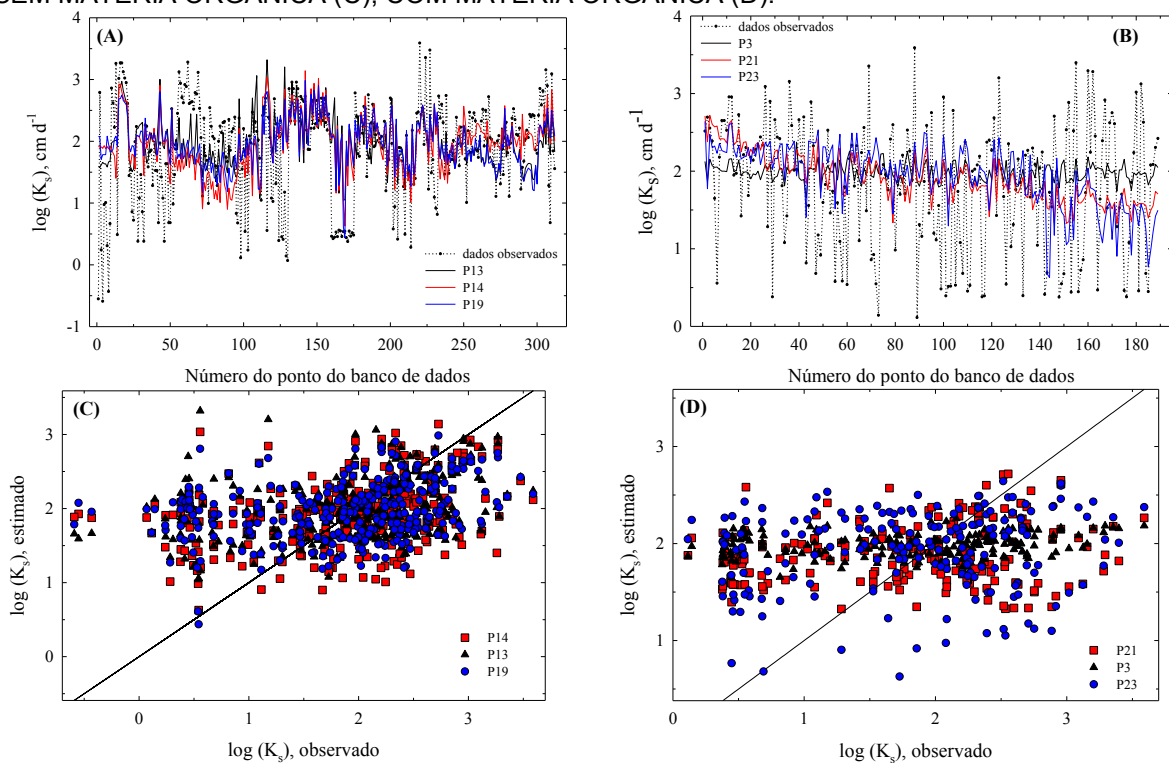
TABELA 7 - FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA (PTFs) PROPOSTAS

Propostas	PTF	eq.
	$\log(K_s) = 1,2582 \cdot e^b$	
P13	$b = 0,02109 \cdot \text{Areia} + 0,02264 \cdot \text{Argila} - 3,8081 \cdot \rho_b + 16,323 \cdot \alpha -$ $4,8264 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Areia}^2 - 8,5821 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Argila}^2 + 1,0806 \cdot \rho_b^2 - 18,663 \cdot \alpha^2 +$ $3,4172 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Areia}^3 + 7,1078 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Argila}^3 - 0,06066 \cdot \rho_b^3 + 0,31139 \cdot \alpha^3$	(12)
P14	$\log(K_s) = -86474,697 - 0,00326 \cdot \text{Argila}^2 +$ $6,8890 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Argila}^2 \cdot \ln(\text{Argila}) + 80250,081 \cdot \theta_s -$ $50903,345 \cdot \theta_s \cdot \ln(\theta_s) + 6979,4515 \cdot \theta_s^2 \cdot \ln(\theta_s) -$ $35782,993 \cdot \ln(\theta_s) + 9045,4205 \cdot \theta_s^{-1} \cdot \ln(\theta_s) +$ $6242,7307 \cdot \theta_s^{-1,5}$	(13)
P19	$\log(K_s) = 4822,5474 - 0,002264 \cdot \text{Argila}^2 +$ $4,7297 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Argila}^2 \cdot \log(\text{Argila}) - 2,9596 \cdot 10^5 \cdot \alpha +$ $2,2391 \cdot 10^6 \cdot \alpha^{1,5} + 3,2407 \cdot 10^5 \cdot \alpha^2 +$ $1,7766 \cdot 10^6 \cdot \alpha^2 \cdot \log(\alpha) - 2,6581 \cdot 10^6 \cdot \alpha^{2,5} +$ $3,8615 \cdot 10^5 \cdot \alpha^3$	(14)

em que K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm d^{-1}); argila é a porcentagem de argila (%); areia, a porcentagem de areia (%); ρ_b : densidade do solo (kg dm^{-3}); ρ_p é densidade de partículas (kg dm^{-3}); α é porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). FONTE: o autor (2017).

Tendo em vista o menor número de dados ($N=189$) com OM, suas PTFs estão apresentadas separadamente na Figura 5 (B e D). A função P13 gerou resultados mais próximos dos medidos, porém com distribuição semelhante a P14. Na Figura 5C observam-se que as três funções não ficaram próximas a reta 1:1, sendo que a P13 se sobrepõe a P19, demonstrando a sensibilidade de K_s a tais propriedades (TABELA 7). Esse resultado mostra que uma PTF de valores de entrada mais simples apresentou desempenho compatível com uma PTF mais complexa, sendo vantajosamente aplicável para estimativa de K_s para os dados avaliados no estudo. Comportamento oposto foi observado para os resultados das FPTs com OM, com valores de correlações próximas entre P20 e P22, bem como entre P21 e P23, porém com valores de erros mais diferentes.

FIGURA. 5 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E ALGUMAS DAS PTFs PROPOSTAS: SEM MATÉRIA ORGÂNICA (A); COM MATÉRIA ORGÂNICA (B). LINHAS DE REGRESSÃO LINEAR SEM MATÉRIA ORGÂNICA (C); COM MATÉRIA ORGÂNICA (D).



FONTE: o autor (2017).

A dificuldade em identificar qual foi a melhor PTF com OM pode estar atrelada na influência da própria OM nas demais propriedades do solo, conforme observado por Nemes et al. (2005) e Martín et al. (2016). Nesses estudos, os autores relacionaram a porosidade do solo com OM, tendo em vista que ela pode aumentar a

K_s pelo aumento da porosidade, mas também diminuí-la pelo seu efeito no aumento da retenção de água no solo.

3.6 CONCLUSÃO

Por meio das funções de pedotransferência (PTFs) desenvolvidas e modificadas conclui-se que para a base de dados estudada a influência do teor de matéria orgânica (OM) na condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) não foi fator determinante, tendo em vista seu reflexo nas demais propriedades do solo. Ademais, para fins práticos de uso das PTFs para estimativa de K_s , a obtenção da OM demanda tempo e recurso, indo contra ao conceito de facilidade de uso de uma PTF. Também o uso da umidade na saturação do solo, que apresentou baixa correlação com a K_s , foi para esse estudo insatisfatório na formulação das PTFs. Uma função que apresentou somente teor de argila como entrada, obteve resultado satisfatório, quando comparada a demais funções que utilizaram mais de três propriedades, evidenciando, para os dados analisados, a importância de variáveis que refletem a estrutura do solo na predição de K_s . Porém, uma PTF que estime K_s com as propriedades físico-hidráulicas dos solos avaliados ainda se faz necessária, uma vez que nenhuma das PTFs avaliadas neste trabalho representou bem o comportamento de K_s , devido a variabilidade espacial desse atributo.

3.7 REFERÊNCIAS

Bernardes R.S. **Condutividade hidráulica de três solos da região norte fluminense**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2005.

Brakensiek D.L.; Rawls W.J.; Stephenson G.R. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. **American Society of Agricultural Engineering**. PNR:84-203, 1984.

Campbell G.S.; Shiozawa S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: van Genuchten M.Th et al., editors. **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. University of California: Riverside, 1994. p.317– 328.

Cohen J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale: Erlbaum, 1988.

Cosby B.J.; Hornberger G.M.; Clapp R.B.; Ginn T.R. A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, v. 20, p. 682– 690, 1984.

Dane J.H.; Puckett W. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: van Genuchten MTh et al., editors. **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. University of California: Riverside, 1994. p.389–403.

Evans U.F.; Evans G.U.; Omotosho O.O. Geostatistical determination of appropriate pedotransfer functions (PTFs) in the estimation of aquifers' hydraulic conductivity in the near shore environment of Akwa Ibom State, South-South, Nigeria. **Geoinformatics & Geostatistics**, Akwa, p. 3:2, dez, 2015.

Ferrer-Julià M. Análisis de nuevas funciones de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección. **CEDEX — Ministerio de Fomento**, Col. Cuadernos de investigación, C-48. 2003.

Gee G, Or D. Particle-size analysis. In: Dane J.H.; Topp C., editors. **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America Journal, 2002. v. 4, p.225– 289.

Hu W.; Shao M.A.; Wang Q.J.; Fan J.; Reichardt K. Spatial variability of soil hydraulic properties on a steep slope in the loess plateau of China. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 65, p. 268-276, mai/jun, 2008.

IAPAR. **Instituto Agrônomo do Paraná**. Londrina, 2011 em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>>. Acesso: 5 out. 2016.

Julià M.F.; Monreal T.E.; Jiménez A.S.C.; Meléndez E.G. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, Salamanca, v. 123, p. 257-277, abr, 2004.

Marques J.D.O.; Teixeira W.G.; Reis A.M.; Cruz Junior O.F.; Martins G.C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

Martín M.A.; Reyes M.; Taguas F.J. Estimating soil bulk density whit information metrisic of soil texture. **Geoderma**, Madrid, v. 287, p. 66-70, set, 2016.

McBratney A.B.; Minasny B.; Cattle S.R.; Vervoort R.W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Sydney, v. 109, p. 41-73, dez, 2002.

Nemes A.; Rawls W.J.; Pachepsky Y.A. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1330-1337, jun, 2005.

Pachepsky Y.; Park Y. Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, Beltsville, v. 79, p. 1094-1100, jul, 2015.

Puckett W.E.; Dane J.H.; Hajek B.H. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 831–836, 1985.

Rodas A. **Determinación de la conductividad hidráulica em muestras de suelo inalterada**. Lima: CENDRET; 1970.

Saxton K.E.; Rawls W.L.; Rosenberger J.S.; Papendick R.I. Estimating generalized soil – water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1031– 1036, 1986.

Silva M.A.S.; Mafra A.L.; Albuquerque J.A.; Rosa J.D.; Bayer C.; Mielniczuk J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 329-337, fev, 2006.

Souza E.S.; Antonino A.C.D.; Jaramillo R.A.; Netto A.M.; Montenegro S.M.G.L.; Silva E.B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Serra Talhada, v. 32, p. 1795-1804, ago, 2008.

Vereecken H.; Maes J.; Feyen J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, Leuven, v. 149, n. 1, p. 1-12, jan, 1990.

Wösten J.H.M.; Lilly A.; Nemes A.; Bas C.L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, Wageningen, v. 90, p.169–185, out, 1999.

Wösten J.H.M.; Pachepsky Y.A.; Rawls W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, Wageningen, v. 251, p .123-150, 2001.

4 CONCLUSÃO GERAL

Tendo em vista a utilização da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) em projetos que contemplem as propriedades físico-hidráulicas do solo, como por exemplo os de irrigação, sua quantificação se faz necessária. Os métodos de laboratório utilizados, seja PCC e PCD, demandam tempo e recursos, sendo assim, outros métodos para sua obtenção são utilizados. A função de pedotransferência (PTF) é utilizada na estimativa de K_s , entretanto a maioria dessas PTFs foi realizada para solos de outros países não apresentando boas estimativas para solos do Brasil. As PTFs obtidas foram mais precisas do que as encontradas na literatura, porém,

nenhuma PTF estimou com alta eficiência os resultados de K_s . As funções que requerem somente a textura solo como dado de entrada proporcionaram melhor resultado quando comparadas as que também requeriam a matéria orgânica (MO), demonstrando o efeito da MO nas demais propriedades do solo. A umidade na saturação do solo não apresentou forte correlação com K_s , ressaltando a dificuldade na obtenção de uma PTF para a estimativa de K_s para solos do Brasil.

5 REFERÊNCIAS

Abdelbaki A.M. Using automatic calibration method for optimizing the performance of Pedotransfer functions of saturated hydraulic conductivity. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, v. 7, p. 653-662, julho, 2015.

Barbosa G.M.C.; Tavares Filho J.; Fonseca I.C.B. Condutividade hidráulica saturada e não saturada de Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Londrina, v. 28, p. 403-407, 2004.

Bernardes R.S. **Condutividade hidráulica de três solos da região norte fluminense**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2005.

Bouma J. Using soil survey data or quantitative land evaluation. In **Soil Science**, Nova Iorque, 1989.177-213.

Brakensiek D.L.; Rawls W.J.; Stephenson G.R. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. **American Society of Agricultural Engineering**. PNR:84-203, 1984.

Briggs L.J.; McLane J.W. **The moisture equivalent of soils**. Washington: USDA, 1907.

Briggs L.J.; Shantz H.L. The wilting coefficient and its indirect measurement. **The University of Chicago press Journals**, Chicago, v. 53, n. 1, p. 20-37, jan, 1912.

Cagliari J.; Veronez M.R.; Alves M.E. Remaining phosphorus estimated by pedotransfer function. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Caxias do Sul, v. 35, p. 203-212, dez, 2011.

Campbell G.S.; Shiozawa S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: van Genuchten M.Th et al., editors. **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. University of California: Riverside, 1994. p.317– 328.

Cohen J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale: Erlbaum, 1988.

Cosby B.J.; Hornberger G.M.; Clapp R.B.; Ginn T.R. A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, v. 20, p. 682–690, 1984.

Dane J.H.; Puckett W. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: van Genuchten MTh et al., editors. **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. University of California: Riverside, 1994. p.389–403.

Darcy, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon**. Paris: Dalmont, 1856.

Evans U.F.; Evans G.U.; Omotosho O.O. Geostatistical determination of appropriate pedotransfer functions (PTFs) in the estimation of aquifers' hydraulic conductivity in the near shore environment of Akwa Ibom State, South-South, Nigeria. **Geoinformatics & Geostatistics**, Akwa, p. 3:2, dez, 2015.

Ferrer-Julià M. Análisis de nuevas funciones de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección. **CEDEX — Ministerio de Fomento**, Col. Cuadernos de investigación, C-48. 2003.

Figueiredo Filho D.B.; Silva Junior J.A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**. 2009; 18:115-146.

Fiorin T.T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções** 116 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

Gee G, Or D. Particle-size analysis. In: Dane J.H.; Topp C., editors. **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America Journal, 2002. v. 4, p.225–289.

Ghanbarian-Alavijeh B.; Liaghat A.M.; Sohrabi S. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil physical properties using neural networks model. **International Journal of Environmental**, Karaj, v. 4, n. 2 p. 58-63, 2010.

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, p. 1174-1184, 2013.

Hu W.; Shao M.A.; Wang Q.J.; Fan J.; Reichardt K. Spatial variability of soil hydraulic properties on a steep slope in the loess plateau of China. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 65, p. 268-276, mai/jun, 2008.

Hurtado A.L.B.; Cichota R.; Jong Van Lier, Q. Parametrização do método do perfil instantâneo para determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, São Paulo, v. 29, p. 301-307, 2005.

IAPAR. **Instituto Agrônomo do Paraná**. Londrina, 2011 em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>>. Acesso: 5 out. 2016

Julià M.F.; Monreal T.E.; Jiménez A.S.C.; Meléndez E.G. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, Salamanca, v. 123, p. 257-277, abr, 2004.

Libardi P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

Marcolin C.D.; Klein V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

Marques J.D.O.; Teixeira W.G.; Reis A.M.; Cruz Junior O.F.; Martins G.C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

Martín M.A.; Reyes M.; Taguas F.J. Estimating soil bulk density whit information metrisc of soil texture. **Geoderma**, Madrid, v. 287, p. 66-70, set, 2016.

Mesquita M.G.B.F.; Moraes S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 963-969, mai-jun, 2004.

McBratney A.B.; Minasny B.; Cattle S.R.; Vervoort R.W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Sydney, v. 109, p. 41-73, dez, 2002.

Montenegro A.A.A.; Montenegro S.M.G.L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 30-37, out, 2006.

Nemes A.; Rawls W.J.; Pachepsky Y.A. Influence of organic matter on the estimation of saturared hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1330-1337, jun, 2005.

Pachepsky Y.; Park Y. Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, Beltsville, v. 79, p. 1094-1100, jul, 2015.

Papanicolaou A.N.; Elhakeem M.; Wilson C.G.; Burras C.L.; West L.T.; Lin H.; Clark B.; Oneal B.E. 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, dez, 2015.

Prevedello C.L.; Armindo R.A. **Física do solo com problemas resolvidos 2nd ed. Revisada e Ampliada**. Curitiba: Celso Luiz Prevedello; 2015.

Prevedello C.L.; Loyola J.M.T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. 2002, São Paulo. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**; 2002; São Paulo. ABMS, 2002. p.467-472.

Puckett W.E.; Dane J.H.; Hajek B.H. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 831–836, 1985.

Ramos T.; Gonçalves M.C.; Martins J.C.; Pires F.; Pereira L.S. Propriedades hidráulicas do solo para as diferentes classes texturais. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 34, n. 2, p. 252-264, 2011.

Rodas A. **Determinación de la conductividad hidráulica em muestras de suelo inalterada**. Lima: CENDRET; 1970.

Saxton K.E.; Rawls W.L.; Rosenberger J.S.; Papendick R.I. Estimating generalized soil – water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1031– 1036, 1986.

Shein E.V.; Arkhangel'Skaya T.A.S. Pedotransfer functions: state of the art, problems and outlooks. **Eurasian Soil Science**, Moscou, v. 39, n. 10, p. 1090-1099, ago, 2006.

Silva C.L.; Kato E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 213-220, 1997.

Silva M.A.S.; Mafra A.L.; Albuquerque J.A.; Rosa J.D.; Bayer C.; Mielniczuk J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 329-337, fev, 2006.

Sobieraj J.A.; Elsenbeer H.; Vertessy R.A. Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modeling storm flow generation. **Journal of Hydrology**, Cincinnati, v. 251, p. 202-220, 2001.

Sobieraj J.A.; Elsenbeer H.; Cameron G. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. **Catena**, Cincinnati, v. 55, p. 49-77, abr, 2004.

Souza E.S.; Antonino A.C.D.; Jaramillo R.A.; Netto A.M.; Montenegro S.M.G.L.; Silva E.B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Serra Talhada, v. 32, p. 1795-1804, ago, 2008.

Tóth B.; Weynants M.; Nemes A.; Makó A.; Billas G.; Tóth G. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. **European Journal of Soil Science**, v. 66, p. 266-238, jan, 2015.

Vereecken H.; Maes J.; Feyen J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, Leuven, v. 149, n. 1, p. 1-12, jan, 1990.

Wösten J.H.M.; Lilly A.; Nemes A.; Bas C.L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, Wageningen, v. 90, p.169–185, out, 1999.

Wösten J.H.M.; Pachepsky Y.A.; Rawls W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, Wageningen, v. 251, p .123-150, 2001.