Revista Brasileira de Geografia Física

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

Avaliações de Funções de Pedotransferência para Solos Brasileiros

Lorena Vila Bela Costa¹, Willames de Albuquerque Soares²

¹Graduação em Engenharia Civil pela Universidade de Pernambuco (UPE). Escola Politécnica de Pernambuco (Poli), CEP: 50.720-001, Recife (PE), Brasil, lorenavilabc@gmail.com (autor correspondente). ²Professor Associado da Universidade de Pernambuco (UPE). Escola Politécnica de Pernambuco (POLI), CEP: 50.720-001, Recife (PE), Brasil, was@poli.br

Artigo recebido em 20/04/2020 e aceito em 20/07/2021

RESUMO

Funções de Pedotransferência (FPT) são modelos matemáticos que estimam propriedades do solo de difícil medição por meio de variáveis mais acessíveis, gerando otimização de tempo e de recursos financeiros. Neste estudo, seis Funções de Pedotransferência, fundamentadas na equação de Van Genuchten, foram analisadas para a predição da umidade volumétrica de solos brasileiros, com dados da base global Soil Data Task. Aplicadas para as pressões de 0, 0.01, 0.03, 0.10, 0.20, 0.50, 2.50 e 15.0 bar, os valores resultantes das equações foram comparados com as umidades volumétricas medidas por meio de cinco parâmetros estatísticos: índice de confiança, erro quadrático médio, razão dos desvios, eficiência de modelagem e coeficiente de massa residual. Das funções estudadas foi possível verificar que a FPT proposta por Barros, com 4 parâmetros, foi a que apresentou melhores resultados, enquanto que a de Rawls e Brakensied obteve o menor desempenho. Observou-se que a eficiência de uma FPT está relacionada a dois fatores: a) semelhança entre os dados pedológicos do solo estudado e os utilizados no desenvolvimento da FPT, e b) a quantidade de variáveis analisadas.

Palavras-chave: Estimativa; Propriedades Físicas do Solo; Umidade Volumétrica.

Evaluations of Pedotransfer Functions for Brazilian Soils

ABSTRACT

Pedotransfer Functions (FPT) are mathematical models that estimate difficult-to-measure soil properties through more accessible variables, generating optimization of time and financial resources. In this study, six Pedotransfer Functions, based on the equation of Van Genuchten, analyzed for the prediction of volumetric moisture of Brazilian soils, with data from the global database Soil Data Task. Applied for pressures of 0, 0.01, 0.03, 0.10, 0.20, 0.50, 2.50 and 15.0 bar, the resulting values of the equations were compared with the measured volumetric moistures through five statistical parameters: confidence index, mean square error, deviation ratio, modeling efficiency and residual mass coefficient. Of the functions studied it was possible to verify that the FPT proposed by Barros, with 4 parameters, was the one that presented the best results, while that of Rawls and Brakensied obtained the lowest performance. It has been observed that the efficiency of a FPT is related to two factors: a) similarity between the pedological data of the soil studied and those used in the development of the FPT, and b) the amount of variables analyzed.

Keywords: Estimation; Soil Physical Properties; Soil Moisture Volumetric

Introdução

O conhecimento de propriedades hidrodinâmicas de um determinado solo é fundamental para o seu devido aproveitamento na agricultura, na construção civil, dentre outras atividades. Porém, a obtenção de tais dados requer ensaios bastante dispendiosos, que demandam muito tempo para as suas realizações, além da escassez de mão de obra e laboratórios especializados (Michelon et al., 2010). Diante dessas dificuldades, foram desenvolvidas as Funções de Pedotransferência (FPT), termo esse

normatizado por Bouma (1989) para designar funções que por meio de modelos matemáticos obtêm a predição de parâmetros do solo a partir de outros que tem sua aquisição mais fácil, corriqueira e menos custosa (Andrade et al., 2020). Esses parâmetros são propriedades físicas como textura, estrutura, diâmetro dos poros e densidade, que estão ligadas à diferença de concentração e armazenamento de água no solo (Martins, 2019).

De acordo com Silva et al. (2016) as funções podem ser classificadas em de classe e

contínuas, pontual e paramétrica, pseudo-contínua e redes neurais. As de classe estimam propriedades hidráulicas do solo com relação à classe textural, enquanto as contínuas predizem as variáveis utilizando regressões estatísticas entre dados de obtenção facilitada e as funções contínuas dos fatores medidos. Já a FPT pontual estima a umidade volumétrica em determinados pontos da curva de retenção de água, ao passo que as paramétricas, por estimar os parâmetros da curva de retenção de um modelo definido, possibilitam a obtenção da umidade volumétrica em todos os pontos desejados da curva. Por fim, a pseudo-contínua não necessita de um modelo específico para estimar a curva de retenção e as redes neurais são técnicas computacionais que tem o objetivo de desenvolver modelos semelhantes aos neurônios do cérebro humano que tenham a capacidade de processar grandes bancos de dados, o que permite o aprimoramento dos parâmetros estatísticos de eficiência.

Segundo Kotlar et al. (2020), as propriedades utilizadas como preditoras em FPT variam de acordo com a disponibilidade de dados ou a facilidade para realizar medições. Botula et al. (2014) ressaltam que as funções de pedotransferência vem sendo bastante utilizadas ao longo dos últimos anos para a estimativa de propriedades de solos de regiões de clima temperado, enquanto são pouco aplicadas para solos dos trópicos úmidos. Para Michelin et al. (2010) o maior impasse no caso do Brasil é a falta de banco de dados de características físico-hídricas dos diferentes solos das regiões do país. Diante desse cenário brasileiro, alguns estudos para a criação de bancos de dados voltados para o desenvolvimento de FPT vêm sendo publicados. Ottoni et al. (2018) em seu estudo tiveram os objetivos de estabelecer um banco de dados físico e hídrico referente à solos brasileiros para o desenvolvimento de FPT – Hydrophysical database for Brazilian Soils (HYBRAS), onde os dados presentes estão organizados em uma estrutura de tabelas, e de utilizar esse banco de dados para comparar a acurácia das funções temperadas e tropicais em relação à estimativas de retenção de água, concluindo que as últimas apresentam melhores desempenhos, com possível exceção de solos de textura grossa. O HYBRAS, que foi criado e financiado pelo Departamento de Hidrologia do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) como parte do projeto institucional intitulado “Estudos de Caracterização Hidrológica dos Solos”, lançou a sua primeira versão em 2018, composto por 445 perfis de solos referentes a um

total de 1075 amostras de 15 estados brasileiros. Cidin et al. (2019), considerando a necessidade de medir a quantidade de carbono nos solos, organizaram informações em um banco de dados para estimar por meio de funções de pedotransferência áreas em potencial para o sequestro desse elemento. Foram organizados os dados de teores de areia, silte, argila, soma de bases, capacidade catiônica total e quantidade de carbono de 5.264 amostras levantadas na profundidade 0-30 cm que possibilitaram a representação de pontos de todo o território brasileiro, com suas principais classes e uso dos solos nacionais.

Ao longo do tempo diversos estudos para solos brasileiros vêm sendo desenvolvidos com o auxílio de funções de pedotransferência.

Oliveira, et al. (2002) elaboraram funções de pedotransferência para estimar o conteúdo de água e a água disponível nos potenciais de -33 e -1.500 kPa para solos de Pernambuco e compararam a eficiência dessas com outras já existentes. Foram empregadas duas bases de dados, uma com 98 perfis do solo, agrupados em 27 classes taxonômicas, para o desenvolvimento das FPT e outra com 22 perfis para a avaliação. As equações foram elaboradas pelo programa SYSTAT com o método stepwise a 1%. A separação dos elementos em classes não representou considerável melhoria na capacidade preditiva e uma pequena tendência de superestimação para água disponível foi observada. Eles concluíram que a partir de dados granulométricos e de densidade do solo estimativas de umidade retida nos potenciais de -33 e -1.500 kPa podem ser feitas com razoável precisão e que as equações avaliadas de outros trabalhos não são eficientes para solos pernambucanos.

Silva, et al. (2008) desenvolveram FPT para estimar a curva de retenção de água do solo e a curva de resistência do solo à penetração. O solo estudado foi Latossolo Vermelho de uma área pertencente à Usina Barra Grande, no município de Lenções Paulista, São Paulo. Ele foi dividido em cinco regiões, sendo coletadas 36 amostras deformadas e indeformadas, na profundidade do solo de 5-10 cm. O ajuste das curvas de retenção de água foi realizado utilizando a equação de Hutson e Cass, que apresenta apenas dois parâmetros, potencial matricial e teor de água volumétrica, que foram regulados pelo método de Gauss-Newton e procedimento PROCNLLIN. As funções geradas demonstraram elevado poder para a avaliação, o monitoramento e controle da

qualidade física do solo e a consideração do teor de argila no solo reduziu a amplitude da densidade do mesmo.

Filho, et al. (2012) realizaram um estudo com o intuito de identificar atributos do solo para a estimativa do índice de estabilidade de agregados (IeaE). O solo observado foi do tipo Latossolo Vermelho Eutroférico, localizado na região norte do Estado do Paraná, do qual foram retiradas 76 amostras coletadas na profundidade de 0-20 cm. Dez variáveis independentes foram avaliadas: argila total, densidade do solo, resistência à penetração, matéria orgânica, pH em água, capacidade de troca de cátions a pH 7,0, água disponível, volume total de poros, macro porosidade e umidade gravimétrica. As equações foram desenvolvidas com o uso da regressão múltipla stepwise e, ao final, foi possível constatar que os atributos argila total, densidade do solo, resistência à penetração, matéria orgânica e pH em água são os de maior importância para a predição do IeaE com boa precisão.

Souza, et al. (2017) utilizaram quatro funções do programa Rossetta (Schaap et al., 2001), ROS1, ROS2, ROS3, ROS4, para a determinação da curva de retenção e disponibilidade de água através dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980). Os autores definiram nove unidades experimentais na Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Sete Lagoas, e mais nove em área da Embrapa Milho e Sorgo, localizada no mesmo município, Minas Gerais. Uma amostra de solo indeformado foi obtida de cada unidade experimental dessa com o objetivo de determinar os pontos da curva de retenção pelo método clássico na mesa de tensão e uma outra para a determinação da granulometria, que foi um dos dados de entrada das FPT, densidade do solo, teor de água ao potencial matricial de -33 e -1500 kPa foram os demais. O código computacional RETC também foi aplicado na definição dos parâmetros para a sua otimização, já que ele ajusta os dados observados e restringe os resultados do volume residual à valores maiores ou iguais a zero. ROS4 apresentou os melhores ajustes para as curvas de retenção de água no solo, sendo está a equação que mais solicita quantidade de dados de entrada.

A fim de atestar a eficiência das FPT frente aos métodos clássicos de obtenção da curva de retenção Melo et al. (2015) avaliou três modelos de funções, o de Arya e Paris (1981) e dois de Walczak et al. (2006), M1 e M2, utilizando dados de 78 amostras indeformadas da bacia do arroio Taboão, município de Pejuçara –

Rio Grande do Sul, região representativa do planalto basáltico. Para a determinação da curva de retenção, o método clássico escolhido foi a Câmara de Richards (câmara de pressão) e para a análise estatística utilizaram o coeficiente de correlação Pearson, coeficiente de concordância e o coeficiente de desempenho. Os autores observaram que os três modelos subestimaram os teores de umidades em todas as três camadas estudadas e que o desempenho do melhor modelo do estudo, M1, pode ser atribuído ao fato de que ele considera o parâmetro densidade do solo. A influência positiva dessa propriedade também foi observada, por exemplo, por Melo e Pedrollo (2015), que em seu estudo com 228 amostras do solo com utilização de redes neurais a densidade do solo contribuiu em até 46% no melhoramento da função estudada, e por Pequeno et al. (2018), que ao testar o uso de FPT para estimar a retenção de água de um Latossolo Vermelho Amarelo em Rondônia observaram que há correlação positiva entre densidade do solo e retenção de água e que está provavelmente é devida a sua variabilidade em relação as condições estruturais do solo sob forças capilares, onde o seu aumento diminui os espaços porosos, influenciando, assim, diretamente na retenção de água do solo, como afirmado anteriormente por Scheinost et al. (1997). O que evidencia que os parâmetros dos solos geram influências distintas nas funções para a estimativa de umidade volumétrica. Bruning et al. (2019) realizaram um trabalho com o mesmo viés, utilizaram a equação de Arya e Paris (1981) para estimar a umidade volumétrica de dois tipos de solos de três locais distintos, produtores de grandes culturas, do estado de Rio Grande do Sul. Eles também observaram que as umidades estimadas apresentaram valores inferiores quando comparadas as obtidas pela câmara de Richards para valores altos e baixos de potencial matricial, porém, em uma análise geral, concluíram que o modelo utilizado é uma boa alternativa para a obtenção dos parâmetros da equação de Van Genuchten visto que os resultados obtidos foram tidos como ótimos.

Fuentes-Guevara et al. (2019) em seu estudo desenvolvido na bacia hidrográfica de Pelotas avaliaram a aplicabilidade e confiabilidade das FPT do tipo paramétricas de regiões temperadas e tropical para predizer o seu potencial em capturar a estrutura de dependência espacial do conteúdo de água no solo, concluíram que os piores desempenhos apresentados foram pelas funções de pedotransferência de clima temperado em comparação às de clima tropical.

De forma mais pontual, funções de pedotransferência também são utilizadas para estimar propriedades físicas do solo em que medições diretas de amostras não perturbadas exigem muito trabalho e tempo empregado. Boschi et al. (2018) avaliaram 25 FPT na estimativa da densidade aparente a partir de um banco de dados composto de 222 perfis de solos distribuídos em diversos biomas brasileiros utilizando diferentes métricas. Eles observaram que as funções de pedotransferência apresentaram diferentes desempenhos, havendo duas funções que apresentaram os melhores desempenhos: Modelo M & J-B, provavelmente devido à grande variação dos dados utilizados em sua geração, cerca de 12.000 perfis de solo; e BEN-C, a similaridade entre os conjuntos de dados foi atribuída ao resultado. Oliveira (2019) também avaliou funções para a estimativa de densidade aparente, em parte do seu trabalho o desempenho de três PTF disponíveis na literatura foi comparado com o das três desenvolvidas utilizando dados de 23 municípios do Pará. O melhor desempenho foi observado pela função criada FPT1 que é composta pelas variáveis silte, densidade de partícula e carbono orgânico do solo.

Diante da variedade de funções de pedotransferência utilizadas e desenvolvidas, o presente artigo, em um campo mais restrito, se propõe a definir qual a mais indicada para a

predição da umidade de solos brasileiros, levando em consideração que a semelhança na origem dos solos utilizados para a criação de equações e o banco de dados teste influênciam positivamente nos resultados de uma estimativa. Ao todo seis FPT foram analisadas: Gupta e Larson (1979) e Rawls e Brakensied (1989) desenvolvidas com dados de solos dos Estados Unidos; Vereecken et al. (1989) e Wösten et al. (1999), criadas com base em solos europeus; Barros et al. (2013) – 4v e Barros et al. (2013) – 2v, elaboradas para solos do Nordeste do Brasil. Cada equação será aplicada a dados representativos de todo o território brasileiro e seus desempenhos serão comparados, por meio de dados estatísticos, para a observação dos melhores resultados.

Material e métodos

Foram utilizados para o emprego das FPT resultados de ensaios granulométricos de solos disponíveis na base de dados global, voltada para o desenvolvimento de funções de pedotransferência, *Soil Data Task* (Tempel et al., 1996). Esse banco de dados é composto ao todo por 131.472 amostras de solos extraídos de 20.920 perfis de diferentes países, que foram destacados pelo *International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC) na Figura 1

Figura 1. Origem das amostras do banco de dados Soil Data Task.
Fonte: Tempel et al., (1996).

Para o presente estudo desse banco dados foram selecionadas 85 amostras de solos brasileiros que possuíam todas as seguintes

propriedades requeridas pelas funções:
porcentagens de areia, argila, silte, matéria
orgânica, densidade e umidade volumétrica.

A Figura 2 demonstra a distribuição das séries de dados no triângulo de classificação textural, nela é possível observar que a maioria

das amostras se encontram na fração muito argilosa e argilosa, e os demais na franco argilo arenos.

Figura 2. Triângulo textural das amostras dos solos brasileiros.

As funções de pedotransferência analisadas foram: Gupta e Larson (1979), Rawls e Brakensied (1989), Vereecken et al. (1989), e Wösten et al. (1999) descritas no artigo de Wagner et al. (2001), e duas de Barros et al. (2013). As funções foram utilizadas para estimar a umidade volumétrica $\theta(h)$ para as pressões de 0, 0.01, 0.03, 0.1, 0.2, 0.5, 2.5 e 15 bar.

A equação de Van Genuchten (1980) (1) foi utilizada para a estimativa da umidade volumétrica por Wagner et al. (2001) e Barros et al. (2013), que possuem equações próprias para cada um dos parâmetros.

$$\theta = \theta_R + \frac{(\theta_S - \theta_R)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

em que: θ é a umidade volumétrica; θ_R a umidade volumétrica residual; θ_S a umidade volumétrica saturada; α , n em parâmetros de ajustes empíricos; e h o potencial matricial. θ , θ_R , θ_S são expressos em cm^3/cm^3 , α em $1/\text{cm}$, h em bar, n e m são adimensionais.

Quando não possuem representações especiais θ_S é apresentado pela equação (2) e m pela equação (3).

$$\theta_S = 1 - D/2,65 \quad (2)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (3)$$

em que: D é a densidade aparente do solo.

Gupta e Larson (1979)

Gupta e Larson (1979) elaboraram uma equação geral (4) que estima a umidade volumétrica baseada em curvas de retenção elaboradas com 43 materiais de solo dos Estados Unidos.

$$\theta = a \text{ sand} + b \text{ silt} + c \text{ clay} + d \text{ om} + e D \quad (4)$$

em que: Sand, silt, clay e om são as porcentagens de areia, silte, argila e matéria orgânica, respectivamente. D é a densidade aparente do solo medida em g/cm^3 . a , b , c e d são coeficientes adimensionais que possuem valores específicos para cada pressão em bar.

Para posterior comparativo com a base de dados escolhida para validação de todas as equações dos seis artigos analisados as fórmulas utilizadas foram as (5), (6) e (7) para os potenciais matriciais de 0.1, 0.2 e 15 bar nessa ordem:

$$\theta_{0.1} = 5,018.10^3 \text{ sand} + 8,548.10^3 \text{ silt} + 8,883.10^3 \text{ clay} + 4,966.10^3 \text{ om} - 24,230.10^2 D \quad (5)$$

$$\theta_{0.2} = 3,890.10^3 \text{ sand} + 7,066.10^3 \text{ silt} + 8,408.10^3 \text{ clay} + 2,817.10^3 \text{ om} - 18,780.10^2 D \quad (6)$$

$$\theta_{15} = -0,059.10^3 \text{ sand} + 1,142.10^3 \text{ silt} + 5,766.10^3 \text{ clay} + 2,228.10^3 \text{ om} + 2,671.10^2 D \quad (7)$$

Rawls e Brakenied (1989)

Rawls e Brakensied (1989) definiram as seguintes equações para a estimativa dos parâmetros da equação (1):

$$\theta_R = - 0,0182482 + 8,7269.10^{-4} \text{ sand} + 0,00513488 \text{ clay} + 0,02939286\theta_S - 1,5395.10^{-4} \text{ clay}^2 - 1,0827.10^{-3} \text{ sand}\theta_S - 1,8233.10^{-4} \text{ clay}^2\theta_S^2 + 3,0703.10^{-4} \text{ clay}^2\theta_S - 2,3584.10^{-3}\theta_S^2 \text{ clay} \quad (8)$$

$$h_b = \exp (5,3396738 + 0,1845038 \text{ clay} - 2,48394546\theta_S - 0,00213853 \text{ clay}^2 - 0,04356349 \text{ sand}\theta_S - 0,61745089 \text{ clay}\theta_S + 0,00143598 \text{ sand}^2\theta_S^2 - 0,00855375 \text{ clay}^2\theta_S^2 - 1,282.10^{-5} \text{ sand}^2 \text{ clay} + 0,00895359 \text{ clay}^2\theta_S \ln(n) = 0,053 - 0,009 \text{ sand} - 0,013 \text{ clay} + 0,00015(\text{sand})^2 \quad (17)$$

em que: Clay, om e sand são as porcentagens de argila, material orgânico e areia, respectivamente. D é a densidade aparente do solo medida em g/cm³.

Pelas exponenciais das equações (16) e (17), α e n são determinados. Para esse método m foi considerado 1.

Wösten et al. (1999)

Wösten et al. (1999) expressaram os parâmetros de Van Genuchten (1980) pelas equações:

$$\alpha^* = - 14,96 + 0,03135 \text{ clay} + 0,0351 \text{ silt} + 0,646 \text{ om} + 15,29 D - 0,192 \text{ topsoil} - 4,671 D^2 - 0,000781 \text{ clay}^2 - 0,00687 \text{ om}^2 + 0,0449/\text{om} + 0,0663 \ln(\text{silt}) + 0,1482 \ln(\text{om}) - 0,04546 D \text{ silt} - 0,4852 D \text{ om} + 0,00673 \text{ topsoil clay} \quad (18)$$

$$- 7,2472.10^{-4} \text{ sand}^2\theta_S + 5,4.10^{-6} \text{ clay}^2 \text{ sand} + 0,5002806\theta_S^2 \text{ clay} \quad (9)$$

$$\lambda = \exp (0,7842831 + 0,0177544 \text{ sand} - 1,062498\theta_S - 5,304.10^{-5} \text{ sand}^2 - 0,00273493 \text{ clay}^2 + 1,11134946\theta_S^2 - 0,03088295 \text{ sand} + 2,6587.10^{-4} \text{ sand}^2\theta_S^2 - 0,00610522 \text{ clay}^2\theta_S^2 - 2,35.10^{-6} \text{ sand}^2 \text{ clay} + 0,00798746 \text{ clay}^2\theta_S - 0,00674491 \theta_S^2 \text{ clay}) \quad (10)$$

em que: λ é o índice do tamanho dos poros do solo e h_b é a pressão capilar em centímetros.

$$\alpha = 1/h_b \quad (11)$$

$$n = \lambda + 1 \quad (12)$$

$$m = \lambda/n \quad (13)$$

Vereecken et al. (1989)

Em Vereecken et al. (1989) os parâmetros são definidos pelas equações:

$$\theta_R = 0,015 + 0,005 \text{ clay} + 0,014 \text{ om} \quad (14)$$

$$\theta_S = 0,81 - 0,283 D + 0,001 \text{ clay} \quad (15)$$

$$\ln(\alpha) = - 2,486 + 0,025 \text{ sand} - 0,351 \text{ om} - 2,617 D - 0,023 \text{ clay} \quad (16)$$

$$n^* = - 25,23 - 0,02195 \text{ clay} + 0,0074 \text{ silt} - 0,194 \text{ om} + 45,5 D - 7,24 D^2 + 0,0003658 \text{ clay}^2 + 0,002885 \text{ om}^2 - 12,81/D - 0,1524/\text{silt} - 0,01958/\text{om} - 0,2876 \ln(\text{silt}) - 0,0709 \ln(\text{om}) - 44,6 \ln(D) - 0,02264 D \text{ clay} + 0,0896 D \text{ om} + 0,00718 \text{ topsoil clay} \quad (19)$$

$$l^* = 0,0202 + 0,0006193 \text{ clay}^2 - 0,001136 \text{ om}^2 - 0,2316 \ln(\text{om}) - 0,03544 D \text{ clay} + 0,00283 D \text{ silt} + 0,0488 D \text{ om} \quad (20)$$

$$\alpha = \exp(\alpha^*) \quad (21)$$

$$n = \exp(n^*) + 1 \quad (22)$$

$$l = 10 (\exp(l^*) - 1) / (\exp(l^*) + 1) \quad (23)$$

em que: l é um parâmetro adimensional e θ_R é definido como 0. Topsoil é uma medida relacionada à cota do solo, para camadas superficiais é estabelecido como 1.

Barros et al. (2013)

Barros et al. (2013) desenvolveram duas equações para a estimativa da umidade volumétrica para dados gerais e mais 6 tipos para solos específicos (*oxisols*, *utisols*, *entisols*, *alfisols*, *cambisols* e *luvisols*), porém, o interesse deste artigo se ateve as equações para os modelos gerais. Nelas, as unidades das propriedades são diferentes das três já vistas anteriormente.

Para a primeira equação, 4v, (quatro variáveis - areia, argila, material orgânico e densidade) os parâmetros a serem aplicados na equação de Van Genuchten (1980) são expressos pelas equações:

$$\text{Log}(\alpha) = 2,8118 + 0,8861 \text{ sand} - 1,1907 \text{ clay} - 0,0015140 D \quad (24)$$

$$\alpha = 10^{\text{Log}(\alpha)} \quad (25)$$

$$n = 1,5662 + 0,3292 \text{ sand} - 0,4135 \text{ clay} - 5,5341 \text{ om} \quad (26)$$

$$\theta_r = 0,0858 - 0,1671 \text{ sand} + 0,3516 \text{ clay} + 1,1846 \text{ om} + 0,0000290 D \quad (27)$$

Para a equação 2v (duas variáveis - areia e argila) as medidas são calculadas pelas equações:

$$\text{Log}(\alpha) = 0,9267 - 1,5958 \text{ clay} \quad (28)$$

$$n = 1,5299 + 0,3265 \text{ sand} - 0,3957 \text{ clay} \quad (29)$$

$$\theta_R = 0,1286 - 0,1484 \text{ sand} + 0,3571 \text{ clay} \quad (30)$$

$$\theta_S = 0,5526 - 0,2320 \text{ sand} - 0,1178 \text{ clay} \quad (31)$$

Em que α possui a mesma definição apresentada pela equação (25).

Análise de desempenho

A comparação dos valores medidos e dos valores estimados foi analisada pelo coeficiente de correlação (R) e pelo índice de confiança ou desempenho (c), obtido pela equação (32). Tais índices estatísticos foram propostos por Camargo e Sentelhas (1997), onde a análise do índice c segue as classes de interpretação da Tabela 1.

$$c = \left(1 - \frac{\sum (E_i - M_i)^2}{\sum ((E_i - M) + (M_i - M))^2} \right) \cdot R \quad (32)$$

Em que: E_i são os valores simulados, M_i os valores medidos, M a média dos valores medidos e N o número de observações.

Tabela 1. Classificação do índice c

Desempenho	Valor de c
Ótimo	>0,85
Muito Bom	0,76-0,85
Bom	0,66-0,75
Mediano	0,61-0,65
Sufrível	0,51-0,60
Mau	0,41-0,50
Péssimo	<0,40

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Em Loague e Green (1991) outros parâmetros comparativos foram somados a análise do presente artigo, sendo eles: erro quadrático médio (EQM), dado pela equação (33), razão dos desvios (RD), dado pela equação (34), além da eficiência da modelagem (EM), dada pela equação (35) e o coeficiente de massa residual (CMR),

dado pela equação (36). Os valores ótimos de EQM, RD, EM e CMR, são 0, 1, 1, e 0, respectivamente.

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{N} \right]^{1/2} \cdot \frac{100}{M} \quad (33)$$

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2} \quad (34)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 - \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (35)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (36)$$

em que: T_i representa os valores calculados, M_i os valores experimentais, $\bar{M}$ é a média dos valores experimentais e N o número de determinações.

Foram atribuídos pontos para o desempenho de cada FPT em relação a cada um dos parâmetros estatísticos (Tabela 2). O somatório dos pontos adquiridos permitiu a classificação de cada FPT e a definição da melhor para o caso estudado.

Tabela 2. Ponderação dos pontos estatísticos.

Desempenho	1º	2º	3º	4º	5º	6º
Pontos	10	8	6	4	2	0

Resultados

Após a aplicação das seis FPT, as umidades volumétricas medidas e as estimadas foram relacionadas na Figura 3. Os seis gráficos, de um modo geral, apresentaram a característica de ter uma distribuição de pontos semelhante nos dois lados da linha de tendência linear, onde o aumento do espalhamento dos valores se deu para maiores umidades. Rawls e Brakensied (1989) foi a função que apresentou maior dispersão de valores, enquanto a de Barros et al. (2013) – 4v foi a que apresentou menor dispersão e semelhança entre os dois lados da linha de tendência.

Com a finalidade de simplificar o entendimento dos resultados, os nomes das seis FPT serão relacionados às seguintes siglas: Gupta e Larson (1979) – GL; Rawls e Brakensied (1989) – RB; Vereecken et al. (1989) – VK; Wösten et al. (1999) – WT; Barros et al. (2013) 4v – B4v; Barros et al. (2013) 2v – B2v.

No estudo de Wagner et al. (2001), VK apresentou graficamente uma grande dispersão dos valores estimados quando aplicados para a base de dados de solos alemães, característica diferente do encontrado no presente artigo, onde os resultados da função de pedotransferência ficaram próximos da linha de tendência. Também em Wagner et al. (2001), RB e WT apresentaram gráficos semelhantes, fato igualmente encontrado.

Os valores encontrados utilizando o modelo proposto por Barros et al. (2013) demonstrou que os gráficos das relações entre a

umidade volumétrica medida e a estimada para diferentes pressões revelou um melhor desempenho da equação para quatro variáveis em relação à de duas variáveis. Essa conclusão também pode ser observada neste artigo, onde B4v apresentou dispersão de valores mais bem distribuídos do que B2v.

Os resultados dos parâmetros estatísticos aplicados nas seis funções de pedotransferência foram reunidos na Tabela 3.

Para o índice c as duas equações de Barros et al. (2013) foram os mais próximos de 1, classificados como bons. VK e WT, apesar de apresentarem valores para c um pouco mais baixos, também foram classificados como bons. GL obteve um desempenho considerado mediano, enquanto RB obteve um c sofrível.

B2v foi o modelo de melhor desempenho para EQM, seguido por VK e B4v, com valores aproximados, e GL, RB e WT, com EQM quase o mesmo, foram o que tiveram o pior desempenho nesse parâmetro estatístico. Em contrapartida, em relação à razão dos desvios GL foi a melhor equação, seguida por VK e B2v. B4v, RB e WT foram as que apresentaram os valores mais distantes de 1, em ordem crescente.

Para o índice EM o melhor desempenho foi de B4v, seguido por WT e B2v, com valores próximos. RB e VK apresentaram baixo valor de eficiência da modelagem, porém o mais baixo desempenho foi de GL.

Figura 3. Umidades volumétricas de todos os modelos: medidas vs. estimadas

Para o quinto parâmetro estatístico, CMR, B4v e WT apresentaram valores próximos de zero, sendo os primeiros em desempenho, seguidos por VK e RB. E GL e B2v tiveram os valores mais distantes do ótimo.

Com essas análises, para cada parâmetro estatístico as FPT foram classificadas do primeiro ao sexto lugar, tendo pontos atribuídos para cada colocação, como apresentado na Tabela 2, em caso de empate a classificação segue a ordem numérica. Ao final do somatório a pontuação de cada função foi a seguinte: Barros et al. (2013) - 4v - 40 pontos; VK - 34 pontos; B2v - 32 pontos; WT - 24 pontos; GL - 20 pontos; e RB - 10 pontos. A partir desses resultados um ranking de desempenho pode ser gerado (Tabela 4).

Com esses resultados foi possível constatar dois pontos que influenciam o desempenho de uma FPT para a predição da umidade volumétrica: o tipo de solo estudado e a quantidade de variáveis analisadas. Em seus estudos Tomasella e Hodnett (2004) relataram que as diferenças físicas e químicas entre os solos temperados e tropicais podem ser a explicação para que FPT originadas de solos de clima temperado não apresentem resultados tão adequados para solos de clima tropical, argumento também relatado nos resultados dos estudos de Van Den Berg et al. (1997) e de Fuentes-Guevara et al. (2019).

Tabela 3. Resultados dos parâmetros estatísticos das FPT.

Modelo	Gupta e Larson (1979)	Rawls e Brakensied (1989)	Vereecken et al. (1989)	Wösten et al. (1999)	Barros et al. (2013) - 4v	Barros et al. (2013) - 2v
c	0,63 (Mediano)	0,53 (Sofrível)	0,72 (Bom)	0,70 (Bom)	0,75 (Bom)	0,75 (Bom)
EQM(%)	38,19	42,77	26,68	42,70	28,61	25,13
RD	1,03	1,80	0,88	1,97	1,57	0,76
EM	0,19	0,34	0,47	0,61	0,67	0,58
CMR	0,29	0,19	0,16	-0,12	0,10	-0,43

Por exemplo, no caso de oxissolos o teor de argila muitas vezes excede 60%, diferente dos temperados, fazendo, assim, com que as FPT desenvolvidas a partir desses não abrangem todo o intervalo da variável argila, resultando em baixos desempenhos. Dessa forma, quando a função de pedotransferência é aplicada para solos com

características pedológicas semelhantes aos dados utilizados no seu desenvolvimento ela pode prever a propriedade com maior precisão, pois levará em consideração os níveis de concentração das variáveis analisadas para a estimativa e a distribuição das partículas in loco.

Tabela 4. Ranking das FPT de acordo com o seu desempenho.

Ranking	FPT
1º	Barros et al. (2013) - 4v
2º	Vereecken et al. (1989)
3º	Barros et al. (2013) - 2v
4º	Wösten et al. (1999)
5º	Gupta e Larson (1979)
6º	Rawls e Brakensied (1989)

Esse ponto também foi observado por Souza et al. (2015), que tiveram por objetivo desenvolver funções de pedotransferência para a estimativa da resistência à penetração de amostras do solo do Espírito Santo, por Boschi et al. (2018), que avaliaram a previsão de FPT para estimar a densidade aparente de amostras representativas de diversas regiões do Brasil, concluindo que o desempenho das funções pode ser comprometido se utilizar um conjunto de dados que diferem dos utilizados na sua criação e também por Cueff et al. (2021) que afirmaram que o seu pequeno tamanho do conjunto de dados de solos de um única região da França pode ter influenciado no baixo desempenho de predição das funções desenvolvidas para o país, visto que não é representativo da diversidade do solo francês. Porém, também é importante ressaltar que a mineralogia pode ter um efeito no solo que cause uma sobreposição ao efeito da classe dos solos. (Santos et al., 2013).

Kotlar et al. (2019) em seu estudo sobre a avaliação do desenvolvimento e da incerteza das funções de pedotransferência para a estimativa do conteúdo de água de dados de solo em diferentes pressões da Dinamarca e do Brasil concluíram que a variabilidade inerente dos dados, principalmente constatado no conjunto de dados das amostras dinamarquesas, pode causar um aumento da incerteza da previsão do conteúdo de água dos solos.

Após a aplicação das dez FPT selecionadas, Tomasella e Hodnett (2004) constataram que as funções mais simples foram as menos bem sucedidas. Essa afirmação pode estar relacionada ao fato de que as fórmulas que utilizam um número muito limitado de variáveis restringem a habilidade das funções de conseguir estimar propriedades de tipos de solos diferentes, ou seja, quanto maior o uso de variáveis independentes na construção das funções maior será a capacidade delas de obter resultados mais precisos, pois elas terão um alcance maior da variabilidade das características específicas de cada tipo de solo.

Nebel et al. (2010) em seu estudo sobre a aplicação de FPT para a estimativa do conteúdo de água do solo no estado brasileiro do Rio Grande do Sul, também relataram que um dos motivos de fracasso de uma função de pedotransferência na estimativa do teor de água no solo pode estar relacionado justamente à simplicidade da sua equação limitada por estreita amplitude e variáveis. E ainda que o uso de funções cujos

dados base utilizados para o seu desenvolvimento sejam notadamente diferentes dos solos utilizados para avaliação das FPT pode comprometer o seu desempenho, por causar maior dispersão e menor precisão da estimativa.

Barros et al (2013) desenvolveram suas duas FPT a partir de um banco de dados de solos do Nordeste brasileiro, Vereecken et al. (1989) tomou como base solos belgas, Wösten et al. (1999) solos europeus, Rawls e Brakensied (1989) e Gupta e Larson (1979) solos dos Estados Unidos. O que se pode observar é que as FPT desenvolvidas com dados de solos mais parecidos com os brasileiros obtiveram melhor desempenho, apesar de Verrecken et al. (1990) ter colocação do ranking maior do que Barros et al. (2013) – 2v. E é nesse quesito que atua o segundo ponto influenciador: a quantidade de variáveis. Barros et al. (2013) utilizaram quatro variáveis em 4v e duas em 2v, Wösten et al. (1999) e Vereecken et al. (1989) trabalharam com quatro e Rawls e Brakensied (1989) com três. Apesar de ter o pior desempenho no estudo, Gupta e Larson (1979) é a que utilizou mais variáveis, cinco. Quanto maior a quantidade de variáveis utilizadas mais é possível aproximar os valores estimados aos medidos já que, como anteriormente discutido, uma maior quantidade de informações das características do solo restringe o amplo campo da predição.

A influência dos parâmetros sobre a eficiência das funções é outro ponto que deve ser levado em consideração no desenvolvimento da FPT. Caviglione (2018) avaliou funções de pedotransferência para retenção de água com o objetivo de obter o índice S, indicador da qualidade física de solos, utilizando dados obtidos de amostras de 36 locais, em duas camadas, dispersos em todo o estado do Paraná. As funções apresentaram baixos índices de eficiência de modelagem, o que representou que as PTF têm dificuldade de estimar curvas para a determinação do índice S. A primeira causa atribuída para esse resultado foi que a equação de Dexter (2004), utilizada para a predição do indicador de qualidade do solo, requer os parâmetros θ_R , θ_S e n , dois a menos que o modelo de Van Genuchten (1980), utilizado para a obtenção da curva de retenção de água. Nesse estudo o parâmetro n foi apontado como o que mais influenciou o teor de água no solo, devido à análise de Qu et al. (2015), e o m , que é dependente de n , como apresentado na equação (3), o que rege a assimetria da curva no ponto de inflexão. A ausência de α na estimativa do índice S foi apontada como

prejudicial à precisão das estimativas do índice S, ressaltando que a existência de interação entre os parâmetros deve ser considerada. A segunda causa apontada foi a estimativa da umidade residual, que quando considerada fixa, a estimativa do índice apresentou os piores valores de índice de eficiência de modelagem.

Outros estudos utilizaram algumas das funções de pedotransferência analisadas no presente artigo. Nguyen et al. (2015), após a aplicação da formulação de Gupta e Larson (1979) para solos vietnamitas, encontrou resultados insatisfatórios para a previsão da retenção de água em solos para plantação de arroz, superestimando os valores da propriedade para solos tropicais, apresentou baixa precisão em relação às outras FPT estudadas, resultado semelhante ao encontrado nesse estudo. Santra e Das (2008), com o objetivo de desenvolver uma nova FPT para a predição de propriedades hidráulicas para solos da Índia Oriental, utilizou quatro funções para calibração, na pesquisa, sendo a de Wösten et al. (1999), a que apresentou melhor eficiência na estimativa das propriedades hidráulicas, enquanto que no presente artigo demonstrou desempenho mediano, o que ressalta que as funções de pedotransferência são bastante específicas para as propriedades e a região para qual foram criadas.

Conclusões

As Funções de Pedotransferência são satisfatórias e viáveis para a predição da umidade volumétrica para solos brasileiros, e os fatores que influenciam no seu desempenho são: a) a semelhança entre os solos estudados e os utilizados na elaboração, e b) a quantidade de variáveis utilizadas na predição da característica.

A FPT proposta por Barros et al. (2013), com quatro parâmetros, foi a que apresentou melhor desempenho. Isso pode ser atribuído ao fato de essa FPT ter sido desenvolvida com solos do Nordeste brasileiro, ou seja, solos com características pedológicas semelhantes aos dos solos do banco de dados do presente artigo, além de utilizar quatro variáveis para a estimativa (areia, argila, material orgânico e densidade). No outro extremo do ranking ficou a FPT proposta por Rawls e Brakensied (1989), que foi desenvolvida com dados de regiões de clima temperado e que faz uso de três variáveis (areia, argila e densidade).

O ideal para uma melhor estimativa dos parâmetros da curva de retenção proposta por Van Genuchten (1980) é utilizar funções de pedotransferência que tenham sido elaboradas a

partir de uma base de dados que contenha solos com características pedológicas análogas, ou o mais próximas possíveis, aos estudados, além de optar por aquelas que utilizarem a maior quantidade de variáveis para a predição.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Escola Politécnica de Pernambuco pelo espaço cedido para as reuniões de desenvolvimento do presente artigo e pelo projeto de Iniciação Científica.

Referências

- Andrade, F. H. N., Almeida, C. D. G. C., Almeida, B. G., Filho, J. A. C. A., Mantovanelli, B. C., Filho, J. C. A. 2020. Atributos físico-hídricos do solo via funções de pedotransferência em solos dos tabuleiros costeiros de Pernambuco. *Irriga* 25, 69-86.
- Arya, L. M., Paris, J. F., 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal* 45, 1023-1030.
- Barros, A.H.C., Lier Q.J.V., Maia, A.H.N. Scarpere, F.V., 2013. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 379-391.
- Boschi, R. S., Boccs, F. F., Assad, M. L. R. C. L., Assad, E. D., 2018. How accurate are pedotransfer functions for bulk density for Brazilian soils? *Scientia Agricola* 75, 70-78.
- Botula, Y.D., Ranst, E. V., Cornelis, W.M., 2014. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 679-698.
- Bouma, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sc.* 9, 177-213.
- Bruning, J., Robaina, A. D., Peiter, M. X., Boscaini, R., Conceição, C. G., Gollo, E. A., 2019. Estimativa da curva de retenção de água no solo por função de pedotransferência. *Revista de Ciência Agronômicas* 28, 97-110.
- Camargo, A. P., Sentelhas, P. C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 5, 89-97.
- Cidin, A. C. M., Lopes-Assad, M. L. R. C., Crestana, S. 2019. Avaliação de atributos do solo para desenvolvimento de função de pedotransferência para estimativa de teores de

- carbono em solos brasileiros: Análise exploratória, in: Villa-Boas, P. R., Martins, M. A., Miloria, D. M. P., Martin-Neto, L., Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária: Ciência, inovação e mercado 2019. Embrapa Instrumentação, São Carlos, pp. 351-355.
- Caviglione, J. H., 2018. Pedotransfer functions of soil water properties to estimate the S-index. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 22, 465-470.
- Cueff, S., Coquet, Y., Aubertot, J. N., Bel, L., Pot, V., Alletto, L. 2021. Estimation of soil water retention in conservation agriculture using published and new pedotransfer functions. *Soil and Tillage Research* 209, 1-14.
- Dexter, A. R., 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.
- Fuentes-Guevara, M. D., Kopp, L. M., Pereira, T. S., Rosa, T. R., Oliveira, L. M., Timm, L. C. 2019. Potencial das funções de pedotransferência em capturar a estrutura de dependência espacial do conteúdo de água no solo. In: anais do XXI Encontro de pós graduação, Pelotas, 2019, 1, 1-4. Disponível: <https://wp.ufpel.edu.br/enpos/anais/anais-2019/>. Acesso: 25 abr. 2021.
- Filho, J. T., Feltran, C. T. M., Oliveira, J. F., Almeida, E., Guimarães, M. F., 2012. Atributos de solo determinantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 436-441.
- Gupta, S. C., Larson, W. E., 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic Matter percent, and bulk density. *Water Resources research* 15, 1633-1635.
- Kotlar, A. M., Jong Van Lier, Q., Brito, E. S., 2020. Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. *Geoderma* 361, 1-10.
- Kotlar, A. M., Jong Van Lier, Q., Barros, A. H. C., Iversen, B. V., Vereecken, H., 2019. Development and uncertainty assessment of pedotransfer functions for predicting water contents at specific pressure heads. *Vadose Zone Journal* 18, 1-13.
- Loague, K. M., Green, R. E., 1991. Statistical and graphical methods for solute transport models. *Journal of Contaminat Hydrology* 7, 51-73.
- Martins, W. W. T. Análise do desempenho de pedofunções par determinação da capacidade de campo. Monografia de Agronomia, Centro Universitário de Anápolis, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO. 2019, 31p.
- Melo, T. M., Bretanha, S. S. F., Pereira, M., Castro, N. M. R., Louzada, J. A. S., Oliveira, M. H. C., 2015. Comparação de modelos para determinação indireta da curva de retenção de água no solo: Aplicação em solos da Bacia do Arroio Taboão, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, 571-582.
- Melo, T.M., Pedrollo, O.C., 2015. Artificial Neural Networks for Estimating Soil Water Retention Curve Using Fitted and Measured Data. *Applied and Environmental Soil Science* 2015, 1-16.
- Michelon, C. J., Carlesso, R., Oliveira, Z. B., Knies, A. E., Petry, M. T., Martins, J. D., 2010. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural* 40, 848-853.
- Nebel, A. L. C., Timm, L. C., Cornelis, W., Gabriels, D., Reihardt, K., Aquino, L. S., Pauletto, E. A., Reinert, D. J., 2010. Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowland soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 669-680.
- Nguyen, P. M., Van Le, K., Botula, Y. D., Cornelis, W. M., 2015. Evaluation of soil water retention pedotransfer functions for Vietnamese Mekong Delta soils. *Agricultural Water Management*, 126-138.
- Oliveira, L. M. Imputação múltipla e funções de pedotransferência para estimativa da densidade de solos da Amazônia oriental. Tese de Doutorado em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA. 2019, 72p.
- Oliveira, L. B., Ribeiro, M. R., Jacomine, P. K. T., Rodrigues, J. J. V., Marques, F. A., 2002. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* 26, 315-323.
- Otoni, M. V., Otoni Filho, T. B., Schaap, M. G., Lopess-assad, M. L. R. C., Rotunno Filho, O. C. 2018. Hydrophysical Database for Brazilian Soils (HYBRAS) and Pedotransfer Functions for Water Retention. *Vadose Zone Journal* 17, 1-17.
- Pequeno, P. L. L., Fagundes, F. P., Santos, R. C., Santini, C. L. A., Rambo, M. A., Schlindwein, J. A. 2018. Uso de funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em um latossolo no estado de Rondônia.

- Revista Eletrônica de Engenharia Civil 14, 229-239.
- Qu, W., Bogaen, H. R., Huisman, J. A., Vanderborght, J., Schuh, M., Priesack, E., Vereecken, H., 2015. Predicting subgrid variability of soil water content from basic soil information. *Geophysical Research Letters* 42, 789-796.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel-Seytoux, H.J. Ed., *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling—Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishing, 275-300.
- Santos, W. J. R., Curi, N., Silva, S. H. G., Araújo, E. F., Marques, J. J., 2013. Pedotransfer functions for water retention in different soil classes from the center Southern Rio Grande do Sul State. *Ciência e Agrotecnologia* 37, 49-60.
- Santra, P., Das, B. S., 2008. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. *Geoderma* 146, 439-448.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., Van Genuchten, M. TH., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer function. *Journal of Hydrology* 1, 163-176.
- Scheinost, A. C., Sinowski, W., Auerswald, K., 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78, 29-143.
- Silva, A. P., Tormena, C. A., Fidalski, J., Imhoff, S., 2008. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* 16, 1-10.
- Silva, A. C., Armindo, R. A., 2016. Importância das funções de pedotransferência no estudo das propriedades e funções hidráulicas dos solos do Brasil. *Multi-Science Journal* 1, 31-37.
- Souza, J. M., Bonomo R., Pires, F. R., 2015. Pedotransfer functions for soil resistance to penetration of a soil under subsoiling. *American – Eurasian Journal of Agricultura & environmental Sciences* 15, 019-1024.
- Souza, P. G. C., Júnior, J. C. F. B., Viana, J. H. M., 2017. Curva de retenção e disponibilidade total de água em latossolos empregando funções de pedotransferência. *Revista Engenharia na Agricultura* 25, 417-427.
- Tempel, P., Batjes, N., Van Engelen, V., 1996. Soil data set for pedotransfer function development (International Soil Reference and Information Centre: Wageningen, The Netherlands, 1996). IGBP-DIS [online]. Disponível: <https://data.isric.org/geonetwork/srv/api/records/65429343-4283-4a97-a630-d8105a686c33>. Acesso: 19 set. 2017.
- Tomasella, J., Hodnett, M., 2004. Pedotransfer functions for tropical soils. *Geoderma* 30, 415-429.
- Van Den Berg, M., Klamt, E., Van Reeuwijk, L. P., Sombroek, W. G., 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma* 78, 161-180.
- Van Genuchten, M. T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.
- Vereecken, H., Feyen, J., Maes, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci* 148, 389-403.
- Wagner, B., Tarnawski, V. R., Hennings, V., Müller, U., Wessolek, G., Plagge, R., 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma* 102, 275-297.
- Walczak, R. T., Moreno, F., Stawinski, C., Fernandez, E., Arrue, J. L., 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *J. Hydrol.* 329, 527-533.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185.