

# Comparação de diferentes funções de pedotransferência para estimar as propriedades hidráulicas dos solos em Portugal

## Comparison of different pedotransfer function for estimating soil hydraulic properties in Portugal

Tiago B. Ramos<sup>1</sup>, Maria C. Gonçalves<sup>2</sup>, José C. Martins<sup>2</sup> e Luís S. Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEER-Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, [tiago\\_ramos@netcabo.pt](mailto:tiago_ramos@netcabo.pt)

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Quinta do Marquês, Av. República, 2784-505 Oeiras, Portugal.

### Resumo

Neste trabalho apresentam-se diferentes funções de pedotransferência (PTFs) para estimar as propriedades hidráulicas dos solos de Portugal. A base de dados PROPSOLO, que contém informação sobre as propriedades físicas e químicas de 697 horizontes amostrados em 330 perfis de solo, foi utilizada no desenvolvimento das PTFs. Foram seguidas diferentes abordagens: (i) PTFs por classes, a partir da média aritmética dos valores do teor de água no solo a -0.25, -1, -3.2, -6.3, -10, -33, -100, -250 e -1500 kPa, sendo os dados primeiro agrupados por classes de textura e estratificados em função da profundidade da camada e densidade aparente do solo; (ii) PTFs pontuais, desenvolvidas por regressão múltipla, para os teores de água no solo nos mesmos potenciais mátricos e para a condutividade hidráulica saturada (Ks); (iii) PTFs contínuas, desenvolvidas também por regressão múltipla, para os parâmetros do modelo de Mualem-van Genuchten; e (iv) PTFs por Krigagem Normal, a partir interpolação dos teores de água a -33 e -1500 kPa, segundo a disposição das texturas correspondentes no diagrama textural. Relativamente à validação das funções desenvolvidas, (i) as PTFs por classes apresentaram um desvio médio quadrático (RMSE) entre 0.039 e 0.057 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>; (ii) as PTFs pontuais resultaram num RMSE entre 0.032 e 0.041 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a retenção de água no solo nos diferentes potenciais mátricos e 0.680 para log(Ks); (iii) as PTFs contínuas apresentaram um erro médio entre 0.027 e 0.059 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a curva de retenção de água no solo e entre 0.533 e 0.588 para log(Ks); e (iv) as PTFs por Krigagem Normal resultaram num RMSE entre 0.033 e 0.040 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>.

Palavras-chave: Funções de pedotransferência; Krigagem Normal; Propriedades hidráulicas; Regressão múltipla.

### Abstract

A set of pedotransfer functions (PTFs) was developed to estimate the soil hydraulic properties of Portuguese soils. The data was extracted from a database containing information collected in 697 horizons of 330 soil profiles. Different approaches were followed: (i) class-PTFs based on the arithmetic mean of soil water content values at -0.25, -1, -3.2, -6.3, -10, -33, -100, -250 and -1500 kPa matric potentials, after grouping data by texture classes, layer depth, and soil bulk density; (ii) point PTFs for specific values of soil water retention curves and for the saturated hydraulic conductivity (Ks),

using multiple regression analysis; (iii) continuous PTFs for the parameters of the Mualem-van Genuchten model, also using multiple regression analysis; and (iv) point PTFs developed for estimating soil water content values at -33 and -1500 kPa by interpolating the data from the location of the corresponding soil textures in the textural diagram with Ordinary Kriging. Validation showed that: (i) the class-PTFs presented a RMSE between 0.039 and 0.057  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; (ii) the point PTFs resulted in a RMSE between 0.032 and 0.041  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  for the soil water retention values at different matric potentials and 0.680 for  $\log(K_{s_m})$ ; (iii) the continuous PTFs showed a RMSE between 0.027 and 0.059  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  for the retention curve and between 0.533 and 0.588 for  $\log(K_s)$ ; and (iv) point PTFs by Ordinary Kriging resulted in a RMSE between 0.033 and 0.040  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

Keywords: Multiple regression analysis; Ordinary Kriging; Pedotransfer functions; Soil hydraulic properties.

## Introdução

Muitos dos métodos laboratoriais usados na determinação das propriedades hidráulicas do solo são bastante morosos, dispendiosos, trabalhosos e limitados ao tamanho das amostras, restringindo o seu uso devido à heterogeneidade do meio quando o objectivo é a caracterização de grandes áreas, nomeadamente áreas agrícolas ou bacias hidrográficas. Nesse sentido, as funções de pedotransferência (PTFs) permitem estimar indirectamente aquelas propriedades a partir de outras mais básicas, tais como a granulometria, a massa volúmica aparente, o teor de carbono orgânica, entre outras.

As PTFs podem ser agrupadas em PTFs por classes, quando são desenvolvidas para um conjunto de dados muito específico, como por exemplo, as classes texturais, ou PTFs contínuas, quando a mesma função é usada para o conjunto global. Para cada um daqueles grupos, as PTFs podem ainda ser subdivididas em PTFs pontuais, quando se pretende estimar pontos específicos das curvas de retenção de água no solo,  $\theta(h)$ , ou da condutividade hidráulica,  $K(h)$ , ou PTFs paramétricas, quando são desenvolvidas para estimar os parâmetros de um qualquer modelo funcional que descreve  $\theta(h)$  e  $K(h)$  de forma completa (Wösten *et al.*, 2001).

Gonçalves *et al.* (1997; 1999) desenvolveram várias PTFs paramétricas para estimar as propriedades hidráulicas dos solos de Portugal. Mais tarde, Paz *et al.* (2009) desenvolveram PTFs para estimar o teor de água retido no solo a -0.25, -10 e -1500 kPa. Neste trabalho, actualizam-se algumas daquelas funções para o conjunto de dados hoje existente. Desenvolvem-se ainda novas funções que permitem otimizar o uso das PTFs em função dos dados de entrada e do objectivo pretendido.

## Material e métodos

As PTFs foram desenvolvidas a partir da informação contida na base de dados PROPSOLO (Ramos *et al.*, 2011), que reúne informação sobre as propriedades físicas e químicas determinadas em 697 camadas/horizontes de 330 perfis de solo localizados em Portugal Continental. O Quadro 1 apresenta as principais características físicas e químicas dos dados usados no desenvolvimento das PTFs.

**Quadro 1** – Características dos dados usados no desenvolvimento das PTFs

Parâmetro	N	Média	D. Padrão	Min.	Max.
AG (%)	697	20.7	17.6	0.1	94.6
AF (%)	697	34.2	15.4	0.7	73.6
L (%)	697	21.5	12.2	0.9	68.1
A (%)	697	23.6	14.8	0.1	63.3
Corg (g kg <sup>-1</sup> )	697	8.24	5.02	0.01	25.1
$\rho_b$ (g cm <sup>-3</sup> )	697	1.50	0.18	0.91	1.90
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	697	0.441	0.074	0.25	0.659

AG, areia grossa; AF, areia fina; L, limo; A, argila; Corg, carbono orgânico;  $\rho_b$ , densidade aparente;  $\phi$ , porosidade total.

Foram desenvolvidas as seguintes PTFs:

**1) PTFs por classe:** PTFs para estimar a porosidade total ( $\phi$ ), os teores de água retida no solo a -0.25, -1, -3.2, -6.3, -10, -33, -100, -250 e -1500 kPa e os parâmetros do modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980). Os dados foram agrupados primeiramente por classe textural, segundo a classificação da FAO e do sistema da Sociedade Internacional da Ciência do Solo (ISSS) e, em seguida, tendo em conta a profundidade de cada camada e a massa volúmica aparente. Dois terços da informação disponível na base de dados foram usados no desenvolvimento das PTFs, enquanto que os restantes dados foram usados na validação das funções. A divisão dos dados foi aleatória e repetida dez vezes. As PTFs desenvolvidas para cada classe de dados foram calculadas através da média aritmética dos teores médios de água no solo nos diferentes potenciais mátricos em cada um dos dez conjuntos de dados usados no desenvolvimento das funções. Os parâmetros de van Genuchten foram depois ajustados aos valores médios dos teores de água no solo estimados para cada classe. As PTFs foram validadas com o desvio médio quadrático (RMSE).

**2) PTFs pontuais:** PTFs para estimar  $\phi$ , os teores de água retida no solo a -0.25, -1, -3.2, -6.3, -10, -33, -100, -250 e -1500 kPa e a condutividade saturada do solo medida laboratorialmente ( $K_{sm}$ ). As PTFs foram obtidas por análise de regressão múltipla, em que os argumentos usados foram a textura do solo (AG, AF, L e A), a média geométrica do diâmetro das partículas (GPD) e o seu desvio padrão (GSD) tal como definidos por Shirazi e Boersma (1984), a massa volúmica aparente ( $\rho_b$ ), o teor de carbono orgânico (Corg) e a profundidade média da camada de solo (Z). O desenvolvimento e a validação das PTFs foram realizados de acordo com a mesma metodologia referida anteriormente.

**3) PTFs paramétricas:** PTFs para estimar os parâmetros do modelo de Mualem- van Genuchten (MvG; van Genuchten, 1980) e assim obter  $\theta(h)$  e  $K(h)$ . Neste modelo,  $\theta_r$  e  $\theta_s$  correspondem aos teores de água residual e na saturação [L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>], respectivamente,  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada [L T<sup>-1</sup>],  $\alpha$  [L<sup>-1</sup>] e  $\eta$  [-] são parâmetros de ajustamento empíricos e  $\ell$  é um parâmetro que descreve a conectividade/tortuosidade dos poros. As PTFs foram obtidas também por análise de regressão múltipla. Para além dos argumentos usados no desenvolvimento das PTFs pontuais, foram ainda introduzidos os teores de água nos potenciais mátricos -33 e -1500 kPa como argumentos. O desenvolvimento e a validação das PTFs foram também realizados de acordo com a metodologia anteriormente referida.

**4) PTFs pontuais:** PTFs para estimar o teor de água retido no solo a -33 e -1500 kPa. Foram desenvolvidos diagramas ternários, por interpolação dos teores de água medidos laboratorialmente, e tendo em conta a disposição das texturas correspondentes no

diagrama textural, ou seja, o diagrama textural foi convertido num diagrama ternário das propriedades hidráulicas do solo. A continuidade espacial dos teores de água nos diferentes potenciais mátricos foi analisada através de um variograma experimental e a interpolação dos valores medidos foi realizada pelo método da Krigagem Normal. As estimativas de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  foram assim obtidas para cada posição do triângulo, isto é, para uma grelha com 4350 unidades, em que cada pixel ( $1 \text{ L}^2$ ) foi definido através da conversão das unidades percentuais em distância ( $1\% = 1 \text{ L}$ ). O desenvolvimento e a validação das PTFs foram também realizados de modo semelhante aos anteriores.

## Resultados e discussão

**PTFs por classe:** O Quadro 2 apresenta, como exemplo, as PTFs desenvolvidas para as classes texturais da FAO. O RMSE obtido por estas PTFs foi de apenas  $0.057 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Contudo, a introdução da  $\rho_b$  como dado de entrada resultou numa diminuição do RMSE ( $0.043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), que foi ainda mais pronunciada quando as classes texturais da ISSS, juntamente com  $\rho_b$ , foram usadas no desenvolvimento das PTFs ( $0.039 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). A maior vantagem destas PTFs reside na sua simplicidade, podendo portanto ser facilmente aplicadas nas mais diversas situações.

**Quadro 2** – Funções de pedotransferência por classe textural da FAO.

Classe textural	$\phi$	Teor de água no solo								
		$\theta_{0.25}$	$\theta_1$	$\theta_{3.2}$	$\theta_{6.3}$	$\theta_{10}$	$\theta_{33}$	$\theta_{100}$	$\theta_{250}$	$\theta_{1500}$
Muito fina	0.541	0.528	0.504	0.479	0.465	0.457	0.428	0.391	0.364	0.318
Fina	0.496	0.484	0.463	0.440	0.422	0.410	0.373	0.333	0.306	0.260
Medianamente fina	0.529	0.516	0.495	0.474	0.461	0.451	0.407	0.331	0.281	0.197
Mediana	0.421	0.401	0.376	0.348	0.328	0.314	0.269	0.222	0.192	0.142
Grosseira	0.396	0.376	0.345	0.303	0.260	0.231	0.167	0.125	0.103	0.067

**PTFs pontuais:** As PTFs pontuais para os diferentes potenciais mátricos estudados e para  $K_{s_m}$  são apresentadas no Quadro 3. O RMSE destas funções variou entre 0.032 e  $0.041 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para os diferentes potenciais mátricos estudados, sendo os valores mais baixos registados perto da saturação. Para  $\log(K_{s_m})$ , o RMSE encontrado foi de 0.680.

**Quadro 3** – Funções de pedotransferência pontuais para diferentes potenciais mátricos e para a condutividade hidráulica saturada medida ( $K_{s_m}$ ).

$\phi = 0.874 + 6.80E^{-4} L + 1.04E^{-3} A - 0.309 \rho_b - 2.20 E^{-4} Z$
$\theta_{-0.25 \text{ kPa}} = 0.828 + 7.20E^{-4} L + 1.27E^{-3} A - 0.299 \rho_b$
$\theta_{-1 \text{ kPa}} = 0.752 + 1.06E^{-3} L + 1.52E^{-3} A - 0.273 \rho_b$
$\theta_{-3.2 \text{ kPa}} = 0.673 + 1.21E^{-3} L + 1.55E^{-3} A - 0.237 \rho_b - 0.116 \text{ GPD}$
$\theta_{-6.3 \text{ kPa}} = 0.596 + 1.10E^{-3} L + 2.68E^{-3} A - 0.197 \rho_b - 0.282 \text{ GPD} + 2.31E^{-4} Z$
$\theta_{-10 \text{ kPa}} = 0.531 + 1.79E^{-3} L + 1.84E^{-3} A - 0.176 \rho_b - 0.263 \text{ GPD}$
$\theta_{-33 \text{ kPa}} = 0.294 + 2.18E^{-3} L + 2.75E^{-3} A - 0.086 \rho_b - 0.223 \text{ GPD} + 1.88E^{-2} \text{ Corg} + 3.25E^{-4} Z$
$\theta_{-100 \text{ kPa}} = 0.072 + 2.80E^{-3} L + 4.10E^{-3} A + 2.70E^{-2} \text{ Corg}$
$\theta_{-250 \text{ kPa}} = -0.012 + 3.00E^{-3} L + 3.74E^{-3} A + 2.13E^{-2} \text{ Corg} + 5.10E^{-3} \text{ GSD} + 3.21E^{-4} Z$
$\theta_{-1500 \text{ kPa}} = -0.002 + 1.16E^{-3} L + 4.10E^{-3} A + 1.17E^{-2} \text{ Corg} + 2.81E^{-3} \text{ GSD} + 1.82E^{-4} Z$
$\log(K_{s_m}) = 2.867 + 3.414 \text{ GPD} - 0.963 \rho_b + 0.246 \text{ Corg}$

**PTFs contínuas:** As PTFs para os parâmetros de M-vG são apresentadas no Quadro 4. As funções desenvolvidas sem o uso dos teores de água como argumentos resultaram num RMSE entre 0.033 e 0.086 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para diferentes valores de  $\theta(h)$  e 0.588 para  $\log(K_s)$ . Os valores mais baixos foram novamente obtidos para a região de  $\theta(h)$  mais próxima da saturação e os mais altos para  $\theta_{-10}$  kPa e  $\theta_{-33}$  kPa. A introdução de  $\theta_{-33}$  kPa e  $\theta_{-1500}$  kPa como argumentos das PTFs levou a uma diminuição significativa dos erros de previsão, com os RMSE a variar entre 0.017 e 0.039 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para diferentes valores de  $\theta(h)$  e 0.533 para  $\log(K_s)$ . Neste caso, os erros mais baixos foram obtidos para  $\theta_{-33}$  kPa e os mais altos para  $\theta_{-6.3}$  kPa. As PTFs desenvolvidas por regressão múltipla podem apresentar, portanto, uma maior precisão mas também uma maior complexidade.

**Quadro 4** – Funções de pedotransferência paramétricas para o modelo de M-vG.

*Sem teores de água no solo como argumento:*

$$\theta_r = 0.010 + 1.49E^{-3} A + 1.62E^{-3} GSD$$

$$\theta_s = 0.883 + 1.46E^{-3} A - 0.319 \rho_b - 1.34E^{-4} Z$$

$$\log(\alpha) = -0.018 - 8.55E^{-3} AF - 2.40E^{-3} L - 0.798 GPD - 0.310 \rho_b$$

$$\log(\eta) = 0.146 - 7.50E^{-4} A + 0.316 GPD + 1.84E^{-3} GSD - 0.026 \rho_b$$

$$\ell = 0.376 - 0.129 L - 0.073 A - 0.145 GSD$$

$$\log(K_s) = 5.352 - 1.90E^{-2} AF - 1.54E^{-2} L - 9.11E^{-3} A - 3.22E^{-2} GSD - 1.411 \rho_b$$

*Com teores de água no solo como argumento:*

$$\theta_r = 0.041 + 1.00E^{-3} GSD - 0.163 \theta_{-33 \text{ kPa}} + 0.467 \theta_{-1500 \text{ kPa}}$$

$$\theta_s = 0.754 + 5.60E^{-4} A + 0.179 GPD - 0.285 \rho_b + 0.216 \theta_{-33 \text{ kPa}} + 0.144 \theta_{-1500 \text{ kPa}}$$

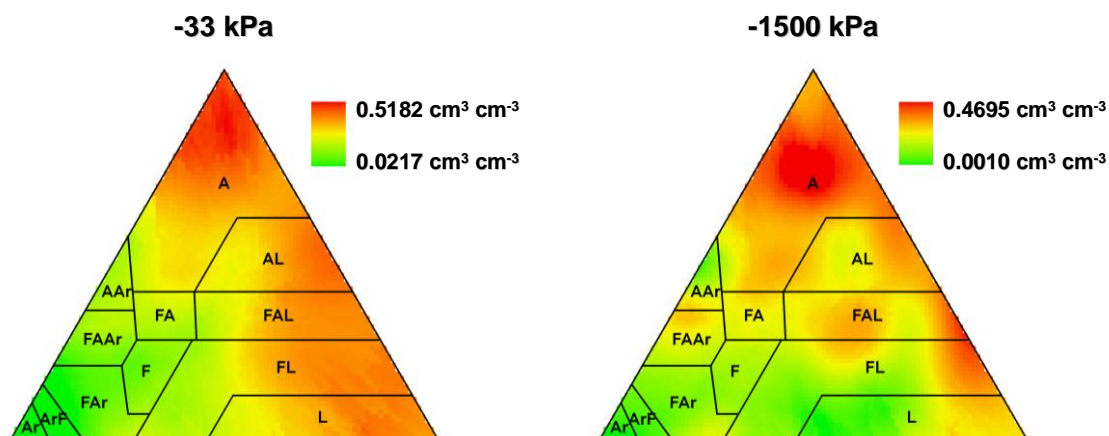
$$\log(\alpha) = 1.660 + 1.99E^{-2} GSD - 1.317 \rho_b - 8.786 \theta_{-33 \text{ kPa}} + 8.049 \theta_{-1500 \text{ kPa}}$$

$$\log(\eta) = 0.073 + 6.27E^{-4} AF + 1.01E^{-3} L + 1.21E^{-3} A + 0.233 GPD - 0.425 \theta_{-1500 \text{ kPa}}$$

$$\ell = -0.166 - 0.062 L - 23.917 \theta_{-1500 \text{ kPa}}$$

$$\log(K_s) = 7.178 - 1.27E^{-2} AF - 3.52E^{-2} GSD - 2.138 \rho_b - 8.989 \theta_{-33 \text{ kPa}} + 6.699 \theta_{-1500 \text{ kPa}}$$

**PTFs pontuais (Krigagem Normal):** Os diagramas ternários que permitem estimar os teores de água no solo a -33 e -1500 kPa são apresentados na Figura 1. Os RMSE obtidos com as estimativas de  $\theta_{-33}$  kPa e  $\theta_{-1500}$  kPa foram de 0.040 e 0.033 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Os diagramas mostram claramente que os teores de água estão directamente relacionados com as texturas do solo, com as classes mais grosseiras a apresentarem teores mais baixos e as mais finas, valores mais altos. A maior vantagem destas PTFs é a obtenção de teores de água volumétricos sem que para isso seja necessário conhecer  $\rho_b$ .



**Figura 1** – Diagramas ternários para os teores de água no solo a -33 e -1500 kPa.

## Conclusões

As PTFs desenvolvidas neste trabalho permitem estimar as propriedades hidráulicas do solo a partir de várias características e propriedades físicas e químicas mais básicas e fáceis de determinar. Estas funções apresentam maior ou menor complexidade em função dos dados de entrada, sendo as mais simples aquelas em que apenas é necessário o conhecimento da classe textural do solo, e as mais sofisticadas aquelas em que o conhecimento de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  é essencial.

Apesar da diversidade de soluções, o erro de estimativa resultante pode ser comparável entre as várias PTFs, apesar de, obviamente, as funções mais simples apresentarem erros maiores e as mais complexas serem ligeiramente mais precisas. No entanto, se, por exemplo, os erros de previsão das PTFs pontuais derivadas quer por regressão múltipla ( $0.032\text{-}0.041 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) quer pelo método de interpolação ( $0.033\text{-}0.040 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) forem comparados, verificamos que é possível obter o mesmo tipo de precisão a partir de menos informação.

As PTFs desenvolvidas podem assim ter inúmeras aplicações, que vão, por exemplo, da gestão da rega ao mapeamento das propriedades hidráulicas do solo, ou à modelação da dinâmica da água e dos solutos no solo através de modelos empíricos ou mecanísticos.

## Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto EUTROPHOS (PTDC/AGR-AAM/098100/2008) da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). T. B. Ramos foi financiado pela bolsa FCT SFRH/BD/60363/2009.

## Bibliografia

- Gonçalves, M.C., Pereira, L.S., Leij, F.J., 1997. Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of Portuguese soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 48: 387-400.
- Gonçalves, M.C., Almeida, V.V., Pereira, L.S., 1999. Estimation of hydraulic parameters for Portuguese soils. *In: van Genuchten, M. Th., Leij, F., Wu, L. (Eds.), Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media. Part 2, University of California Riverside: CA, USA, p 1199-1210.*
- Paz, A.M., Cipriano, D., Gonçalves, M.C., Pereira, L.S., 2009. Funções de pedo-transferência para a curva de retenção da água no solo. *Rev. Ciências Agrárias*, 32: 337-343.
- Ramos, T.B., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Pires, F.P., Pereira, L.S., 2011. Propriedades hidráulicas dos solos para as diferentes classes texturais. *Rev. Ciências Agrárias*, 34(2): 252-264.
- Shirazi, M.A., Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 142-147.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
- Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.*, 251: 123-150.