

CAPÍTULO 13

Funções de Pedotransferência para a Estimativa de Parâmetros Físico-Hídricos do Solo do Bioma Cerrado

Mariana Faria Veloso

Lineu Neiva Rodrigues

Marta Vasconcelos Ottoni

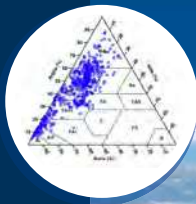


Ilustração: adaptado de Veloso et al. (2022)
Fotos: Fabiano Bastos (primeiro plano), Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1, 2 e 3).



13.1 Introdução

A carência de dados, de parâmetros e de informações hidroclimáticas representativos do bioma Cerrado tem limitado a utilização de modelos de simulação, o que muitas vezes leva à simplificação dos processos de tomada de decisão, trazendo incertezas no planejamento e gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas do bioma (Rodrigues, 2016).

Dentre os dados necessários na modelagem e simulação de processos hidrológicos, destacam-se os parâmetros físico-hídricos do solo, como os teores de água e a condutividade hidráulica do solo saturado. Esses parâmetros são essenciais na compreensão da dinâmica de água na zona vadosa dos solos.

A estimativa dessas propriedades físico-hídricas, entretanto, apresenta dependência de rotinas trabalhosas para aquisição dos dados, inviabilizando, muitas vezes, a sua obtenção, principalmente quando se deseja representar grandes áreas, como é o caso do bioma Cerrado. Além disso, à medida que a análise passa do nível macrorregional para o local, aumentando a escala de trabalho, há necessidade de maior detalhamento das amostragens, aumentando o esforço e o custo do trabalho.

A falta desses dados na escala apropriada oportuniza a utilização de funções de pedotransferência (FPTs), que são funções que possibilitam estimar propriedades do solo utilizando outros parâmetros do solo de mais simples obtenção e acessível custo, como são os casos dos teores granulométricos, teor de matéria orgânica, densidade do solo, densidade de partícula e entre outros (Pachepsky; Rawls, 2004).

A precisão e confiabilidade das FPTs dependem das características do conjunto de dados (escala, variáveis preditoras, tamanho da amostra, heterogeneidade etc.) e das técnicas utilizadas. Nos últimos anos, vários métodos têm sido utilizados para o desenvolvimento das FPTs. Na literatura, é verificado que a técnica de regressão linear múltipla tem sido uma das mais empregadas, mas atualmente, tem ganhado

forças os métodos de aprendizado de máquina, que são modelos mais complexos, capazes de realizar análises não lineares entre as variáveis envolvidas (Araya; Ghezzehei, 2019; Veloso et al., 2022; Veloso et al., 2023).

13.2 Solos do Cerrado

Os solos desempenham funções primordiais como filtro e regulador da água de chuva e da recarga de aquíferos. Além disso, condicionam o tipo de vegetação e são indicadores das atividades antrópicas e da interação entre sua conservação e a dos recursos hídricos (Campos; Freitas-Silva, 1998).

Com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), o Cerrado apresenta um total de 12 classes de solos, e a sua distribuição espacial pode ser observada na Figura 13.1 em conjunto com as áreas de corpos hídricos, afloramentos rochosos e dunas, sendo estas representadas pela classe "Outros".

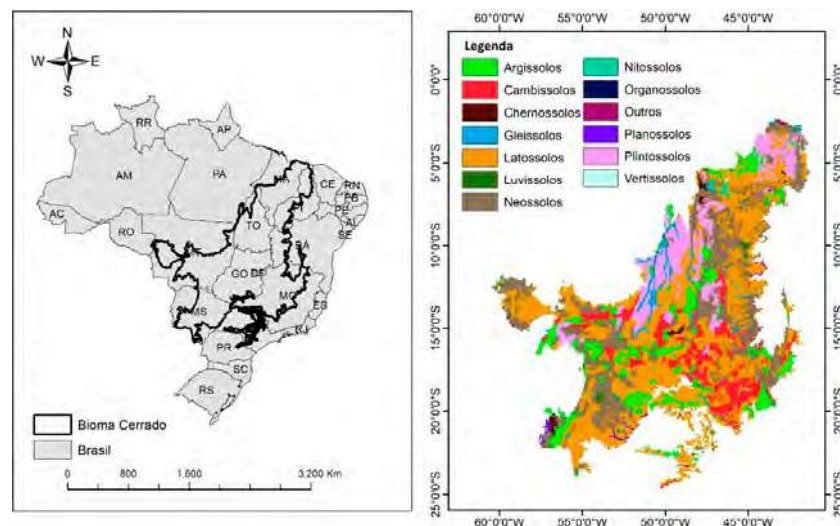


Figura 13.1. Localização e classes de solo predominantes do bioma Cerrado.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2011).

Ocupando cerca de 793.488,88 km², ou seja, 39,8% do bioma, o Latossolo é a classe de solo predominante do Cerrado, seguida pelos Neossolos com aproximadamente 24,3% da área do Cerrado (Tabela 13.1).

Tabela 13.1. Classes de solos e seus respectivos valores de área ocupada no bioma Cerrado.

Classe de solo	Área (km ²)	Área (%)
Latossolos	793.488,88	39,8
Neossolos	484.808,99	24,3
Argissolos	231.110,81	11,6
Plintossolos	227.310,19	11,4
Cambissolos	172.780,61	8,7
Gleissolos	34.732,79	1,7
Nitossolos	13.434,29	0,7
Chernossolos	13.316,31	0,7
Planossolos	10.073,09	0,5
Outros	9.164,05	0,5
Luvissolos	8.203,82	0,4
Vertissolos	1.374,77	0,1
Organossolos	150,12	0,1
Soma	1.999.948,73	100,00

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2011).

Os Latossolos são solos profundos, com boa drenagem, apresentando um avançado estágio de intemperização. Contudo, a baixa fertilidade proveniente da deficiência nutricional, acidez e elevada saturação de alumínio e ferro requerem, de modo geral, a adoção de práticas conservacionistas que visam a utilização do solo para a agricultura (Santos et al., 2018). Em contrapartida, os Neossolos são solos pouco evoluídos, constituídos basicamente por material mineral ou orgânico, devido à baixa intensidade dos processos pedogenéticos (Santos et al., 2018).

Segundo Ferreira (1988), os Latossolos brasileiros apresentam um aumento da taxa de infiltração à medida que os teores de argila aumentam no solo. Silva e Kato (1997) acrescentam que esse comportamento se deve à estrutura dos Latossolos, principalmente aos maiores valores de macroporosidade e pela estabilidade dos agregados dada à presença dos óxidos de ferro e alumínio.

Sendo assim, os Latossolos brasileiros fogem às generalizações, tendo em vista que os solos arenosos possuem maior quantidade de macroporos, condutividade hidráulica e taxas de infiltração. Diante disso, as FPTs desenvolvidas em climas temperados, que constituem em sua maioria na literatura, apresentando solos bem menos intemperizados e similares aos solos arenosos, quando aplicadas em solos tropicais podem não representar as reais características dos locais em estudo (Tomasella et al., 2000; Gunarathna et al., 2019), principalmente em regiões com a predominância de Latossolos.

Veloso et al. (2022) desenvolveram FPTs para o Cerrado utilizando uma base de dados com mais de 500 amostras de solos espalhadas pelo bioma, com percentuais elevados de areia e argila, sendo a maioria classificados como argiloso e franco argilo-arenoso (Figura 13.2).

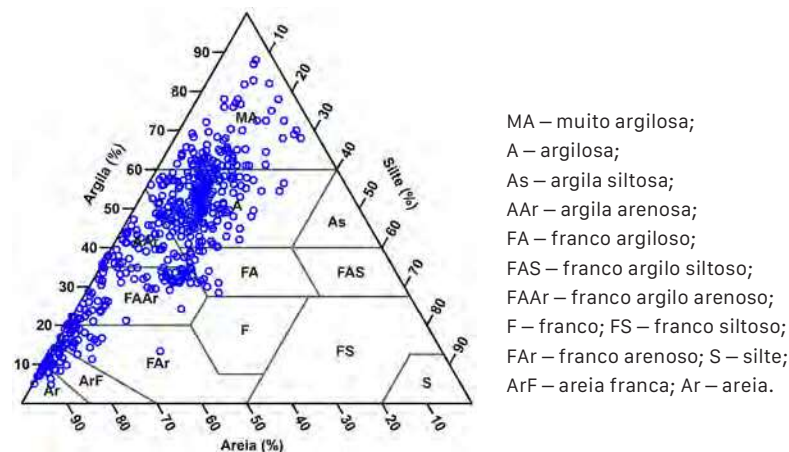


Figura 13.2. Triângulo textural das amostras de solos do bioma Cerrado.

Fonte: Adaptado de Veloso et al. (2022).

De acordo com Veloso et al. (2022), essas amostras apresentaram valores médios para as frações areia, silte e argila iguais a 41,1, 16,7 e 42,1%, respectivamente. Já a densidade do solo e a densidade de partícula apresentaram valores médios iguais a 1,37 e 2,61 g cm⁻³, respectivamente. A umidade do solo na capacidade de campo (CC), equivalente ao teor de água no solo na tensão de 10 kPa, e no ponto de murcha permanente (PMP), teor de água na tensão de 1500 kPa, apresentaram valores médios iguais a 0,364 e 0,285 m³ m⁻³, tendo as suas variações de valores apresentadas na Figura 13.3A, em que a CC apresentou valores na faixa de 0,148 e 0,505 m³ m⁻³ e os valores de PMP variaram entre 0,098 e 0,435 m³ m⁻³.

Com base ainda nas amostras de solo utilizadas por Veloso et al. (2022), na Figura 13.3B, apresenta-se a variação da disponibilidade total de água no solo (DTA), com valores variando na faixa de 0,32 e 3,98 mm cm⁻¹, e média igual a 1,49 mm cm⁻¹. Vale ressaltar que à medida que a textura do solo se torna mais fina (solos mais argilosos), a tendência é ocorrer um aumento na DTA.

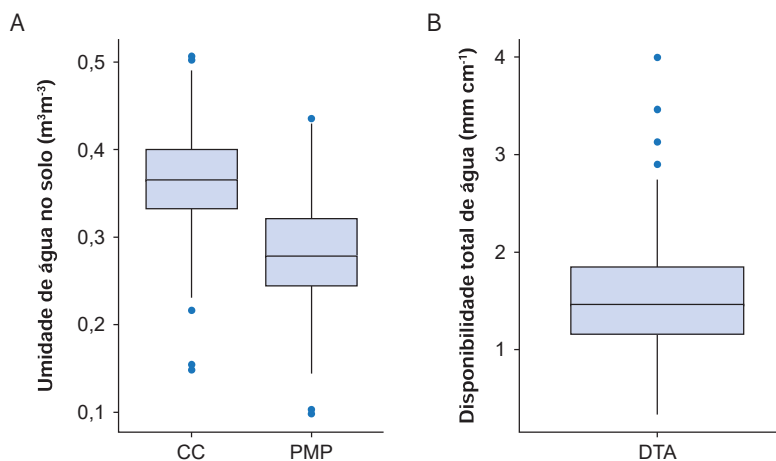


Figura 13.3. Boxplot dos valores da capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) (A); disponibilidade total de água (DTA) (B).

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) variaram de 0,19 a 246,25 mm h^{-1} , com média igual a 34,01 mm h^{-1} , mediana igual a 14,57 mm h^{-1} e um Coeficiente de Variação (CV) igual a 138,49%, o que pode ser explicado pela alta variabilidade espacial e temporal inerente a esse parâmetro do solo (Baiafonte et al., 2017; Hirmas et al., 2018; Ottoni et al., 2019). Veloso et al. (2022) comentam que essa alta variabilidade de K_s dificulta a obtenção de FPTs representativas dos solos do Cerrado.

13.3 Funções de pedotransferência para o bioma Cerrado

Na literatura, podem ser encontradas algumas FPTs desenvolvidas para o Brasil. Tomasella et al. (2000) propuseram FPTs para a estimativa de curvas de retenção de água do solo baseadas no modelo de van Genuchten. Benites et al. (2006) elaboraram FPTs para a previsão da densidade dos solos brasileiros. Ottoni et al. (2019) desenvolveram FPTs para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado em solos internacionais (brasileiros e europeus). Barros et al. (2013) construíram FPTs para a região nordeste do país e Kotlar et al. (2020) para os solos siltosos da região amazônica. Esses trabalhos representaram um avanço para a caracterização físico-hídrica de solos no Brasil; entretanto, as funções de pedotransferência desenvolvidas nesses estudos ainda carecem de verificações, principalmente quanto às suas incertezas.

No caso do Cerrado, algumas FPTs foram elaboradas para a estimativa de parâmetros do solo da região. Veloso et al. (2022, 2023) trabalharam com os dados de solos do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Embrapa Cerrados e do Hybras (Ottoni et al., 2018) para gerar FPTs para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado, umidade do solo em diferentes tensões matriciais e parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten.

As FPTs foram desenvolvidas considerando diferentes conjuntos de variáveis preditoras, como percentuais de areia, silte e argila, densidade do solo e de partículas, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, além das umidades na CC (teor de água no solo na tensão de 10kPa) e PMP (teor de água no solo na tensão de 1.500 kPa).

Veloso et al. (2022, 2023) utilizaram a regressão linear múltipla e algoritmos de aprendizado de máquina para o desenvolvimento das FPTs. Verificou-se um melhor desempenho nos algoritmos *Random Forest* e *Support Vector Regression* nas estimativas de Ks, umidades nas tensões de 0, 6, 10, 33, 100 e 1.500 kPa, e parâmetros de van Genuchten (umidade de saturação, umidade residual, α e n) quando comparado a outros modelos de aprendizado de máquina e à regressão linear múltipla.

Nas Tabelas 13.2, 13.3 e 13.4, são apresentadas as FPTs, obtidas por regressão linear múltipla para o Cerrado, para estimativa da Ks, umidades do solo nas tensões 0, 6, 10, 33, 100 e 1.500 kPa, e parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (Veloso, 2021; Veloso et al., 2023).

Tabela 13.2. Funções de pedotransferência para a estimativa de Ks para a região do Cerrado.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ² ⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\log(k_s) = -4.254974 - 1.406278(\log(\text{Silte})) - 10.335965(\log(D_s))$	0,36	0,59	-0,01
$\log(k_s) = 3.798054 - 7.860309(\log(D_s)) - 5.236486 \theta_{1.500}$	0,42	0,56	0,01

⁽¹⁾ Ks = condutividade hidráulica do solo saturado (mm h⁻¹); $\theta_{1.500}$ = umidade do solo na tensão de 1500 kPa (m³ m⁻³); Silte (%); Ds = densidade do solo (g cm⁻³).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

⁽⁴⁾ ME = erro médio.

Fonte: Veloso (2021).

Tabela 13.3. Funções de pedotransferência para a estimativa da umidade do solo nas tensões 0, 6, 10, 33, 100 e 1.500 kPa para a região do Cerrado.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\theta_0 = 0,3174383 - 0,0730122(\log(\text{Areia})) - 1,0636051(\log(\text{Ds})) + 1,0621988(\log(\text{Dp})) - 0,022102(\log(\text{Macro}))$	0,71	0,03	-0,01
$\theta_6 = -1,0186139 + 0,248967(\log(\text{Argila})) + 0,6977942(\log(\text{Dp})) + 0,4748349(\log(\text{Pt})) - 0,1003896(\log(\text{Macro}))$	0,65	0,03	0,02
$\theta_{10} = -0,4836716 + 0,1764649(\log(\text{Argila})) + 0,1785483(\log(\text{Ds})) + 0,3710038(\log(\text{Micro})) - 0,0504698(\log(\text{Macro}))$	0,64	0,04	-0,01
$\theta_{33} = -0,50243206 + 0,3031745(\log(\text{Argila})) + 1,02206019(\log(\text{Ds})) - 0,08008585(\log(\text{Macro}))$	0,56	0,05	0,01
$\theta_{100} = -0,56801394 + 0,19508774(\log(\text{Argila})) + 0,6912217(\log(\text{Dp})) + 0,21932143(\log(\text{Micro})) - 0,06917081(\log(\text{Macro}))$	0,64	0,04	0,01
$\theta_{1.500} = -0,24688953 + 0,04792146(\log(\text{Silte})) + 0,22503525(\log(\text{Argila})) + 0,4445548(\log(\text{Dp})) - 0,08125156(\log(\text{Macro}))$	0,58	0,04	-0,01
$\theta_0 = 0,1814579 - 1,088485(\log(\text{Ds})) + 0,8529062(\log(\text{Dp})) + 0,3163872 \theta_{1.500}$	0,77	0,03	-0,01
$\theta_6 = -0,07549893 + 0,06060497(\log(\text{Argila})) + 1,19910227 \theta_{10} - 0,27752582 \theta_{1.500}$	0,89	0,02	0,02
$\theta_{10} = -0,19465425 - 0,03766904(\log(\text{Silte})) + 0,2389363(\log(\text{Micro})) + 0,79487795 \theta_{1.500}$	0,85	0,03	0,01
$\theta_{33} = 0,04195487 + 0,23929856 \theta_{10} + 0,75331832 \theta_{1.500}$	0,95	0,02	0,01

Continua...

Tabela 13.3. Continuação.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\theta_{100} = -0,1098622 + 0,2690601(\log(Dp)) + 0,3614433\theta_{10} + 0,6516879\theta_{1.500}$	0,95	0,02	0,01
$\theta_{1.500} = -0,02612024 + 0,0414105(\log(\text{Silte})) + 0,06193916(\log(\text{Argila})) - 0,08934998(\log(\text{Micro})) + 0,83206566\theta_{10}$	0,82	0,03	-0,01

⁽¹⁾ θ_{10} , $\theta_{1.500}$, θ_{100} , θ_{33} , θ_{1000} e $\theta_{1.500}$ = umidades do solo nas tensões 0, 6, 10, 33, 100, e 1500 kPa, respectivamente (cm³ cm⁻³); Areia (%); Silte (%); Argila (%); Ds = densidade do solo (g cm⁻³); Dp = densidade de partículas (g cm⁻³); Pt = Porosidade total (%); Micro = microporosidade (%); Macro = macroporosidade (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

⁽⁴⁾ ME = erro médio.

Fonte: Veloso (2021).

Tabela 13.4. Funções de pedotransferência para a estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para a região do Cerrado.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾	ME ⁽⁴⁾
$\theta_s = -0,5486392 - 0,7762026\log(Ds) + 0,800532\log(Dp)$	0,62	0,02	-0,01
$\theta_r = -8,83933 + 2,7462026\log(\text{Areia}) + 1,310042\log(\text{Argila}) + 1,029454\log(\text{Macro})$	0,21	0,09	0,01
$\theta = -0,974911 + 0,3520109\log(\text{Silte}) + 0,5497387\log(\text{Macro})$	0,15	0,61	0,06
$n = 0,74627149 - 0,0031476\log(\text{Silte}) - 0,33812542\log(\text{Micro})$	0,11	0,15	-0,01

⁽¹⁾ θ_s = umidade de saturação (m³ m⁻³); θ_r = umidade residual (m³ m⁻³); α , n = parâmetros de ajuste (adimensional); Areia (%); Silte (%); Argila (%); Ds = densidade do solo (g cm⁻³); Dp = densidade de partículas (g cm⁻³); Micro = microporosidade (%); Macro = macroporosidade (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

⁽⁴⁾ ME = erro médio.

Fonte: Veloso et al. (2023).

Um dos pontos importantes das FPTs desenvolvidas por Veloso (2021) é a opção de utilizar as umidades na capacidade de campo (CC - θ_{10}) e ponto de murcha permanente (PMP - θ_{1500}) como variáveis nas equações (Tabela 13.2), já que esses teores de água no solo são mais comumente obtidos em laboratório, podendo tornar a estimativa dos parâmetros do solo mais precisos, conforme foi verificado no aumento dos valores de R^2 . Gunarathna et al. (2019), Veloso et al. (2022, 2023) também utilizaram esses teores de água na CC e PMP nos modelos de aprendizado de máquina, destacando a importância dessas variáveis no desempenho dos modelos.

Quanto às FPTs desenvolvidas para a estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, a umidade residual, α e n apresentaram baixos desempenhos. Veloso et al. (2023) ressaltam a dificuldade de ajustar essas funções, em que as características inerentes desses parâmetros do solo dificultam o desenvolvimento dos modelos, mesmo utilizando técnicas como o aprendizado de máquina.

Medrado e Lima (2014) também desenvolveram FPTs para a estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para o Cerrado. Os autores utilizaram um banco de dados de 413 amostras, totalizando 1401 camadas de solo. O desempenho dessas FPTs foi avaliado estatisticamente e sua eficiência comparada com a FPT de Tomasella et al. (2000). Por fim, as FPTs desenvolvidas foram superiores em 70% quando comparadas ao modelo de Tomasella considerando a estatística p-value.

Outras FPTs para o Cerrado podem ser encontradas na literatura, como Rodrigues et al. (2011), que desenvolveram FPTs para a estimativa da CC (teor de água no solo na tensão de 6 kPa), PMP (tensão de água no solo na tensão de 1500 kPa) e densidade do solo para a bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho, localizada no Distrito Federal, utilizando 891 amostras de 92 perfis de solo. Já Rodrigues e Maia (2011) utilizaram o mesmo banco de dados do trabalho de Rodrigues et al. (2011) para desenvolver as FPTs para a estimativa da K_s e as umidades de saturação e residual para a mesma bacia hidrográfica. As FPTs de-

desenvolvidas por Rodrigues et al. (2011) e Rodrigues e Maia (2011) são apresentadas nas Tabelas 13.5 e 13.6, respectivamente.

Tabela 13.5. Funções de pedotransferência para a estimativa do ponto de murcha permanente, capacidade de campo e densidade do solo para a bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾
CC = 0,8 – 0,3711 DG + 0,0010 AG – 0,0006 AF	0,58
PMP = 0,3451 – 0,1369 DG + 0,0106 MO + 0,0007 ARG – 0,0007 SLT	0,59
DG = 1,1153 – 0,0016 ARG – 0,0208 MO – 0,0018 SLT	0,10

⁽¹⁾ CC = capacidade de campo (m³ m⁻³); PMP = ponto de murcha permanente (m³ m⁻³); DG = densidade do solo (g cm⁻³); MO = matéria orgânica (%); ARG = argila (%); SLT = silte (%); AG = argila grossa (%); AF = argila fina (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

Fonte: Rodrigues et al. (2011).

Tabela 13.6. Funções de pedotransferência para a estimativa da Ks, umidade de saturação e umidade residual para a bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾
Ks = 1,4064 – 0,8527 DG + 0,0011 SLT	0,30	274,77
θ _s = 0,3442 – 0,1372 DG + 0,0105 MO + 0,0007 ARG – 0,0007 SLT	0,90	0,02
θ _r = 1673,84 – 1576,94 DG + 3,84 AF – 19,67 AG	0,59	0,02

⁽¹⁾ Ks = condutividade hidráulica do solo saturado (mm h⁻¹); θ_s = umidade de saturação (g g⁻¹); θ_r = umidade residual (g g⁻¹); DG = densidade do solo (g cm⁻³); MO = matéria orgânica (%); ARG = argila (%); SLT = silte (%); AG = argila grossa (%); AF = argila fina (%).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

Fonte: Rodrigues e Maia (2011).

O desenvolvimento de FPTs na escala microrregional tende a ser mais preciso quando aplicado à área de estudo para a qual a FPT foi desenvolvida. Contudo, a grande variabilidade das características do solo do bioma Cerrado pode dificultar o desenvolvimento preciso dessas FPTs, como foi verificado por Rodrigues e Maia (2011).

Já Rosseti et al. (2022) desenvolveram FPTs para a estimativa da CC (teor de água no solo na tensão de 33 kPa) e PMP (teor de água no solo na tensão de 1500 kPa) para os solos do Cerrado localizados no Sul do estado do Mato Grosso. Os autores utilizaram 156 amostras de solo para o desenvolvimento das FPTs e estudaram a aplicação de FPTs da literatura desenvolvidas para o Brasil e no mundo. A conclusão dos autores foi que as FPTs desenvolvidas para a área de estudo apresentaram melhores desempenhos quando comparadas àquelas FPTs publicadas na literatura.

Na Tabela 13.7, são apresentadas as FPTs desenvolvidas por Rosseti et al. (2022) para a estimativa da CC e PMP para os solos do Sul do estado Mato Grosso.

Tabela 13.7. Funções de pedotransferência para a estimativa da CC e PMP do sul do estado Mato Grosso.

Funções de pedotransferência ⁽¹⁾	R ² ⁽²⁾	RMSE ⁽³⁾
CC = 0,264 – 0,002 Areia + 0,024 TOC + 0,002 Argila	0,94	0,04
CC = 0,057 – 0,001 Areia + 0,743 Micro	0,98	0,03
PMP = 0,386 – 0,004 Areia – 0,002 Argila	0,94	0,02
PMP = 0,568 – 0,003 Areia – 0,001 Argila – 0,281 Tp – 0,069 Ds + 0,005 TOC	0,95	0,04

⁽¹⁾ CC = capacidade de campo (cm³ cm⁻³); PMP = ponto de murcha permanente (cm³ cm⁻³); Areia (%); Argila (%); Tp = Porosidade Total (cm³ cm⁻³); TOC = Carbono Orgânico Total (%); Micro = Microporosidade (cm³ cm⁻³).

⁽²⁾ R² = coeficiente de determinação.

⁽³⁾ RMSE = raiz do erro médio quadrático.

Fonte: Rosseti et al. (2022).

Nas Figuras 13.4 e 13.5, apresentam-se comparação dos valores do coeficiente de determinação (R²) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE), respectivamente, das FPTs da literatura desenvolvidas para a região do Cerrado.

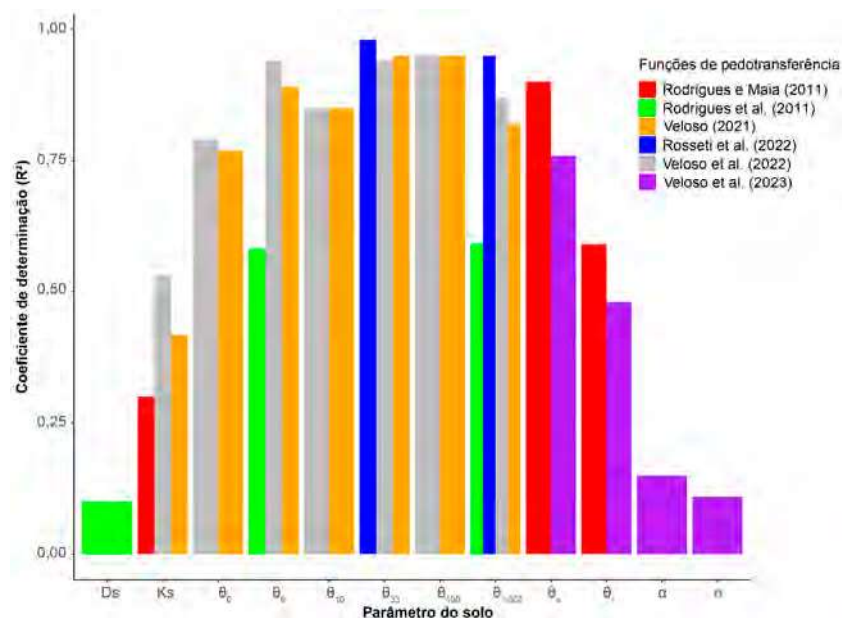


Figura 13.4. Comparação do coeficiente de determinação (R^2) das funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas no Cerrado e publicadas na literatura para a estimativa de parâmetros do solo.

Conforme verificado nos trabalhos de Rodrigues et al. (2011) e Veloso et al. (2022), as FPTs com piores desempenhos foram aquelas desenvolvidas para estimativa de K_s . Essas FPTs apresentaram valores de R^2 variando entre 0,30 e 0,42, e valores de RMSE maiores que 30 mm h^{-1} . Esse desempenho das FPTs foi observado mesmo quando se utilizou técnicas de aprendizado de máquina. As FPTs para estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, principalmente α e n , não apresentaram bom desempenho para o Cerrado, o que pode ser comprovado pelos altos valores de RMSE, que variaram entre 0,616 e 10,184 m para α , e 0,154 a 1,645 para o parâmetro n .

Em contrapartida, as FPTs para estimativa das umidades do solo nas diferentes tensões matriciais (0, 6, 10, 33, 100 e 1500 kPa) apresentaram melhores desempenhos, com destaque para as FPTs de

Veloso (2021) e Veloso et al. (2022), valores de R^2 superiores a 0,75 e baixos valores de RMSE.

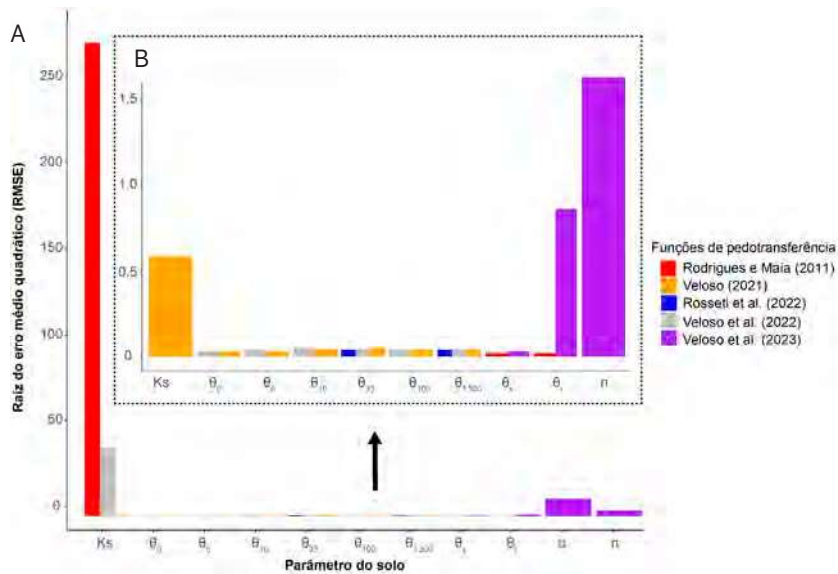


Figura 13.5. Comparação da raiz do erro médio quadrático (RMSE) das funções de pedotransferência desenvolvidas no Cerrado e publicadas na literatura para a estimativa de parâmetros do solo (A); detalhe ampliado da comparação das funções de pedotransferência com RMSE próximas de zero (B).

Além disso, as FPTs desenvolvidas para toda a extensão do Cerrado (Veloso, 2021; Veloso et al., 2022) apresentaram bons desempenhos quando comparadas às das FPTs calibradas para escala microrregional (Rodrigues e Maia, 2011; Rodrigues et al., 2011; Rosseti et al., 2022). Apesar da simplicidade da regressão linear múltipla, método utilizado por Veloso (2021), as FPTs que utilizaram esse método de ajuste apresentaram valores de R^2 relativamente próximos aos desenvolvidos por Veloso et al. (2022), que adotaram algoritmos de aprendizado de máquina.

A falta de planejamento é um dos gargalos para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Cerrado. A utilização das FPTs

nos modelos de simulação pode contribuir para melhorar o planejamento e a gestão de recursos hídricos. Para isso, entretanto, é fundamental entender como essas FPTs se comportam nesse ambiente. Neste sentido, utilizou-se três FPTs para estimativa da CC e PMP, que conseqüentemente permite obter a demanda hídrica, que no caso foi aplicado para a cultura do milho. Os dados utilizados na simulação são apresentados na Tabela 13.8.

Tabela 13.8. Características do solo, da cultura e as funções de pedotransferência utilizadas no cálculo da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente para estimativa da demanda hídrica da cultura de milho.

Característica do solo ⁽¹⁾	Cultura	Funções de pedotransferência
Ds = 1,3 g cm ⁻³ Dp = 2,7 g cm ⁻³ Argila: 42% Silte: 19% Areia Total: 39% Areia Grossa: 5% Areia Fina: 34% MO: 3,5% Microporosidade: 39% Macroporosidade: 16%	Milho Data de plantio: 01/04/2023 Duração do ciclo da cultura: 90 dias Profundidade efetiva do sistema radicular: 50 cm Fator de Disponibilidade de Água no Solo (f): 0,5	Veloso (2021) (Tabela 13.3) Rodrigues et al. (2011) (Tabela 13.5) Rosseti et al. (2022) (Tabela 13.7)

⁽¹⁾ Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas; MO = matéria orgânica.

Utilizando a FPT apresentada por Rodrigues et al. (2011), a demanda hídrica da cultura do milho foi de 28,3 mm, ou seja, 283,2 m³ ha⁻¹. Para as FPTs de Veloso (2021), a demanda calculada foi de aproximadamente 25,6 mm (256,9 m³ ha⁻¹), um valor relativamente próximo ao obtido por Rodrigues et al. (2011). Já quando se aplicam as FPTs de Rosseti et al. (2022) na estimativa da CC e PMP, essa demanda praticamente dobra, obtendo-se um valor de aproximadamente 52,5 mm (525,7 m³ ha⁻¹).

Os resultados obtidos indicam a variabilidade que se pode obter nas simulações utilizando FPTs. Assim, deve-se ter uma atenção especial ao se utilizar essas funções na simulação, mesmo na fase de planeja-

mento. Recomenda-se, sempre que possível, utilizar várias FPTs nas simulações e apresentar os seus diversos cenários, como por exemplo, a aplicação dessas FPTs em modelos de simulações mais completos que permitem avaliar as incertezas espaciais e temporais das FPTs no manejo de irrigação. Além disso, ressalta-se a importância de validar essas estimativas com dados locais das áreas em estudo, tendo em vista a alta variabilidade dos dados de solo observados para o Cerrado.

13.4 Considerações finais

Os estudos de funções de pedotransferência desenvolvidos para o Cerrado representam um avanço para a caracterização físico-hídrica dos solos do bioma. Algumas FPTs para o Cerrado apresentaram bons desempenhos de estimativa, com destaque para a predição da CC, PMP e demais teores de água, como as apresentadas por Rosseti et al. (2022), Veloso (2021) e Veloso et al. (2022).

Já a condutividade hidráulica saturada foi o parâmetro do solo mais difícil de ser estimado com as FPTs, sua característica inerente como a alta variabilidade reflete na baixa e média capacidade preditiva das FPTs desenvolvidas para o Cerrado. Da mesma maneira, os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, principalmente α e n , apresentam baixas precisões em suas estimativas.

No entanto, mais estudos são necessários para aprimorar as FPTs desenvolvidas para o Cerrado, de forma a integrar outras propriedades do solo, mineralogia e manejo do solo, trazendo uma abordagem mais completa para o bioma.

13.5 Referências

ARAYA, S. N.; GHEZZEHEI, T. A. Using machine learning for prediction of saturated hydraulic conductivity and its sensitivity to soil structural perturbations. **Water Resources Research**, v. 55, n. 7, p. 5715–5737, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR024357>

- BARROS, A. H. C.; LIER, Q. de J. van; MAIA, A. de H. N.; SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 379-391, 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/86806/1/2013AP09.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; LIMA, C. X. **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 104). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/856032>.
- CAMPOS, J. E. G.; FREITAS-SILVA, F. H. Geologia do Distrito Federal. In: INVENTÁRIO hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília, DF: Sematec: Iema: MMA-SRH, 1998, 86 p.
- FERREIRA, M. M. **Influência da mineralogia na fração de argila nas propriedades físicas de Latossolos brasileiros**. 1988. 79 f. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- GUNARATHNA, M. H. J. P.; SAKAI, K.; NAKANDAKARI, T.; MOMII, K.; KUMARI, M. K. N. Machine learning approaches to develop pedotransfer functions for tropical Sri Lanka soils. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1940, 2019.
- HIRMAS, D. R.; GIMÉNEZ, D.; NEMES, A.; KERRY, R.; BRUNSELL, N. A.; WILSON, C. J. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle. **Nature**, v. 561, p. 100–103, 2018.
- KOTLAR, A. M.; VAN LIER, Q. de J. BRITO, E. S. Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. **Geoderma**, v. 361, 114098, 2020.
- MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59-66, Set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.08.003>.
- OTTONI, M. V.; OTTONI FILHO, T. B.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; ROTUNNO FILHO, O. C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1345-1358, Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.050>.
- PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. de H. N. Funções de pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica saturada e as umidades de saturação e residual

do solo em uma bacia hidrográfica do Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. H. N.; SILVA, R. N.; Funções de pedotransferência para estimar capacidade de campo, ponto de murcha permanente e densidade global em solos de uma bacia hidrográfica do Bioma Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2011.

RODRIGUES, L. N. Bacia experimental do Rio Buriti Vermelho, na ecorregião do Planalto Central. In: RODRIGUES, L. N.; SCHULER, A. E. (ed.). **Água: desafios para a sustentabilidade da agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 233-255. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1145397/1/AGUA-Desafios-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-ed-01-2016.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

ROSSETI, R. A. C.; AMORIM, R. S. S.; DI RAIMO, L. A. Di L.; TORRES, G. N.; da SILVA, L. C. M.; ALVES, I. M. Pedotransfer functions for predicting soil-water retention under Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, e02474, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02474>

SANTOS, H. G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R. O.; ÁGILO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTIN, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. de. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/920267>. Acesso em: 19 abr. 2024.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

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, n. 2, p. 13-20, 1997.

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

VELOSO, M. F. Desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimativa de propriedades físico-hídricas do solo do bioma Cerrado. 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VELOSO, M. F.; RODRIGUES, L. N.; FERNANDES FILHO, E. I. Evaluation of machine learning algorithms in the prediction of hydraulic conductivity and soil moisture at the Brazilian Savannah. **Geoderma Regional**, v. 30, e00569, 2022.

VELOSO, M. F.; RODRIGUES, L. N.; FERNANDES FILHO, E. I.; VELOSO, C. F.; REZENDE, B. N. Pedotransfer functions for estimating the van Genuchten model parameters in the Cerrado biome. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 202-208, 2023.