



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Letícia Guimarães Pimentel

**Avaliação de equações de pedotransferência (PTF) para estimativa de
parâmetros físico-hídricos dos solos das bacias hidrográficas dos rios
Ivinhema, Amambai e Iguatemi - Mato Grosso do Sul**

Rio de Janeiro

2024

Letícia Guimarães Pimentel

**Avaliação de equações de pedotransferência (PTF) para estimativa de parâmetros físico-hídricos dos solos das bacias hidrográficas dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi -
Mato Grosso do Sul**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

P644 Pimentel, Leticia Guimarães.
Avaliação de equações de pedotransferência (PTF) para estimativa de parâmetros físico-hídricos dos solos das bacias hidrográficas dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi – Mato Grosso do Sul / Leticia Guimarães Pimentel. – 2024.
92 f.

Orientador: Wenceslau Geraldês Teixeira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Solos - Erosão - Teses. 3. Bacias hidrográficas - Mato Grosso do Sul - Teses. 4. Desenvolvimento de recursos hídricos - Teses. I. Teixeira, Wenceslau Geraldês. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 556.012

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Leticia Guimarães Pimentel

Assinatura

13 de agosto de 2024

Data

Avaliação de equações de pedotransferência (PTF) para estimativa de parâmetros físico-hídricos dos solos das bacias hidrográficas dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi - Mato Grosso do Sul

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 16 de julho de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **WENCESLAU GERALDES TEIXEIRA**
 Data: 27/07/2024 06:40:45-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira, D. SC. (Orientador)
 Embrapa Solos, UERJ

Documento assinado digitalmente
 **ALENA TORRES NETTO**
 Data: 30/07/2024 10:48:36-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a. Alena Torres Netto
 Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Documento assinado digitalmente
 **ALFREDO AKIRA OHNUMA JUNIOR**
 Data: 29/07/2024 13:46:27-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Jr.
 Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Documento assinado digitalmente
 **MARTA VASCONCELOS OTTONI**
 Data: 26/07/2024 14:27:44-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr.^a. Marta Vasconcelos Ottoni
 Serviço Geológico do Brasil - SGB

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação, que marca o fim de uma etapa importante em minha jornada acadêmica, não seria possível sem o apoio e incentivo de diversas pessoas especiais. A elas, dedico meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha imensa gratidão à minha mãe, Cristina. Sua força, amor incondicional e palavras de incentivo foram a base fundamental para que eu perseverasse nos momentos mais desafiadores. Agradeço por acreditar em mim desde o início e por me ensinar o valor da dedicação e do trabalho duro.

Ao meu companheiro, Luiz Augusto, estendo meus mais profundos agradecimentos pelo apoio constante, paciência e compreensão durante todo o processo de pesquisa e escrita da dissertação. Sua presença foi fundamental para manter meu ânimo e me ajudar a superar os obstáculos que encontrei pelo caminho. Agradeço por ser meu porto seguro e por compartilhar comigo as alegrias e conquistas dessa jornada.

Ao meu orientador, Professor Doutor Wenceslau Teixeira, agradeço a valiosa orientação e mentoria ao longo da pesquisa. Sua expertise, conhecimento e insights inestimáveis foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por dedicar seu tempo e atenção, por me incentivar a pensar criticamente e por me ajudar a aprimorar minhas habilidades como pesquisadora.

À minha família e amigos, agradeço o apoio e a compreensão durante todo o período de dedicação à dissertação. Agradeço por me proporcionarem momentos de descontração e alegria, que foram essenciais para manter meu equilíbrio e bem-estar.

Por fim, agradeço à Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, por me proporcionar a oportunidade de realizar meus estudos de mestrado e por me oferecer os recursos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço também à Embrapa Solos, FAPED e Itaipu, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização da pesquisa.

A todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero obrigado.

Quem explora a terra não pode deixar que ela se esgote.

Autor Desconhecido

RESUMO

PIMENTEL, Leticia Guimarães. *Avaliação de equações de pedotransferência (PTF) para estimativa de parâmetros físico-hídricos dos solos das bacias hidrográficas dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi - Mato Grosso do Sul*. 2024. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A obtenção de parâmetros físico-hídricos do solo é desafiadora e de elevado custo. As funções de pedotransferência (PTFs) permitem a estimativa de parâmetros físico-hídricos do solo a partir de dados mais facilmente obtidos. O estudo teve como objetivo avaliar a confiabilidade de PTFs para estimar a densidade do solo (D_s), as umidades volumétricas do solo na capacidade de campo - 10 kPa (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente - 1500 kPa (θ_{PMP}) para os solos predominantes das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi, no Mato Grosso do Sul. As PTFs foram selecionadas num sistema hierárquico. i) calculando valores medianos de θ_{CC} e θ_{PMP} em função unicamente do grupamento textural, ii) calculando valores medianos de θ_{CC} e θ_{PMP} em função da classe de solo associada com grupamento textural, iii) foram calculados valores de D_s , θ_{CC} e θ_{PMP} utilizando PTFs selecionadas com a utilização dos preditores: granulometria e os teores de carbono orgânico do solo. Para a avaliação da melhor confiabilidade das predições das PTFs, foram considerados os menores valores de RMSE e os maiores valores dos R^2 e análises gráficas. Os resultados indicaram que quando se conhece apenas o grupamento textural se recomenda utilizar os valores de θ_{CC} de $0,110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e θ_{PMP} de $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o grupamento arenosa; de $0,250 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de $0,143 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o grupamento média; de $0,365 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de $0,278 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o grupamento argilosa e $0,381 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,296 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o grupamento muito argilosa. Para as classes de solos que ocorrem em maior extensão na área estudada, os Latossolos Vermelhos dos grupamentos texturais média, argilosa e muito argilosa, os valores recomendados de θ_{CC} são $0,214$; $0,395$; e $0,356 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de θ_{PMP} são $0,118$; $0,282$; e $0,276 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente. Para a segunda classe de solos de maior ocorrência, os Neossolos Quartzarênicos, o valor do θ_{CC} é de $0,110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e θ_{PMP} é de $0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Para a estimativa dos parâmetros por preditores são indicadas como as PTFs com maior confiabilidade, para D_s a proposta por Huf dos Reis et al. (2024). Para θ_{CC} a proposta por Reichert et al. (2020). E para θ_{PMP} a proposta por Oliveira et al. (2002).

Palavras-chave: Modelagem Hidrológica; Densidade do Solo; Capacidade de Campo; Ponto de Murcha Permanente.

ABSTRACT

PIMENTEL, Leticia Guimarães. *Evaluation of pedotransfer equations (PTF) for estimating physical-hydric parameters of soils in the river basins of the Ivinhema, Amambai and Iguatemi rivers - Mato Grosso do Sul*. 2024. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The acquisition of soil physical-hydrical parameters is often challenging and costly. Pedotransfer functions (PTFs) allow the estimation of soil physical-hydrical parameters from more easily obtained data. This study aimed to evaluate the reliability of PTFs in estimating soil bulk density (D_s), soil volumetric moisture at field capacity - 10 kPa (θ_{CC}), and at the permanent wilting point - 1500 kPa (θ_{PMP}) for the predominant soils in the Ivinhema, Amambai, and Iguatemi river basins in Mato Grosso do Sul. The PTFs were selected in a hierarchical system: i) calculating median values of θ_{CC} and θ_{PMP} solely based on textural grouping, ii) calculating median values of θ_{CC} and θ_{PMP} based on the soil class associated with textural grouping, and iii) calculating values of D_s , θ_{CC} and θ_{PMP} using selected PTFs with the predictors: particle size distribution and soil organic carbon content. To evaluate the best accuracy of PTF predictions, the lowest RMSE values, the highest R^2 values, and graphical analysis were considered. The results indicated that when only the textural grouping is known, it is recommended to use θ_{CC} values of $0.110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and θ_{PMP} values of $0.043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for the sandy group, $0.250 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and $0.143 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for the medium group; $0.365 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and $0.278 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for the clayey group, and $0.381 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and $0.296 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for the very clayey group. For the soil classes that occur most extensively in the studied area, the Latossolos Vermelhos (Ferralsols) in the medium, clayey, and very clayey textural groups, the recommended θ_{CC} values are 0.214, 0.395, and $0.356 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, and the θ_{PMP} values are 0.118, 0.282, and $0.276 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectively. For the second most common soil class, the Neossolos Quartzarênicos (Arenosols), the θ_{CC} value is $0.110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and the θ_{PMP} value is $0.037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. For parameter estimation by predictors, the most accurate PTFs are those proposed by Huf dos Reis et al. (2024) for D_s , by Reichert et al. (2020) for θ_{CC} , and by Oliveira et al. (2002) for θ_{PMP} .

Keywords: Hydrological Modeling; Bulk Density; Field Capacity; Permanent Wilting Point.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Coleta de amostra de solo com cilindro volumétrico.	19
Figura 2: Método do cilindro volumétrico	20
Figura 3: a) Mesa de tensão; b) Câmara de pressão de Richards.	22
Figura 4: WP4C - Meter, EUA.	24
Figura 5: Mapa de localização das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi, mostrando locais dos dados observados do BD-MS e os rios da região.	26
Figura 6: Mapa sinótico de classes de solo das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.	27
Figura 7: Guia para grupamento de classes de textura.	29
Figura 8: Densidade do solo (Ds) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.	42
Figura 9: Resíduos estimados para a predição de Ds pelas PTF-Ds 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul, organizados pela, (a) classe de solo, (b) sistema de uso da terra e (c) classe textural.	49
Figura 10: Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de densidade do solo (Ds) observados versus preditos pelas funções 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) dos solos nas bacias dos rios Ivinhema no Mato Grosso do Sul, Amambai e Iguatemi, classificados por (a) classe de solo, (b) sistema de uso da terra e (c) classe textural.	50
Figura 11: Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.	52
Figura 12: Teor de argila versus valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na capacidade de campo (θ_{CC}) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.	57
Figura 13: Carbono orgânico versus valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na capacidade de campo (θ_{CC}) em solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.	58
Figura 14: Resíduos estimados para a predição de θ_{CC} pelas PTFs- θ_{CC} 1, 2 e 7 de Assad et al. (2001), Balbino et al. (2004) e Reichert et al. (2020) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	61

Figura 15: Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de θ_{CC} observados versus θ_{CC} preditos pelas funções 1, 2 e 7 de Assad et al. (2001), Balbino et al. (2004) e Reichert et al. (2020) dos solos nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	62
Figura 16: Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.	64
Figura 17: Teor de argila versus valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.	69
Figura 18: Carbono orgânico versus valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.	70
Figura 19: Resíduos estimados para a predição de θ_{PMP} pelas PTFs- θ_{PMP} 7, 8 e 9 de Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	73
Figura 20: Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de θ_{PMP} observados versus θ_{PMP} preditos pelas funções 7, 8 e 9 de Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) dos solos nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	74
Figura 21: Resumo gráfico das conclusões.	76
Figura 22: Gestão Sustentável, Conservação da Biodiversidade e Promoção da Resiliência Ambiental nas ODS	90
Figura 23: Modelo de gestão da diretoria de coordenação 2020-2024.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Funções de pedotransferência, seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF-Ds.....	30
Tabela 2: Domínios dos preditores das funções de pedotransferência de Huf dos Reis et al. (2024), Tomasella e Hodnett (1998), Bernoux et al. (1998) e Benites et al. (2007).....	31
Tabela 3: Funções de pedotransferência, seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF- θ_{CC}	34
Tabela 4: Funções de pedotransferência, seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF- θ_{PMP}	36
Tabela 5: Domínios dos preditores das funções de pedotransferência para estimativa de θ_{CC}	37
Tabela 6: Domínios dos preditores das funções de pedotransferência para estimativa de θ_{PMP}	37
Tabela 7: Área estimada das classes de solo a partir do mapa preliminar de solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi e do estado do Mato Grosso do Sul.....	40
Tabela 8: Estatística descritiva dos valores de densidade do solo (Ds), frações granulométricas, e teores de carbono orgânico (CO) para o banco de dados de solos (BD-MS_Ds) do Mato Grosso do Sul.	43
Tabela 9: Estimativas da confiabilidade das predições (Root Mean Square Error – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da densidade do solo (Ds) para as onze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	45
Tabela 10: Estimativas das incertezas das predições (Root Mean Square Error – RMSE) da densidade do solo (Ds), por classe de solo dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	46
Tabela 11: Estimativas das incertezas das predições (Root Mean Square Error – RMSE) da densidade do solo (Ds), por classe textural dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	46
Tabela 12: Estimativas das incertezas das predições (Root Mean Square Error – RMSE) da densidade do solo (Ds), por uso da terra dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	47

Tabela 13: Estatística descritiva do θ_{CC} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) realizada com 1.320 amostras de solos representativos da cobertura pedológica do Brasil, em função de grupamentos texturais relacionados às subordens e grandes grupos taxonômicos de solos selecionados segundo o SiBCS. Valores da mediana de θ_{CC} estão apresentados em negrito.....	53
Tabela 14: Estatística descritiva dos valores de umidade na capacidade de campo θ_{CC} , densidade (D_s), frações granulométricas, e teores de matéria orgânico (MO) para o banco de dados de solos (BD-MS_CC) do Mato Grosso do Sul.	58
Tabela 15: Estimativas da confiabilidade das predições (Root Mean Square Error – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) para as doze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	59
Tabela 16: Estatística descritiva do θ_{PMP} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) realizada com 1.538 amostras de solos representativos da cobertura pedológica do Brasil, em função de grupamentos texturais relacionados às subordens e grandes grupos taxonômicos de solos selecionados segundo o SiBCS. Valores da mediana de θ_{PMP} estão apresentados em negrito.	65
Tabela 17: Estatística descritiva dos valores de umidade no ponto de murcha permanente θ_{PMP} , densidade (D_s), frações granulométricas, e teores de matéria orgânico (MO) para o banco de dados de solos (BD-MS_PMP) do Mato Grosso do Sul.	70
Tabela 18: Estimativas da confiabilidade das predições (Root Mean Square Error – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as onze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD - Água Disponível
BD - Banco de Dados
CC - Capacidade de Campo
CO - Carbono Orgânico
Ds - Densidade do Solo
HEC - Hydrologic Engineering Center
HMS - Hydrologic Modeling System
IC - Intervalos de Confiança
MO - Matéria Orgânica
MS - Mato Grosso do Sul
PMP - Ponto de Murcha Permanente
PTFs - *PedoTransferFunction*
R² - Coeficiente de Determinação
RMSE - Root Mean Square Error
ZAE - Zoneamento Agroecológico
 θ – Umidade volumétrica do solo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1. OBJETIVOS	17
1.1. Objetivo geral	17
1.2. Objetivos específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Densidade do solo	18
2.2. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC})	21
2.3. Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})	23
3. METODOLOGIA	26
3.1. Área de estudo	26
3.2. Densidade do solo	28
3.2.1. Seleção e descrição de dados da densidade do solo (D_s)	28
3.2.2. Sistema hierárquico para estimativa da densidade do solo (D_s)	29
3.2.2.1. Densidade do solo (D_s) para grupamentos texturais	29
3.2.2.2. Densidade do solo (D_s) utilizando parâmetros preditores	30
3.3. Seleção e descrição de dados da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})	32
3.4. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (- 10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa)	33
3.4.1. Sistema hierárquico para estimativa da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa)	33
3.4.1.1. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) para grupamentos texturais	33
3.4.1.2. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) para classes de solos e grupamentos texturais	33
3.4.1.3. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) utilizando parâmetros preditores	34
3.4.1.4. Domínios das PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP}	37
3.4.1.5. Testes de confiabilidade das predições das PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP}	38
4. RESULTADOS	40

4.1. Solos da Área de Estudo	40
4.2. Densidade do Solo (Ds) estimada utilizando parâmetros preditores	41
4.3. Densidade do Solo (Ds) estimada por PTFs	42
4.4. Umidade na Capacidade de Campo (θ_{CC}) estimado utilizando parâmetros preditores (-10 kPa).....	51
4.5. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) estimado por equações PTFs (- 10 kPa).....	55
4.6. Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) estimado utilizando parâmetros preditores (-1500 kPa)	63
4.7. Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) estimado por equações PTFs (-1500 kPa)	67
5. CONCLUSÃO	75
6. RECOMENDAÇÕES	77
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A	78

INTRODUÇÃO

A Itaipu Binacional é considerada a maior geradora de energia limpa e renovável do planeta. Na adoção de um modelo de gestão para suas ações socioambientais, priorizando a segurança hídrica e o desenvolvimento territorial, na área de influência da usina, Itaipu organizou um complexo de projetos denominado de Ações Integradas de Solo e Água (AISA), devido ao incremento das taxas de erosão hídricas dos solos nas áreas de contribuição hídrica do Reservatório da Hidrelétrica de Itaipu.

O projeto “Mapeamento digital de solos e de atributos físico-hídricos dos solos, das bacias dos rios Sul-mato-grossenses Ivinhema, Amambai e Iguatemi, para fins de modelagem hidrológica, manejo e conservação de solo e água”, liderado pela Embrapa Solos, trata da Pesquisa, Desenvolvimento, Inovação, Difusão e Transferência de Tecnologias sobre Solos e Hidropedologia. O objetivo geral é realizar o mapeamento digital dos solos e de atributos físico-hídricos, das bacias hidrográficas contribuintes para o Reservatório da Hidrelétrica de Itaipu, no estado do Mato Grosso do Sul, para fins de modelagem hidrológica, manejo e conservação do solo e água.

A modelagem hidrológica é uma ferramenta que permite a simulação e previsão de padrões e comportamentos de fluxos de água e solutos em sistemas complexos como o solo (TUCCI, 1998). Esses modelos podem assumir formas físicas, matemáticas, computacionais ou conceituais, e são aplicados em diversas áreas como ciências naturais, engenharia, economia e ciências sociais. É um campo de estudo que transita pela hidrologia, mas é bastante utilizado na agronomia e nas ciências ambientais (DOS SANTOS, 2009; MARINHO FILHO et al., 2012).

O *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), utilizado pela Itaipu Binacional, é um *software* utilizado para simular processos hidrológicos de sistemas dendríticos de bacias hidrográficas e determinar seu comportamento sob diversas condições climáticas e de uso da terra (UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2023). Em conjunto com os dados hidrológicos e da bacia, podem ser incorporados parâmetros de solo e aplicados em modelagens que buscam compreender a resposta do ambiente às precipitações, como as taxas de infiltração, a capacidade de armazenamento de água no solo e a taxa de escoamento superficial, por exemplo (WÖSTEN; PACHEPSKY; RAWLS, 2001; AL-HUSSEIN et al., 2022).

A interpretação de como a água é armazenada, distribuída para as plantas e como ela se move através do perfil do solo, é importante na otimização de práticas agrícolas como a irrigação, não apenas para o aumento da eficiência no uso da água, como também para a proteção da saúde e produtividade do solo, contribuindo para uma agricultura mais sustentável e resiliente (RAJKAI; KABOS; VAN GENUCHTEN, 2004, FIGUEIRAS et al., 2016).

Os parâmetros densidade do solo, capacidade de campo e ponto de murcha permanente formam um sistema interligado, amplamente utilizados para prever como as plantas responderão às condições de umidade do solo ao longo do tempo.

A densidade do solo (D_s) é a razão entre a massa de uma amostra de solo seca (em g) e seu volume (sólidos mais poros, em cm^3) (HILLEL, 1998).

A umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) foi originalmente definida por Veihmeyer e Hendrickson (1931) como o teor de água retido no solo após a saturação e drenagem livre por um ou dois dias. A θ_{CC} representa a quantidade máxima de água que o solo pode armazenar quando deixado drenar livremente, tornando-se disponível para as plantas.

A umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) representa o valor da umidade do solo no qual a água, mesmo presente, não estará mais disponível para as plantas.

A obtenção de dados de D_s , de θ_{CC} e θ_{PMP} muitas vezes são desafiadoras e sujeitas a variabilidades, dependendo das condições ambientais e das características específicas do solo, ou seja, para sua mensuração precisa são necessários laboratórios especializados e condições controladas (LIMA et al., 2020; DA NOBREGA et al., 2022; CHOUDHURY et al., 2023).

No Brasil, a disponibilidade de dados sobre esses parâmetros físico-hídricos é rara. Existem bancos de dados nacionais que fornecem parâmetros físico-hídricos, mas a heterogeneidade dos solos brasileiros e a extensão territorial do país podem dificultar a obtenção de dados representativos e precisos para as regiões (OTTONI et al., 2018; FONTANA et al., 2024; OTTONI et al., 2024).

Esse estudo contribui com os objetivos do projeto na organização do conhecimento e proposição de equações de pedotransferência de características físico-hídricas dos solos das bacias tributária da área de estudo. Contribui com a parametrização do solo e conseqüentemente do aprimoramento dos processos de modelagem hidrológica relacionadas a operação da Usina. Do ponto de vista ambiental, os processos de infiltração, condução e o movimento da água na superfície do terreno (enxurradas) que tem papel importante no volume de água que chegará no reservatório, na vida útil do reservatório considerando o aporte de sedimentos e soterramento e a sustentabilidade de sistemas de produção agropecuário.

As funções de pedotransferência (*PedoTransferFunction* - PTF) são ferramentas estatísticas preditivas baseadas em propriedades físicas e químicas do solo mais amplamente disponíveis e medidas (BOUMA, 1989). As PTFs podem suprir a falta de dados medidos diretamente (MCBRATNEY et al., 2002).

Dentre as PTFs usadas para estimar parâmetros físico-hídricos do solo, ocorre uma distinção entre aquelas que preveem o teor de água em alguns potenciais matriciais, são as PTFs pontuais e, as PTFs que estimam os parâmetros da curva de retenção de água, que são as PTFs paramétricas (BOTULA, 2013). As PTFs pontuais são mais precisas para estimativas de valores específicos como a θ_{CC} e θ_{PMP} (MCBRATNEY et al., 2002; TOMASELLA et al., 2003; BOTULA; RANST; CORNELIS, 2014).

O ajuste de novas PTFs, conforme McBratney et al. (2002), é um processo complexo, conforme a base de dados e os métodos utilizados para sua derivação. Em alguns casos, pode ser recomendável calibrá-las para condições locais específicas (MINASNY; MCBRATNEY, 2002).

Além das PTFs, sistemas hierárquicos foram criados para permitir a predição em função da disponibilidade de informações e dados sobre os solos.

Os sistemas Rosetta 1 (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001) e Rosetta 3 (ZHANG; SCHAAP, 2017), que são baseados na abordagem hierárquica, tem por objetivo a estimativa dos coeficientes de retenção de água de van Genuchten e condutividade hidráulica e são compostos por cinco funções de abordagem hierárquica. A primeira função consiste na consulta dos parâmetros em uma tabela com cada classe textural. Da segunda função à quinta função, são redes neurais artificiais combinadas com reamostragem bootstrap, que podem fornecer parâmetros hidráulicos que variam continuamente com a textura do solo. Já o sistema Ingá (TEIXEIRA et al., 2021) que tem por objetivo a estimativa da água disponível no solo foi dividido em duas fases, sendo a diferença da segunda para a primeira, a não utilização de informações sobre a posição geográfica do terreno e o uso de informações de rotina da caracterização de solos.

Esta dissertação foi estruturada em três capítulos independentes. Contudo, para seguir os requisitos institucionais de formatação, os capítulos foram introduzidos de forma conjunta na Introdução e nos Objetivos e foi também apresentada uma Conclusão Geral. As ODS as quais essa dissertação se enquadra, estão apresentadas no Apêndice A. Por fim, esta dissertação é fruto do projeto denominado: Ação Integrada de Solo e Água – (AISA), numa parceria da Itaipu Binacional, Embrapa Solos e outras instituições.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo geral

O estudo teve como objetivo avaliar a confiabilidade e indicar funções de pedotransferência (PTFs) num sistema hierárquico, para estimar a densidade do solo (D_s), as umidades volumétricas do solo na capacidade de campo - 10 kPa (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente - 1500 kPa (θ_{PMP}) para os solos predominantes das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi, no Mato Grosso do Sul.

1.2. Objetivos específicos

- Organizar um banco de dados com as características dos solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi;
- Criar um sistema hierárquico de PTFs para estimativa da densidade do solo, umidade na capacidade de campo e umidade no ponto de murcha permanente;
- Indicar as PTFs com maior confiabilidade para a região de estudo, em função da disponibilidade de parâmetros preditores disponíveis para as bacias;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) é a razão entre a massa de uma amostra de solo seca (em g) e seu volume (sólidos mais poros, em cm^3) (HILLEL, 1998). É considerada uma das propriedades físicas fundamentais do solo (Apêndice A). A D_s é o indicador do grau de compactação do solo, influenciando o crescimento e a densidade de raízes, a movimentação e a retenção de água no solo, é uma característica indispensável para avaliações de estoques de carbono ou outros nutrientes no solo (REICHARDT; TIMM, 2004; DE VOS et al., 2005).

O método do cilindro volumétrico é o mais utilizado para as medições da D_s . Consiste na coleta de uma amostra de solo indeformada, através da inserção no solo, de um cilindro volumétrico de volume conhecido para a determinação de uma amostra com volume e massa conhecida (Figura 1: Coleta de amostra de solo com cilindro volumétrico.). As amostras são secas em estufa a 105°C sendo então pesadas para a obtenção da massa seca do solo. A D_s é então calculada pela divisão da massa (g) pelo volume do cilindro, em cm^3 (TEIXEIRA et al., 2017) (Figura 2).

Figura 1: Coleta de amostra de solo com cilindro volumétrico.



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 2: Método do cilindro volumétrico



Fonte: autoria própria, 2024.

Outro método de estimativa da D_s é o uso de Funções de Pedotransferência (PTFs), que vem sendo usado pelos cientistas do solo como forma de superar as restrições associadas às medições diretas (OBIDIKE-UGWU; OGUNWOLE; EZE, 2023).

As funções de pedotransferência (*PedoTransferFunction* - PTF) são ferramentas estatísticas preditivas baseadas em propriedades físicas e químicas do solo mais amplamente disponíveis e medidas (BOUMA, 1989). Essas PTFs foram desenvolvidas para estimar D_s a partir de um conjunto de dados específicos como granulometria (teores das frações areia, silte e argila) conteúdo de carbono orgânico (CO), pH, soma de cátions (BENITES et al., 2007, ALEXANDER, 1980; MANRIQUE; JONES, 1991; KAUR; KUMAR; GURUNG, 2002; SOUZA et al., 2016; NANKO et al., 2014), dados da classe, uso da terra e da profundidade do solo (PALLADINO et al. 2022).

As PTFs para estimativas da D_s (PTFs- D_s) têm sido elaboradas, tanto para estimativas regionais (TOMASELLA; HODNETT, 1998; BERNOUX et al., 1998; DE SOUZA et al., 2016;

BARROS; FEARNSSIDE, 2015), como também nacionais (BENITES et al, 2007; HUF DOS REIS et al., 2024) e mundiais (RAWLS, 1983; HAN et al., 2012; AL-QINNA; JABER, 2013; NANKO et al., 2014; SEVASTAS et al., 2018; PALLADINO et al., 2022; OBIDIKE-UGWU; OGUNWOLE; EZE, 2023). No entanto, o uso das PTFs em regiões diferentes das quais elas foram calibradas devem ter sua confiabilidade avaliada previamente (KAUR; KUMAR; GURUNG, 2002; MCBRATNEY et al., 2002).

2.2. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC})

A umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) foi originalmente definida por Veihmeyer e Hendrickson (1931) como o teor de água retido no solo após a saturação e drenagem livre por um ou dois dias. A θ_{CC} representa a quantidade de água que o solo pode armazenar quando deixado drenar livremente, tornando-se disponível para as plantas.

A caracterização geral da θ_{CC} como um estado hidrológico do solo ainda não está plenamente estabelecida apesar de sua relevância na compreensão da dinâmica da água no solo e na definição das condições iniciais em aplicações hidrológicas e agronômicas (Apêndice A), e ainda determinar a água disponível no solo para as plantas, (ASSOULINE; OR, 2014).

Para diferentes classes de solo, a θ_{CC} assume valores potenciais diferentes, moldado por uma complexa interação entre as características físico-hídricas e químicas do solo (ZETTL et al., 2011). BRITO et al. (2011) descreve ainda que essa interação, é influenciada por diversos fatores, como: distribuição de tamanho de partículas e poros, quantidade de matéria orgânica, características físico-hídricas e propriedades químicas.

A ambiguidade na definição de θ_{CC} gerou desafios práticos na criação de metodologias para estimar esse parâmetro, tanto em laboratório, quanto em campo (TWARAKAVI; SAKAI; ŠIMŮNEK, 2009). Em estudos realizados em países de clima temperado, o potencial matricial de - 33 kPa é comumente utilizado para estimar a θ_{CC} , principalmente em solos argilosos. Já em países de clima tropical, a estimativa da θ_{CC} apresenta maior variabilidade, com valores de tensão entre - 6 a - 10 kPa como frequentemente utilizados (ANDRADE; STONE, 2011; RUIZ; FERREIRA; PEREIRA, 2003; dos SANTOS et al., 2013; AL MAJOU et al., 2022). O valor de -10 kPa será usada nesta dissertação.

A umidade na capacidade de campo pode ser estimada por métodos em campo e em laboratório. A estimativa em campo da θ_{CC} pode ocorrer pelo método do perfil instantâneo que se baseia na análise dos componentes da equação de Richards (HURTADO; CICHOTA; VAN LIER, 2005). Em laboratório os métodos da curva de retenção, que envolve a utilização de mesa de tensão, câmara de pressão de Richards (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) (TEIXEIRA et al. 2017) ou funil de Haines (CÁSSARO et al., 2008) e o método da centrífuga (SÁ; VIANA, 2017), são utilizados para essa estimativa da θ_{CC} .

Figura 3: a) Mesa de tensão; b) Câmara de pressão de Richards.



Fonte: autoria própria, 2024.

Dentre os métodos para estimar a θ_{CC} , as Funções de Pedotransferência (PTFs) se destacam por sua simplicidade e rapidez. Diversos estudos se dedicaram à estimativa da θ_{CC} utilizando PTFs com potencial matricial de -33 kPa, como: Almeida et al. (2010), Alvarenga et al. (2010), Gaiser, Graef e Cordeiro (2010), Nascimento et al. (2010), Andrade e Stone (2011), Michelin et al. (2010), Soares (2013), dos Santos et al. (2013), da Silva (2014), Soares et al. (2014), de Souza et al. (2014), Menegaz et al. (2015), Pequeno (2016), Nóbrega et al. (2022) e Rossetti et al. (2022).

Poucos autores se dedicaram à aplicação de PTFs com potencial matricial de 10 kPa, abrangendo uma ampla gama de solos e condições. Autores como Van den Berg et al. (1997) que desenvolveram PTFs para estimar θ_{CC} , θ_{PMP} e AD para Latossolos e outros solos com argilas de baixa atividade para dez países, incluindo solos brasileiros. Balbino et al. (2004) desenvolveram PTFs para estimar θ_{CC} a 10 e 33 kPa e θ_{PMP} a 1.500 kPa, para Latossolos Vermelhos de textura argilosa, no estado de Goiás. Assad et al. (2001) desenvolveram PTFs para estimar os limites superior (10 kPa) e inferior (1.500 kPa) de água disponível a partir do conteúdo de areia total para solos brasileiros.

Dionizio e Costa (2019) desenvolveram PTFs para estimar a θ_{CC} para solos do Oeste da Bahia, analisando a influência de cinco diferentes usos e cobertura do solo nesta propriedade. Giarola, Silva e Imhoff (2002), Urach (2007), Reichert et al. (2009) e Reichert et al. (2020) desenvolveram PTFs para estimar θ_{CC} e θ_{PMP} para solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

2.3. Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})

A umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou limite inferior de água disponível, desempenha um papel fundamental na determinação do volume e da disponibilidade de água no solo para as plantas, quando a água no solo está em um potencial, em módulo, igual ou maior que 1.500 kPa. O θ_{PMP} representa o valor da umidade do solo no qual a água, mesmo presente, não estará mais disponível para as plantas (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949).

Segundo Wiecheteck et al. (2020), em estudos pioneiros como de Briggs e Shantz (1912), Veihmeyer e Hendrickson (1928) e Richards e Weaver (1943), foi concluído que diferentes espécies de plantas murcham em potenciais semelhantes, independentemente também da textura do solo. Contudo, pesquisas posteriores observaram que o θ_{PMP} é um valor dinâmico, ou seja, o potencial da água que faz com que as plantas tenham uma murcha irreversível varia com as espécies de plantas, o estágio de desenvolvimento, a classe de solo e as condições ambientais (TEIXEIRA et al., 2023). Exemplos da variabilidade do potencial matricial do solo no θ_{PMP} são citados por Procópio et al. (2004). Em um estudo que determinou o potencial da água no solo, em solo Argissolo Vermelho Amarelo, mostrou variações de valores do θ_{PMP} entre 700 a 1.100 kPa para o girassol (*Helianthus annuus*), entre 1.050 a 1.610 kPa para tabaco (*Nicotiana attenuata*), entre 1.450 a 2.140 kPa para o milho (*Zea mays*), entre 2.050 a 3.860 kPa para wheatgrass (*Agropyron intermedium*) e de 3.470 kPa para Cassia (*Cassia fasciculata*).

Dentre as utilizações dos valores de θ_{PMP} , cita-se o cálculo do conteúdo de água disponível (AD) calculada pela subtração dos valores da umidade entre a capacidade de campo (θ_{CC}) e a θ_{PMP} (TEIXEIRA et al., 2021; VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949).

Reichardt e Timm (2004) definem θ_{CC} como a umidade do solo na qual, após a saturação, a drenagem interna praticamente cessa. A θ_{CC} pode ser afetada por muitos fatores,

mas é considerada a umidade volumétrica do solo na qual o sistema solo-água saturado inicialmente, com drenagem livre, atingiu o equilíbrio entre um e dois dias (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949).

Várias técnicas e métodos de medição da θ_{PMP} foram desenvolvidos ao longo dos anos, sendo os indiretos os mais comuns, dentre esses ressaltam-se o da câmara de pressão de Richards (TEIXEIRA et al. 2017), a psicrometria do ponto de orvalho (Figura 4) (KLEIN, 2017; MAESTÁ et al., 2019; TEIXEIRA; MARTINS; LUMBRERAS, 2020) e o método da centrífuga (SÁ; VIANA, 2017).

Figura 4: WP4C - Meter, EUA.



Fonte: autoria própria, 2024.

O método direto (fisiológico) para determinar o θ_{PMP} envolve o uso de uma planta indicadora submetida a um processo de estresse hídrico e recuperação da murcha em câmara escura e úmida. Esse processo é repetido até que a planta permaneça murcha durante 24 horas na câmara e então, obtém-se a umidade no ponto de murcha permanente (SANTOS et al. 2019).

A θ_{PMP} também pode ser estimada por funções matemáticas, chamadas de Funções de Pedotransferência (PTF). Dentre as PTFs que permitem estimar o θ_{PMP} de solos do Brasil tem-

se as propostas por: Tomasella e Hodnett (1998), Tomasella, Hodnett e Rossato (2000) e Tomasella et al. (2003), Tormena e da Silva (2002), de Mello et al. (2005), Fidalski e Tormena (2007), da Silva et al. (2008), Fiorin (2008), Barros et al. (2013), Medrado e Lima (2014) Barros e Jong van Lier (2014); Ottoni et al., (2018).

PTFs para estimar θ_{CC} , θ_{PMP} e AD foram desenvolvidas por Van den Berg et al. (1997) para Latossolos e outros solos com argilas de baixa atividade para dez países, incluindo solos brasileiros. Nascimento et al. (2010) também desenvolveram PTFs para estimar θ_{CC} e θ_{PMP} a específico para classes de solos, como Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos.

Tomasella e Hodnett (1998) desenvolveram equações para estimar o conteúdo de água em potenciais matriciais selecionados como a CC e o PMP para um conjunto de dados de solos amazônicos. PTFs para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 e -1.500 kPa e AD foram elaborados por Oliveira et al. (2002) para solos de Pernambuco. Estudos como Giarola, Silva e Imhoff (2002), Urach (2007) e Reichert et al. (2009) desenvolveram PTFs para estimar θ_{CC} e θ_{PMP} para solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

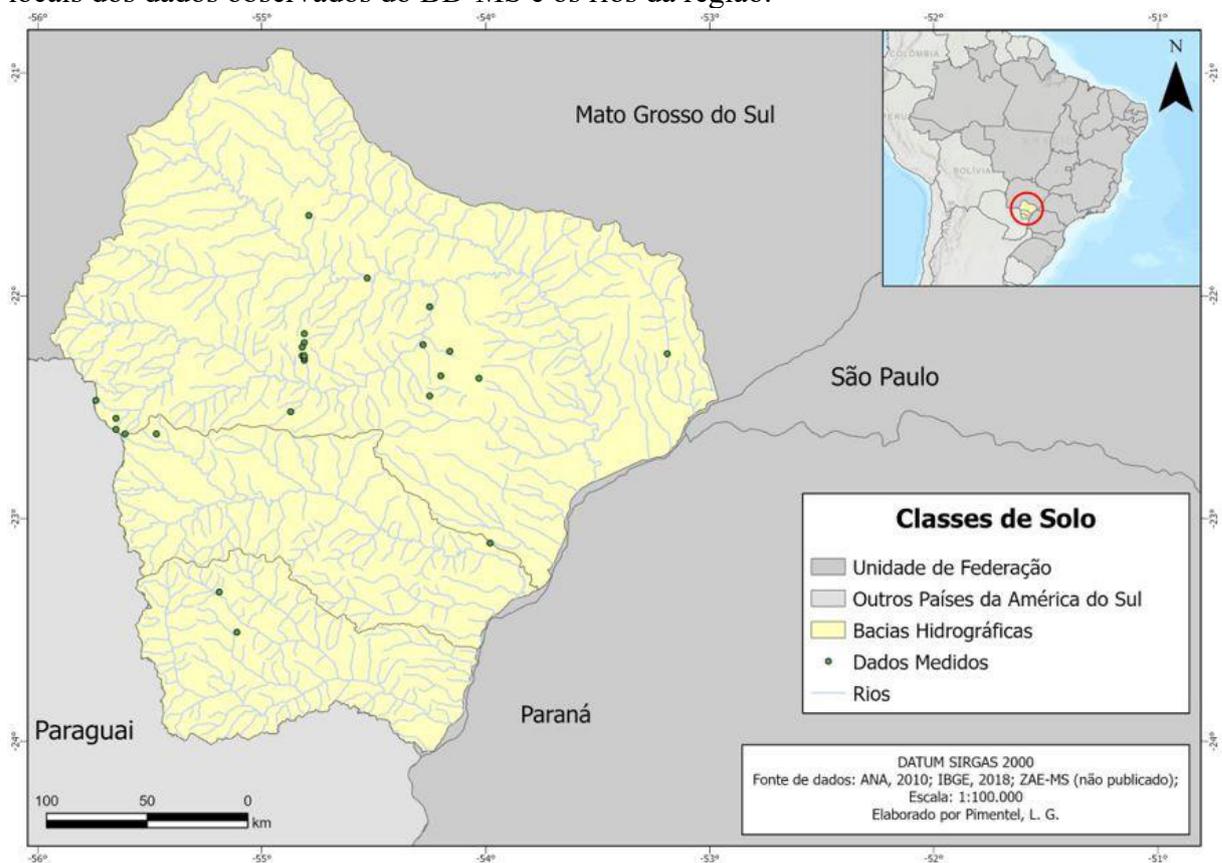
3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

A área de estudo se concentra nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi (no lado brasileiro), que se estendem pelo estado do Mato Grosso do Sul (Figura 5). Juntas, essas bacias abrangem uma área considerável de aproximadamente 64 mil km², englobando 37 municípios.

Conforme a classificação de Köppen, o clima na área de estudo é classificado como subtipo Cwa, caracterizado como clima mesotérmico úmido, verões quentes e inverno seco. A temperatura média anual é de 23,3 °C, com chuvas concentradas no período de verão entre 1.000 mm e 2.033 mm (FIETZ et al., 2024).

Figura 5: Mapa de localização das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi, mostrando locais dos dados observados do BD-MS e os rios da região.



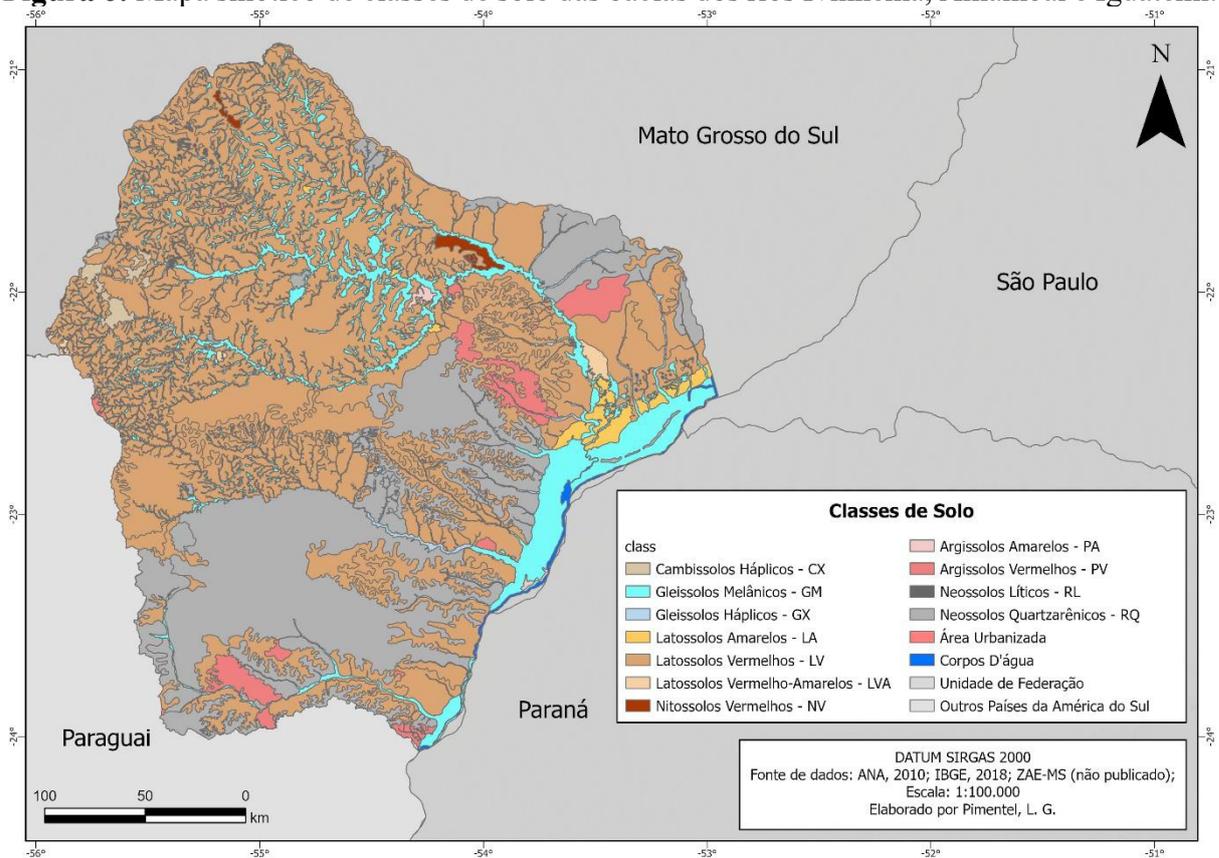
Fonte: ANA, 2010 e IBGE, 2021 e 2023, adaptado por Pimentel, L. G.

Os solos das bacias hidrográficas neste estudo estão passando por um processo de mapeamento abrangente. Com base em dados preliminares do Projeto Zoneamento Agroecológico do Mato Grosso do Sul (ZAE-MS), foi elaborada uma estimativa inicial das classes pedológicas predominantes na região (Figura 6).

Com este mapa preliminar, as áreas de cada classe taxonômica foram estimadas até o segundo nível categórico, em conjunto com o grupamento textural. As áreas de cada classe e grupamento textural foram calculadas em quilômetros quadrados e em porcentagem da área total de estudo.

A estimativa das áreas ocupadas pelas classes de solos foi realizada com uso os dados da legenda do mapa e a porcentagem de ocorrência em relação à área total da região de estudo. As áreas em quilômetros quadrados que cada classe textural ocupa também foram estimadas e compiladas.

Figura 6: Mapa sinótico de classes de solo das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.



Fonte: ANA, 2010; IBGE, 2018; ZAE-MS (não publicado); adaptado por Pimentel, L. G.

3.2. Densidade do solo

3.2.1. Seleção e descrição de dados da densidade do solo (Ds)

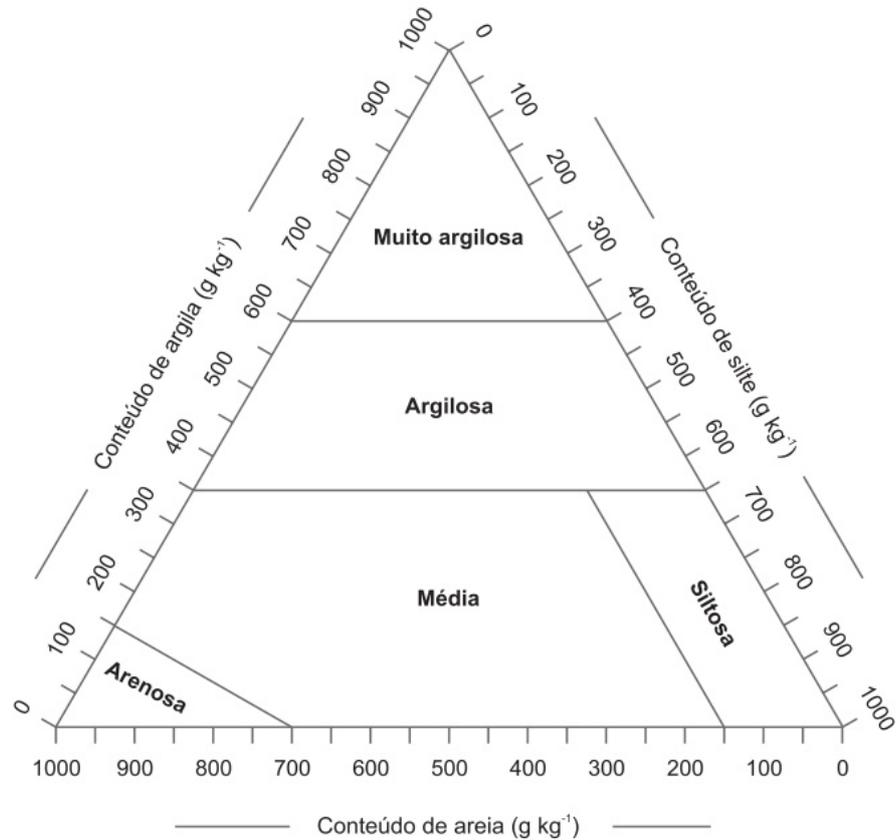
Um banco de dados (BD-MS_Ds) foi organizado com dados de densidade do solo (Ds) das três bacias da área de estudo, obtidos em trabalhos publicados. O BD-MS_Ds totaliza 88 dados de Ds observados, incluindo informações de teores de argila, silte, areia fina e grossa e carbono orgânico (CO).

O BD-MS_Ds também conta com dados de localização, como município, microbacia, coordenadas e elevação, além de classe de solo, sistemas de uso da terra, profundidade e classe textural.

Os dados de classe de solo e de classe textural foram harmonizados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (DOS SANTOS et al., 2023) e os sistemas de uso da terra pela legenda da Coleção 7 do MapBiomas (2023).

Os dados foram classificados segundo os grupos do grupamento textural utilizado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (DOS SANTOS et al., 2018). Os grupamentos texturais são a reunião de uma ou mais classes de textura de solos e compreende cinco classes (Figura 7).

Figura 7: Guia para grupamento de classes de textura.



Fonte: dos Santos et al., 2018

3.2.2. Sistema hierárquico para estimativa da densidade do solo (D_s)

3.2.2.1. Densidade do solo (D_s) para agrupamentos texturais

Devido ao número limitado de amostras disponíveis para avaliar a confiabilidade das estimativas de D_s para toda a região, e à ausência de dados para algumas das principais classes de solo e agrupamento textural, foi realizada uma análise exploratória com amostras de todo o Brasil, para estimar valores médios, medianos e variabilidade, utilizando boxplots. Essa análise foi feita com 1.446 dados obtidos dos bancos de dados de Ottoni et al. (2018) e Fontana et al. (2024).

3.2.2.2. Densidade do solo (Ds) utilizando parâmetros preditores

Foram feitas estimativas dos valores de Ds das amostras por onze PTFs-Ds calibradas para estimar Ds para solos do Brasil (Tabela 1). Foram consideradas apenas as amostras que estavam dentro da faixa de valores granulométricos e de conteúdo de carbono para as quais as PTFs-Ds foram desenvolvidas (domínio da função). Estas PTFs-Ds e os preditores necessários delas estão descritos na Tabela 1 e seus domínios na Tabela 2.

Tabela 1: Funções de pedotransferência, seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF-Ds.

Funções	Referências	Preditores	PTF	Nº	Regiões
		%			
PTF-Ds 1	Huf dos Reis et al, 2024 - 1	Areia, Argila	$Ds = 1.286 + 3.208 \times 10^{-3}x(\text{Areia}) - 2.013 \times 10^{-3}x(\text{Argila})$	3.050	Brasil
PTF-Ds 2	Huf dos Reis et al, 2024 - 2	Areia, Argila, CO	$Ds = 1.358 + 2.79 \times 10^{-3}x(\text{Areia}) - 2.328 \times 10^{-3}x(\text{Argila}) - 0.052(\text{CO})$	2.827	Brasil
PTF-Ds 3	Huf dos Reis et al, 2024 - 3	Areia f, Areia g, Argila	$Ds = 1.198 + 2.971 \times 10^{-3}x(\text{Areia f.}) + 4.472 \times 10^{-3}x(\text{Areia g.}) - 8.706 \times 10^{-4}x(\text{Argila})$	1.081	Brasil
PTF-Ds 4	Huf dos Reis et al, 2024 - 4	Areia f, Areia g, Argila, CO	$Ds = 1.243 + 2.983 \times 10^{-3}x(\text{Areia f.}) + 4.187 \times 10^{-3}x(\text{Areia g.}) - 5.793 \times 10^{-4}x(\text{Argila}) - 6.208 \times 10^{-2}x(\text{CO})$	990	Brasil
PTF-Ds 5	Tomasella e Hodnett, 1998	Argila, Silte, CO	$Ds = 1,578 - 0,058x(\text{CO}) - 0,006x(\text{Silte}) - 0,004x(\text{Argila})$	2.827	Amazônia
PTF-Ds 6	Bernoux et al, 1998 - 1	Argila	$Ds = 1,352 - 0,0045x(\text{Argila})$	2.955	Amazônia
PTF-Ds 7	Bernoux et al, 1998 - 2	Argila, CO	$Ds = 1,398 - 0,0047x(\text{Argila}) - 0,042x(\text{CO})$	2.711	Amazônia

Continuação

Funções	Referências	Preditores	PTF	Nº	Regiões
		%			
PTF-Ds 8	Benites et al, 2007 - 1	Argila	$D_s = 1,5224 - 0,0005x(\text{Argila})$	3.050	Brasil
PTF-Ds 9	Benites et al, 2007 - 2	Argila, CO	$D_s = 1,5688 - 0,0005x(\text{Argila}) - 0,009x(\text{CO})$	2.804	Brasil
PTF-Ds 10	Benites et al, 2007 - 3	Argila, CO	$D_s = 1,554 - 0,0004x(\text{Argila}) - 0,01x(\text{CO})$	423	Brasil
PTF-Ds 11	Benites et al, 2007 - 4	Argila, CO	$D_s = 1,567 - 0,0005x(\text{Argila}) - 0,006x(\text{CO})$	345	Brasil

Nº - número de amostras; Areia f - areia fina; Areia g - areia grossa; CO - carbono orgânico;

Fonte: autoria própria, 2024.

Tabela 2: Domínios dos preditores das funções de pedotransferência de Huf dos Reis et al. (2024), Tomasella e Hodnett (1998), Bernoux et al. (1998) e Benites et al. (2007).

Funções	Referências	Argila	Silte	Areia f	Areia g	Areia Total	CO
		-----%-----					
PTF-Ds 1	Huf dos Reis et al, 2024 - 1	0-96	NA	NA	NA	0-98,8	NA
PTF-Ds 2	Huf dos Reis et al, 2024 - 2	0-96	NA	NA	NA	0-98,8	0-9,8
PTF-Ds 3	Huf dos Reis et al, 2024 - 3	0-96	NA	0-97,2	0-97	NA	NA
PTF-Ds 4	Huf dos Reis et al, 2024 - 4	0-96	NA	0-97,2	0-97	NA	0-9,8
PTF-Ds 5	Tomasella e Hodnett, 1998	0-100	0-71	NA	NA	NA	NA
PTF-Ds 6	Bernoux et al, 1998 - 1	3,9-90,75	NA	NA	NA	NA	NA
PTF-Ds 7	Bernoux et al, 1998 - 2	3,9-90,75	NA	NA	NA	NA	0,04-12,16
PTF-Ds 8	Benites et al, 2007 - 1	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6
PTF-Ds 9	Benites et al, 2007 - 2	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6
PTF-Ds 10	Benites et al, 2007 - 3	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6
PTF-Ds 11	Benites et al, 2007 - 4	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6

Areia f - areia fina; Areia g - areia grossa; CO - carbono orgânico; NA - não se aplica;

Fonte: autoria própria, 2024.

A avaliação da confiabilidade das predições das PTFs-Ds foi baseada nos índices: raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) estimado usando a Equação 1 e no coeficiente de determinação (R^2), baseado na covariância entre os valores de Ds observados e preditos (Equação 2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

\hat{y}_i é a estimativa do valor predito;

\bar{y} é a média dos valores observados;

y_i é o valor observado;

A melhor confiabilidade média da predição entre as diferentes PTFs-Ds testadas é indicada por maiores valores de R^2 e dos menores valores de RMSE. A confiabilidade das estimativas das PTF-Ds foi estimada para o conjunto total de dados (88 amostras) e agrupadas por classe de solo, classe textural e sistema de uso do solo.

Gráficos de correlação 1:1 entre os dados preditos e os observados de Ds foram feitos para as cinco PTFs-Ds que apresentaram os menores RMSE (Huf dos Reis et al. 2024).

Foram feitas análises gráficas de dispersão de resíduos *versus* valores preditos em relação às classes de solos, as classes texturais e dos sistemas de uso da terra.

3.3. Seleção e descrição de dados da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})

Este estudo compilou dados de θ_{CC} (-10 kPa) e θ_{PMP} (-1500 kPa) dos solos na área de estudo, totalizando 30 avaliações. As informações foram obtidas de trabalhos publicados e organizados em bancos de dados denominado BD-MS_CC e BD-MS_PMP (FIETZ, 1998; URCHEI, 2001; SCORZA; SILVA, 2006). Além da θ_{CC} e θ_{PMP} , foram coletados dados adicionais sobre os teores de argila, silte, areia total, matéria orgânica (MO) e densidade do solo. Para cada local de coleta de amostra, também foram registradas informações sobre a microbacia, município, coordenadas geográficas (latitude, longitude e datum WGS84), altitude, classe de solo, textura do solo e sistema de uso da terra. A fim de garantir a padronização, as

classes de solo e textura foram harmonizadas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (DOS SANTOS et al., 2018). Já as classes de uso da terra foram categorizadas conforme a legenda proposta na Coleção 7 do MapBiomias (2023).

3.4. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (- 10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa)

3.4.1. Sistema hierárquico para estimativa da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa)

3.4.1.1. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) para grupamentos texturais

Devido ao número limitado de amostras disponíveis para avaliar a confiabilidade das estimativas de θ_{CC} e θ_{PMP} para toda a região, e à ausência de dados para algumas das principais classes de solo e grupamento textural, foi realizada uma análise exploratória com amostras de todo o Brasil, para estimar valores médios, medianos e variabilidade, utilizando boxplots. Essa análise foi feita com 1.320 dados de θ_{CC} e 1.538 dados de θ_{PMP} obtidos dos bancos de dados de Ottoni et al. (2018) e Fontana et al. (2024).

3.4.1.2. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) para classes de solos e grupamentos texturais

Para ampliar a análise da estimativa de θ_{CC} e θ_{PMP} somente por grupamento textural, foram calculadas as médias, medianas e intervalos de confiança (IC) dos valores estimados de θ_{CC} e θ_{PMP} para cada grupamento textural dentro de classe de solo. Esses valores foram obtidos

dos mesmos dados utilizados para os grupamentos texturais (OTTONI et al., 2018; FONTANA et al., 2024).

3.4.1.3. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) (-10 kPa) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) utilizando parâmetros preditores

Foram obtidas estimativas dos valores θ_{CC} e θ_{PMP} por doze equações de PTFs- θ_{CC} e onze equações de PTFs- θ_{PMP} calibradas para solos do Brasil (

Tabela 3 e Tabela 4). Como preditores foram utilizados dados de areia, silte e argila e densidade do solo. As PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP} de Reichert et al. (2009) - 1 e Reichert et al. (2020) utilizam também o teor de matéria orgânica (MO) como uma das variáveis preditoras. A MO (%) foi estimada a partir da equação de van Bemelen $MO = CO (\%) \times 1,724$, onde CO é o teor, em %, de carbono orgânico (TEIXEIRA et al., 2017). Para investigar a influência de propriedades do solo na estimativa de θ_{CC} e θ_{PMP} , foram realizadas análises gráficas entre os teores de argila e teores de carbono orgânico *versus* os dados observados de θ_{CC} e θ_{PMP} .

As PTFs de Assad et al. (2001), Dionizio e Costa (2019), Giarola, Silva e Imhoff (2002), Urach (2007), van den Berg et al. (1997) apresentam os resultados com base em umidade volumétrica, e as PTFs- θ_{CC} de Balbino et al. (2004), Reichert et al. (2009) e Reichert et al. (2020) os resultados de umidade são em base gravimétrica. Para interpretação dos dados, transformaram-se os valores estimados de umidade do solo em base gravimétrica para base volumétrica utilizando os valores de densidade do solo (

Tabela 3).

Tabela 3: Funções de pedotransferência, seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF- θ_{CC} .

Funções	Referências	Preditores	PTF	Nº	Regiões
		%	θ_{CC}		
PTF- θ_{CC} 1	Assad et al. (2001)	Areia	$\theta_{CC} = 39,07988535 - 0,04098682x(\text{Areia})^{1,4554565}$	238	Brasil
PTF- θ_{CC} 2	Balbino et al. (2004) *	Argila	$\theta_{CC} = 0,331x\text{Argila} + 8,3$	140	Goiás

PTF- θ_{CC} 3	Dionizio e Costa (2019)	Ds	$\theta_{CC} = 0,46082 - 0,18014xDs$	22	Bahia
----------------------	-------------------------	----	--------------------------------------	-----------	-------

Continuação.

Funções	Referências	Preditores	PTF	Nº	Regiões
		%	θ_{CC}		
PTF- θ_{CC} 4	Giarola, Silva e Imhoff (2002)	Argila, Silte	$\theta_{CC} = 0,081 + 0,005xSilte + 0,004xArgila$	35	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{CC} 5	Reichert et al. (2009) - 1*	Argila, Silte, MO	$\theta_{CC} = 0,268 + 0,05xArgila + 0,24x(Argila + Silte) + 0,85xMO - 0,127xDs$	294	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{CC} 6	Reichert et al. (2009) - 2*	Argila, Silte	$\theta_{CC} = 0,037 + 0,38x(Argila + Silte)$	358	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{CC} 7	Reichert et al. (2020) *	Argila, Areia, MO	$\theta_{CC} = 364 * 27,8x\log(MO) + 0,012 * Argila - 0,37xAreia$	44	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{CC} 8	Urach (2007) - 1	Areia, Silte, Ds	$\theta_{CC} = 0,40971 - 0,00268xAreia - 0,00123xSilte + 0,000$	253	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{CC} 9	Urach (2007) - 2	Areia, Ds	$\theta_{CC} = 0,718 - 0,00274xAreia - 0,26307xDs$	86	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{CC} 10	Urach (2007) - 3	Areia, Argila, Ds	$\theta_{CC} = 49,6557 - 0,16882xAreia + 0,21658xArgila - 12,6897xDs$	624	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{CC} 11	Van den Berg et al. (1997) - 1	Argila	$\theta_{CC} = 13,96 + 0,387xArgila$	91	Brasil
PTF- θ_{CC} 12	Van den Berg et al. (1997) - 2	Argila, Silte	$\theta_{CC} = 11,27 + 0,367xArgila + 0,226xSilte$	91	Brasil

*Preditores estão em $g\ kg^{-1}$; N° - número de amostras; Ds - Densidade do Solo; MO - Matéria Orgânica; Fonte: autoria própria, 2024.

As PTFs de Rosseti et al. (2022), Urach (2007), Giarola, Silva e Imhoff (2002), Tomasella e Hodnett (1998), Van den Berg et al. (1997) apresentam os resultados com base em umidade volumétrica, e as PTFs- θ_{PMP} de Nascimento et al. (2010), Oliveira et al. (2002) e

Reichert et al. (2009), os resultados são umidade em base gravimétrica. Para interpretação dos dados, transformaram-se os valores estimados de umidade do solo em base gravimétrica para base volumétrica utilizando os valores de densidade do solo (Tabela 4).

Tabela 4: Funções de pedotransferência, seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF- θ_{PMP} .

Funções	Referências	Preditores	PTF	Nº	Regiões
		%	θ_{PMP}		
PTF- θ_{PMP} 1	Rosseti et al. (2022)	Argila, Areia	$\theta_{PMP} = 0,386 - 0,004 \times \text{Areia} - 0,002 \times \text{Argila}$	156	Mato Grosso
PTF- θ_{PMP} 2	Nascimento et al. (2010)	Argila	$\theta_{PMP} = 0,0221 + 0,000288 \times \text{Argila}$	874	Brasil
PTF- θ_{PMP} 3	Urach (2007)	Areia, Silte, Ds	$\theta_{PMP} = 0,462 - 0,00022 \times \text{Areia} - 0,000044 \times \text{Silte} - 0,1838 \times \text{Ds}$	86	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{PMP} 4	Giarola, Silva e Imhoff (2002) - A	Argila, Silte	$\theta_{PMP} = -0,031 + 0,005 \times \text{Silte} - 0,003 \times \text{Argila}$	35	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{PMP} 5	Giarola, Silva e Imhoff (2002) - B	Argila, Silte	$\theta_{PMP} = 0,024 + 0,005 \times \text{Silte} - 0,003 \times \text{argila}$	35	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{PMP} 6	Tomasella e Hodnett. (1998)	Argila, Silte, Ds	$\theta_{PMP} = (0,91 + 0,15 \times \text{silte} + 0,396 \times \text{argila}) \times \text{Ds} \times 0,01$	838	Amazônia
PTF- θ_{PMP} 7	Oliveira et al. (2002)	Argila, Silte, Areia, Ds	$\theta_{PMP} = 0,000038 \times \text{areia} + 0,000153 \times \text{silte} + 0,000341 \times \text{argila} - 0,030861 \times \text{Ds}$	467	Pernambuco
PTF- θ_{PMP} 8	Van den Berg et al. (1997) - 1	Argila	$\theta_{PMP} = 3,83 + 0,272 \times \text{argila} + 0,212 \times \text{silte}$	91	Brasil
PTF- θ_{PMP} 9	Van den Berg et al. (1997) - 2	Argila, Silte	$\theta_{PMP} = 6,35 + 0,284 \times \text{argila}$	91	Brasil
PTF- θ_{PMP} 10	Reichert et al. (2009) - 1	Argila, Argila+Silte, MO, Ds	$\theta_{PMP} = -0,04 + 0,15 \times \text{argila} + 0,17 \times (\text{argila} + \text{silte}) + 0,91 \times \text{MO} + 0,026 \times \text{Ds}$	307	Rio Grande do Sul

PTF- θ_{PMP} 11	Reichert et al. (2009) - 2	Argila, Areia	$\theta_{PMP}=0,236 + 0,045x_{argila} - 0,21x_{areia}$	685	Rio Grande do Sul
------------------------	----------------------------	---------------	--	-----	-------------------

Nº - número de amostras; Ds - Densidade do Solo; MO - Matéria Orgânica;

Fonte: autoria própria, 2024.

3.4.1.4. Domínios das PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP}

O domínio de uma equação é o conjunto de todos os valores válidos para a variável que satisfazem a equação, sem resultar em expressões matemáticas indefinidas ou inconsistentes.

Para a utilização judiciosa de uma PTF, é fundamental verificar se os valores dos preditores utilizados na função estão dentro do intervalo (valores mínimos e máximos) dos dados que foram utilizados para calibrar as PTFs. A validade da PTF em um determinado caso só é garantida se todos os preditores estiverem dentro dos intervalos apresentados nas Tabela 5 e

Fonte: autoria própria, 2024.

Tabela 6.

Tabela 5: Domínios dos preditores das funções de pedotransferência para estimativa de θ_{CC} .

Funções	Referências	Ds	Argila	Silte	Areia Total	MO
		g cm ⁻³	-----%			
PTF- θ_{CC} 1	Assad et al. (2001)	NA	NA	NA	2-92	NA
PTF- θ_{CC} 2	Balbino et al. (2004)*	NA	NA	NA	NA	NA
PTF- θ_{CC} 3	Dionizio e Costa (2019)	NA	NA	NA	NA	NA
PTF- θ_{CC} 4	Giarola, Silva e Imhoff (2002)	NA	6-81	9,9-41,8	NA	NA
PTF- θ_{CC} 5	Reichert et al. (2009) - 1*	NA	10-820	10-780	NA	0-10
PTF- θ_{CC} 6	Reichert et al. (2009) - 2*	NA	10-820	10-780	NA	NA
PTF- θ_{CC} 7	Reichert et al. (2020) *	NA	19-360	NA	37-322	0,5-17
PTF- θ_{CC} 8	Urach (2007) - 1	1,91-1,63	NA	4,2-67,6	1,2-72,7	NA
PTF- θ_{CC} 9	Urach (2007) - 2	0,88-1,51	NA	NA	3,7-95,8	NA
PTF- θ_{CC} 10	Urach (2007) - 3	0,86-1,85	1,22-82	NA	3,5-98,7	NA
PTF- θ_{CC} 11	Van den Berg et al. (1997) - 1	NA	10-95	NA	NA	NA
PTF- θ_{CC} 12	Van den Berg et al. (1997) - 2	NA	10-95	NA	NA	NA

*Preditores estão em g kg⁻¹; MO - matéria orgânico; Ds - densidade do solo; NA - não se aplica;

Fonte: autoria própria, 2024.

Tabela 6: Domínios dos preditores das funções de pedotransferência para estimativa de θ_{PMP} .

Funções	Referências	Ds g cm ⁻³	Argila -----%	Silte	Areia Total	MO
PTF- θ_{PMP} 1	Rosseti et al. (2022)	NA	2,82-74,45	NA	14,27-96,04	NA
PTF- θ_{PMP} 2	Nascimento et al. (2010)	NA	2-96	NA	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 3	Urach (2007)	0,88-1,51	NA	2,1-78	3,7-95,8	NA

Continuação.

Funções	Referências	Ds g cm ⁻³	Argila -----%	Silte	Areia Total	MO
PTF- θ_{PMP} 4	Giarola, Silva e Imhoff (2002) - A	NA	6-81	9,9-41,8	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 5	Giarola, Silva e Imhoff (2002) - B	NA	6-81	9,9-41,8	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 6	Tomasella e Hodnett (1998)	0,72-1,91	1,7-96	0-71	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 7	Oliveira et al. (2002)*	1,02-2,06	20-830	10-457	50-950	NA
PTF- θ_{PMP} 8	Van den Berg et al. (1997) - 1	NA	10-95	NA	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 9	Van den Berg et al. (1997) - 2	NA	10-95	NA	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 10	Reichert et al. (2009) - 1	0,86-1,85	1-82	1-78	NA	0-10
PTF- θ_{PMP} 11	Reichert et al. (2009) - 2	NA	1-82	NA	1-99	NA

*Preditores estão em g kg⁻¹; MO - matéria orgânica; Ds - densidade do solo; NA - não se aplica;

Fonte: autoria própria, 2024.

3.4.1.5. Testes de confiabilidade das predições das PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP}

Para o teste de confiabilidade das predições das PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP} , foram considerados dois indicadores, a raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês Root Mean Square Error), estimado usando a Equação 1 e os coeficientes de determinação (R^2) que é calculado baseado na covariância entre os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} observados e θ_{CC} e θ_{PMP} preditos (Equação 2). Indicam menor discrepância entre os dados observados e previstos, as PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP} com menores valores de RMSE, próximos a 0,0 e indicam melhor ajuste dos dados à relação entre θ_{CC} e θ_{PMP} observado e θ_{CC} e θ_{PMP} previsto, as PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP} com

maiores valores de R^2 , próximos a 1,0. Foram consideradas com maior confiabilidade para estimar a θ_{CC} e θ_{PMP} no contexto do estudo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=n}^N (y_i - \underline{y_i})^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=n}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \underline{y_i})^2} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

\hat{y}_i é a estimativa do valor;

$\underline{y_i}$ é a média dos valores observados;

y_i é o valor observado;

Para validar a confiabilidade das estimativas das PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP} , utilizou-se o conjunto de 30 dados de θ_{CC} e θ_{PMP} observados em relação com os valores preditos. Análises gráficas de dispersão de resíduos *versus* valores preditos e gráficos de correlação 1:1 entre os dados preditos e os observados de θ_{CC} e θ_{PMP} foram avaliadas para as PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP} que apresentaram os menores RMSE e maiores valores de R^2 .

Nos gráficos de correlação 1:1, a precisão é maior quanto menor a dispersão dos pontos em relação à linha principal.

4. RESULTADOS

4.1. Solos da Área de Estudo

Na área de estudo ocorre a predominância dos Latossolos Vermelhos que ocupam 55,5% da extensão territorial (Tabela 7). Em seguida, vêm os Neossolos Quartzarênicos (17%) e os Nitossolos Vermelhos (8,5%).

Tabela 7: Área estimada das classes de solo a partir do mapa preliminar de solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi e do estado do Mato Grosso do Sul.

Classes de solo	Área (km ²)	Área (%)
Argissolo Amarelo	212,4	0,3
Argissolo Vermelho	2374,5	3,6
Cambissolo Háptico	238,0	0,4
Chernossolo Argilúvico	0,6	0,0
Gleissolo Háptico	1176,1	1,8
Gleissolo Melânico	4902,9	7,5
Latossolo Amarelo	488,5	0,7
Latossolo Vermelho	35309,0	55,6
Latossolo Vermelho-Amarelo	679,0	1,0
Neossolo Litólico	59,6	0,1
Neossolo Quartzarênico	11151,0	16,8
Nitossolo Vermelho	5660,5	8,7
Organossolo Háptico	322,5	0,3
Organossolo Fólico	216,1	2,5
Planossolo Háptico	1643,1	0,0
Plintossolo Argilúvico	27,2	0,5

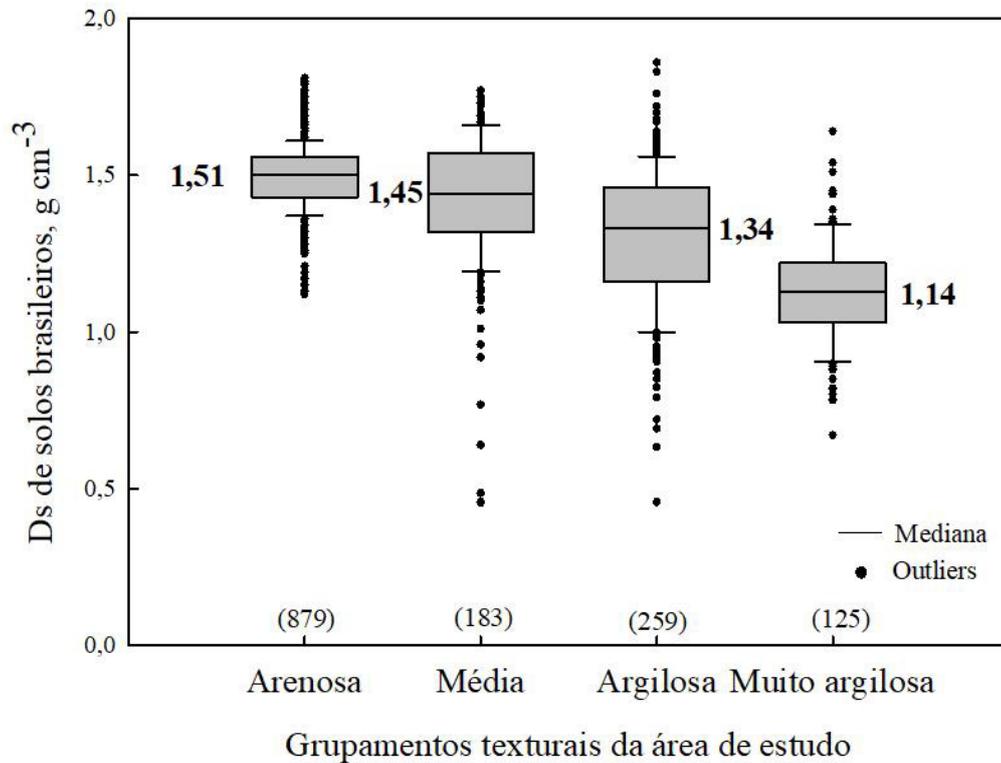
Fonte: autoria própria, 2024.

4.2. Densidade do Solo (Ds) estimada utilizando parâmetros preditores

Os valores medianos de Ds de solos do Brasil dos grupamentos texturais que ocorrem na área de estudo, estão sintetizados na Figura 8: Densidade do solo (Ds) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.. Para os solos do Mato Grosso do Sul, foram observadas quatro classes de valores de Ds em função dos grupamentos texturais: média, arenosa, muito argilosa e argilosa. Os resultados mostram valores medianos na faixa de 1,14 a 1,51 g cm⁻³.

O grupamento textural que abrange a classe arenosa apresenta menor dispersão dos dados, evidenciado pelo tamanho reduzido do boxe, sugerindo que a textura do solo é um fator importante na determinação da Ds (HUF DOS REIS et al., 2024) (Figura 8: Densidade do solo (Ds) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.). A menor dispersão e outliers para a estimativas da Ds sugerem que funções mais simples podem ser suficientes para estimar essa propriedade do solo nos grupamentos arenoso e muito argiloso. Isso pode reduzir a complexidade das análises e aumentar a confiabilidade dos resultados.

Figura 8: Densidade do solo (Ds) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.



Fonte: autoria própria, 2024.

4.3. Densidade do Solo (Ds) estimada por PTFs

Os dados de Ds disponíveis no BD-MS_Ds compreendem quatro classes de solo conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (DOS SANTOS et al., 2023). A classe de solo com maior número de dados é o Latossolo Vermelho, com 75 amostras. As outras classes que têm dados de Ds na região estudada são os Plintossolos Argilúvicos, os Argissolos Vermelho Amarelos e o Neossolo Quartzarênico com, respectivamente, 5, 4 e 4 amostras. As 88 amostras disponíveis estão distribuídas em oito classes texturais. A textura muito argilosa é mais frequente com 34 amostras, e apenas uma amostra apresenta textura franco argilosa.

Cinco sistemas de uso da terra foram identificados, classificados como formação florestal e pastagem os que apresentaram os maiores números de amostras com 35 e 27 amostras, respectivamente. Os sistemas que não foram possíveis de ser classificados estão denominados de mosaico de usos com cinco amostras, esse sistema de uso da terra não foi considerado nas análises de confiabilidade para sistemas de uso.

Na Tabela 8 são mostrados os intervalos de valores (máximo-mínimo) dos teores de argila, silte, areia fina, areia grossa e carbono orgânico das amostras que foram usados como preditores para as estimativas da Ds, com essas faixas é possível verificar se atendem o domínio dos parâmetros preditores com o qual as equações foram ajustadas.

Os dados de Ds variaram entre 0,91 a 1,80 g cm⁻³, apresentando valor médio de 1,32 g cm⁻³. Os teores de argila variaram entre 3 e 77% com valor médio de 41%. Os valores de carbono orgânico variaram entre 0,10 a 2,92% com valor médio de 0,76% (Tabela 8).

Tabela 8: Estatística descritiva dos valores de densidade do solo (Ds), frações granulométricas, e teores de carbono orgânico (CO) para o banco de dados de solos (BD-MS_Ds) do Mato Grosso do Sul.

Estatística descritiva	Ds	Argila	Silte	Areia total	Areia fina	Areia grossa	CO
	g cm ⁻³	-----%-----					
Máximo	1,80	77	34	93	56	51	2,92
Mínimo	0,91	3	3	11	5	2	0,10
Média	1,32	41	12	48	26	21	0,76
Mediana	1,40	54	11	27	16	10	0,71
Desvio padrão	0,23	26	7	29	15	16	0,73

Fonte: autoria própria, 2024.

A melhor confiabilidade entre as onze PTF-Ds avaliadas é indicada pelos menores valores de RMSE e maiores valores de R² (**Tabela 9**).

Entre as PTFs-Ds avaliadas, a proposta por Benites et al. (2007), identificada como PTF-Ds 11, exibiu o maior RMSE, alcançando um valor de 0,290 g cm⁻³. Por outro lado, a PTF-Ds 3, também de autoria de Benites et al. (2007) e identificada como PTF-Ds 10, demonstrou o R² mais baixo, com um valor de 0,299. Esses resultados sugerem que essas funções exibiram as menores confiabilidades entre as equações analisadas (

Tabela 9).

A constatação de um valor reduzido de R^2 , como o observado nas propostas de Benites et al. (2007), que foi da ordem de 0,11, também foi corroborada por Souza et al. (2016). Este último estudo estimou os valores de densidade de solo (Ds) para 242 amostras de solo na bacia do rio Doce, localizada em Minas Gerais. Os autores atribuíram a diminuta confiabilidade das PTFs-Ds a uma elevada variabilidade presente no conjunto de dados utilizado para o desenvolvimento dessas equações.

As PTFs-Ds 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) obtiveram na combinação dos indicadores de confiabilidade, os melhores índices (baixos RMSE e altos R^2) dentre as onze PTFs testadas.

Reforçando a tese acima, de acordo com De Vos et al. (2005), uma PTF-Ds apresenta uma confiabilidade satisfatória quando o RMSE está entre 0,12 e 0,25 g cm⁻³. Seguindo este critério, as PTFs-Ds 1, 2, 3, 4 e 5 mostraram boa confiabilidade para os solos do Mato Grosso do Sul quando analisados de forma global, sem distinção de classe textural, classe de solo e por uso da terra.

As PTFs-Ds de Huf et al. (2024) foram desenvolvidas num sistema hierárquico com a inclusão de diferentes parâmetros preditores da Ds. A inclusão de maior número de parâmetros preditores não necessariamente melhoram os índices de confiabilidade (RMSE e R^2) (

Tabela 9).

Neste estudo, as PTFs-Ds 2 e 3 obtiveram boas confiabilidades, com RMSE próximos aos encontrados pelas PTFs-Ds 2 e 3 de Huf dos Reis et al. (2024) ($0,16 \text{ g cm}^{-3}$) (

Tabela 9).

A PTF-Ds 1 de Huf dos Reis et al., (2024) que utilizou somente dados de argila e areia, apresentou o valor de RMSE de $0,167 \text{ g cm}^{-3}$. A PTF-Ds 2, que utiliza como preditores argila, areia e CO, teve aumento de RMSE para $0,170 \text{ g cm}^{-3}$. A PTF-Ds 3, que não utiliza CO, mas fraciona a areia total em areia fina e grossa, reduziu o valor da RMSE para $0,163 \text{ g cm}^{-3}$, sendo a que apresentou melhor confiabilidade dentre as quatro PTFs-Ds propostas por Huf et al., (2024). A PTF-Ds 4 que tem como preditores argila, areia fina, areia grossa e CO neste estudo, apresentou um valor de $0,167 \text{ g cm}^{-3}$, mostrando que nem sempre o acréscimo de mais variáveis preditoras aumentará a confiabilidade.

Tomasella e Hodnett (1998) desenvolveram a PTF-Ds 5 a partir de resultados de Ds avaliados em solos da Amazônia e encontraram um valor de R^2 de 0,60. Huf dos Reis et al (2024), utilizando dados de Ds de todo o Brasil estimou um RMSE de $0,20 \text{ g cm}^{-3}$ e R^2 de 0,37 para a PTF-Ds 5. Boschi et al. (2018) avaliou um conjunto com 884 amostras de solo para todos os biomas brasileiros e constatou que PTF-Ds 5 apresentou um valor de R^2 de 0,40 e RMSE de $0,19 \text{ g cm}^{-3}$. Benites et al. (2007) utilizando a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) encontrou um RMSE de $0,28 \text{ g cm}^{-3}$ num estudo com 613 amostras. O presente trabalho também encontrou boa confiabilidade para a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998), que obteve um valor RMSE de $0,17 \text{ g cm}^{-3}$ o terceiro menor valor dentre as PTFs-Ds testadas (

Tabela 9).

Tabela 9: Estimativas da confiabilidade das predições (Root Mean Square Error – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da densidade do solo (Ds) para as onze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.

Funções	Referências	RMSE	R^2
PTF-Ds 1	Huf dos Reis et al, 2024 - 1	0,1677	0,338
PTF-Ds 2	Huf dos Reis et al, 2024 - 2	0,1707	0,333
PTF-Ds 3	Huf dos Reis et al, 2024 - 3	0,1635	0,336
PTF-Ds 4	Huf dos Reis et al, 2024 - 4	0,1671	0,320
PTF-Ds 5	Tomasella e Hodnett, 1998	0,1685	0,318
PTF-Ds 6	Bernoux et al, 1998 - 1	0,2246	0,335
PTF-Ds 7	Bernoux et al, 1998 - 2	0,2022	0,336
PTF-Ds 8	Benites et al, 2007 - 1	0,2621	0,335
PTF-Ds 9	Benites et al, 2007 - 2	0,2895	0,317
PTF-Ds 10	Benites et al, 2007 - 3	0,2818	0,299
PTF-Ds 11	Benites et al, 2007 - 4	0,2902	0,330

Fonte: autoria própria, 2024.

Foram obtidos os valores de RMSE por classe de solo, classe textural e uso da terra, apresentados na

Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12. Os RMSEs reduziram seus valores quando classificados por esses critérios, menos para a classe de solo Plintossolo Argilúvico (

Tabela 10), classe textural franco arenosa e muito argilosa (Tabela 11) e sistema de uso da terra Agricultura (Tabela 12).

A PTF-Ds 3 desenvolvida por Huf dos Reis et al. (2024) obteve a melhor confiabilidade dentre os cinco modelos quando analisados todos os dados do Mato Grosso do Sul em conjunto (RMSE = 0,163 g cm⁻³), porém quando o conjunto de dados foi analisado separadamente, pelos sistemas de uso, classe de solo e classe textural, as PTFs-Ds apresentam confiabilidades diferentes.

A PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998), que obteve a quarta melhor confiabilidade com todos os dados, foi o que apresentou maior melhora nos valores de RMSE quando os dados foram analisados separadamente. Considerando os dados mais representativos (maior número de amostras), a PTF-Ds 5 apresentou maior confiabilidade ao estimar a Ds para Latossolos Vermelhos (RMSE = 0,154 g cm⁻³) (

Tabela 10).

Tabela 10: Estimativas das incertezas das previsões (*Root Mean Square Error* – RMSE) da densidade do solo (Ds), por classe de solo dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.

Classe de solo	Huf dos	Huf dos	Huf dos	Huf dos	Tomasella	Nº de amostras
	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 1	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 2	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 3	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 4	e Hodnett, 1998 - PTF-Ds 5	
-----RMSE-----						
Argissolo Vermelho Amarelo	0,056	0,065	0,049	0,043	0,049	4
Latossolo Vermelho Neossolo	0,163	0,167	0,156	0,161	0,154	75
Quartzarênico	0,121	0,140	0,084	0,102	0,073	4
Plintossolo Argilúvico	0,291	0,277	0,313	0,304	0,307	5

Números em negrito indicam os RMSEs para as amostras mais representativas de classe textural;

Fonte: autoria própria, 2024.

A PTF-Ds 1 de Huf dos Reis et al. (2024) se mostrou com maior confiabilidade ao estimar Ds em solos de textura muito argilosa com RMSE de $0,206 \text{ g cm}^{-3}$ e a PTF-Ds 4 de Huf dos Reis et al. (2024) obteve menor RMSE ao estimar Ds para solos com textura franco argilo-arenosa (RMSE = $0,148 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabela 11).

Tabela 11: Estimativas das incertezas das previsões (*Root Mean Square Error* – RMSE) da densidade do solo (Ds), por classe textural dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.

Classe textural	Huf dos	Huf dos	Huf dos	Huf dos	Tomasella e	Nº de amostras
	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 1	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 2	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 3	Reis et al, 2024 - PTF-Ds 4	Hodnett, 1998 - PTF-Ds 5	
-----RMSE-----						
Areia	0,118	0,133	0,083	0,095	0,067	3
Areia Franca	0,099	0,105	0,081	0,080	0,065	8
Argilo arenosa	0,052	0,070	0,036	0,065	0,043	2
Argilosa	0,219	0,203	0,229	0,209	0,261	5
Franco argilo-arenosa	0,167	0,157	0,161	0,148	0,157	19
Franco arenosa	0,409	0,396	0,401	0,385	0,397	16
Franco argilosa	0,005	0,098	0,045	0,170	0,115	1
Muito argilosa	0,206	0,216	0,207	0,219	0,212	34

Números em negrito indicam os RMSEs para as amostras mais representativas de classe textural;

Fonte: autoria própria, 2024.

A PTF-Ds 5 também apresentou maior confiabilidade ao estimar a Ds e para os sistemas de usos da terra, Formação florestal (RMSE = $0,091 \text{ g cm}^{-3}$) e Formação savânica (RMSE = $0,075 \text{ g cm}^{-3}$). Além disso a PTF-Ds 1 também se mostrou com maior confiabilidade ao estimar Ds em sistemas de Pastagem com RMSE de $0,160 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 12)

A não redução do RMSE quando agrupados em classe de uso do solo em especial para a classe agricultura deve estar relacionado a solos compactados e não compactados do mesmo grupamento textural (Tabela 12).

Tabela 12: Estimativas das incertezas das predições (*Root Mean Square Error* – RMSE) da densidade do solo (Ds), por uso da terra dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.

Uso da terra	Huf dos Reis et al, 2024 - PTF-Ds 1	Huf dos Reis et al, 2024 - PTF-Ds 2	Huf dos Reis et al, 2024 - PTF-Ds 3	Huf dos Reis et al, 2024 - PTF-Ds 4	Tomasella e Hodnett, 1998 - PTF-Ds 5	Nº de amostras
-----RMSE-----						
Agricultura	0,313	0,339	0,312	0,337	0,339	10
Formação florestal	0,120	0,118	0,111	0,109	0,091	35
Formação savânica	0,112	0,099	0,097	0,079	0,075	11
Mosaico de usos	0,172	0,148	0,169	0,151	0,123	5
Pastagem	0,160	0,162	0,161	0,163	0,185	27

Números em negrito indicam os RMSEs para as amostras mais representativas de classe textural;

Fonte: autoria própria, 2024.

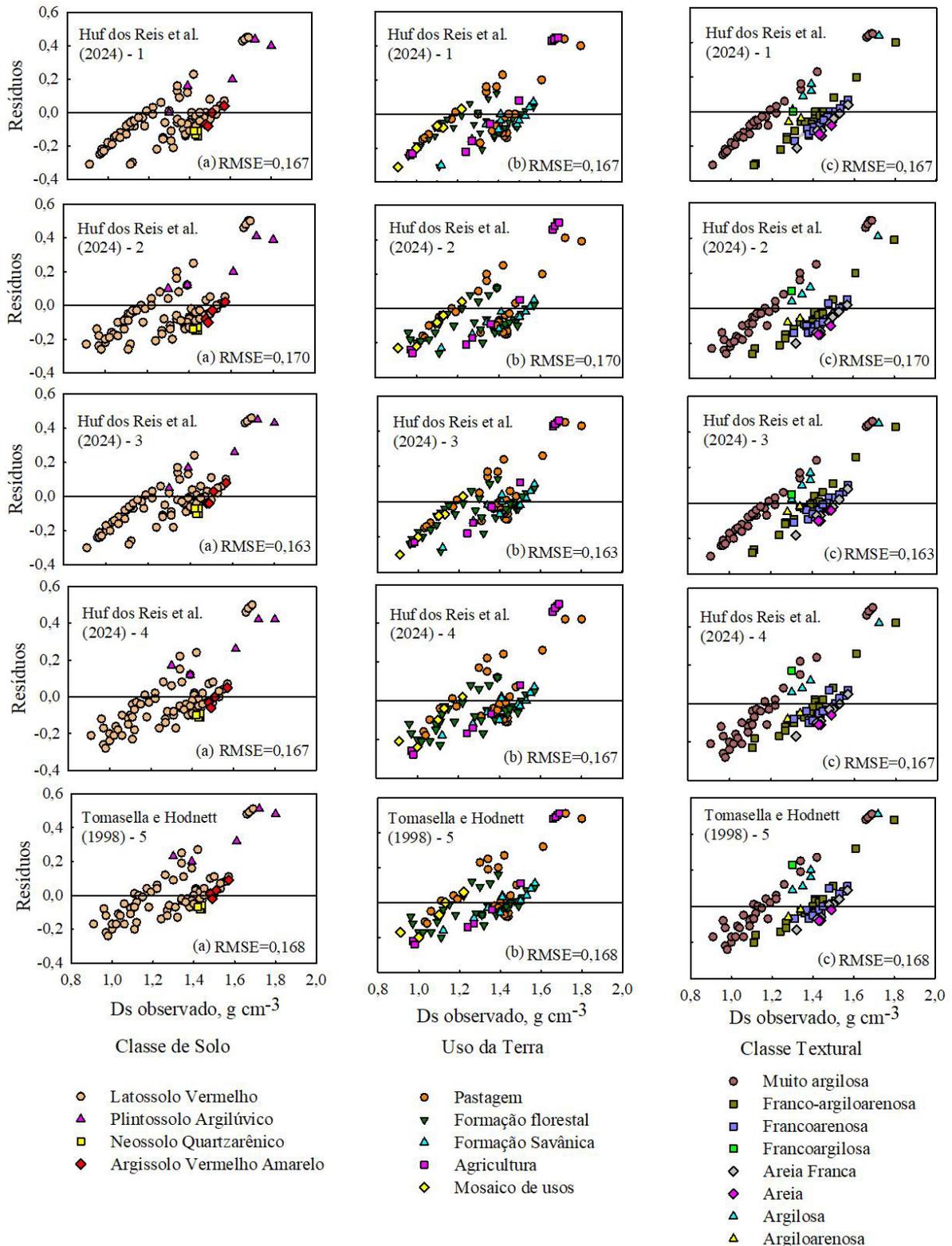
A Figura 9 os resíduos estimados para a predição de Ds pelas PTFs-Ds 1, 2, 3, 4 e 5 e a Figura 10 mostra os resultados dos gráficos de dispersão 1:1 e dados de correlação (R^2) entre valores observados e previstos de Ds para as PTFs-Ds 1, 2, 3, 4 e 5, classificados também em classes de solos, classe textural e sistema de uso do solo. Observa-se que a Ds tende a ser superestimada para Neossolos Quartzarênicos, principalmente em sistemas de uso como pastagem (Figura 10). Os valores de Ds dos Plintossolos Argilúvicos foram subestimados (Figura 9).

Baixos teores de Ds geralmente são encontrados em solos com altos teores de matéria orgânica e ou de argila, especialmente os solos argilosos e muito argilosos bem estruturados como os Latossolos e Argissolos sob a vegetação original. O menor valor de Ds $0,91 \text{ g cm}^{-3}$ encontrado neste estudo, corroborando essa afirmativa, foi determinado num Latossolo Vermelho muito argiloso no estudo de Camargo e Freitas (1971).

Altos valores de Ds são encontrados em solos arenosos (p. ex: Neossolos Quartzarênicos e Espodossolos) (HUF DOS REIS et al, 2024; OTTONI et al., 2018). No banco de dados (BD-MS_Ds) não há amostras de Espodossolos, apesar da ocorrência desse solo na região estudada (SEPLAN, 1988). O maior valor de Ds ($1,80 \text{ g cm}^{-3}$) foi encontrado num Plintossolo Argilúvico com classe textural franco argilo-arenosa, sob pastagem (CAMARGO; FREITAS, 1971).

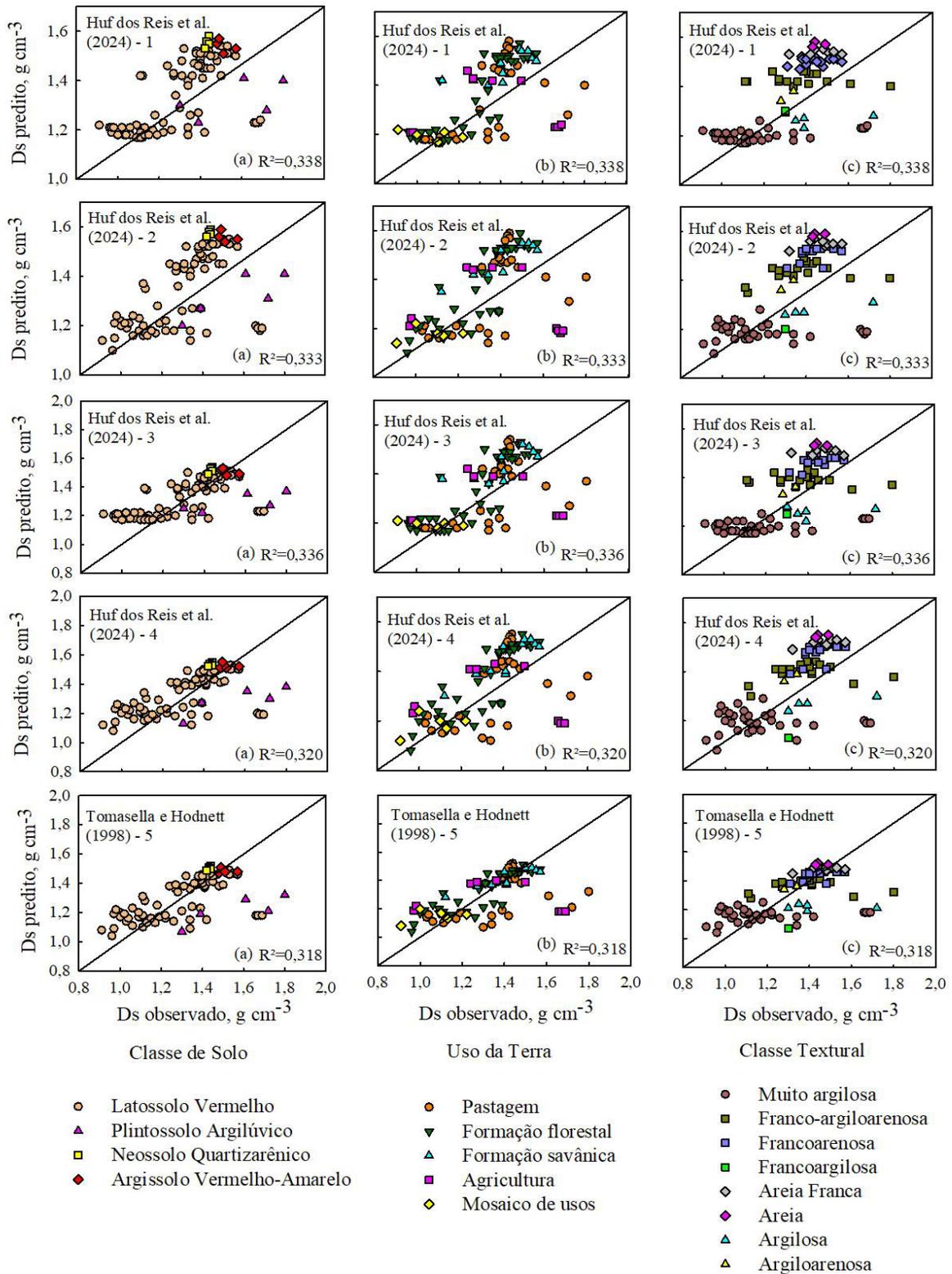
A análise gráfica dos resíduos entre os dados de D_s observados e preditos para as funções de Huf dos Reis, et al (2024) e Tomasella e Hodnett (1998) apresentados na Figura 9, mostra que os maiores resíduos (subestimativas de ordem $0,4 \text{ g cm}^{-3}$) foram encontrados em seis amostras com os maiores valores de D_s , que variaram de $1,66$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 9 e Figura 10). Esses dados são provenientes de áreas com Latossolo Vermelho e Plintossolo Argilúvico, com sistema de uso de agricultura e de pastagem (SOBRINHO et al. 2003; CAMARGO; FREITAS, 1971). Esses sistemas de uso podem ter causado a compactação do solo devido a sistemas de manejo inadequados, como observado por Santana et al. (2018) em Argissolos Vermelho-Amarelo na região nordeste do Brasil. A classe textural dessas amostras é argilosa e muito argilosa, que geralmente têm baixos valores de D_s na sua condição original, entretanto solos dessas classes texturais são susceptíveis à compactação e ao aumento dos índices de D_s . Esses fatos reforçam que a especificidade do conjunto de dados utilizados para estimativa de D_s , pode alterar os resultados das PTFs e o grande desafio para uma PTF- D_s confiável, é a inclusão de um parâmetro estrutural, que permite diferenciar solos com granulometria e teores de carbono semelhantes, mas com diferentes estruturas ou graus de compactação.

Figura 9: Resíduos estimados para a predição de Ds pelas PTF-Ds 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul, organizados pela, (a) classe de solo, (b) sistema de uso da terra e (c) classe textural.



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 10: Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de densidade do solo (D_s) observados *versus* preditos pelas funções 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) dos solos nas bacias dos rios Ivinhema no Mato Grosso do Sul, Amambai e Iguatemi, classificados por (a) classe de solo, (b) sistema de uso da terra e (c) classe textural.



Fonte: autoria própria, 2024.

4.4. Umidade na Capacidade de Campo (θ_{CC}) estimado utilizando parâmetros preditores (- 10 kPa)

Os valores medianos da θ_{CC} de solos do Brasil dos grupamentos texturais que ocorrem na área de estudo, estão sintetizados na Figura 11. Para os solos do Mato Grosso do Sul, foram observadas quatro classes de valores de θ_{CC} em função dos grupamentos texturais: média, arenosa, muito argilosa e argilosa. Os resultados mostram valores medianos na faixa de 0,110 a 0,381 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

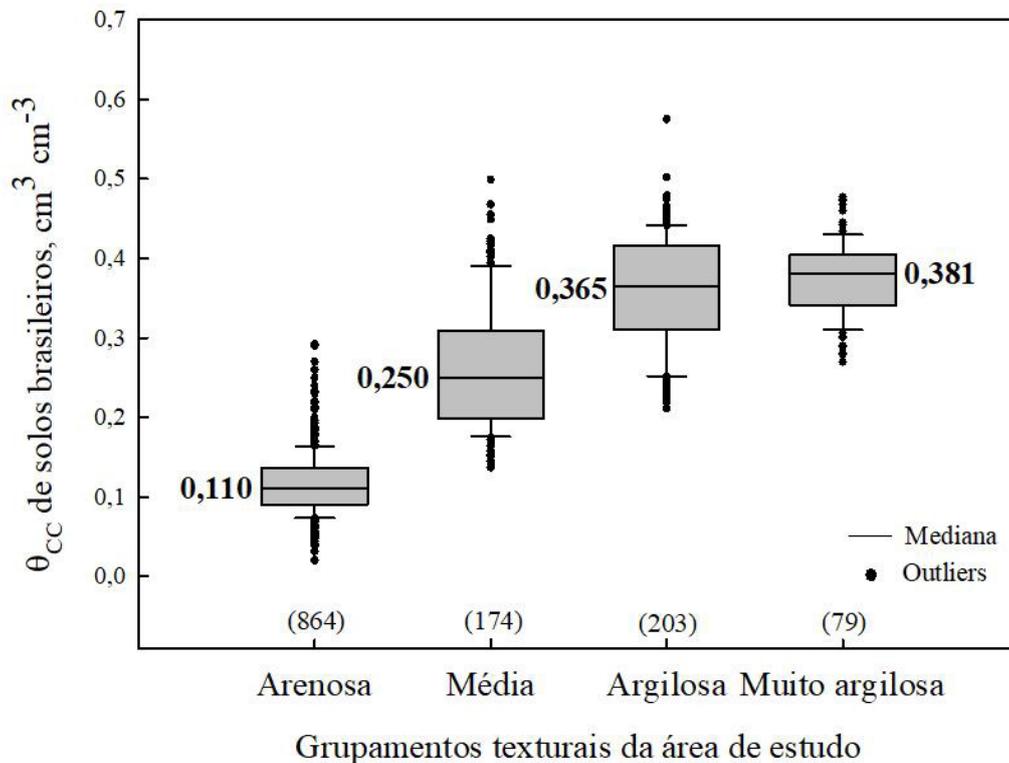
Os grupamentos texturais que abrangem as classes arenosa e muito argilosa apresentam menor dispersão dos dados, evidenciado pelo tamanho reduzido dos boxes, sugerindo que a textura do solo é um fator importante na determinação da θ_{CC} (DALMAGO, et al. 2009; DE SOUZA, et al. 2016). A textura muito argilosa se distingue por apresentar o menor número de dados discrepantes, ou seja, valores que se distanciam significativamente do restante dos dados.

A menor dispersão e *outliers* para a estimativas da θ_{CC} sugerem que funções mais simples podem ser suficientes para estimar essa propriedade do solo nos grupamentos arenoso e muito argiloso. Isso pode reduzir a complexidade das análises e aumentar a confiabilidade dos resultados.

Os grupamentos texturais argilosa e muito argilosa, são os predominantes na área de estudo e apresentam valores medianos de θ_{CC} de 0,365 e 0,381 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente (Figura 11). O grupamento textural arenosa que também é expressivo na área, o valor da mediana encontrado foi de 0,110 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Figura 11).

Em estudos em regiões específicas como os realizados por Macedo (1991) no Rio de Janeiro (45 amostras de solo) e por Parfitt (2009) no Rio Grande do Sul (99 amostras de solo) encontraram valores similares para o grupamento textural média ao deste estudo (Figura 11). Valores similares aos grupamentos texturais argilosa e muito argilosa (Figura 11), foram encontrados em Latossolos Vermelhos nos estados do Pará, Amazonas, São Paulo e Goiás (EMBRAPA/FAO, 1991; MARQUES et al., 2010; GREGO; COELHO; VIEIRA, 2011; ANDRADE; STONE, 2011).

Figura 11: Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.



Fonte: autoria própria, 2024.

A Tabela 13 apresenta os valores médios, desvios padrão, coeficientes de variação, medianas, mínimos e máximos da θ_{CC} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para classes de solos em combinação com grupamento textural para o Brasil.

É importante notar que não foram encontrados dados de para os grupamentos texturais das classes de solo: Organossolo Fólico e Háplico, Plintossolo Argilúvico e Gleissolos Melânicos. Para algumas classes não foram encontrados valores para alguns grupamentos texturais, como os Argissolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos, Gleissolos Háplicos e Planossolos Háplicos.

Foram encontrados para o Brasil 194 dados de θ_{CC} para os Latossolos Vermelhos nos grupos texturais média, argilosa e muito argilosa, com medianas de θ_{CC} de 0,214; 0,395 e 0,356 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente. As medianas de θ_{CC} para as texturas argilosas e muito argilosas encontradas nesta análise se aproximam dos valores estimados usando apenas o grupamento textural (Figura 11).

Para os Neossolos Quartzarênicos, segunda classe de solo mais frequente na área de estudo, foi obtido valor mediano da θ_{CC} de $0,110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Em Neossolos Quartzarênicos de seis estados brasileiros: Tocantins, Mato Grosso, Bahia, Rondônia, Mato Grosso do Sul e Santa Catarina, foram encontrados valores de θ_{CC} similares aos estimados por esse estudo para todo o Brasil (TORRES, 2017; COCHRANE et al., 2006; COSTA, 2012; DOS SANTOS et al., 2008; CARDOSO et al., 2012; COSTA, 2012). Os baixos valores da θ_{CC} dos Neossolos Quartzarênicos, são explicados pela classe textural do solo ser obrigatoriamente arenosa, com conteúdo máximo de argila de 15%.

Os Argissolos Amarelos e Gleissolos Háplicos no grupamento textural arenosa tiveram valores medianos de θ_{CC} variando entre $0,110$ a $0,171 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Tabela 13).

Os menores valores das medianas da θ_{CC} são encontrados para Argissolos Amarelos e Neossolos Quartzarênicos ($0,110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e os maiores valores também são encontrados em Argissolos Amarelos de textura argilosa ($0,438 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). O maior e o menor valor encontrado na mesma classe de solo (Argissolo Amarelo) indicam que apenas a informação sobre a classe de solo, em especial nas que abrange vários grupamentos texturais, como os Argissolos e Latossolos, é impreciso.

Os Argissolos Amarelos, Argissolos Vermelhos, Gleissolos Háplicos, Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelhos, Neossolos Líticos e Planossolos Háplicos, dentro do grupamento textural média apresentam valores similares de θ_{CC} entre $0,203$ e $0,270 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Tabela 13)

Entre as classes de solos do grupamento textural média, o menor valor da θ_{CC} foi encontrado nos Latossolos Vermelho-Amarelos de $0,178 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o maior valor em Chernossolos Argilúvicos de $0,373 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. O Chernossolo Argilúvico do grupamento textural argilosa apresentou o maior valor de θ_{CC} dentre os solos brasileiros com $0,438 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Tabela 13: Estatística descritiva da umidade na capacidade de campo θ_{CC} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) calculada com 1.320 amostras de solos representativos da cobertura pedológica do Brasil, em função da classe de solos e grupamentos texturais

Classe de solo	Grupamento textural	n°	Média	DP	CV	Mediana	Min	Max
	arenosa	2	0,110	0,007	6	0,110	0,105	0,115
Argissolo Amarelo	média	7	0,218	0,050	23	0,226	0,137	0,290
	argilosa	15	0,265	0,028	11	0,267	0,226	0,310

Continuação

Classe de solo	Grupamento textural	n°	Média	DP	CV	Mediana	Min	Max
Argissolo Vermelho	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	19	0,267	0,023	9	0,270	0,220	0,310
	argilosa	4	0,332	0,590	18	0,325	0,270	0,409
Cambissolo Háplico	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	14	0,357	0,064	18	0,370	0,200	0,421
Chernossolo Argilúvico	média	21	0,379	0,060	16	0,373	0,246	0,499
	argilosa	5	0,446	0,080	18	0,438	0,359	0,575
Gleissolo Háplico	arenosa	3	0,186	0,028	15	0,171	0,168	0,218
	média	14	0,229	0,049	21	0,248	0,151	0,323
	argilosa	11	0,413	0,047	11	0,409	0,324	0,502
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Gleissolo Melânico	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	-	-	-	-	-	-	-
	siltosa	-	-	-	-	-	-	-
	argilosa	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Latossolo Amarelo	média	40	0,207	0,039	18	0,203	0,145	0,290
	argilosa	22	0,248	0,019	8	0,248	0,211	0,289
	muito argilosa	23	0,388	0,030	8	0,393	0,301	0,430
Latossolo Vermelho	média	18	0,271	0,101	37	0,214	0,165	0,455
	argilosa	125	0,385	0,052	13	0,395	0,226	0,479
	muito argilosa	51	0,367	0,053	14	0,356	0,270	0,477

Continuação

Classe de solo	Grupamento textural	n°	Média	DP	CV	Mediana	Min	Max
Latosolo Vermelho-Amarelo	média	6	0,204	0,078	38	0,178	0,142	0,357
	argilosa	17	0,346	0,037	11	0,340	0,290	0,425
Neossolo Lítico	média	17	0,244	0,035	14	0,250	0,180	0,340
Neossolo Quartzarênico	arenosa	859	0,115	0,038	33	0,110	0,020	0,292
Nitossolo Vermelho	argilosa	4	0,379	0,018	5	0,378	0,360	0,400
	muito argilosa	5	0,386	0,028	7	0,400	0,340	0,411
Organossolo Fólico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Organossolo Háptico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Planossolo Háptico	média	18	0,234	0,044	19	0,229	0,179	0,329
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Plintossolo Argilúvico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-

(-) representa que não foram encontrados dados para esses grupamentos texturais. DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação;

Fonte: Ottoni, et al. 2018; Fontana, et al. 2024; adaptado por Pimentel, 2024.

4.5. Umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) estimado por equações PTFs (- 10 kPa)

Os 30 dados de θ_{CC} disponíveis no BD-MS_CC são provenientes de oito perfis, das classes Latossolo Vermelho (23 dados) e Argissolo Vermelho (sete dados) e estão classificados em três grupamentos texturais: média, argilosa e muito argilosa. Apenas um sistema de uso da terra foi identificado entre os dados disponíveis: agricultura. Nesse caso, indica-se a

necessidade de obtenção de dados de valores de referência de θ_{CC} em áreas sem uso antrópico, em especial para os solos argilosos e muito argilosos, onde a compactação pode alterar os valores de θ_{CC} .

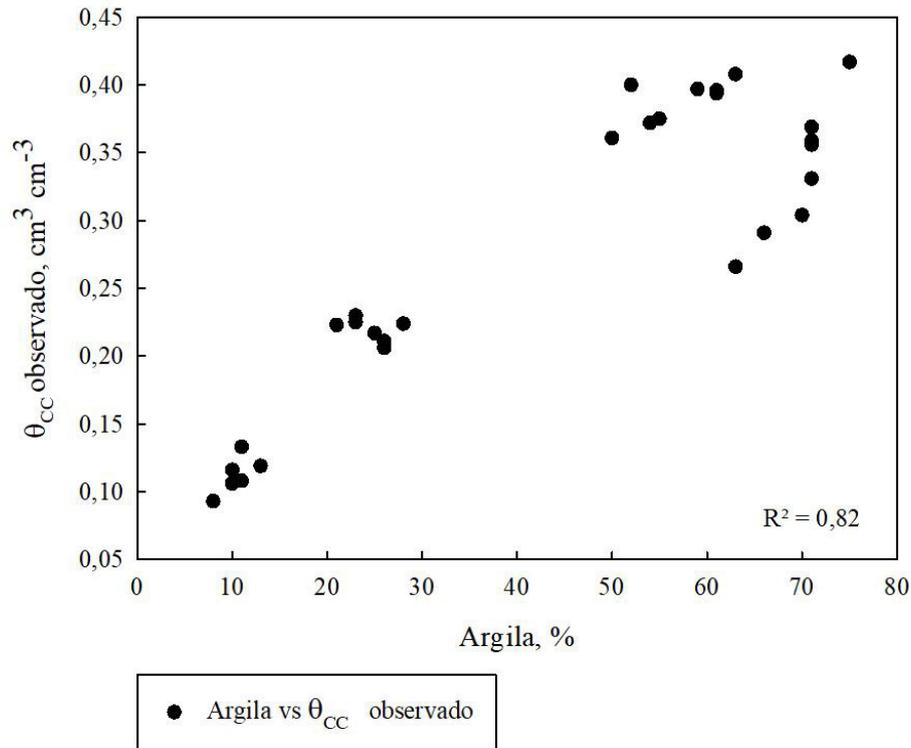
O aumento da densidade do solo, com o aumento da massa das frações granulométricas por volume de solo, tende a reduzir os valores da θ_{CC} e conseqüentemente reduzir os valores de água disponível (AD).

A correlação entre os valores da θ_{CC} e os teores de argila é possível observar um aumento dos valores da θ_{CC} com o aumento dos teores de argila (Figura 12). Esses resultados também foram observados por Dalmago et al. (2009) num estudo no Rio Grande do Sul que associou o aumento de θ_{CC} em profundidade a uma camada de transição para um horizonte B textural (Bt), com maiores teores de argila que o restante do perfil.

O aumento da θ_{CC} não está somente relacionada a composição granulométrica do solo. Alguns autores consideram que a retenção de água na capacidade de campo (CC) está relacionada a interações complexas entre conteúdo de argila, estruturação do solo (densidade) e aos teores de carbono orgânico (MICHELON et al., 2010; MENGAZ et al., 2015; RAMOS, 2018; LOBATO, 2019).

O maior valor da θ_{CC} encontrado nos dados avaliados na região de estudo foi de 0,417 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Figura 12) determinado num Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, com teores de argila de 75% (FIETZ, 1998), esse valor é maior que o valor mediano θ_{CC} encontrado para os solos do Brasil (0,356 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), uma diferença de 17% em relação ao valor encontrado na região.

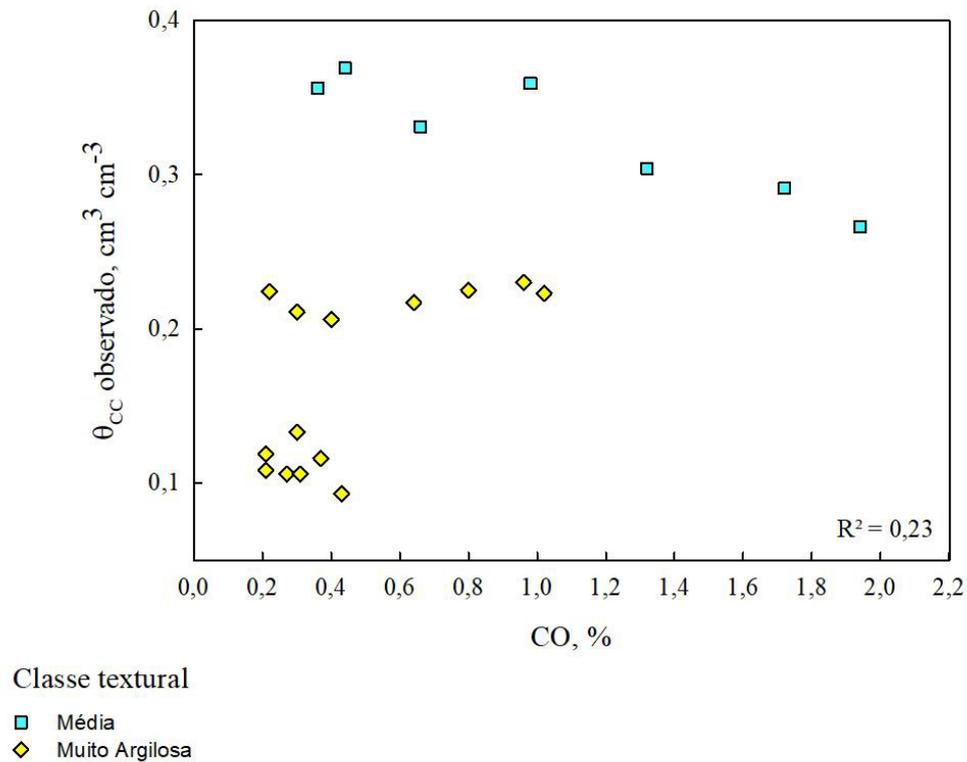
Figura 12: Teor de argila *versus* valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na capacidade de campo (θ_{CC}) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.



Fonte: autoria própria, 2024.

Correlações positivas entre carbono orgânico (CO) e θ_{CC} são encontradas na literatura (COSTA et al., 2013; MENGAZ et al., 2015; RAMOS, 2018; AMBUS et al., 2023). Contudo, neste estudo não houve correlações entre os teores de carbono e θ_{CC} , provavelmente devido aos baixos teores de carbono, entre 0,23% e 3,34% e aos elevados percentuais de argila dessas amostras (Figura 13).

Figura 13: Carbono orgânico *versus* valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na capacidade de campo (θ_{CC}) em solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.



Fonte: autoria própria, 2024.

A estatística descritiva, com a apresentação dos valores de média, mediana, desvio padrão e valores mínimos e máximos dos preditores (granulometria, Ds e MO) utilizados nas estimativas das PTFs- θ_{CC} são apresentados na Tabela 14. Os valores de θ_{CC} , variaram entre 0,093 e 0,417 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ com um valor médio de 0,270 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Os teores de argila variaram entre 8 e 75% com valor médio de 42%. Os valores medidos da densidade do solo variaram entre 1,02 a 1,55 g cm^{-3} com valor médio de 1,36 g cm^{-3} .

Tabela 14: Estatística descritiva dos valores de umidade na capacidade de campo θ_{CC} , densidade (Ds), frações granulométricas, e teores de matéria orgânica (MO) para o banco de dados de solos (BD-MS CC) do Mato Grosso do Sul.

Estatística descritiva	θ_{CC}	Ds	Argila	Silte	Areia total	Argila + Silte	MO
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	g cm^{-3}	-----%-----				
Máximo	0,417	1,55	75	23	89	91	3,34
Mínimo	0,093	1,02	8	2	9	11	0,37
Média	0,270	1,36	42	9	49	51	1,14
Mediana	0,279	1,41	51	9	36	64	0,74
Desvio padrão	0,111	0,15	24	6	29	29	0,86

Fonte: autoria própria, 2024.

Na Tabela 15, estão sintetizados os valores de RMSE, de R^2 e o número de predições de θ_{CC} para cada PTF- θ_{CC} . Algumas amostras não apresentaram resultados para determinadas PTFs devido a dois motivos: (1) as propriedades dessas amostras estavam fora do domínio de validade da PTF em questão; e (2) as amostras não possuíam todos os parâmetros preditores para a PTF. Com a PTF- θ_{CC} 4 de Giarola, Silva e Imhoff (2002) foi possível estimar apenas 12 valores de θ_{CC} pois 18 amostras não apresentavam valores de silte dentro do domínio da equação (valores menores que 9,9%).

As PTFs- θ_{CC} 1, 2 e 7 de Assad et al. (2001), Balbino et al. (2004) e Reichert et al. (2020) respectivamente, obtiveram na combinação dos indicadores de confiabilidade, os melhores índices (baixos valores de RMSE e altos valores de R^2) dentre as doze PTFs testadas.

A PTF- θ_{CC} 7, que usa como preditores argila, areia e matéria orgânica (MO) obteve o melhor desempenho dentre as três PTFs- θ_{CC} selecionadas, com RMSE de $0,034 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A confiabilidade das estimativas de θ_{CC} pela PTF- θ_{CC} 7 apresentaram os valores de RMSE e R^2 de $0,034 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,934$, respectivamente. Reichert et al. (2020) utilizando a mesma PTF encontrou valores de $0,052 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,76$ para os mesmos indicadores. A maior confiabilidade neste estudo pode ser devido ao menor número de dados e reduzido número de classes de solos.

Tabela 15: Estimativas da confiabilidade das predições (*Root Mean Square Error* – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) para as doze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.

Funções	Referências	RMSE	R^2	n°
PTF- θ_{CC} 1	Assad et al. (2001)	0,039	0,885	30
PTF- θ_{CC} 2	Balbino et al. (2004)	0,038	0,949	30
PTF- θ_{CC} 3	Dionizio e Costa (2019)	0,113	0,242	30
PTF- θ_{CC} 4	Giarola, Silva e Imhoff (2002)	0,059	0,068	12
PTF- θ_{CC} 5	Reichert et al. (2009) - 1	0,069	0,922	21
PTF- θ_{CC} 6	Reichert et al. (2009) - 2	0,043	0,937	30
PTF- θ_{CC} 7	Reichert et al. (2020)	0,034	0,934	21
PTF- θ_{CC} 8	Urach (2007) - 1	0,049	0,664	21
PTF- θ_{CC} 9	Urach (2007) - 2	0,078	0,666	28
PTF- θ_{CC} 10	Urach (2007) - 3	0,083	0,779	30
PTF- θ_{CC} 11	Van den Berg et al. (1997) - 1	0,054	0,751	26
PTF- θ_{CC} 12	Van den Berg et al. (1997) - 2	0,045	0,798	26

n°- número de estimativas de umidade na CC para cada equação, considerando os ranges;

Fonte: autoria própria, 2024.

A Figura 14 mostra a análise gráfica da dispersão dos resíduos, e os valores da RMSE. A Figura 15 mostra a relação 1:1 entre valores observados e preditos de θ_{CC} e o coeficiente de determinação (R^2) das PTFs- θ_{CC} 1, 2 e 7 que foram as que apresentaram as melhores confiabilidades. As análises gráficas indicam que a PTF- θ_{CC} 2 superestima os valores de θ_{CC} , com média de $0,298 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. As PTFs- θ_{CC} 1 e 7, apresentaram um número significativo de

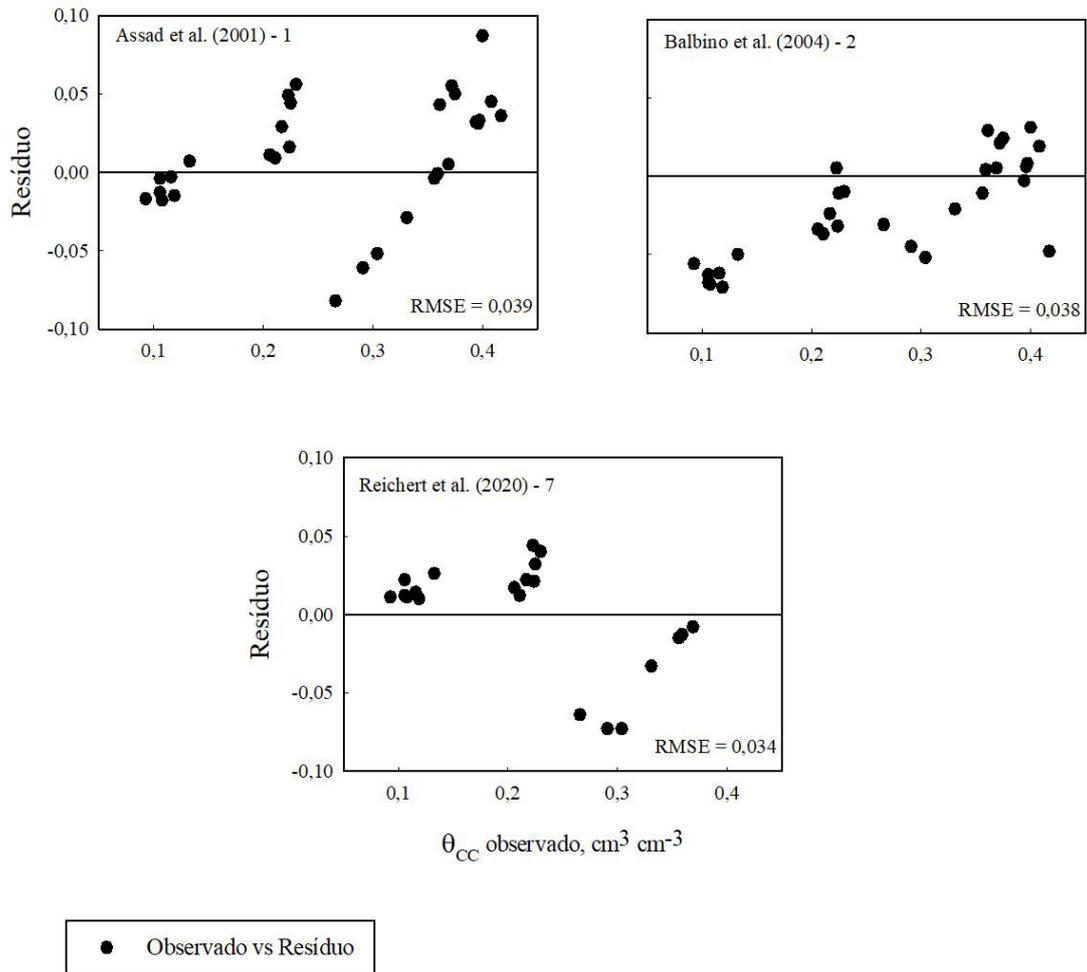
subestimativas para θ_{CC} (Figura 14). As disparidades no desempenho da PTF- θ_{CC} 2 com superestimativas e das PTFs- θ_{CC} 1 e 7, com subestimativas, podem ser relacionadas às diferentes regiões as quais foram desenvolvidas.

A análise gráfica e parâmetros estatísticos mostram que a PTF- θ_{CC} 7, proposta por Reichert et al. (2020), como a de melhor desempenho global entre as amostras estudadas. Os resultados de Araújo et al. (2011) e Carducci et al. (2011), que obtiveram valores de θ_{CC} próximos à média estimada pela equação de Reichert et al. (2020), em Latossolos Vermelhos, corroboram com a confiabilidade da PTF- θ_{CC} 7 na estimativa da retenção de água.

A PTF- θ_{CC} 2 de Balbino et al. (2004) se destacou como a segunda com maior confiabilidade dentre as três PTFs- θ_{CC} avaliadas, evidenciado pelo baixo valor do RMSE e corroborada pela análise gráfica, evidenciando uma distribuição dos resíduos não enviesada e da relação entre estimados e preditos próxima da reta 1:1 (Figura 14 e Figura 15).

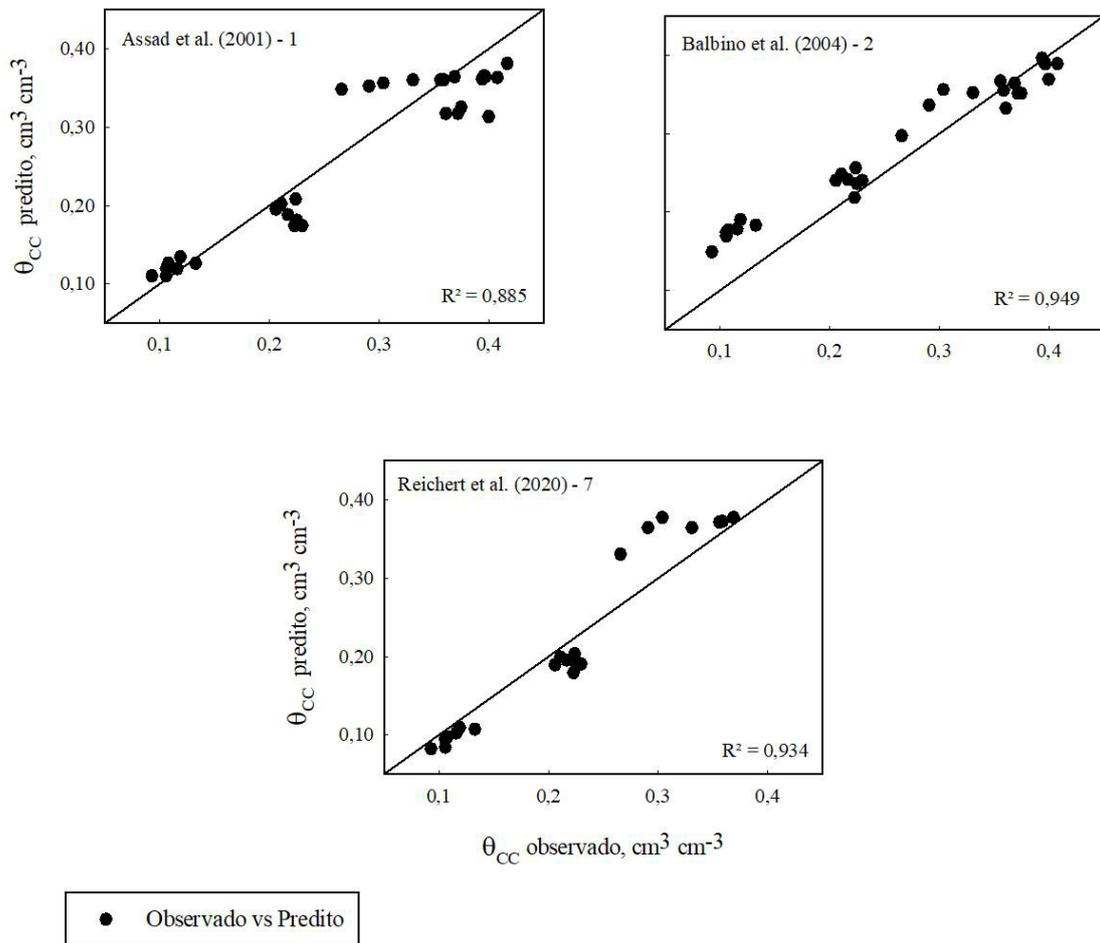
PTF- θ_{CC} 2 utilizada em Latossolos Vermelhos do norte de Planaltina - Goiás, apresentou superestimativas de θ_{CC} no potencial de 10 kPa, mas ainda assim se demonstrou com maior confiabilidade, com RMSE de 0,031 g g⁻¹. Essa característica a torna uma opção viável quando há escassez de dados de matéria orgânica.

Figura 14: Resíduos estimados para a predição de θ_{CC} pelas PTFs- θ_{CC} 1, 2 e 7 de Assad et al. (2001), Balbino et al. (2004) e Reichert et al. (2020) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 15: Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de θ_{CC} observados *versus* θ_{CC} preditos pelas funções 1, 2 e 7 de Assad et al. (2001), Balbino et al. (2004) e Reichert et al. (2020) dos solos nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.



Fonte: autoria própria, 2024.

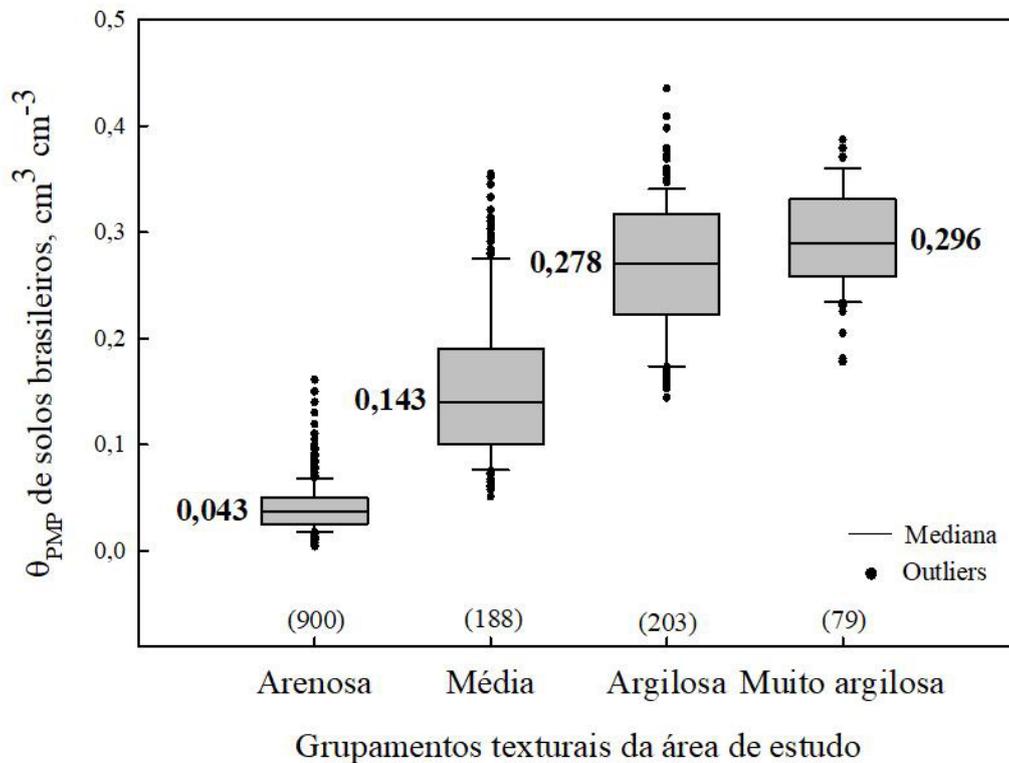
4.6. Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) estimado utilizando parâmetros preditores (-1500 kPa)

Os valores da mediana de θ_{PMP} de solos do Brasil representativos dos grupamentos texturais que representam a área de estudo, estão sintetizados na Figura 16. Para os solos do Mato Grosso do Sul, foram observadas quatro classes de valores de θ_{PMP} em função dos grupamentos texturais: média, arenosa, muito argilosa e argilosa. Os resultados mostram valores de mediana na faixa de 0,043 a 0,296 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

O grupamento textural que compreende as texturas argilosa e muito argilosa, que ocorrem principalmente na classe dos Latossolos Vermelhos, apresentaram mediana de θ_{PMP} com valores semelhantes, respectivamente, 0,278 e 0,296 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Valores próximos aos encontrados para as medianas de θ_{PMP} dos Latossolos Vermelhos e suas classes texturais, foram respectivamente de 0,282 e 0,276 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tabela 16).

Os Neossolos Quartzarênicos também são expressivos na área e o valor da mediana encontrado para a classe textural arenosa foi de 0,037 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, apenas 0,006 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ menor que o valor encontrado para a grupamento textural arenosa de 0,043 (Figura 16). E o grupamento textural arenoso foi o que apresentou a maior homogeneidade entre os dados, indicado pelo reduzido tamanho do *boxplot*.

Figura 16: Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.



() - número de dados para cada grupamento textural. **Fonte:** autoria própria, 2024.

Os valores médios, desvio padrão, coeficiente de variação, medianos, mínimos e máximos do θ_{PMP} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para classes de solos em combinação com grupamento textural estão apresentados na Tabela 16. Não foram encontrados dados de θ_{PMP} para alguns grupamentos texturais das classes Argissolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos, Gleissolos Háplicos e Melânicos, Neossolos Líticos, Organossolo Fólico e Háplico e Plintossolo Argilúvico.

Para a classe dos Latossolos Vermelhos, solo predominante da área de estudo, foram encontrados 202 dados nos grupos texturais média, argilosa e muito argilosa (Tabela 16). Os valores máximos de θ_{PMP} da classe de solo, confirmam o valor encontrado para a estatística descritiva do BD-MS_PMP de $0,362 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Os Neossolos Quartzarênicos apresentaram valores de média e mediana de θ_{PMP} de $0,040$ e $0,037 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Valores próximos ao valor mínimo de θ_{PMP} ($0,050 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) da estatística descritiva do BD-MS_PMP, valor esse relacionado a um Argissolo Vermelho de classe textural Areia Franca (SCORZA JÚNIOR; SILVA, 2006).

Os valores para a mediana de θ_{PMP} para os Latossolos Amarelos e Argissolos Vermelhos, dos grupamentos texturais argilosa e muito argilosa, variaram entre 0,170 e 0,398 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Os baixos valores da mediana do θ_{PMP} desses solos que apresentam essas classes texturais, podem ser explicados devido ao fato de que no banco de dados HYBRAS, esses solos apresentam texturas que variam de textura argilosa a argilo arenosa com valores equilibrados de argila e areia ($36\% < \text{argila} < 59\%$, $32\% < \text{areia} < 59\%$).

Os Argissolos Amarelos, Gleissolos Háplicos e Neossolos Quartzarênicos tiveram valores medianos de θ_{PMP} variando entre 0,033 a 0,053 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para o grupamento textural que engloba a textura arenosa (Tabela 16).

No grupamento de textura média, os valores para a mediana de θ_{PMP} variou entre as classes de solo. O menor valor foi encontrado nos Gleissolos Melânicos (de θ_{PMP} de 0,063 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e o maior valor em Chernossolos Argilúvicos (de θ_{PMP} de 0,282 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Mas, em geral, comportam-se de forma similar nos Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos, Gleissolos Háplicos, Latossolos Vermelhos e Latossolos Amarelos e Neossolos Líticos.

Embora com número de dados limitados para o grupamento textural arenosa, em diversas classes de solo, os valores da mediana da θ_{PMP} obtidos são similares, parecendo serem predominantemente controlados pela composição granulométrica. Contudo, nos grupamentos texturais que incluem as texturas média, argilosa e muito argilosa, existe grande variação nos valores do θ_{PMP} entre as classes dos solos.

Tabela 16: Estatística descritiva da umidade na capacidade de campo - θ_{PMP} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) calculada com 1.538 amostras de solos representativos da cobertura pedológica do Brasil, em função das classes de solos e grupamentos texturais

Classe de solo	Grupamento textural	n°	Média	DP	CV	Mediana	Min	Max
Argissolo Amarelo	arenosa	2	0,053	0,01	19	0,053	0,046	0,06
	média	7	0,135	0,032	24	0,131	0,078	0,17
	argilosa	15	0,195	0,025	13	0,195	0,168	0,26
Argissolo Vermelho	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	19	0,199	0,020	10	0,190	0,170	0,250
	argilosa	4	0,265	0,057	21	0,240	0,230	0,350

Continuação

Classe de solo	Grupamento textural	n°	Média	DP	CV	Mediana	Min	Max
Cambissolo Háplico	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	14	0,192	0,065	34	0,183	0,105	0,295
Chernossolo Argilúvico	média	21	0,281	0,048	17	0,282	0,167	0,355
	argilosa	5	0,37	0,064	17	0,398	0,278	0,435
Gleissolo Háplico	arenosa	3	0,037	0,018	49	0,033	0,021	0,056
	média	15	0,132	0,059	45	0,148	0,051	0,207
	argilosa	11	0,31	0,032	10	0,304	0,264	0,377
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Gleissolo Melânico	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	3	0,074	0,025	34	0,063	0,055	0,103
	siltosa	-	-	-	-	-	-	-
	argilosa	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Latossolo Amarelo	média	40	0,13	0,028	21	0,128	0,076	0,19
	argilosa	22	0,171	0,018	11	0,170	0,144	0,21
	muito argilosa	23	0,318	0,044	14	0,324	0,225	0,379
Latossolo Vermelho	média	31	0,138	0,074	54	0,118	0,06	0,352
	argilosa	125	0,238	0,049	17	0,282	0,156	0,379
	muito argilosa	51	0,279	0,045	16	0,276	0,178	0,378
Latossolo Vermelho-Amarelo	média	6	0,102	0,073	72	0,077	0,058	0,25
	argilosa	17	0,26	0,044	17	0,26	0,19	0,35
Neossolo Lítico	média	17	0,136	0,025	18	0,14	0,08	0,19
Neossolo Quartzarênico	arenosa	895	0,04	0,021	52	0,037	0,004	0,161
Nitossolo Vermelho	argilosa	4	0,308	0,028	9	0,305	0,28	0,341
	muito argilosa	5	0,307	0,032	11	0,3	0,26	0,341

Continuação

Classe de solo	Grupamento textural	n°	Média	DP	CV	Mediana	Min	Max
Organossolo Fólico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Organossolo Háptico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Planossolo Háptico	média	18	0,084	0,01	12	0,081	0,072	0,11
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Plintossolo Argilúvico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Ottoni, et al. 2018; Fontana, et al. 2024; (-) representa que não foram encontrados dados para esses grupamentos texturais. DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação;

4.7. Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) estimado por equações PTFs (-1500 kPa)

Os 30 dados de θ_{PMP} disponíveis no BD-MS_PMP são provenientes de oito perfis, das classes Latossolo Vermelho (23 dados) e Argissolo Vermelho (sete dados) e estão classificados em três grupamentos texturais: média, argilosa e muito argilosa. Apenas um sistema de uso da terra foi identificado entre os dados disponíveis: agricultura. Indicando a necessidade de obtenção de dados de valores de referência θ_{PMP} em áreas sem uso antrópico, em especial para os solos argilosos e muito argilosos, onde a compactação pode alterar os valores de θ_{PMP} .

O aumento da densidade do solo, com o aumento da massa das frações granulométricas por determinado volume de solo, tende a aumentar os valores da θ_{PMP} e conseqüentemente reduzir os valores de AD.

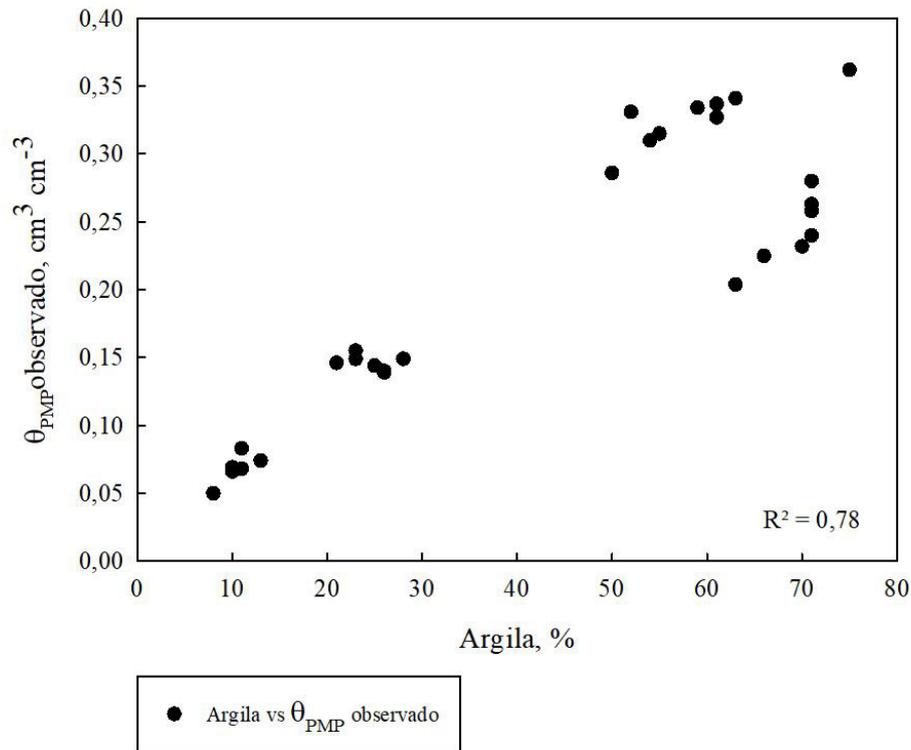
A relação entre os valores de θ_{PMP} e os teores de argila mostrou que, os valores de θ_{PMP} aumentam com o aumento dos teores de argila (Figura 17). Esses resultados estão de acordo com a literatura (VAN DEN BERG et al., 1997; GIAROLA; SILVA; IMHOFF, 2002; OLIVEIRA et al., 2002; TOMASELLA et al., 2003; URACH, 2007; SILVA, et al. 2008; REICHERT et al., 2009; ALVARENGA, et al. 2010; KLEIN et al., 2010; SANTRA et al. 2018;

REICHERT et al., 2020, HUF DOS REIS et al., 2024), que indica que solos com maiores teores de argila tendem a ter maiores valores de umidade no PMP. Isso ocorre porque as argilas têm uma capacidade de retenção de um elevado volume de água em altos potenciais, devido à elevada superfície específica (SE) das partículas de argila em comparação com as partículas de silte e areia (REICHERT et al., 2009, REICHARDT; TIMM, 2004).

O maior valor de θ_{PMP} encontrado neste estudo de $0,362 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ foi determinado num Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, com teores de argila de 75% (FIETZ, 1998) (Figura 17). Solos com elevados valores de θ_{PMP} tendem a apresentar uma baixa disponibilidade de água para as plantas, pois um grande volume da água armazenada no solo apresenta potenciais maiores que 1500 kPa.

Solos que apresentam frações granulométricas semelhantes, mas com diferenças entre os valores de θ_{PMP} denota um fenômeno ainda pouco estudado, mas provavelmente estaria ligado à mineralogia da fração argila e sua superfície específica (SE). A SE das argilas 1:1 como a caulinita varia numa faixa de 10 a 50 m^2/g e de argilas 2:1, como as esmectitas, a SE apresenta valores entre 400 e 1.180 m^2/g (SOUZA; TORRENT, 2021).

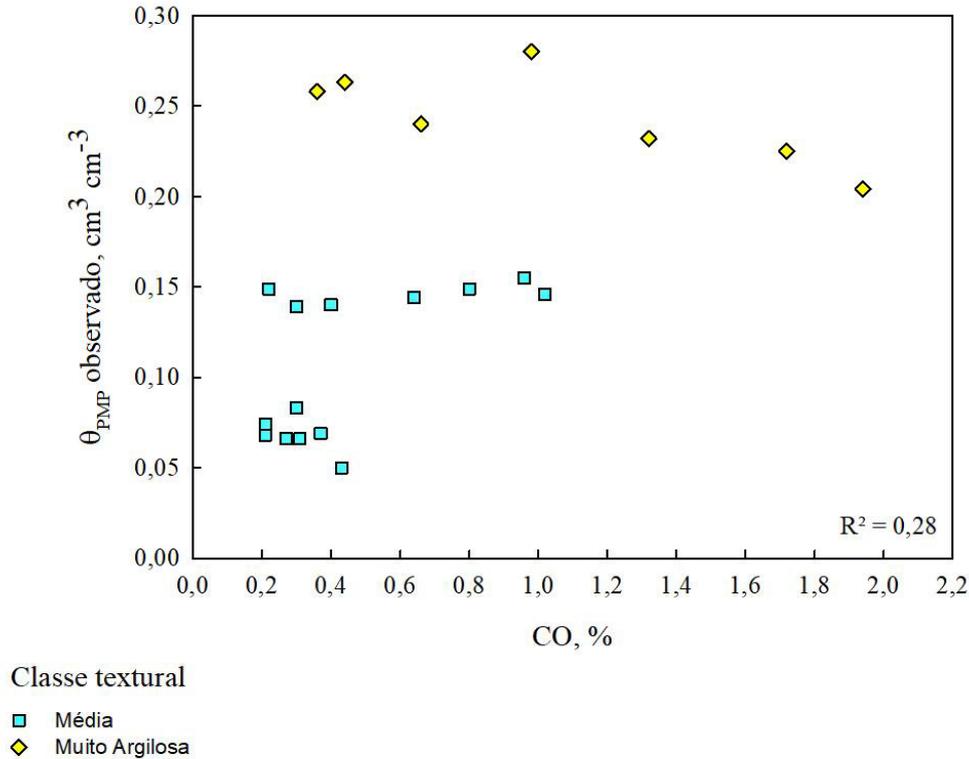
Figura 17: Teor de argila *versus* valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.



Fonte: autoria própria, 2024.

Correlações positivas entre carbono orgânico (CO) e θ_{PMP} são comumente encontradas na literatura (VAN DEN BERG et al., 1997; TOMASELLA et al., 2003; URACH, 2007; SILVA et al. 2008; REICHERT et al., 2009; ALVARENGA et al. 2010; KLEIN et al., 2010; SANTRA et al. 2018; REICHERT et al., 2020, HUF DOS REIS et al., 2024). Contudo, neste estudo a falta de correlação entre os teores de carbono e da θ_{PMP} provavelmente está relacionado aos baixos teores relativos de carbono, entre 0,21% e 1,94% e aos elevados percentuais de argila dessas amostras (Figura 18).

Figura 18: Carbono orgânico *versus* valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.



Fonte: autoria própria, 2024.

A estatística descritiva, com a apresentação dos valores de média, mediana, desvio padrão e valores mínimos e máximos dos preditores (granulometria, Ds e MO) utilizados nas estimativas das PTFs- θ_{PMP} são apresentados na Tabela 17. Os valores de θ_{PMP} , variaram entre 0,050 e 0,362 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ com um valor médio de 0,205 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Os teores de argila variaram entre 8 e 75% com valor médio de 42%. Os valores medidos da densidade do solo variaram entre 1,02 a 1,55 g cm^{-3} com valor médio de 1,36 g cm^{-3} .

Tabela 17: Estatística descritiva dos valores de umidade no ponto de murcha permanente θ_{PMP} , densidade (Ds), frações granulométricas, e teores de matéria orgânica (MO) para o banco de dados de solos (BD-MS PMP) do Mato Grosso do Sul.

Estatística descritiva	θ_{PMP}	Ds	Argila	Silte	Areia total	Argila + Silte	MO
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	g cm^{-3}	-----%-----				
Máximo	0,362	1,55	75	23	89	91	3,34
Mínimo	0,050	1,02	8	2	9	11	0,37
Média	0,205	1,36	42	9	49	51	1,14
Mediana	0,215	1,41	51	9	36	64	0,74
Desvio padrão	0,103	0,15	24	6	29	29	0,86

θ_{PMP} - umidade no ponto de murcha permanente; Ds - densidade do solo; MO - matéria orgânica; **Fonte:** autoria própria, 2024.

Os valores de RMSE, de R^2 e o número de predições de θ_{PMP} para cada PTFs- θ_{PMP} são apresentados na Tabela 18. Algumas amostras não apresentaram resultados das estimativas para algumas PTFs em virtude de suas propriedades estarem fora dos domínios para as quais foram desenvolvidas, ou não apresentarem todos os parâmetros necessários para a estimativa. Com as PTFs de Giarola, Silva e Imhoff (2002) foram possíveis estimar apenas 12 valores de θ_{PMP} pois 18 amostras não apresentavam valores de silte dentro do domínio da equação (valores menores que 9,9%).

As PTFs- θ_{PMP} 7, 8 e 9 de Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) obtiveram na combinação dos indicadores de confiabilidade, os melhores índices (baixos valores de RMSE e altos valores de R^2) dentre as onze PTFs testadas.

Valores elevados de R^2 (0,965), como observado no modelo proposto por Oliveira et al. (2002), é corroborado pelos estudos de Reichert et al. (2020), que encontraram valor de R^2 para prever θ_{PMP} igual a 0,955 e 0,95 respectivamente. Este último estudo desenvolveu PTFs para estimar θ_{PMP} para 85 horizontes superficiais e subsuperficiais de solos do estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 18: Estimativas da confiabilidade das predições (*Root Mean Square Error* – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as onze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.

Funções	Referências	RMSE	R^2	n°
PTF- θ_{PMP} 1	Rosseti et al. (2022)	0,1056	0,867	29
PTF- θ_{PMP} 2	Nascimento et al. (2010)	0,1853	0,917	30
PTF- θ_{PMP} 3	Urach (2007)	0,0874	0,215	27
PTF- θ_{PMP} 4	Giarola, Silva e Imhoff (2002) - A	0,0888	0,107	12
PTF- θ_{PMP} 5	Giarola, Silva e Imhoff (2002) - B	0,0516	0,107	12
PTF- θ_{PMP} 6	Tomasella e Hodnett (1998)	0,0615	0,854	22
PTF- θ_{PMP} 7	Oliveira et al. (2002)	0,0358	0,965	30
PTF- θ_{PMP} 8	Van den Berg et al. (1997) - 1	0,0593	0,778	26
PTF- θ_{PMP} 9	Van den Berg et al. (1997) - 2	0,0590	0,704	26
PTF- θ_{PMP} 10	Reichert et al. (2009) - 1	0,1396	-	21
PTF- θ_{PMP} 11	Reichert et al. (2009) - 2	0,1675	0,316	30

n°- número de estimativas de umidade no PMP para cada equação, considerando os ranges; **Fonte:** autoria própria, 2024.

A análise gráfica da dispersão dos resíduos, em conjunto com o RMSE, é mostrada na Figura 19. O gráfico 1:1 entre valores observados e preditos de θ_{PMP} , em conjunto com os valores de R^2 , estão na Figura 20.

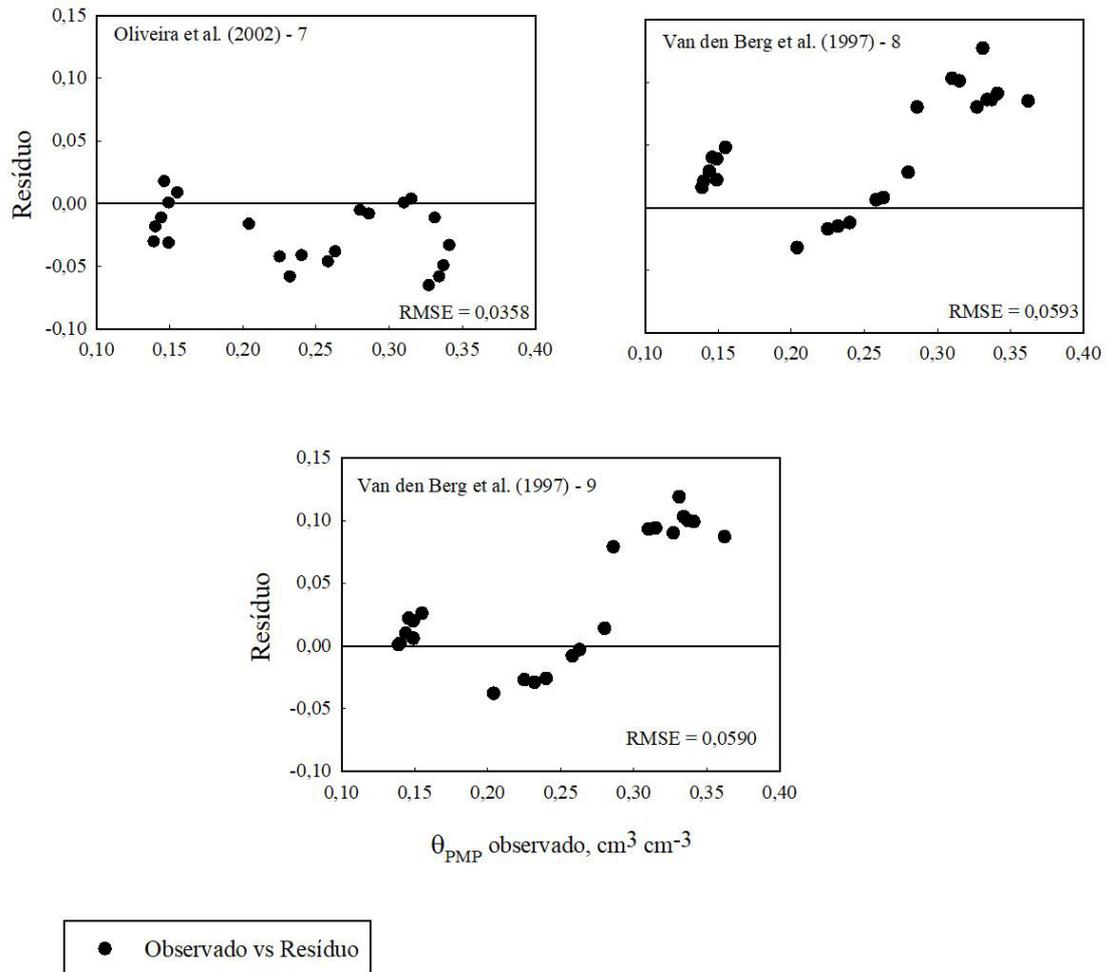
As Figuras indicam que a umidade no PMP foi subestimada pelas PTFs- θ_{PMP} , exceto pela PTF- θ_{PMP} 7 que superestimou os valores de θ_{PMP} .

A análise gráfica e parâmetros estatísticos mostram que a PTF- θ_{PMP} 7, proposta por Oliveira et al. (2002), como a de melhor desempenho global entre as amostras estudadas (Figura 19 e Figura 20). Essa boa performance dessa PTF foi também verificada nos estudos de Urach (2007) e Reichert et al. (2009).

Van den Berg et al. (1997) desenvolveram as PTFs- θ_{PMP} 8 e 9 a partir de dados de θ_{PMP} avaliados em Latossolos e solos de baixa atividade de argila oriundos de dez países de clima tropical, incluindo solos brasileiros. Encontraram valores de $R^2 = 0,70$ para a PTF- θ_{PMP} 8 e $R^2 = 0,80$ para a PTF- θ_{PMP} 9, valores esses que variaram 0,07 para a PTF- θ_{PMP} 8 e 0,10 para a PTF- θ_{PMP} 9 encontrados neste trabalho.

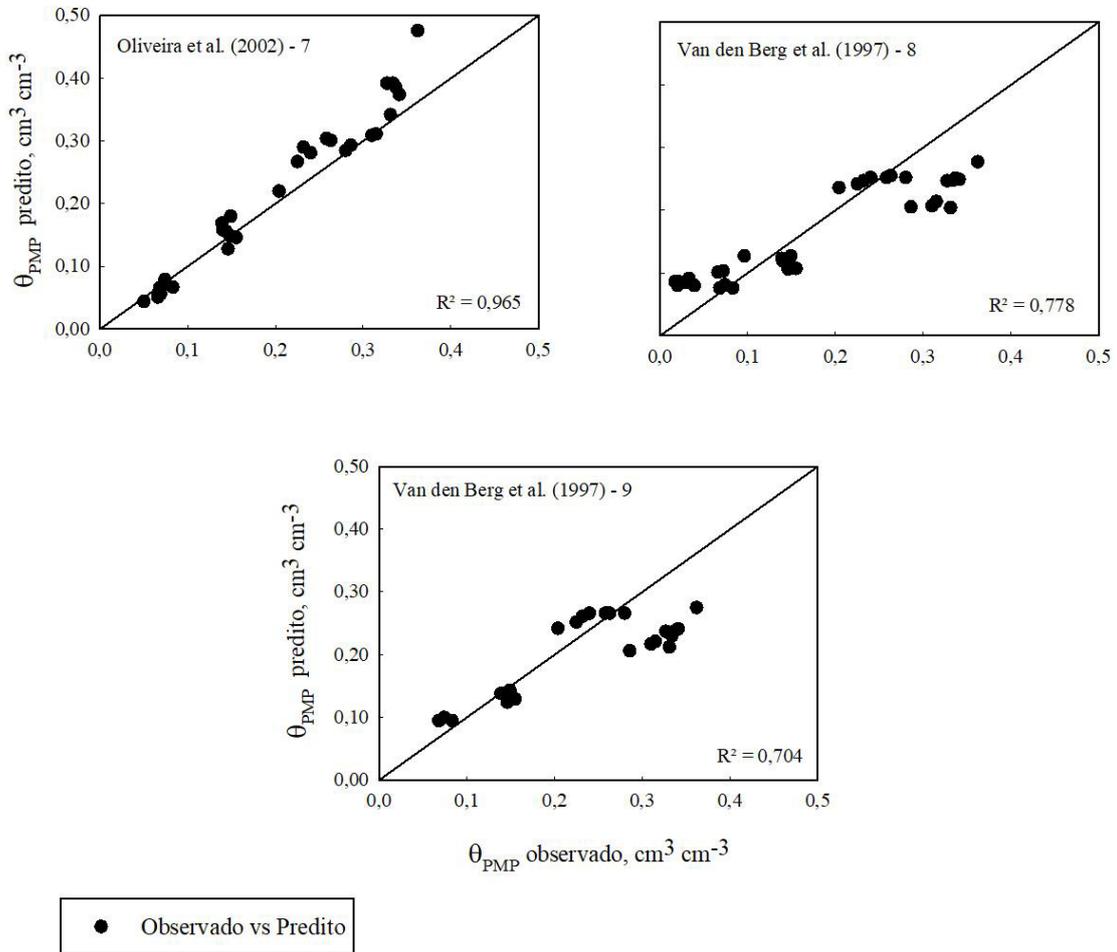
A PTF- θ_{PMP} 9 de Van den Berg et al. (1997) que utiliza silte e argila para estimar θ_{PMP} teve o segundo melhor desempenho indicado pelo baixo valor do RMSE, sendo assim, é mais adequada quando há falta de dados de densidade do solo (Figura 19 e Figura 20).

Figura 19: Resíduos estimados para a predição de θ_{PMP} pelas PTFs- θ_{PMP} 7, 8 e 9 de Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura 20: Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de θ_{PMP} observados *versus* θ_{PMP} preditos pelas funções 7, 8 e 9 de Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) dos solos nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.



Fonte: autoria própria, 2024.

5. CONCLUSÃO

Densidade do solo

Para a estimativa de D_s a PTF- D_s 3 de Huf dos Reis et al. (2024) é a indicada, quando os dados disponíveis são somente dados granulométricos.

Umidade do solo na Capacidade de Campo (θ_{CC}) e no Ponto de Murcha Permanente (θ_{PMP})

Quando se conhece apenas grupamento textural se recomenda utilizar os valores de $\theta_{CC} = 0,110 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $\theta_{PMP} = 0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; $\theta_{CC} = 0,250 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $\theta_{PMP} = 0,143 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; de $\theta_{CC} = 0,365 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de $\theta_{PMP} = 0,278$; $\theta_{CC} = 0,381 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $\theta_{PMP} = 0,296 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ respectivamente para os grupamentos arenosa, média, argilosa e muito argilosa.

Para os Latossolos Vermelhos nos grupamentos texturais média, argilosa e muito argilosa os valores recomendados de θ_{CC} são 0,214; 0,395; e 0,356 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de θ_{PMP} são 0,118; 0,282; e 0,276 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente.

Para os Neossolos Quartzarênicos o valor do θ_{CC} é de 0,110 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e θ_{PMP} é de 0,037 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ é indicado.

Para estimar a θ_{CC} para a região de estudo a PTF- θ_{CC} 2 de Balbino et al. (2004) é a indicada quando houver disponibilidade de dados de granulometria.

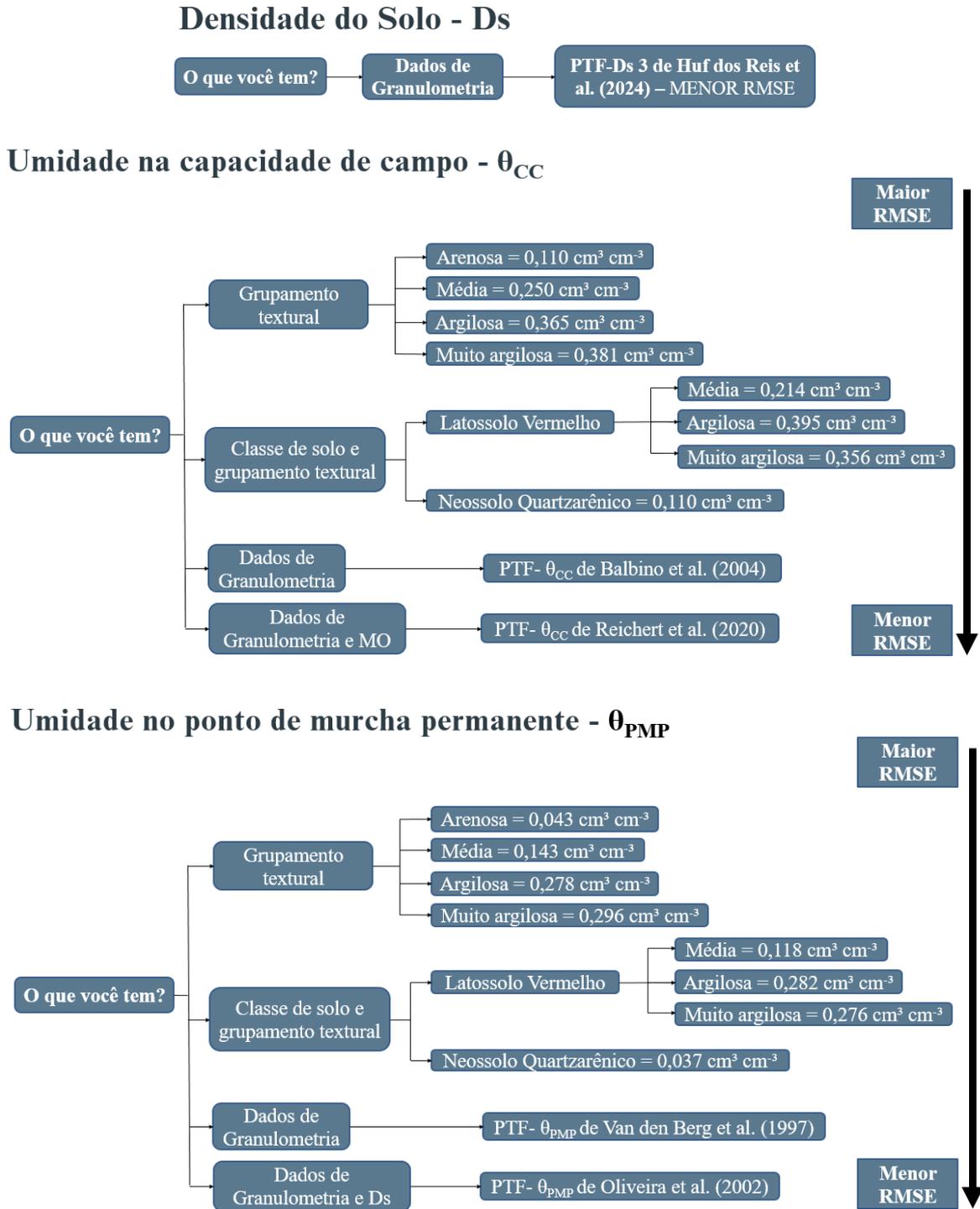
A PTF- θ_{CC} de Reichert et al. (2020), com maior confiabilidade, é indicada se houver dados de granulometria e matéria orgânica, em especial para a classe dos Latossolos Vermelhos dos grupamentos texturais muito argiloso e média e Argissolo Vermelho argiloso.

Para a estimativa de θ_{PMP} na região estudada, a PTF- θ_{PMP} 9 de Van den Berg et al. (1997) é a indicada quando houver disponibilidade de dados de granulometria.

A PTF- θ_{PMP} de Oliveira et al. (2002), com maior confiabilidade, é indicada quando se dispõe de dados de granulometria, e da densidade do solo, em especial para a classe dos Latossolos Vermelhos classe texturais muito argiloso e médio e Argissolo Vermelho argiloso.

O resumo gráfico das conclusões é apresentado na Figura 21.

Figura 21: Resumo gráfico das conclusões.



Fonte: autoria própria, 2024.

6. RECOMENDAÇÕES

Com uma maior disponibilidade de dados físico-hídricos na região que deverá acontecer com o avanço do Projeto de Ação Integrada de Solo e Água - AISA, recomenda-se ajustar e e/ou validar PTFs-Ds, PTFs- θ_{CC} e PTFs- θ_{PMP} específicas para todas as classes de solos e seus grupamentos texturais área das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no estado do Mato Grosso do Sul.

A utilização de preditores de características do terreno obtidos através consultas a mapas pelo de coordenadas geográficas (por ex. consulta a mapas de classes de solos, mapas de uso da terra, mapas de relevos, mapas de teores de argila, de densidade do solo, etc.) tem um grande potencial para o ajuste de novas PTFs de parâmetros físico hídricos específica para região desse estudo (GeoPTFs).

REFERÊNCIAS

- AL-HUSSEIN, A. A. KHAN, S. NCIBI, K. HAMDI, N. HAMED, Y. Flood analysis using HEC-RAS and HEC-HMS: a case study of Khazir river (Middle East—Northern Iraq). **Water**, v. 14, n. 22, p. 3779, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14223779>
- AL-QINNA, M. I.; JABER, S. M. Predicting soil bulk density using advanced pedotransfer functions in an arid environment. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 3, p. 963-976, 2013. DOI: 10.13031/trans.56.9922
- ALEXANDER, E. B. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 4, p. 689-692, 1980. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400040005x
- ALMEIDA, F. N. ALMEIDA, R. R. SILVA, G. N. MASUTTI, M. M. Determinação dos parâmetros físicos – hídricos dos solos do perímetro irrigado da cidade de Petrolina/PE. In: XI CONNEPI, 2010, Maceió. **Anais do XI CONNEPI**. Alagoas: Instituto Federal de Alagoas, 2010.
- ALVARENGA, C. C. MELLO, C. R. ÁVILA, L. F. CÔRREA, M. P. BORGES, L. A. Determinação da umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente com base em atributos físicos do solo. In: XIX CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 2010, Lavras. **Anais do XIX Congresso da Pós-Graduação**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010.
- AMBUS, J. V. AWE, G. O. CARVALHO, P. C. F. REICHERT, J. M. Integrated crop-livestock systems in lowlands with rice cultivation improve root environment and maintain soil structure and functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 227, p. e105592, 2023. DOI: 10.1016/j.still.2022.105592
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Países**. 2010. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7cfd53c4-b4e1-4aba-a79b-857a19649df6>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.
- ANA - Agência Nacional de Águas. O índice de segurança hídrica (ISH). Disponível em: <https://pnsh.ana.gov.br/seguranca>. Acesso em: 22 de jul. de 2024.
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000200001
- ARAUJO-JUNIOR, C. F., DIAS JUNIOR, M. S. GUIMARÃES, P. T. G. ALCANTARA, E. N. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. **Planta Daninha**, v. 29, p. 499-513, 2011. DOI: 10.1590/S0100-83582011000300004
- ARAUJO FILHO, J. C. SANTOS, J. C. P. LUZ, R. Q. P. **Avaliação detalhada do potencial de terras para irrigação nas áreas de reassentamento de colonos do Projeto Jusante-área 3, Glória, BA**. 1 ed. Recife: Embrapa Solos, 2008. ISBN: 978-85-85864-26-2

ASSAD, M. L. L. SANS, L. M. A. ASSAD, E. D. ZULIO JUNIOR, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Agrometeorologia**, v. 3, p. 588-596, 2001. ISSN 0104-1347

ASSOULINE, S.; OR, D. The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. **Water Resources Research**, v. 50, n. 6, p. 4787-4802, 2014. DOI: 10.1002/2014WR015475

BALBINO, L. C. BRUAND, A. PRIMO, I. BROSSARD, M. QUETIN, P. GRIMALDI, M. Change in the hydraulic properties of a Brazilian clay Ferralsol on clearing for pasture. **Geoderma**, v. 120, p. 297-307, 2004. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.08.017

BARROS, A. H. C. DE JONG VAN LIER, Q. MAIA, A. 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. DOI: 10.1590/S0100-06832013000200009

BARROS, A. H. C.; DE JONG VAN LIER, Q. Pedotransfer functions for Brazilian soils. eBook: Springer, 2014. Separata de: TEIXEIRA, W. G.; CEDDIA, M. B.; OTTONI, M. V.; DONNAGEMMA, G. K. (Ed.). **Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration**. eBook: Springer, 2014. p131-162. DOI: 10.1007/978-3-319-06013-2_6

BARROS, H. S.; FEARNSIDE, P. M. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 397-407, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140358

BENITES, V. M. MACHADO, P. L. FIDALGO, E. C. C. COELHO, M. R. MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, n. 1-2, p. 90-97, 2007. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.01.005

BERNOUX, M. CERRI, C. ARROUAYS, D. JOLIVET, C. VOLKOFF, B. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 3, p. 743-749, 1998. DOI:

BOSCHI, R. S. BOCCA, F. F. ASSAD, M. L. R. C. L. ASSAD, E. D. How accurate are pedotransfer functions for bulk density for Brazilian soils? **Scientia Agricola**, v. 75, p. 70-78, 2018.

BOTULA, Y. D. **Indirect methods to predict hydrophysical properties of soils of Lower Congo**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas Aplicada) - Universidade de Ghent, Gante, 2013.

BOTULA, Y. D.; RANST, E. V.; CORNELIS, W. M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 679-698, 2014.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, v. 9, p. 177-213, 1989. DOI: 10.1007/978-1-4612-3532-3_4

BRITO, A. DOS S. LIBARDIM P. L. MOTA, J. C. A. MORAES, S. O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1939-1948, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000600010

CAMARGO, M.; DE FREITAS, F. G. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Sul do Estado de Mato Grosso**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1971, v. 18, p. 839.

CARDOSO, E. L. CRISPIM, S. M. A. CARVALHO FILHO, A. LUMBRERAS, J. F. MOTTA, P. E. F. ARAÚJO, A. R. FERNANDES, A. H. B. M. JACOMINE, P. K. T. FERNANDES, F. A. CALDERANO, S. B. SHINZATO, E. SOARES, M. T. S. X Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos. (Ed.) **Guia de excursão de estudos de solos no Pantanal e Cerrados do Estado de Mato Grosso do Sul**. Corumbá: Embrapa Pantanal; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2012.

CARDUCCI, C. E. OLIVEIRA, G. C. SEVERIANO, E. C. ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 77-86, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100007

CÁSSARO, F. A. M. PIRES, L. F. SANTOS, R. A. GIMÉNEZ, D. REICHARDT, K. Funil de Haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2555-2562, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000600032

CHOUDHURY, B. U. SANTRA, P. SINGH, N. CHAKRABORTY, P. Development of land-use-specific pedotransfer functions for predicting bulk density of acidic topsoil in eastern Himalayas (India). **Geoderma Regional**, v. 34, p. e00671, 2023. DOI: 10.1016/j.geodrs.2023.e00671

COCHRANE, T. T. COCHRANTE, T. A. Diversity of the land resources in the Amazonian state of Rondônia, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 1, p. 91-102, 2006. DOI: 10.1590/S0044-59672006000100011

COSTA, A. D. A. **Retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina: Avaliação e geração de funções de pedotransferência**. 2012. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, 2012.

COSTA, A. DA, ALBUQUERQUE, J, A. ALMEIDA, J. A. COSTA, A. LUCIOANO, R. V. Pedotransfer functions to estimate retention and availability of water in soils of the state of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 889-910, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000400007

DA NÓBREGA, C. C. SILVA, P. L. F. OLIVEIRA, F. P. CAMPOS, M. C. C. SOUSA NETO, A. T. Funções de pedotransferência para estimar a retenção e a disponibilidade de água em Planossolo Háplico sob sistemas integrados de produção agropecuária no Agreste da Paraíba. **Scientia Plena**, v. 18, n. 7, 2022. DOI: 10.14808/sci.plena.2022.070202

DA SILVA, A. P. TORMENA, C. A. FIDALSKI, J. IMHOFF, S. Pedotransfer functions for the soil water retention and soil resistance to penetration curves. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1–10, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000100001

DA SILVA, E. CURI, N. FERREIRA, M. M. VOLPATO, M. M. L. SANTOS, W. J. R. SILVA, S. H. G. Pedotransfer function for water retention in the main soils from the Brazilian coastal plains. **Agrotec**, v. 39, p. 331-344, 2014. DOI: 10.1590/S1413-70542015000400003

DE MELLO, C. R. OLIVEIRA, G. C. FERREIRA, D. F. LIMA, J. M. LOPES, D. Models for determination of parameters of van Genuchten equation for a Cambisol. **Revista Brasileira de**

Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, p.23–29, 2005. DOI: 10.1590/S1415-43662005000100004

DE SOUZA, J. M. BONOMO, R. PIRES, F. R. BONOMO, D. Z. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. **Revista Brasileira de Ciência. Agrárias**, v. 9, p. 606-613, 2014. DOI: 10.5039/agraria.v9i4a3732

DE SOUZA, J. M. PEREIRA, L. R. REIS, E. F. BONOMO, R. Variabilidade espacial da capacidade de campo e ponto de murcha permanente em argiloso amarelo coeso. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 5, p. 875, 2016. DOI: 10.7127/rbai.v10n500457

DE VOS, B. MEIRVENNE, M. V. QUATAERT, P. DECKERS, J. MUYS, B. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 2, p. 500-510, 2005. DOI: 10.2136/sssaj2005.0500

DOS SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**; v.2, n. 3, p. 1-19, 2009. DOI: 10.26848/rbgf.v2i3.232624

DOS SANTOS, C. S. SILVA, P. F. SANTOS, J. C. C. SILVA, C. H. BARROS, A. C. Estimativa da umidade na capacidade de campo em vasos e em laboratório. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 2: p. 21, 2013. DOI: 10.1590/S1415-43662011000200001

DOS SANTOS, H. G. JACOMINE, P. K. T. ANJOS, L. H. C. OLIVEIRA, V. A. LUMBRERAS, J. F. COELHO, M. R. ALMEIDA, J. A. ARAÚJO FILHO, J. C. OLIVEIRA, J. B. CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos - SiBCS**. 5.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356p. ISBN: 978-85-7035-817-2

DOS SANTOS, H. G. JACOMINE, P. K. T. ANJOS, L. H. C. OLIVEIRA, V. A. LUMBRERAS, J. F. COELHO, M. R. ALMEIDA, J. A. ARAÚJO FILHO, J. C. LIMA, H. N. MARQUES, F. A. **Proposta de atualização da 5ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 1.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023. 141p. ISSN: 1517-2627

DALMAGO, G. A. BERGAMASCHI, H. BERGONCI, J. I. KRUGER, C. A. M. B. COMIRAN, F. HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 855-864, 2009. DOI: 10.1590/S1415-43662009000700007

DIONÍZIO, E. A. COSTA, M. H. Influence of land use and land cover on hydraulic physical soil properties at the cerrado agricultural frontier. **Agriculture**, v. 24, p. e9010024, 2019. DOI: 10.3390/agriculture9010024

EMBRAPA/FAO. **Caracterização físico hídrica dos principais solos da Amazônia legal: I**. Estado do Pará. Relatório técnico. Acordo EMBRAPA/SNLCS-FAO. Belém, Brasil, 1991.

FIETZ, C. R. **Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão**. 1998. 116p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998. DOI: 10.11606/T.11.2019.tde-20191220-111207

FIETZ, C. FISCH, G. COMUNELLO, E. FLUMIGNAN, D. L. **O clima de Dourados e Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul**. 21 ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2024. 51p. ISSN 1516-845X / e-ISSN 1679-043X

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

FONTANA, A. TEIXEIRA, W. G. DONAGEMMA, G. K. SILVA, A. L. BARROS, A. H. C. OLIVEIRA, A. P. COSTA, A. CHAGAS, C. S. VICTORIA, D. C. COUTO, E. G. SANTOS, F. C. OLIVEIRA, F. P. TORRES, G. N. ALBUQUERQUE, J. A. ARAÚJO FILHO, J. C. LUMBRERAS, J. F. VIANA, J. H. M. FIDALSKI, J. PIMENTEL, L. G. Di RAIMO, L. A. Di L. HERNANI, L. C. ALBUQUERQUE FILHO, M. R. OTTONI, M. V. COELHO, M. R. FERREIRA, P. L. FREITAS, P. L. OLIVEIRA, V. Á. "**Dados de composição física, química e retenção de água em solos arenosos do Brasil**". Brasília: Embrapa/Redape, 2024.

GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J. C. Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 523-526, 2000. DOI: 10.1071/SR99001

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.4, p. 885-893, 2002. DOI: 10.1590/S0100-06832002000400005

GREGO, C. R.; COELHO, R. M.; VIEIRA, S. R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 337-350, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200005

HAN, G. Z. ZHANG, G. L. GONG, Z. T. WANG, G. F. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. **Soil Science**, v. 177, n. 3, p. 158-164, 2012. DOI: 10.1097/SS.0b013e31823fd493

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. 1 ed. London: Academic Press, San Diego, 1998.

HUF DOS REIS, A. M. TEIXEIRA, W. G. FONTANA, A. BARROS, A. H. C. VICTORIA, D. C. VASQUES, G. M. SAMUEL-ROSA, A. OTTONI, M. V. MONTEIRO, J. E. B. A. Hierarchical Pedotransfer Functions to Predict Bulk Density in Brazilian Soils. **Scientia Agricola**, v. 81, p. e20220255, 2024. DOI: 10.1590/1678-992X-2022-0255

HURTADO, A. L. B.; CICHOTA, R.; VAN LIER, Q. DE J. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 301-307, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000200016

IBGE. **Mapa de Solos**. 2018. Escala 1: 250.000. IBGE. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.

IBGE. **Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.

IBGE. **Bases Cartográficas Contínuas**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.

ITAIPU. **Gestão por bacias hidrográficas**. 2024. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/meioambiente/gestao-por->

- MCBRATNEY, A. B. MINASNY, B. CATTLE, S. R. VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, n. 1-2, p. 41-73, 2002. DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00139-8
- 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, 2014. DOI: 10.1016/j.geodrs.2014.08.003
- MENEGAZ, S. T. Avaliação da qualidade físico-hídrica de solos irrigados em algumas regiões do Brasil. In: III INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2015, Fortaleza. **Anais do III Inovagri International Meeting**. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia, 2015. DOI: 10.12702/iii.inovagri.2015-a060
- MICHELON, C. J. CARLESSO, R. OLIVEIRA, Z. B. KNIES, A. E. PETRY, M. T. MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010005000055
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 107, n. 1-2, p. 55-70, 2002. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00138-0
- NANKO, K. UGAWA, S. HIRANO, S. IMAYA, A. KOBAYASHI, M. SAKAI, H. ISHIZUKA, S. MIURA, S. TANAKA, N. TAKAHASHI, M. KAMEKO, S. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. **Geoderma**, v. 213, p. 36-45, 2014. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.07.025
- NASCIMENTO, G. B. ANJOS, L. H. C. PEREIRA, M. G. FONTANA, A. SANTOS, H. G. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, v.4, n.5, p.560-569, 2010. DOI: 10.5239/agraria.v5i4.551
- NÓBREGA, C. C. SILVA, P. L. F. OLIVEIRA, F. P. CAMPOS, M. C. C. SOUSA NETO, A. T. Funções de pedotransferência para estimar a retenção e a disponibilidade de água em Planossolo Háptico sob sistemas integrados de produção agropecuária no Agreste da Paraíba. **Scientia Plena**, v. 18, p. e070202, 2022. DOI: 10.14808/sci.plena.2022.070202
- NU – Nações Unidas (Brasil). Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 22 de julho de 2024.
- OBIDIKE-UGWU, E. O.; OGUNWOLE, J. O.; E EZE, P. N. Derivation and validation of a pedotransfer function for estimating the bulk density of tropical forest soils. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 9, n. 1, p. 801-809, 2023. DOI: 10.1007/s40808-022-01531-2
- OLIVEIRA, L. B. et al. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.26, p.315-323, 2002. DOI:10.1590/S0100-06832002000200004
- OTTONI, M. V. RIBEIRO, M. R. JACOMINE, P. K. T. RODRIGUES, J. MARQUES, F. A. Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. **Vadose Zone Journal**, v.17, n.1, p.1-17, 2018. DOI: 10.2136/vzj2017.05.0095
- OTTONI, M. V. TEIXEIRA, W.G. HUF DOS REIS, A. M. PIMENTEL, L. G. SOUZA, L.R. ALBUQUERQUE, J. A. MELO, V. F. CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V. REICHERT, J. M.

VIANA, J. H. M. FONTANA, A. MEDRADO, L. C. SANTOS, G. G. AMARAL, L. G. H. ANJOS, L. H. C. ARAÚJO FILHO, J. C. BHERING, S.B. BRITO, G. F. CAMPOS, P. G. CAMPOS, P. N. COSTA, A. M. MARQUES, J. D. O. MARTINS, A. L. S. MELO, V. F. NASCIMENTO, M. B S. NORONHA, N. C. OLIVEIRA, R. D. PORTELA, J. C. SERAFIM, M. E. SILVA, M. B. RODRIGUES, S. ALMEIDA, W. S. MORAES, M. L. CURI, N. Saturated hydraulic conductivity and steady-state infiltration rate database at Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2024 (no prelo)

PALLADINO, M. ROMANO, N. PASOLLI, E. NASTA, P. Developing pedotransfer functions for predicting soil bulk density in Campania. **Geoderma**, v. 412, p. e115726, 2022. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115726

PARFITT, J. M. **Impacto da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos em solos de várzea**. 2009. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2009.

PEQUENO, P. L. L. 2016. **Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em solos da mesorregião do Agreste Paraibano**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2016.

PIMENTEL, L. G. HUF DOS REIS, A. M. MARTINS, G. C. FREGONEZI, F. R. GONÇALVES, A. O. TEIXEIRA, W. G. Ajuste de equações de retenção de água em Latossolos Amarelos muito argilosos da Amazônia Central. In: WORKSHOP DE SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE ÁGUA E SOLUTOS NO SOLO, 2022, Rio de Janeiro. **Anais do Workshop de Simulação de Fluxos de Água e Solutos no solo**. Rio de Janeiro: Ed. dos Autores, 2022. p. 39-43.

PROCÓPIO, S. O. SANTOS, J. B. SILVA, A. A. DONAGEMMA, G. K. MENDONÇA, E. S. Ponto de murcha permanente de soja, feijão e plantas daninhas. **Planta Daninha**. v.22, n.1, p.35-41, 2004. DOI: 10.1590/S0100-83582004000100005

RAJKAI, K.; KABOS, S.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2, p. 145-152, 2004. DOI: 10.1016/j.still.2004.07.003

RAMOS, H. M. M. **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade e atributos físico-hídricos de solos do estado do Piauí**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018.

RAWLS, W. J. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content1. **Soil Science**, v. 135, n. 2, p. 123-125, 1983. DOI: 10.1097/00010694-198302000-00007

REICHERT, J. M. ALBUQUERQUE, J. A. KAISER, D. R. REINERT, D. J. URACH, F. L. CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1547-1560, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000600004

REICHERT, J. M. ALBUQUERQUE J. A. PERAZA, J. E. S. COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, v.21, e00277, 2020. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00277

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**, v.56, n.5, p.331-340, 1943. DOI: 10.1097/00010694-194311000-00002

ROSSETI, R. A. C. AMORIM, R. S. S. DI RAIMO, L. A. D. L TORRES, G. N. SILVA, L. C. M. ANDRADE, I. A. Pedotransfer functions for predicting soil-water retention under Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, e02474, 2022. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02474

RUIZ, H. A. FERREIRA, G. B. PEREIRA, J. B. M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 389-393, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000200019

SÁ, M. A. C. VIANA, J. H. M. Retenção de água no solo pelo método da centrífuga. Brasília: Embrapa, 2017. Separata em: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA W. G. (Ed). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. p.53-64.

SANTANA, M. D. S. ANDRADE, E. M. GIONGO, V. SALVIANO, A. M. CUNHA, T. J. F. Impacto da mudança do uso da terra sobre a densidade do solo em Argissolo no Semiárido. In: JORNADA DE INTEGRAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2018, Petrolina. **Anais da Jornada de integração da pós-graduação da Embrapa Semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2018. p. 143-149.

SANTOS, H. M. Determinação do ponto de murcha permanente em solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, n. 2, p. 242-250, 2019.

SANTRA, P. KUMAR, M. KUMAWAT, R. N. PAINULI, D. K. HATI, K. M. HEUVELINK. G. B. M. BATJES, N. H. Pedotransfer functions to estimate soil water content at field capacity and permanent wilting point in hot Arid Western India. **Journal of Earth System Science**, v.127, p.1-16, 2018. DOI: 10.1007/s12040-018-0937-0

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of hydrology**, v. 251, n. 3-4, p. 163-176, 2001. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00466-8

SCORZA JÚNIOR, R. P.; SILVA, J. P. Avaliação do potencial de contaminação dos recursos hídricos por pesticidas na Bacia do Rio Dourados, MS. **Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v.17, p.87-106, 2006. DOI: 10.5380/pes.v17i0.10666

SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. **Projeto estudos integrados do potencial de recursos naturais: solo**. 1988. Disponível em:<https://www.semadesc.ms.gov.br/estudos-integrados-do-potencial-de-recursos-naturais-de-mato-grosso-do-sul/>. Acesso em: 11 out. 2023.

SEVASTAS, S. GASPARATOS, D. BOTSIS, D. SIARKOS, I. DIAMANTARAS, K. BILAS, G. Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece. **Geoderma Regional**, v. 14, p. e00169, 2018. DOI: 10.1016/j.GEODRS.2018.e00169

SILVA, Á. P. TORMENA, C. A. FIDALSKI, J. IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1-10, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000100001

SOARES, F. C. **Uso de diferentes metodologias na geração de funções de pedotransferência para a retenção de água em solos do Rio Grande do Sul**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2013.

SOARES, F. C. PEITER, M. X. PEITER, M. X. RUSSI, J. L. VIVAN, G. A. Redes neurais artificiais na estimativa da retenção de água do solo. **Ciência Rural**, v. 44, p. 293-300, 2014. DOI: 10.1590/S0103-84782014000200016

SOBRINHO, T. A. VITORINO, A. C. T. SOUZA, L. C. F. GONÇALVES, M. C. CARVALHO, D. F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 191-196, 2003. DOI: 10.1590/S1415-43662003000200001

SOUZA, E. D. FERNANDES FILHO, E. I. SCHAEFER, C. E. G. R. BATJES, N. H. SANTOS, G. R. PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, v. 73, p. 525-534, 2016. DOI: 10.1590/0103-9016-2015-0485

SOUZA, A. C. TORRENT, J. Caracterização físico-química de argilas do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, e0007111, 2021. DOI: 10.3891/rbcs.2021.e0007111

TEIXEIRA, W. G. BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. Brasília: Embrapa, 2020. Separata de: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA W. G. (Ed). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. p.33-46.

TEIXEIRA, W. G. MARTINS, A. L. S. C. M. M. LUMBRERAS, J. F. Retenção de água em amostras de solos da XIII RCC, estado do Maranhão. Brasília: Embrapa, 2020. Separata de: SILVA, M. B.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. (Ed.). **Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão**. Brasília: Embrapa, 2020. c.14, ePub.

TEIXEIRA, W. G. VICTORIA, D. C. BARROS, A. H. C. LUMBRERAS, J. F. ARAUJO FILHO, J. C. SILVA, F. A. M. LIMA, E. P. BUENO FILHO, J. S. S. MONTEIRO, J. E. B. A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. Boletim de pesquisa e desenvolvimento 272. ISSN: 1678-0892

TEIXEIRA, W. G. MARTINS, A. L. S. PIMENTEL, L. G. HUF DOS REIS, A. M. VALLE, L. G. F. SANTOS, G. D. PEREIRA, C. M. M. LUMBRERAS, J. F. Avaliação e estimativas dos teores de água retida a 1500 kPa (ponto de murcha permanente) em amostras dos horizontes de solos dos perfis da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos - RCC de Goiás e Tocantins. Brasília: Embrapa, 2023. Separata de: SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, R. E. M. de; MADARI, B. E. (Ed.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins**. Brasília: Embrapa, 2023. c.18, ePub.

TOMASELLA, J. HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil science**, v.163, n.3, p.190-202, 1998. DOI: 10.1097/00010694-199803000-00003

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. DOI: 10.2136/sssaj2000.641327x

TOMASELLA, J. PACHEPSKY, Y. CRESTANA, S. RAWLS, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.1085–1092, 2003. DOI: 10.2136/sssaj2003.1085

TORMENA, C.A. DA SILVA. A. P. Incorporation of the bulk density to two models adjusted to the soil water retention curve. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v.26, p.305–314, 2002. DOI: 10.1590/S0100-06832002000200003

TORRES, G. N. **Distribuição de partículas e retenção de água em solos arenosos do estado de Mato Grosso**. 2017. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2017. p. 153.

TWARAKAVI, N. K. C. SAKAI, M.; ŠIMŮNEK, J. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. **Water Resources Research**, v. 45, n. 10, 2009. DOI: 10.1029/2009WR007944

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. p. 668p.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrologic modelling system – release notes**. 2023. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest/release-notes/v-4-12-0-release-notes>. Acesso em: 03 de maio de 2024.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

URCHEI, M. A. O potencial dos solos de Mato Grosso do Sul para Agricultura Irrigada. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. Separata de: URCHEI, M. A.; FIETZ, C. R. **Princípios de Agricultura Irrigada: Caracterização e Potencialidades em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. c.6 p.77-99.

VAN DEN BERG, M. KLAMT, E. REEUWIJK, L. P. SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v. 78, n. 3-4, p. 161-180, 1997. DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00045-1

VEIMEHYER, F. J. HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, v. 32. p. 181-193, 1931.

VEIHMEYER, F. J. HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 75-94, 1949. DOI: 10.1097/00010694-194907000-00007

ZETTL, J. BARBOUR, L. HUANG, M. CHENG, B. LESKIU, L. A. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 91, n. 2, p. 133-147, 2011. DOI: 10.4141/cjss09117

ZHANG, Y. SCHAAP, M. G. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 39-53, 2017. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.004

WIECHETECK, L. H. GIAROLA, N. F. B. LIMA, R. P. TORMENA, C. A. TORRES, L. C. PAULA, A. L. Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (-15.000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures. **Agricultural Water Management**, v. 230, n. 1, p. e105965, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105965

WÖSTEN, J. H. M. PACHEPSKY, Y. A. RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of hydrology**, v. 251, n. 3-4, p. 123-150, 2001. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00464-4

APÊNDICE A

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas fornecem uma estrutura abrangente para abordar vários desafios globais, incluindo a sustentabilidade ambiental e a gestão de recursos naturais. Estudos de natureza experimental que envolvem o solo e funções de pedotransferência estão intimamente relacionados a vários desses objetivos, especialmente aqueles que abordam questões de gestão sustentável do solo, conservação da biodiversidade e promoção da resiliência ambiental. A Figura 22 ilustra as ODS que mais se relacionam com esta pesquisa.

Figura 22: Gestão Sustentável, Conservação da Biodiversidade e Promoção da Resiliência Ambiental nas ODS



Fonte: NU (2024).

O ODS 2, correspondente à Fome Zero e Agricultura Sustentável, tem como destaque a Meta 2.4 “garantir a sustentabilidade dos sistemas de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes [...]” (NU, 2024). Nesse item em específico, busca-se atender diversos objetivos, como a sustentabilidade dos sistemas de produção por meio da promoção de práticas agrícolas que sejam ecologicamente sustentáveis e que contribuam para a preservação dos recursos naturais.

Outro objetivo relacionado à Meta 2.4 diz respeito ao aumento da produtividade de maneira sustentável, assegurando que a produção de alimentos possa suprir as necessidades globais sem esgotar os recursos naturais. A questão da resiliência climática também é discutida, sendo o fortalecimento da capacidade dos sistemas agrícolas de resistirem e se adaptarem a mudanças climáticas e eventos climáticos extremos, fatores que beneficiam a segurança alimentar mesmo em situações adversas.

Com relação à conservação dos ecossistemas, a Meta 2.4 visa implementar práticas que preservem a biodiversidade e mantenham os serviços ecossistêmicos essenciais para a agricultura e para a vida humana. Por fim, mas não menos importante, está a melhoria na saúde e na qualidade do solo e da terra, combatendo a degradação, a desertificação e a perda de fertilidade.

A qualidade do solo é fundamental para a saúde das plantas e, conseqüentemente, para a produção de alimentos. Com Base no exposto, a Meta 2.4. tem aderência à esta pesquisa, uma vez que a determinação de propriedades físicas e hídricas através de funções de pedotransferência, são essenciais para desenvolver práticas agrícolas que aumentem a produtividade de forma sustentável.

O ODS 6 se refere à Água Potável e Saneamento, e a Meta 6.6 entra em destaque quando associada ao tema do presente trabalho. Como objetivo, o intuito é proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos. Nesse escopo, as PTFs podem ajudar a identificar áreas com solos vulneráveis à degradação, permitindo a implementação de práticas de manejo que protejam esses ecossistemas. Além disso, estudos experimentais podem utilizar PTFs para avaliar a qualidade do solo e monitorar mudanças ao longo do tempo, ajudando a determinar o impacto de práticas de manejo e intervenções de restauração.

Na ODS 13, Ação Contra a Mudança Global do Clima, a Meta 13.1 busca fortalecer a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados com o clima e desastres naturais em todos os países. Considerando esse aspecto, os solos são um componente crítico do sistema climático global. Eles atuam como reservatórios de carbono, influenciam o ciclo hidrológico e afetam a produtividade agrícola, que é fundamental para a segurança alimentar. Portanto, um exemplo em que PTFs podem ser utilizadas em conjunto com estratégias de adaptação climática, diz respeito à seleção de culturas resistentes à seca e o desenvolvimento de sistemas de irrigação eficientes, que ajudam a aumentar a resiliência das comunidades agrícolas.

Outro ODS 15, referente à Vida Terrestre, tem uma das metas que bastante se conectam ao assunto deste trabalho: a Meta 15.3. Nela, é definido o objetivo até o ano de 2030 “combater a desertificação, restaurar terras e solos degradados, incluindo terras afetadas pela desertificação, seca e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo” (NU, 2024).

As ODS são uma agenda global estabelecida pela ONU para promover o desenvolvimento sustentável até 2030. Outros temas que estão ligados ao assunto desta pesquisa, são a segurança hídrica, o desenvolvimento territorial e a gestão territorial por bacias hidrográficas, conceitos que visam garantir o uso sustentável dos recursos hídricos e o desenvolvimento das regiões. De acordo com a ANA (2024) o Índice de Segurança Hídrica (ISH) foi criado para esclarecer o conceito de risco aos usos da água.

A segurança hídrica é a capacidade de garantir a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas para a saúde humana, o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade

ambiental. Envolve a gestão eficiente dos recursos hídricos para prevenir escassez, poluição e desastres naturais relacionados à água. Na dimensão humana “avalia a garantia da oferta de água para o abastecimento de todas as cidades do País”. Na dimensão ecossistêmica, trata da “vulnerabilidade de mananciais para abastecimento humano e usos múltiplos” (ANA, 2024) (Figura 23).

Figura 23: Modelo de gestão da diretoria de coordenação 2020-2024.



Fonte: Itaipu, 2024.

Por sua vez, o desenvolvimento territorial se refere ao planejamento e implementação de políticas e ações que promovam o crescimento econômico, social e ambiental de uma região, que deve ser sustentável e respeitar as particularidades locais promovendo a inclusão social e a preservação ambiental. Já a gestão territorial por bacias hidrográficas é uma abordagem integrada de gestão dos recursos naturais, que considera a bacia hidrográfica como a unidade de planejamento. Essa gestão visa equilibrar o uso dos recursos hídricos com a preservação ambiental e o desenvolvimento econômico das comunidades dentro da bacia.