

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**PEDOFUNÇÕES PARA RETENÇÃO DE ÁGUA DE
SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL IRRIGADOS POR
ASPERSÃO**

TESE DE DOUTORADO

Cleudson Jose Michelin

**Santa Maria, RS, Brasil
2010**

**PEDOFUNÇÕES PARA RETENÇÃO DE ÁGUA DE SOLOS
DO RIO GRANDE DO SUL IRRIGADOS POR ASPERSÃO**

por

Cleudson Jose Michelon

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de concentração Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

Orientador: Reimar Carlesso

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**PEDOFUNÇÕES PARA RETENÇÃO DE ÁGUA DE SOLOS DO RIO
GRANDE DO SUL IRRIGADOS POR ASPERSÃO**

elaborada por
Cleudson Jose Michelin

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Reimar Carlesso, Ph.D.
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert, Ph.D. (UFSM)

Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC)

Mirta Teresinha Petry, Dr. (FATEC)

Renato Beppler Spohr, Dr. (Cesnors/UFSM)

Santa Maria, 26 de fevereiro de 2010.

M623p Michelon, Cleudson Jose, 1980-
Pedofunções para retenção de água de solos do Rio Grande do Sul irrigados por aspersão / Cleudson Jose Michelon. – Santa Maria, 2010.
109 f. ; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2010.
"Orientador: Prof. Reimar Carlesso"

1. Ciência do solo 2. Funções de pedotransferência 3. Retenção de água 4. Solos 5. Rio Grande do Sul I. Carlesso, Reimar II. Título

CDU: 631.674.5

Ficha catalográfica elaborada por
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Cleudson Jose Michelon. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Campus da UFSM, Rua Q, Prédio 68, Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900 Fone / Fax (Oxx) 55 3220 8399; End. Eletr. cleudsonjose@gmail.com

À minha família, que sempre me apoiou e incentivou em todas minhas decisões, **DEDICO** este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita, ao Centro de Ciências Rurais, ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPEs, pela concessão da bolsa e pelo apoio para a realização deste curso.

Ao professor Reimar Carlesso, pela orientação e pelos ensinamentos muito importantes para a minha formação científica e, sobretudo, pela amizade, confiança e estímulo para a realização deste trabalho.

A Mirta T. Petry, Gustavo De David, Cleiton Dalla Santa e Juliano Gomes de Andrade, amigos e colegas de trabalho no Sistema Irriga, que sobrecarregaram suas atividades durante o período em que estive afastado para cursar as disciplinas do doutorado.

A Alberto Knies, Brantan Chagas, Carlos Grasel, Célio Trois, Elias Dorneles, Francisco Avelar, Juliano Martins, Luis Fernando Grasel, Manoel Moura, Renato Spohr, Roberto Miranda, Rodrigo Elesbão, Sebastian, Tatiana Fiorin, Tiago Broetto, Vinicius Dubou, e Zanandra de Oliveira, também amigos e colegas do Sistema Irriga, pela ajuda e parceria em todos os momentos.

Aos professores do Instituto Federal Farroupilha Campus Santo Augusto, pelos ajustes de horários nos momentos em que eu tive compromissos com o doutorado.

Aos professores que ministraram as aulas no decorrer do Curso, pelos ensinamentos e disponibilidade de tempo sempre que necessário.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e considerações.

À minha namorada, Gabriela Furian, por entender os momentos de ausência.

Aos amigos Carlos E. V. Casali e Marivana Giovelli Casali, pela ajuda nos momentos em que precisei de hospedagem em Santa Maria.

Em especial à minha família, pelo incentivo e apoio e pela compreensão nos momentos de ausência.

A Deus, por existir e pela saúde.

Muito Obrigado!

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

PEDOFUNÇÕES PARA RETENÇÃO DE ÁGUA DE SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL IRRIGADOS POR ASPERSÃO

Autor: Cleudson Jose Michelin
Orientador: Reimar Carlesso
Data: 26 de fevereiro de 2010

A determinação de algumas características físico-hídricas do solo, especialmente aquelas ligadas à retenção de água, é difícil, exigindo criteriosa amostragem do solo, laboratórios com equipamentos sofisticados e de alto custo, técnicos treinados e alta demanda de tempo. Esses fatores limitam muito o número de laboratórios especializados e dificultam o acesso a essas informações. Alternativamente, é possível estimar a retenção de água através de outros atributos do solo, de simples obtenção, através de funções de pedotransferência (FPTs). O principal objetivo deste trabalho foi estabelecer modelos matemáticos para estimar a retenção de água em solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul, que possam ser utilizados em laboratórios de física do solo para a obtenção da curva característica de água dos solos. O trabalho foi realizado utilizando-se 2.235 amostras de solo das camadas superficial, intermediária e inferior de solos irrigados do Estado do RS, disponíveis no banco de dados de análises físicas do Sistema Irriga®. Esse banco de dados é composto por informações de textura do solo (areia, silte e argila), densidade (do solo e de partículas), porosidade do solo (macro, micro e total), além das informações do conteúdo de água nos potenciais de 0, -1, -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa. As equações foram obtidas através da opção stepwise do programa estatístico SAS. Utilizou-se parte do conjunto de dados (60% das amostras) para gerar as equações e o restante (40%) para validar as equações geradas em cada camada do perfil do solo. Foram geradas FPTs para estimar a retenção de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, nas camadas superficial, intermediária e inferior do perfil do solo. As equações obtidas apresentaram em sua constituição atributos texturais e estruturais do solo. Os atributos estruturais apresentaram maior

correlação com a retenção de água nos potenciais mais elevados. Em potenciais mais baixos, os atributos texturais foram os que melhor se correlacionaram com a retenção de água. Observou-se que, quanto mais homogêneos são os dados das variáveis que compõem as equações, maior é a precisão na estimativa da retenção de água pelas equações geradas. De modo geral, as FPTs geradas apresentaram elevada capacidade preditiva dos dados, podendo ser disponibilizadas para utilização em laboratórios de física do solo, desde que sejam utilizadas dentro das faixas de validação das mesmas.

Palavras-chave: Funções de pedotransferência; conteúdo de água no solo; modelagem.

ABSTRACT

Doctorate's Thesis
Post-Graduation Program on Soil Science
Federal University of Santa Maria

PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR WATER RETENTION OF IRRIGATED SOILS FOR SPRINKLER OF RIO GRANDE DO SUL STATE

Author: Jose Cleudson Michelin
Advisor: Reimar Carlesso
Date: February, 26th, 2010

The determination of some soil physical characteristics, especially those related to water retention is difficult, requiring careful soil sampling, laboratories with sophisticated and high-cost equipment, highly trained personal and high demand of labor time. All of these factors greatly limit the number of specialized labs and make the access to that information very difficult. Alternatively, it is possible to estimate the points of the soil water retention curve using other soil physical attributes, based on pedotransfer functions (PTFs). The main objective of this study was to obtain mathematical models to estimate the soil water retention curve of some irrigated soils of Rio Grande do Sul State. These generated models can be used in soil physics labs to estimate the entire soil water retention curve. The work was carried out using 2235 soil samples, collected in three soil depths (surface, intermediate and lower layer of soil profile) in irrigated areas of Rio Grande do Sul State. The database of soil physical analysis belongs to the Sistema Irriga lab of the Federal University of Santa Maria. That database consists of information of soil texture (sand, silt and clay content), density (bulk and particles), soil porosity (macro, micro and total), besides the information of soil water content at the matric potential of 0, -1, -6, -33, -100, -500 and -1500 kPa. The equations were obtained through the stepwise option of SAS statistical program. It was used part of the data set (60% of samples) to generate the equations and the remaining (40%) to validate the equations generated for the three soil layers of the soil profile. PTFs were generated to estimate the soil water content at a matrix potential of 0, -1, -33, -100, -500 and -1500 kPa, in the superficial, intermediate and lower layers of the soil profile. All the generated equations presented as variable information of soil textural and structure attributes. The structural attributes showed a higher correlation with the soil

water retention at highest matrix potential. At lower matrix potential, the soil textural attributes were better correlated with soil water content. It was observed that increasing the homogeneity of the soil parameters data improve the accuracy in estimating the soil water retention curves using the generated equations. In general, the generated PTFs resulted in excellent predictive capacity of the soil water retention curves and may be used in soil physics labs to reduced labor time and cost, since the measured soil physical attributes are within the tolerated limit of each variable.

Keywords: pedofunctions; water content; modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regiões onde foram realizadas as coletas de solo para compor o banco de dados do Sistema Irriga®.	33
Figura 2 – Variabilidade textural dos solos do Estado do Rio Grande do Sul disponíveis no banco de dados utilizado para desenvolver as Funções de Pedotransferência, nas camadas superficial (A), intermediária (B) e inferior (C) do perfil do solo	43
Figura 3 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de 0 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul	50
Figura 4 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa, em quatro situações de conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e porosidade total. A linha tracejada representa o valor de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para esse potencial	52
Figura 5 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa, em quatro situações de conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e porosidade total	52
Figura 6 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -1 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	56
Figura 7 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, macroporosidade e microporosidade.....	57
Figura 8 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, macroporosidade e microporosidade	58
Figura 9 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -33 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	60

Figura 10 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -33 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina.....	61
Figura 11 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -33 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina.....	62
Figura 12 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -100 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	64
Figura 13 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina.....	65
Figura 14 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina.....	66
Figura 15 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	69
Figura 16 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, silte e argila. A linha tracejada representa o valor de 3% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para esse potencial	70
Figura 17 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, silte e argila.....	71
Figura 18 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -1500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	74
Figura 19 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade de partículas, macroporosidade, silte e argila. A linha tracejada representa o valor de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para esse potencial	75
Figura 20 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade de partículas, macroporosidade, silte e argila	76

Figura 21 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, na faixa de potencial de 0 a -1500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	79
Figura 22 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, na faixa de potencial de 0 a -33 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul	81
Figura 23 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, na faixa de potencial de -33 a -1500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	83
Figura 24 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de 0 e -1 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul.....	89
Figura 25 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 e -100 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul.....	91
Figura 26 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -500 e -1500 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul.....	92
Figura 27 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nas faixas de potenciais de 0 a 33 e de 33 a 1500 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul	94
Figura 28 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nas faixas de potenciais de 0 a -1500 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul	96
Figura 29 – Erros médios (em módulo) da estimativa do armazenamento de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, das camadas superficial, intermediária, inferior e das três camadas conjuntas do perfil de solos do Rio Grande do Sul.....	98
Figura 30 – Erros médios da estimativa do armazenamento de água nas faixas de potenciais de 0 a -33 kPa, -33 a -1500 kPa e 0 a -1500 kPa, das camadas superficial, intermediária, inferior e das três camadas conjuntas do perfil de solos do Rio Grande do Sul	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para gerar e validar as funções de pedotransferência nas camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS.....	44
Tabela 1 – Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para gerar e validar as funções de pedotransferência nas camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS.....	45
Tabela 2 – Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade retida a diferentes potenciais das amostras utilizadas para gerar as funções de pedotransferência nas camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS.....	47
Tabela 3 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	49
Tabela 4 – Faixas de variação das variáveis presentes nas pedofunções obtidas para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, em quatro situações de validação dos modelos	51
Tabela 5 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas	53
Tabela 6 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	55
Tabela 7 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -33 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	59
Tabela 8 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	63
Tabela 9 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	67

Tabela 10 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul.....	73
Tabela 11 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para as faixas de potenciais de 0 a -1500 kPa, 0 a -33 kPa e -33 a -1500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas	80
Tabela 12 – Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água nos potenciais de 0, -1 e -33 kPa, nas camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2)	85
Tabela 13 – Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água nos potenciais de -100, -500 e -1500 kPa, nas camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).....	86
Tabela 14 – Funções de Pedotransferência para estimativa da retenção de água em diferentes potenciais, nas camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul.....	88
Tabela 15 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, das camadas intermediária e inferior do perfil de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas.....	90
Tabela 16 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para as faixas de potenciais de 0 a -1500 kPa, 0 a -33 kPa e -33 a -1500 kPa das camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas	96

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Descrição	Unidade
FPT	Função de Pedotransferência	
Ds	Densidade do solo	g cm ⁻³
Dp	Densidade de partículas	g cm ⁻³
Macro	Macroporosidade do solo	dm ³ dm ⁻³
Micro	Microporosidade do solo	dm ³ dm ⁻³
Pt	Porosidade total do solo	dm ³ dm ⁻³
AGr	Teor de areia grossa	%
AF	Teor de areia fina	%
Si	Teor de silte	%
Arg	Teor de argila	%
θ_0	Conteúdo de água correspondente ao potencial de 0 kPa	cm ³ cm ⁻³
θ_{-1}	Conteúdo de água correspondente ao potencial de -1 kPa	cm ³ cm ⁻³
θ_{-33}	Conteúdo de água correspondente ao potencial de -33 kPa	cm ³ cm ⁻³
θ_{-100}	Conteúdo de água correspondente ao potencial de -100 kPa	cm ³ cm ⁻³
θ_{-500}	Conteúdo de água correspondente ao potencial de -500 kPa	cm ³ cm ⁻³
θ_{-1500}	Conteúdo de água correspondente ao potencial de -1500 kPa	cm ³ cm ⁻³
r^2	Coeficiente de correlação	
R^2	Coeficiente de determinação	
ME	Erro médio	mm
RMSE	Raiz quadrada do erro médio ao quadrado	mm
e_i	Valor estimado da variável resposta	
m_i	Valor medido da variável de interesse	
n	Número de observações	
FPT _{n(1)}	Função de Pedotransferência da camada superficial	
FPT _{n(2)}	Função de Pedotransferência da camada intermediária	
FPT _{n(3)}	Função de Pedotransferência da camada inferior	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	OBJETIVO GERAL	19
1.1.1	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	ÁGUA NO SOLO	21
2.2	ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO.....	22
2.2.1	Textura do solo	22
2.2.2	Estrutura do solo.....	23
2.2.3	Conteúdo de água no solo.....	26
2.3	FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA	28
2.4	MODELO DE REGRESSÃO STEPWISE	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	LOCAIS DE COLETA DE DADOS	33
3.2	COLETA E PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS PARA A CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS	34
3.3	COMPOSIÇÃO DO BANCO DE DADOS	36
3.4	GERAÇÃO E OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA	36
3.5	AValiação DA ACURÁCIA DAS FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA	37
3.6	ANÁLISE DA ACURÁCIA DAS EQUAÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA ESTIMATIVA DA CURVA CARACTERÍSTICA DE ÁGUA	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	AMPLITUDE DE VARIAÇÃO DOS ATRIBUTOS COMPONENTES DO BANCO DE DADOS	42
4.2	CORRELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS E A RETENÇÃO DE ÁGUA	45
4.3	ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA NA CAMADA SUPERFICIAL DE SOLOS DO RS	48
4.3.1	Estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa.....	48
4.3.1.1	Análise da acurácia da $FPT_{0(1)}$ em diferentes conjuntos de dados.....	51
4.3.2	Estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa.....	55
4.3.2.1	Análise da acurácia da $FPT_{-1(1)}$ em diferentes conjuntos de dados	57
4.3.3	Estimativa da retenção de água no potencial de - 33 kPa.....	59
4.3.3.1	Análise da acurácia da $FPT_{-33(1)}$ em diferentes conjuntos de dados.....	61
4.3.4	Estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa.....	63

4.3.4.1	Análise da acurácia da FPT ₋₁₀₀₍₁₎ em diferentes conjuntos de dados	65
4.3.5	Estimativa da retenção de água no potencial de - 500 kPa.....	67
4.3.5.1	Análise da acurácia da FPT ₋₅₀₀₍₁₎ em diferentes conjuntos de dados	69
4.3.6	Estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa.....	72
4.3.6.1	Análise da acurácia da FPT ₋₁₅₀₀₍₁₎ em diferentes conjuntos de dados	74
4.4	ACURÁCIA DAS FPTs NA ESTIMATIVA DE FAIXAS DA CURVA CARACTERÍSTICA DE ÁGUA NO SOLO NA CAMADA SUPERFICIAL DE SOLOS DO RS.....	78
4.4.1	Estimativa da retenção de água na faixa potencial de 0 a -1500 kPa	78
4.4.2	Estimativa da retenção de água na faixa potencial de 0 a -33 kPa	80
4.4.3	Estimativa da retenção de água na faixa potencial de -33 a -1500 kPa	82
4.5	ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA NAS CAMADAS INTERMEDIÁRIA E INFERIOR DOS SOLOS DO RS.....	84
4.6	ACURÁCIA DAS FPTs NA ESTIMATIVA DE FAIXAS DA CURVA CARACTERÍSTICA DE ÁGUA NO SOLO NAS CAMADAS INTERMEDIÁRIA E INFERIOR DE SOLOS DO RS	94
4.7	ERROS MÉDIOS DA ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS DO RS	97
4.8	USO DE FPTs E REDUÇÃO NO TEMPO PARA A OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS.....	101
5	CONCLUSÕES.....	103
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

Em estudo realizado sobre tendências para o futuro, relacionando produção agrícola e alimentação, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) relata que a irrigação será a grande responsável pelo aumento na produtividade das culturas em nível mundial. A previsão é que as áreas irrigadas nos países em desenvolvimento devam aumentar dos atuais 202 para 242 milhões de hectares até o ano de 2030 (FAO, 2002). Entretanto, nesse mesmo estudo, a FAO estima que um em cada cinco países em desenvolvimento sofrerá com a escassez de água e destaca a disponibilidade e o acesso aos recursos hídricos como elementos decisivos para a agricultura e o abastecimento alimentar no futuro. Nesse sentido, o uso racional dos recursos hídricos, visando à conservação da água, constitui um aspecto de grande relevância para uma produção mais sustentável. Assim, a busca de tecnologias e informações que contribuam para um adequado manejo do solo e o uso da água se faz cada vez mais necessária.

A entrada de água no solo depende, segundo González (2005), das condições da superfície e da quantidade de proteção contra o impacto das gotas da chuva, características internas da massa do solo, que incluem tamanho dos poros, profundidade da porção permeável até o horizonte adensado, expansibilidade da argila e dos coloides, conteúdo da matéria orgânica, grau de agregação, umidade do solo, grau de saturação, duração e intensidade da chuva ou irrigação, estação do ano e temperatura do solo e da água. Portanto, o conhecimento das características físico-hídricas do solo em relação à irrigação assume grande importância devido à influência que ela exerce na retenção e disponibilidade de água às plantas.

O manejo adequado da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto. O produtor rural, por não adotar um método de controle da irrigação, usualmente irriga em excesso, temendo que a cultura sofra um déficit hídrico e comprometa a produção. Para a escolha do método mais adequado de irrigação a ser implantado em determinada área e a utilização de um manejo de irrigação eficiente, que permita racionalização dos recursos hídricos, economia de

energia elétrica e maximização da produção, torna-se fundamental o conhecimento das características físico-hídricas do solo.

Algumas características físico-hídricas do solo, especialmente aquelas ligadas à retenção de água, são de difícil determinação, exigindo criteriosa amostragem do solo, laboratórios com equipamentos sofisticados e de alto custo, técnicos treinados e demanda considerável de tempo para sua execução. Esses fatores limitam muito o número de laboratórios especializados nesse tipo de análise e tornam o acesso a essas informações ainda mais difícil. Alternativamente, é possível estimar os pontos da curva de retenção de água através de outros atributos do solo de simples obtenção e disponíveis em banco de dados de solos. Nesse sentido, Bouma (1989) introduziu o conceito de função de pedotransferência (FPT), que está relacionado à estimativa de atributos mais difíceis de ser determinados, como o conteúdo de água no solo sob uma determinada tensão, a partir de atributos facilmente obtidos em análises de laboratório como frações granulométricas, densidade do solo, entre outros.

A utilização de FPTs para a obtenção dos pontos da curva de retenção de água dos solos consiste em uma alternativa promissora para tornar o processo de obtenção dessas informações mais simples, rápido e com menor custo, pois parte da premissa de que apenas alguns atributos seriam determinados nos laboratórios, e estes serviriam de base para a estimativa de outros atributos de determinação complexa. No entanto, as principais limitações à utilização dessas ferramentas consistem na baixa disponibilidade de banco de dados existentes para gerar as FPTs e na ausência da indicação dos limites das variáveis para os quais as FPTs são válidas.

1.1 Objetivo geral

Estabelecer, testar e validar modelos matemáticos para estimar a retenção de água em solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul (RS), que possam ser utilizados em laboratórios de física do solo, para obter mais facilmente e com baixo

custo as informações necessárias para a elaboração da curva característica de água no solo.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Estabelecer funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água em solos irrigados do RS em função de suas propriedades físicas.
- Disponibilizar funções de pedotransferência que possam ser utilizadas em laboratórios de física do solo, como meios alternativos aos métodos tradicionais de determinação da curva de retenção de água do solo.
- Avaliar o erro de estimar o armazenamento de água de um perfil do solo através de pedofunções em relação às determinações de laboratório.
- Estabelecer os valores dos limites de cada variável que compõe as funções de pedotransferência, para os quais os modelos são válidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Água no solo

A disponibilidade de água e ar, a temperatura e a resistência mecânica ao crescimento das raízes são os principais fatores físicos que influenciam o crescimento das plantas. A disponibilidade de água às culturas é variável de acordo com as características do solo, as condições climáticas e a necessidade da planta. Além disso, o aumento ou a redução da disponibilidade hídrica está relacionado ao manejo dado ao solo.

A água é o principal fator responsável pelas flutuações na produção das culturas, especialmente em áreas sem irrigação e em regiões que apresentam períodos de déficit hídrico. A resposta econômica das plantas ao déficit hídrico é um processo dinâmico e, geralmente, difícil de ser mensurado (PETRY, 2004).

A água é retida no solo devido a fenômenos de capilaridade e adsorção. A capilaridade está ligada à afinidade entre partículas sólidas e água, tendo a necessidade da presença de interfaces água-ar para ocorrer. As interfaces água-ar são chamadas de meniscos, e a curvatura destes varia dependendo do tamanho do poro. Quanto menor o poro, tanto mais retida se encontra a água. Como o solo possui uma variedade grande de poros tanto em forma como em diâmetro, aplicando uma energia determinada, esvaziam-se primeiro os poros maiores e, à medida que se aumenta a energia, esvaziam-se cada vez poros menores. É importante considerar que a capilaridade atua na retenção de água nos solos na faixa úmida (REICHARDT; TIMM, 2004), enquanto que a adsorção, na faixa mais seca (HILLEL, 1980). As forças de adsorção dependem, basicamente, da espessura do filme de água que recobre as partículas, a qual varia de acordo com sua superfície específica. Assim, a retenção de água é maior em solos argilosos e com alto teor de matéria orgânica.

O armazenamento e a retenção de água no solo resultam das forças atrativas que ocorrem entre as fases líquida e sólida do solo, as quais possibilitam a retenção de

água no solo contra forças da gravidade, evaporação, absorção pelas raízes e adsorção pelos coloides (REICHARDT, 1990; LIBARDI, 2005). As forças de adsorção e capilaridade são os mecanismos responsáveis pela retenção de água no solo e, conseqüentemente, do potencial matricial (REICHARDT; TIMM, 2004).

Propriedades físicas como textura, distribuição e diâmetro médio de poros e estrutura do solo são diretamente ligadas à variação na quantidade de água armazenada no solo (PETRY, 2007). O tipo de solo e a qualidade das partículas de argila são responsáveis pela afinidade que se estabelece entre a água e as partículas sólidas, resultando na energia de retenção de água no solo (REICHARDT; TIMM, 2004).

2.2 Atributos físico-hídricos do solo

2.2.1 Textura do solo

A textura do solo refere-se à distribuição do tamanho das partículas no solo. A escala de tamanho varia enormemente, desde partículas grandes, visíveis a olho nu, até partículas muito pequenas, que apresentam propriedades coloidais. O tamanho das partículas é de grande importância, pois determina o número de partículas por unidade de volume ou de peso e a superfície que essas partículas expõem.

A distribuição percentual da argila (Arg), silte (Si) e areia é considerada, segundo Tavares Filho; Magalhães (2008), a característica física mais estável do solo, e sua correlação com a superfície específica torna-a uma das propriedades mais importantes do solo. A textura integra o grupo das principais características dos horizontes (TAVARES FILHO; MAGALHÃES, 2008) e refere-se à posição relativa das frações granulométricas que formam a massa do solo. A textura, juntamente com outras características do solo, sobretudo a composição mineralógica e o teor de matéria orgânica, está intimamente relacionada a estrutura, consistência, permeabilidade, capacidade de troca de cátions, retenção de água e fixação de fosfatos. Devido a essas

características, a textura recebe grande atenção de técnicos e pesquisadores, especialmente aqueles ligados à classificação do solo, sendo seu emprego comum nos sistemas taxonômicos como um dos principais critérios para distinção de classes de solo.

Entre os vários fatores que afetam a retenção de água no solo, o principal é a textura do solo (RIQUELME, 2004), pois ela determina a área de contato entre a água e as partículas sólidas, ocasionando assim a acomodação das partículas e a distribuição de poros. Beutler et al. (2002), estudando a retenção de água em solos com diferentes manejos, observaram que as frações granulométricas mais finas do solo foram aquelas que mais influenciaram a retenção de água dos mesmos. Petry (2000), trabalhando com solos de três classes texturais, observou que um solo muito argiloso apresentou maior quantidade total de água armazenada no perfil do que um solo de textura franco-arenosa. No entanto, a disponibilidade de água às plantas foi maior no solo de textura franco-arenosa.

2.2.2 Estrutura do solo

A estrutura de um solo refere-se ao arranjo das partículas e à adesão das partículas menores na formação de maiores, denominadas agregados. A estrutura do solo é de grande importância para a vida vegetal, uma vez que ela influencia a movimentação de água, aeração, densidade e porosidade do solo (LIPIEC, 2003).

A estrutura do solo é uma propriedade importante no funcionamento do solo, na sua capacidade de suporte à vida animal e vegetal, sendo um indicador de qualidade do solo (BRONICK; LAL, 2005). Um solo que não é bem estruturado apresenta problemas na disponibilidade de água e oxigênio de maneira adequada ao desenvolvimento das plantas. A estrutura do solo é uma propriedade que atua como importante fator na aeração, garantindo um fluxo de oxigênio capaz de contrabalançar o excesso de gás carbônico da atmosfera do solo, eliminado pelas raízes e microrganismos.

Para Baver et al. (1972), Argenton et al. (2005), a estrutura pode ser avaliada pela distribuição de tamanho, pela quantidade e pela estabilidade de agregados. Solos arenosos não formam agregados estáveis como ocorre com os argilosos, sendo chamados de solos com estrutura de grãos simples ou sem estrutura. A estrutura é instável, e o solo pode, facilmente, tornar-se compacto e pouco permeável.

A importância da estrutura do solo se deve à influência que a mesma apresenta nos parâmetros físicos do solo (aeração, capacidade térmica, retenção de água e impedimento mecânico), na atividade biológica do solo, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na decomposição da matéria orgânica do solo. Sharma; Uehara (1968) estudando o efeito dos macro e microagregados na curva característica de água no solo de dois Latossolos, os quais foram selecionados pela similaridade de composição, embora apresentassem diferença em sua estrutura, observaram que, para solos fortemente estruturados, a retenção de água no solo foi influenciada grandemente por macroporos em potenciais matriciais que variam entre 0 e -3 KPa, enquanto o efeito dos microporos foi mais significativo em potenciais mais baixos.

Segundo Reinert et al (2001), considerando que a textura de um solo é uma característica pouco variável no tempo e muito pouco afetada pelo manejo, as modificações físicas dos solos são associadas à sua estrutura. Ainda segundo os autores, em sistemas irrigados, o manejo inadequado da água pode gerar limitações de falta de ar para as plantas, pelo excesso de aplicação de água, ou acelerar a compactação do solo, devido ao tráfego de máquinas em solos úmidos em estado de maior susceptibilidade à compactação.

Entre as partículas do solo ou mesmo entre agregados existem espaços porosos, oriundos do arranjo, da distribuição e da orientação das partículas do solo, que podem armazenar água e ar necessários para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, dos microrganismos e animais do solo. O volume total de poros é denominado de porosidade total do solo (Pt). A Pt do solo pode ser dividida em microporosidade (Micro) e macroporosidade (Macro).

O espaço poroso de um solo é determinado principalmente por sua textura e estrutura (HILLEL, 1980). A quantidade e a natureza dos poros existentes variam de acordo com o arranjo ou a geometria das partículas sólidas. Solos arenosos

apresentam Pt reduzida, devido à tendência de as partículas permanecerem em contato íntimo. Em solos de textura média, onde é comum a ocorrência de agregados porosos e elevado teor de matéria orgânica, os espaços porosos por unidade de volume são elevados.

O movimento livre do ar e da água no solo ocorre através dos macroporos. Por outro lado, nos microporos, o movimento do ar é dificultado, enquanto que o da água fica restrito principalmente à capilaridade. Dessa forma, apesar de os solos arenosos apresentarem reduzida porosidade total, o movimento do ar e da água é rápido, em função de predominarem macroporos. Já nos solos de textura fina, apesar de haver grande espaço poroso, o movimento dos gases e da água é relativamente lento, devido à presença predominante de microporos.

A porosidade dos solos é um atributo importante a ser considerado na avaliação da qualidade estrutural dos solos (MARTINS et al., 2002). Drewry et al. (2001), trabalhando com solos da Nova Zelândia, encontraram como macroporosidade crítica os valores de 0,9 e 0,11 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$. Para Tormena et al. (2002), valores críticos de macro estão abaixo dos valores compreendidos entre 0,10 e 0,15 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$. Já Michelon (2005), estudando a qualidade física de solos irrigados, atribuiu valores críticos de Macro em função do teor de argila dos solos. Dessa forma, em solos com teor de argila de 0-300 g kg^{-1} , a Macro considerada crítica foi 0,10 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$; para solos com teor de argila entre 300-500 g kg^{-1} , a Macro considerada foi 0,8 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$; e em solos com teor de argila superior a 500 g kg^{-1} , a Macro considerada foi 0,6 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$.

A quantidade, o diâmetro e a continuidade dos poros no solo afetam diretamente a infiltração de água no solo (LANZANOVA et al. 2007). A distribuição do tamanho de poros afeta a capacidade de armazenamento e o movimento da água no solo (HILLEL, 1980). Essa distribuição depende da textura e da estrutura do solo e pode ser obtida através da curva característica de água no solo.

Outro atributo importante a ser considerado na avaliação da qualidade estrutural do solo é a densidade do solo (Ds). A Ds é afetada por sistemas de manejo do solo que alteram o espaço poroso, principalmente os macroporos, influenciando nas propriedades físico-hídricas importantes do solo, como a porosidade de aeração, a retenção de água

no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência à penetração (KLEIN, 2006).

A ação antrópica tende a elevar a Ds na camada superficial, em função das alterações que ocorrem na estrutura do solo. Em áreas sob sistema plantio direto, esse efeito é mais evidente, pois o revolvimento do solo é mínimo, podendo ser considerado uma consequência natural dessa técnica. De acordo com Reichert (2009), um aumento na Ds não é necessariamente prejudicial às culturas, porque, em certos limites, esse aumento pode contribuir para o armazenamento de água e para a capacidade de suporte de carga do solo. No entanto, se a elevação da Ds atingir níveis críticos, prejuízos começam a ocorrer na produtividade das culturas, em função do surgimento da compactação do solo.

A Ds pode ser usada como medida direta do estado de compactação do solo. Solos compactados apresentam maior massa de sólidos por unidade de volume, indicando maior densidade do solo. De acordo com Alves e Suzuki (2004), o maior estado de compactação de solos sob sistema de cultivo plantio direto, indicado pela Ds, ocorre na camada próxima da superfície do solo.

REINERT et al. (2008) destacam que o sistema plantio direto em um Argissolo distrófico típico elevou a Ds para níveis limitantes, observados pela restrição no crescimento do sistema radicular das plantas cultivadas. Afirmam ainda que, em condições de compactação excessiva, a mobilização eventual com a utilização de escarificadores pode ser necessária.

Para a irrigação, a Ds possui fundamental importância, pelo fato de possibilitar a transformação do conteúdo gravimétrico de água no solo em altura de lâmina de irrigação, parâmetro básico para o dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação.

2.2.3 Conteúdo de água no solo

O conteúdo de água do solo é normalmente variável de acordo com a textura do solo; assim, em solos arenosos, o conteúdo volumétrico de água na saturação está em torno de 0,40 a 0,50 m³ m⁻³; em solos de textura média, é de aproximadamente

0,50 m³ m⁻³; e, em solos argilosos, pode atingir até 0,60 m³ m⁻³ (CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000). O conhecimento do conteúdo de água no solo é de fundamental importância para o bom manejo da água de irrigação.

A relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo e o potencial matricial resulta na curva característica de água no solo. A forma da curva característica da água no solo é afetada pela estrutura e pela textura do solo e, mais especificamente, pela distribuição do tamanho de poros (HILLEL, 1980; KLEIN, 2002). Isso significa que a forma da curva se altera em solos compactados (REICHART, 1990) ou muito degradados.

Em elevados conteúdos de água no solo, nos quais os fenômenos de capilaridade são importantes, a curva característica de água do solo é dependente do arranjo e da distribuição dos poros do solo. Assim sendo, é influenciada pela estrutura do solo, tornando-se uma função da densidade e da porosidade do solo. Por outro lado, para baixos conteúdos de água no solo, a retenção depende dos fenômenos de adsorção, os quais são mais influenciados pela textura e pela superfície específica das partículas (HILLEL et al., 1972; REICHARDT; TIMM, 2004).

O conteúdo de água do solo modifica a aeração, a temperatura e a resistência mecânica à penetração, as quais são afetadas pela D_s e pela distribuição do tamanho de poros (REICHERT et al., 2003). A interação desses fatores físicos regula o crescimento e a funcionalidade do sistema radicular das plantas, refletindo no crescimento e na produtividade dos cultivos.

A determinação do conteúdo de água de um solo pode ser realizada a campo ou em laboratório. Ambos os métodos são bastante precisos, porém demandam bastante tempo e disponibilidade de equipamentos caros, dificultando sua realização em larga escala. Para facilitar a obtenção do conteúdo de água do solo em determinados potenciais, muitos pesquisadores propuseram modelos matemáticos que estimam a retenção de água a partir de parâmetros físicos do solo facilmente obtidos e determinados nas análises de rotina dos laboratórios ou em levantamento de solos. Esses modelos são denominados equações de pedotransferência ou pedofunções.

2.3 Funções de Pedotransferência

O termo funções de pedotransferência (FPTs) foi descrito pela primeira vez por Bouma (1989), com o significado de “transformando dados que possuímos em dados que necessitamos”, em referência a equações que relacionavam a retenção de água e a condutividade hidráulica a parâmetros disponíveis nos estudos de solos. Atualmente, o termo FPTs é usado para incluir as equações que estimam características edáficas de difícil obtenção por meio de outras que podem ser mais facilmente obtidas, como mencionam Oliveira et al. (2002), Pachepsky et al. (2006), Nasta et al. (2009).

As FPTs permitem que informações básicas de solo, disponíveis em relatórios de levantamentos de solos ou em Sistemas de Informação Geográfica, sejam transformadas em outras, de obtenção mais difícil e, geralmente, de custo elevado. O princípio das FPTs consiste em que o sistema de informação, ou os dados, possibilitem expressar, de forma matemática, funções de pedotransferência específicas para uma variedade de propriedades e qualidades de solo.

As propriedades hidráulicas dos solos são, em geral, de difícil determinação, devido ao custo para realização das análises, à demanda de tempo e mão-de-obra e ao pequeno número de laboratórios especializados. Nesse caso, a utilização de FPTs assume grande importância. FPTs podem prever propriedades hidráulicas do solo, como, por exemplo, o conteúdo de água a um particular valor de potencial matricial, como na capacidade de campo, no ponto de murcha permanente, e a água disponível para as plantas (TOMASELLA et al., 2000; SANTRA; SANKAR, 2008). De acordo com Solano Peraza (2003), as FPTs, para estimar as propriedades hidráulicas do solo, agem como módulos menores dentro do método do sistema de informação do solo. Esses algoritmos, quando são estabelecidos com aproximações seguras e precisas, permitem calcular relações fundamentais que simplificam grandemente o mínimo de dados taxonômicos requeridos para modelagem.

Segundo Wösten et al. (2001), quando se trabalha com bases de dados gerais, as FPTs são baratas e fáceis de usar, pois basta identificar a classe de textura a que o solo pertence. Porém, nesses casos, a precisão obtida é limitada, porque é uma

aproximação da média das propriedades hidráulicas para cada classe de textura dentro da base de dados, sem considerar as diversas variações de textura dentro de uma mesma classe e o comportamento próprio que possui cada solo.

Quando se objetiva alta precisão nas propriedades hidráulicas preditas ou seu melhor ajustamento à classe de textura em estudo, o uso de FPTs se torna relativamente caro, pois se torna necessária a determinação exata da composição granulométrica de cada solo. Portanto, é importante considerar que, no momento de usar FPTs, o pesquisador perceba que métodos indiretos não existem sem métodos diretos, pois é somente com a obtenção e a quantificação dos dados diretos do solo que se criam os bancos de dados dos quais são derivados os métodos indiretos (FPTs). Nesse sentido, Tomasella et al. (2000) e Baker (2008) mencionam que as propriedades hidráulicas do solo são consideradas determinações caras e difíceis de ser obtidas. Esse fator limita a disponibilidade de banco de dados referentes a essas propriedades do solo.

Quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e mais próximos destes estiverem os solos que terão seus dados estimados, maior é a precisão das FPTs. Diferenças nos métodos analíticos empregados para a obtenção das variáveis dependentes e independentes constituem um problema bastante comum para a composição dos bancos de dados homogêneos (OLIVEIRA et al., 2002). Diversos pesquisadores, (BRISTOW, et al., 1999; ASSAD, et al., 2001, BRUAND, 2003) consideram a textura do solo a principal variável dos modelos matemáticos para estimar as relações existentes entre as características de água no solo. Entretanto, Ungaro (2005), Saxton; Rawls (2006) e Majou et al. (2008), consideram também outros parâmetros, tais como tamanho de partículas, porosidade, matéria orgânica e Ds. Segundo esses autores, a água retida, especialmente em potenciais mais elevados, é influenciada principalmente pela estrutura do solo, e alterações na mesma podem limitar, em muito, os resultados obtidos. Dessa forma, o uso de amostras deformadas para a obtenção das FPTs não é condição ideal. Nesse sentido, Minasny et al. (2003) afirmaram que a heterogeneidade dos dados pode causar uma performance apenas razoável das FPTs, em razão de a predição não estar vinculada somente às limitações do modelo, mas também à incompatibilidade dos dados.

Na literatura são encontradas diversas equações desenvolvidas para estimar a retenção de água dos solos. Rawls et al. (1982) trabalharam com 2.543 amostras de solos coletadas em todas as regiões dos Estados Unidos. As FPTs foram desenvolvidas por regressão linear múltipla para 12 pontos da curva de retenção, entre os potenciais de -4 kPa até -1500 kPa, utilizando como variáveis explanatórias os teores de Arg, Si, areia, matéria orgânica, a D_s e os conteúdos de água nos potenciais de -33 e -1500 kPa. Aina; Periaswamy (1985) analisaram 12 perfis de solos da região oeste da Nigéria, em amostras coletadas até a profundidade de 0,42m. As FPTs foram elaboradas para os potenciais de -33 e -1500 kPa em amostras indeformadas e em amostras peneiradas, respectivamente. Van den Berg et al. (1997) utilizaram 91 amostras de solos a partir de 31 perfis para gerar FPTs por regressão linear múltipla para os potenciais de -10 kPa e -1500 kPa. Os perfis usados para o desenvolvimento das FPTs foram obtidos em solos dos seguintes países: Brasil, China, Colômbia, Gabão, Indonésia, Costa do Marfim, Quênia, Malásia, Zâmbia e Moçambique, sendo que aproximadamente 75% dos solos foram classificados como Latossolos. Rawls et al. (2003) utilizaram o banco dados da caracterização nacional de solos dos Estados Unidos para estimar a retenção de água nos potenciais de -33 kPa e -1500 kPa e encontraram que a adição do teor de carbono nas FPTs que utilizam apenas a textura do solo causou melhoria significativa na estimativa da retenção de água para os potenciais estudados.

No entanto, de acordo com Tomasella et al. (2000), a maior parte dessas equações não são adequadas às condições dos solos do Brasil, pois elas foram desenvolvidas em regiões temperadas, em solos com características diferentes da maioria dos solos tropicais brasileiros. No Brasil, segundo Minasny et al. (2003), são encontrados poucos resultados de pesquisa em FPTs relacionadas à retenção de água. Isso se deve à baixa disponibilidade de banco de dados digitais com informações de características físicas de solos.

Dentre os estudos desenvolvidos com FPTs para estimar alguns pontos da curva de retenção de água em solos brasileiros, alguns merecem destaque: Gaiser et al. (2000) desenvolveram FPTs para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 kPa e -1500 kPa, utilizando um banco de dados de solos com 627 amostras de regiões

do Nordeste do Brasil (Ceará e Piauí) e Sul da Nigéria, que têm como características comuns o desenvolvimento sob condições tropicais semi-áridas e a origem em rochas sedimentares com predomínio de arenitos; Oliveira et al. (2002) desenvolveram as FPTs para a predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco; Giarola et al. (2002) utilizaram amostras deformadas e indeformadas provenientes de 18 perfis de solos para estimar a retenção de água em solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina; Tomasella et al. (2003) desenvolveram FPTs para os potenciais de -10, -33 e -1500 kPa a partir de um extenso banco de dados de solos compreendendo 838 amostras de todas as regiões do Brasil, com predomínio de amostras de solos da região sudeste; Solano Peraza (2003) estabeleceu FPTs para estimar a retenção de água em 34 unidades de mapeamento de solos do Rio Grande do Sul; Urach (2007) desenvolveu dois conjuntos de FPTs para a estimativa da curva de retenção de água dos solos, trabalhando com dois bancos de dados de solos distintos: o primeiro com solos mais argilosos da região central do RS; e o segundo com solos franco, franco-argilosos e muito argilosos de diversas regiões do RS.

A aplicabilidade de uma FPTs é limitada quando há heterogeneidade dos dados (MINASNY et al., 2003). As pedofunções são usadas em modelos aplicados em várias escalas (PACHEPSKY et al., 1999). Entretanto, seu uso mais adequado relaciona-se a estudos em escala regional, em vez de aplicações em locais específicos (LIN et al., 1999). A utilização de FPTs deve basear-se em calibrações locais, pois as equações obtidas de outros trabalhos demonstraram baixa capacidade preditiva (COELHO et al., 1998; OLIVEIRA et al., 2002; TOMASELLA et al., 2003).

Como se observa, o desenvolvimento de FPTs requer ampla base de dados de solos. No entanto, o uso de equações para representar as relações do teor de água no solo se faz cada vez mais necessário, pois se reduzem grandemente as exigências de dados a serem coletados a campo, diminuindo os custos e o tempo para a obtenção dessas informações.

2.4 Modelo de regressão Stepwise

O modelo stepwise é um procedimento de seleção da melhor equação de regressão por inclusão e/ou substituição de sucessivas variáveis preditoras. A sequência de inserção é determinada pela medida da relevância das variáveis ainda não incluídas no modelo. O nível de relevância é avaliado pelo coeficiente de correlação parcial.

De acordo com Diniz (2008), o procedimento básico do modelo stepwise é o seguinte: (1) seleciona-se entre as variáveis preditoras Z a mais correlacionada com a variável dependente Y (suponha z_1) e encontra-se a equação de regressão linear de primeira ordem $\hat{Y} = f(z_1)$; (2) avalia-se a significância de z_1 . Caso não seja significativa, ela é descartada e adota-se um modelo $Y = Y_{\text{médio}}$ como o melhor. Se for significativa, pesquisa-se a segunda variável preditora a entrar na equação. Isso é feito analisando-se o coeficiente de correlação parcial de todas as variáveis Z que ainda não entraram na equação com Y . A variável com o maior coeficiente de correlação parcial com Y é selecionada (suponha z_2), e a segunda equação de regressão é ajustada; (3) a regressão global é checada pela significância, a melhoria no valor de R^2 é registrada, e o F -valor parcial para as variáveis z_1 e z_2 é examinado. O menor dos dois F 's parcial é então comparado com um ponto percentual F apropriado, e a correspondente variável preditora é retida ou rejeitada na equação de acordo com a significância do teste. Um preditor que pode ter sido o melhor candidato a entrar na equação em um estágio anterior pode, num estágio posterior, ser considerado supérfluo devido às relações entre ele e outras variáveis contidas na equação de regressão; e (4) o procedimento é encerrado quando não existirem mais variáveis a serem removidas da equação e quando a próxima melhor variável não for aceita na equação. Como é testada a entrada de cada variável na equação, conseqüentemente obtém-se uma série de avaliações do efeito R^2 (coeficiente de correlação múltipla).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Locais de coleta de dados

O trabalho foi realizado utilizando-se o banco de dados de análises físicas de áreas irrigadas do Sistema Irriga® da Universidade Federal de Santa Maria. Esse banco de dados possui informações sobre a caracterização física do solo de áreas irrigadas do Estado do Rio Grande do Sul (RS). As áreas hachuradas na Figura 1 representam as regiões onde foram realizadas as coletas de amostras de solo que compõem o banco de dados.

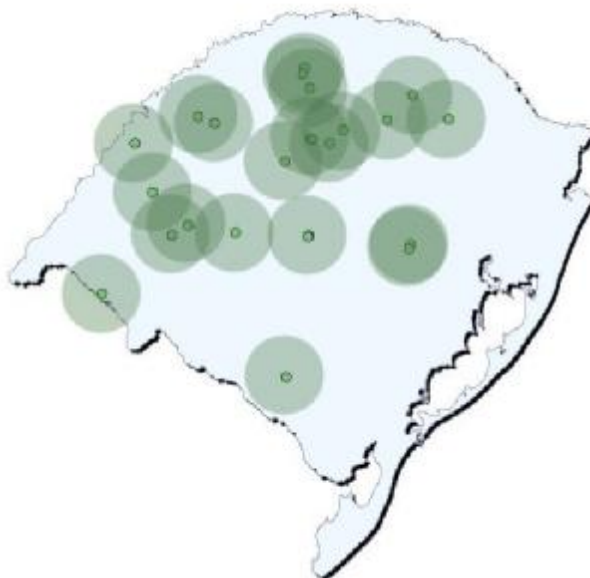


Figura 1 - Regiões onde foram realizadas as coletas de solo para compor o banco de dados do Sistema Irriga®.

Cada área amostrada para a caracterização física foi georeferenciada através da tomada dos dados de latitude, longitude e altitude do local. Em virtude do volume de material necessário e do elevado custo para a realização das análises, realizou-se, nas áreas irrigadas que eram uniformes em relação à textura do solo, em média uma

amostragem a cada 40 ha de área. Nas áreas desuniformes em relação à textura do solo, realizou-se uma amostragem em cada ponto que apresentava diferença de textura. As informações de uniformidade das áreas em relação à textura do solo foram obtidas através de uma consulta aos proprietários das mesmas e visita às áreas.

3.2 Coleta e processamento das amostras para a construção do banco de dados

Para a coleta das amostras, foram cavadas trincheiras de aproximadamente 80 cm de comprimento, 60 cm de largura e 75 cm de profundidade. Os perfis dos solos foram divididos em três camadas, em função da morfologia do solo. A camada superficial variou de 0 a 25 cm de profundidade; a camada intermediária, de 25 a 50 cm; e a camada inferior, de 50 a 75 cm de profundidade, entre os perfis amostrados. Em cada trincheira foram coletadas sete amostras de solo, na profundidade correspondente à porção mediana de cada camada, assim distribuídas: três amostras na camada superficial, duas amostras na camada intermediária e duas amostras na camada inferior.

Coletaram-se amostras com estrutura preservada, com o auxílio de um extrator, no qual era acoplado um cilindro de metal de 5,56 cm de diâmetro, 3 cm de altura e volume $72,8 \text{ cm}^3$, para a determinação da microporosidade (Micro), da densidade do solo (D_s) e da curva característica de água no solo. Quando se utilizou um cilindro com dimensões diferentes daquele especificado anteriormente, foram tomadas as medidas do diâmetro e da altura para a determinação exata do volume do mesmo.

Para as análises granulométricas e de densidade de partículas (D_p), foram coletadas aproximadamente 1000 gramas de solo com estrutura deformada, na porção mediana de cada camada do perfil do solo. Determinações analíticas de textura, D_p , D_s e porosidade foram realizadas conforme métodos descritos no manual de análises de solo da EMBRAPA (1997). Para a análise da textura do solo, utilizou-se o método do densímetro. A D_p foi obtida pelo método do balão volumétrico, e a D_s , pelo método do anel volumétrico.

No laboratório, as amostras de solo com estrutura preservada foram saturadas durante 48 horas e depois pesadas. Posteriormente, as amostras seguiram para a mesa de tensão, onde foram submetidas à tensão de 1 kPa por 48 horas e à tensão de 6 kPa por mais 48 horas. A umidade referente à tensão de 6 kPa correspondeu ao percentual de microporos. A porosidade total (Pt) foi calculada a partir da Ds e Dp, através da seguinte expressão: $Pt = (Dp - Ds) / Dp$. A Macro foi calculada pela diferença entre a Pt e a Micro.

As amostras de solo, ainda com estrutura preservada, seguiram para o aparelho extrator de água idealizado por Richards (RICHARDS, 1949), onde permaneceram por um período de 96 horas na tensão de 33 kPa e outras 96 horas na tensão de 100 kPa, para a obtenção do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 e -100 kPa, respectivamente. Depois disso, as amostras foram colocadas na estufa a 105°C para secagem até massa constante.

O conteúdo de água das amostras de solo nos potenciais de -500 e -1500 kPa foi determinado através de psicrometria, utilizando-se câmaras de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 “dewpoint potentiometer” (DECAGON, 2002). Para essa avaliação, utilizaram-se de cinco a sete subamostras de solo com estrutura deformada, as quais foram secas ao ar, umedecidas com água através de um borrifador, pesadas e levadas até o WP4, onde se fez a leitura do potencial em que a amostra se encontrava. Depois disso as amostras foram levadas para a estufa para secagem até massa constante. A diferença entre as duas pesagens correspondeu ao conteúdo de água do solo no potencial determinado pelo WP4. Relacionando-se o potencial determinado no WP4 para cada subamostra com sua respectiva umidade, traçou-se uma curva, com escala logarítmica, da qual foi obtido o conteúdo de água do solo nos potenciais de -500 e -1500 kPa.

3.3 Composição do banco de dados

O banco de dados utilizado foi composto por informações de textura do solo, D_s , D_p , Macro, Micro, Pt, além das informações do conteúdo de água nos potenciais de 0, -1, -6, -33, -100, -500 e -1500 kPa de amostras do solo de áreas irrigadas do Estado do RS.

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas 2.235 amostras de solo. Destas, 1.200 foram da camada superficial, 520 da camada intermediária e 515 da camada inferior dos perfis do solo. O banco de dados total foi dividido aleatoriamente em dois conjuntos de dados: um conjunto foi utilizado para gerar as FPTs (60% do banco de dados total de cada camada), e o outro foi utilizado para validar os modelos gerados (40% do banco de dados total de cada camada).

3.4 Geração e obtenção das equações de pedotransferência

Os dados foram submetidos a análise estatística utilizando-se o pacote estatístico SAS, onde, primeiramente, realizou-se a análise de correlação simples entre todas as variáveis. Posteriormente, realizou-se a análise de regressão múltipla por meio da opção “stepwise”, do programa estatístico SAS (SAS; 1997), para obter as FPTs.

Um exemplo de regressão múltipla é $\theta_{\psi_m} = \alpha \text{ areia} + \beta S_i + \lambda \text{ Arg} + \delta D_s$, onde θ é conteúdo de água no potencial determinado Ψ_m , considerado a variável dependente; α , β , λ , δ , são os coeficientes de regressão e areia, S_i , Arg e D_s são as variáveis independentes da equação.

Na definição das equações de regressão linear múltiplas, para prever os parâmetros do modelo, foi estabelecido que o comportamento de uma característica na equação deve afetar o parâmetro a ser predito (variável dependente) de forma coerente com o conhecimento empírico e teórico do processo.

A partir dos dados existentes no banco, foram geradas FPTs para estimar cada um dos pontos de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa da curva de retenção de água no solo, totalizando seis FPTs geradas para cada camada estudada (uma para cada ponto da curva). Essas FPTs foram geradas por meio de variáveis independentes incluídas no modelo, em nível de 5% de probabilidade de erro. As variáveis independentes utilizadas neste estudo foram: areia fina (AF), areia grossa (AGr), Si, Arg, Ds, Dp, Macro, Micro e Pt.

Na camada superficial foram utilizadas 720 amostras (60% do total de amostras da camada) para gerar as FPTs e 480 amostras (40% do total de amostras da camada) para validar as mesmas. Na camada intermediária utilizaram-se 312 e 208 amostras para gerar e validar as FPTs, respectivamente. Na camada inferior foram utilizadas 309 e 206 amostras para gerar e validar as FPTs, respectivamente.

3.5 Avaliação da acurácia das funções de pedotransferência

A acurácia das FPTs foi analisada graficamente pela relação 1:1 dos dados estimados versus os observados e por meio dos indicadores estatísticos coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME) e raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE). O ME e o RMSE foram obtidos através das seguintes equações:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ei - mi) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ei - mi)^2} \quad (2)$$

onde:

n = número de observações;

e_i = valor estimado pela FPT da variável de interesse;

m_i = valor medido da variável de interesse.

O erro médio (ME) é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores (se positivo) ou de subestimar (se negativo). Quanto mais próximo de zero for o ME, maior será a acurácia do modelo.

A raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da linha 1:1. Quando o valor de RMSE é igual a zero, indica que houve ajuste perfeito entre os dados estimados e observados.

Para a análise da acurácia das FPTs, utilizou-se o conjunto das amostras que não deram origem aos modelos (40% do banco de dados total). Primeiramente, calcularam-se os indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, em cada potencial matricial considerado, confrontando-se os dados observados (presentes no banco) com o dados estimados (estimados pelas FPTs obtidas), utilizando todo o conjunto de dados selecionado para validar as FPTs (40% do banco de dados total), em cada camada do perfil do solo.

Em um segundo momento, para a camada superficial, foram calculados a média e o desvio padrão das variáveis presentes no banco de dados e, para cada variável independente presente em cada FPT gerada, realizou-se a seleção de três situações de conjuntos de dados, assim descritas: situação 1: conjunto dos dados presentes no intervalo de -0,5 a 0,5 desvios padrão da média para a variável independente considerada; situação 2: conjunto dos dados presentes no intervalo de -1 a 1 desvio padrão da média para a variável independente considerada; situação 3: conjunto dos dados presentes no intervalo de -1,5 a 1,5 desvios padrão da média para a variável independente considerada. Essa divisão em situações 1, 2 e 3 de conjunto de dados foi realizada para cada variável independente presente nas FPTs e em todas as FPTs geradas da camada superficial. Após isso foram calculados os indicadores estatísticos ME e RMSE para cada variável independente, nas três situações consideradas.

Para facilitar a interpretação dos resultados, quando os dados foram divididos em situações 1, 2 e 3 de conjunto de dados, os indicadores estatísticos ME e RMSE foram

calculados em função do armazenamento de água no solo. Os dados dos armazenamentos de água no solo, observado e estimado, foram obtidos multiplicando-se os conteúdos de água observados (presentes no banco) e estimados (obtidos pelas FPTs) respectivamente, pela espessura da camada do perfil do solo (250mm).

Os resultados dos indicadores estatísticos ME e RMSE obtidos nas situações 1, 2 e 3 de conjunto de dados foram comparados com os resultados de ME e RMSE obtidos com todo o conjunto de dados utilizado para validar as FPTs, este denominado de situação 4. Dessa forma, foi possível identificar a acurácia das FPTs geradas para cada potencial, de acordo com a variação na amplitude dos dados das variáveis independentes que compunham o modelo. Adicionalmente, foi possível identificar o intervalo de dados das variáveis independentes presentes nas FPTs, para o qual o modelo é válido - ou de maior acurácia - para a utilização nos laboratórios de física do solo.

A divisão em situações de conjuntos de dados não foi realizada nas camadas intermediária e inferior, pois os erros na estimativa, quando calculados com todo o conjunto de dados de validação das FPTs, foram baixos, não sendo necessário fracionar os mesmos em intervalos de acordo com os desvios da média para indicar a faixa de dados para os quais as FPTs dessas camadas foram mais precisas.

Como forma de se estabelecer um parâmetro indicativo da possibilidade de utilização das FPTs em laboratórios de física do solo, em função dos resultados de ME para cada situação de conjunto de dados, realizou-se o seguinte procedimento: inicialmente, calculou-se a média do conteúdo de água observado em cada potencial matricial estudado. Esse valor foi então transformado em lâmina de água armazenada, multiplicando-se pela espessura da camada. Com esse valor, calcularam-se três percentuais do mesmo 1%; 3% e 5%. Por fim, os valores de ME obtidos em cada uma das situações de conjunto de dados descritas anteriormente foram comparados com os percentuais de 1%; 3% e 5% da lâmina de água média observada em cada potencial matricial estudado, adotando-se o seguinte critério: (i) quando os valores de ME foram menores ou iguais ao valor de 1% da lâmina de água média observada para determinado potencial matricial, considerou-se que a FPT gerada para aquele potencial matricial apresentou excelente precisão na estimativa dos dados; (ii) quando os valores

de ME foram superiores a 1% e inferiores a 3% da lâmina de água média observada para determinado potencial matricial, considerou-se que a FPT gerada para aquele potencial matricial apresentou boa precisão na estimativa dos dados; (iii) quando os valores de ME foram superiores a 3% e inferiores a 5% da lâmina de água média observada para determinado potencial matricial, considerou-se que a FPT gerada para aquele potencial matricial apresentou média precisão na estimativa dos dados.

3.6 Análise da acurácia das equações de pedotransferência na estimativa da curva característica de água

Na tentativa de avaliar a acurácia das FPTs, na estimativa não apenas de um único ponto da curva, foram selecionadas três faixas de potenciais da curva característica de água, nas quais as FPTs foram avaliadas. As faixas de potenciais utilizadas foram: 0 a -33 kPa, -33 a -1500 kPa e 0 a -1500 kPa;

Para compor a faixa de 0 a -33 kPa, utilizaram-se os dados presentes no banco, referentes aos potenciais de 0, -1 e -33 kPa (dados observados da faixa). Esses dados foram relacionados com o conjunto de dados estimados pelas FPTs obtidas para os potenciais de 0, -1 e -33 kPa (dados estimados da faixa). A faixa de -33 a -1500 kPa foi composta pelos dados presentes no banco, referentes aos potenciais de -33, -100, -500 e -1500 kPa (dados observados da faixa). Esses dados foram relacionados com os conjuntos de dados estimados pelas FPTs obtidas para os potenciais de -33, -100, -500 e -1500 kPa (dados estimados da faixa).

A faixa de 0 a -1500 kPa foi composta pelo conjunto de dados dos potenciais 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa presentes no banco, formando o conjunto de dados observado dessa faixa. Esses dados foram relacionados com o conjunto de dados estimados pelas FPTs geradas para os potenciais 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa (dados estimados da faixa).

Os cálculos foram realizados em função do armazenamento de água nas faixas, e a eficiência das FPTs foi calculada por meio dos indicadores estatísticos ME e RMSE.

O armazenamento de água nas faixas foi obtido multiplicando-se os conteúdos de água, observado e estimado, de cada faixa, pela profundidade da camada (250mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Amplitude de variação dos atributos componentes do banco de dados

As áreas irrigadas por aspersão do Estado do Rio Grande do Sul concentram-se, em sua grande maioria, nas regiões do Planalto e Missões. Na Figura 2 é apresentada a variação textural das amostras de solo que compõem o banco de dados total das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS utilizados neste trabalho.

Observa-se o predomínio de solos com teor de Arg superior a 40%. Isso se deve ao fato de que as regiões onde se concentram as áreas irrigadas por aspersão do RS caracterizam-se por apresentar Latossolos com textura argilosa a muito argilosa. O banco de dados utilizado apresentou distribuição textural homogênea ao longo do perfil do solo, com leve incremento no teor de argila de acordo com o aumento na profundidade do perfil do solo (Figura 2).

Propriedades como textura, Ds e porosidade variam de um solo para outro. Isso permite que os solos manifestem suas características próprias que os distinguem dentro de um grupo determinado de classes. A descrição estatística simples, incluindo os valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis analisadas nas camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS, é apresentada na Tabela 1.

Os conjuntos de dados utilizados para gerar e para validar as FPTs apresentaram valores semelhantes para as três camadas avaliadas, algo esperado devido ao fracionamento aleatório do banco de dados original. As amostras utilizadas na camada superficial apresentaram teores médios aproximados de 25, 21 e 52% para as frações texturais areia, Si e Arg, respectivamente. Os valores médios de Ds diminuíram e a Macro aumentou com o incremento na profundidade do perfil do solo (Tabela 1). Isso provavelmente ocorreu devido a presença de compactação na camada superficial de áreas irrigadas do RS, conforme observado por Michelon et al. (2007).

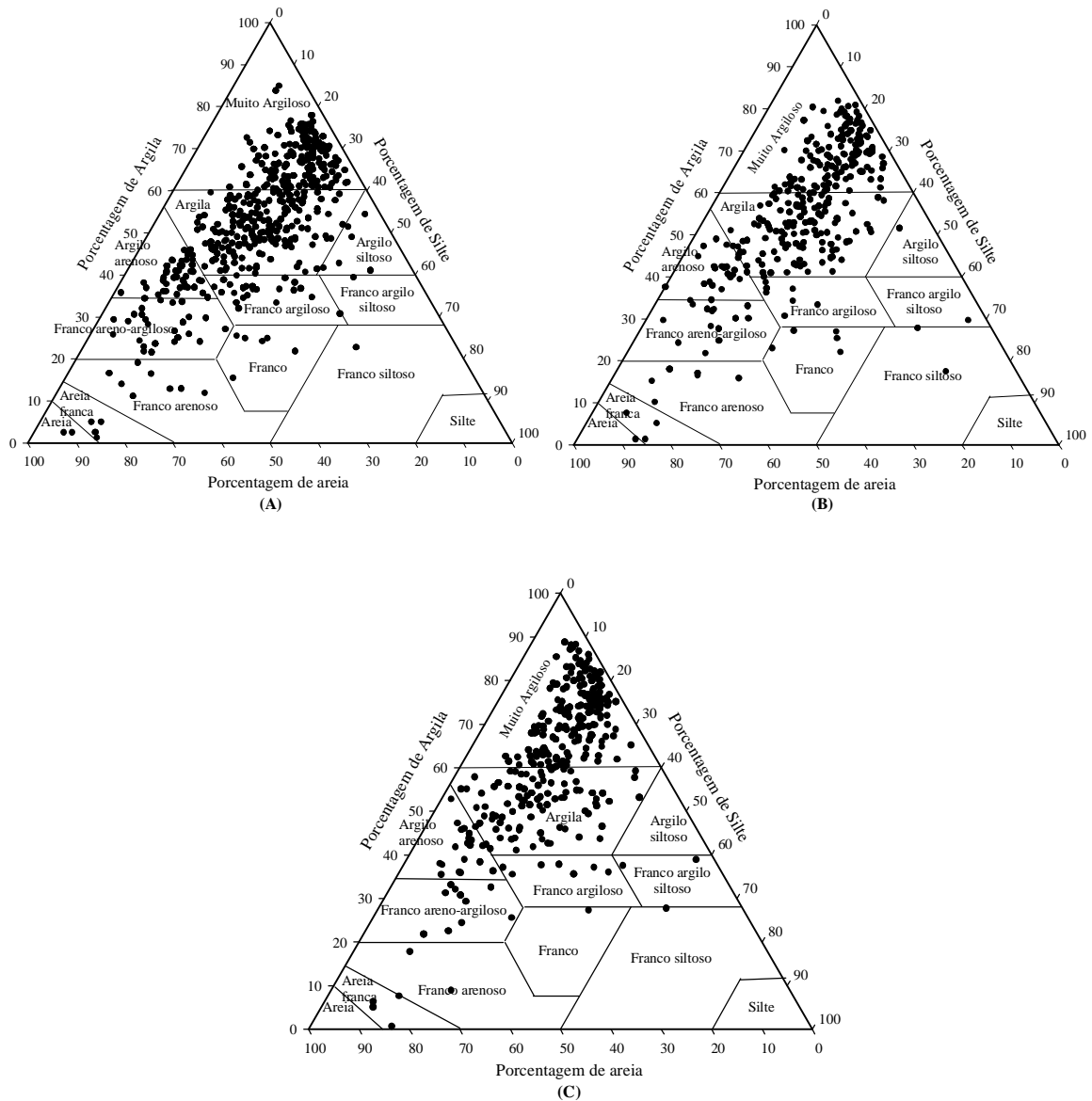


Figura 2 – Variabilidade textural dos solos do Estado do Rio Grande do Sul disponíveis no banco de dados utilizado para desenvolver as Funções de Pedotransferência, das camadas superficial (A), intermediária (B) e inferior (C) do perfil do solo

A Pt média foi mais elevada na camada inferior. Observou-se um incremento nos teores médios de Arg e diminuição nos teores médios de AGr e AF, de acordo com o aumento da profundidade do perfil do solo (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para gerar e validar as funções de pedotransferência das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS

Variáveis	Dados utilizados para gerar as FPTs				Dados utilizados para validar as FPTs			
	Máximo	Mínimo	Média	Desvp	Máximo	Mínimo	Média	Desvp
Camada superficial								
Ds	1,77	0,97	1,40	0,11	1,77	1,00	1,40	0,11
Dp	2,96	2,34	2,72	0,11	2,96	2,36	2,71	0,11
Macro	0,240	0,002	0,080	0,040	0,280	0,001	0,080	0,040
Micro	0,570	0,160	0,400	0,040	0,520	0,170	0,400	0,040
Pt	0,610	0,300	0,480	0,050	0,640	0,300	0,480	0,050
AGr	46	1	9,47	6,41	43	1	9,48	6,56
AF	72	1	16,39	12,42	70	1	16,33	11,62
Si	57	1	21,30	7,57	50	1	21,83	7,72
Arg	84	1	52,80	14,64	85	5	52,36	14,40
θ_0	0,703	0,300	0,517	0,054	0,754	0,325	0,519	0,051
θ_{-1}	0,591	0,262	0,454	0,044	0,560	0,271	0,454	0,042
θ_{-33}	0,499	0,112	0,369	0,049	0,487	0,122	0,368	0,045
θ_{-100}	0,485	0,069	0,349	0,050	0,475	0,101	0,348	0,047
θ_{-500}	0,415	0,042	0,260	0,054	0,400	0,053	0,257	0,053
θ_{-1500}	0,334	0,032	0,226	0,050	0,330	0,039	0,223	0,050
Camada intermediária								
Ds	1,77	1,02	1,32	0,11	1,79	0,97	1,32	0,11
Dp	2,95	2,46	2,71	0,10	2,92	2,27	2,71	0,12
Macro	0,260	0,010	0,100	0,030	0,290	0,010	0,100	0,040
Micro	0,500	0,160	0,410	0,050	0,480	0,230	0,410	0,040
Pt	0,630	0,310	0,510	0,050	0,650	0,270	0,510	0,050
AGr	42	1	9,23	6,67	47	1	8,43	6,33
AF	61	1	16,15	11,79	60	1	14,13	10,49
Si	68	1	19,57	7,63	57	1	20,89	7,89
Arg	82	1	55,05	15,62	80	7	56,54	13,67
θ_0	0,638	0,329	0,535	0,055	0,635	0,336	0,540	0,050
θ_{-1}	0,560	0,273	0,462	0,047	0,537	0,295	0,466	0,040
θ_{-33}	0,471	0,108	0,366	0,055	0,457	0,164	0,372	0,050
θ_{-100}	0,457	0,080	0,345	0,056	0,438	0,140	0,353	0,050
θ_{-500}	0,380	0,046	0,254	0,056	0,387	0,062	0,260	0,050
θ_{-1500}	0,337	0,046	0,221	0,052	0,337	0,041	0,230	0,050
Camada inferior								
Ds	1,65	0,86	1,24	0,11	1,53	1,00	1,24	0,09
Dp	2,95	2,49	2,72	0,09	2,94	2,34	2,72	0,11
Macro	0,370	0,003	0,130	0,050	0,260	0,008	0,130	0,040
Micro	0,510	0,160	0,410	0,050	0,490	0,290	0,410	0,040
Pt	0,690	0,350	0,540	0,050	0,650	0,420	0,540	0,040

Tabela 1 – Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para gerar e validar as funções de pedotransferência das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS

Variáveis	Dados utilizados para gerar as FPTs				Dados utilizados para validar as FPTs			
	Máximo	Mínimo	Média	Desvp	Máximo	Mínimo	Média	Desvp
Camada inferior								
AGr	43	1	7,19	6,18	24	1	7,32	5,41
AF	52	1	13,36	10,47	62	1	13,65	10,75
Si	57	2	17,32	7,66	42	3	18,13	6,89
Arg	89	6	62,11	15,46	88	22	60,89	14,99
θ_0	0,691	0,367	0,560	0,059	0,660	0,421	0,560	0,040
θ_{-1}	0,584	0,317	0,479	0,049	0,572	0,366	0,478	0,040
θ_{-33}	0,476	0,098	0,370	0,055	0,476	0,242	0,371	0,050
θ_{-100}	0,454	0,080	0,349	0,057	0,464	0,223	0,352	0,050
θ_{-500}	0,426	0,067	0,263	0,050	0,402	0,137	0,262	0,050
θ_{-1500}	0,335	0,046	0,234	0,050	0,343	0,118	0,232	0,050

Onde: FPT - funções de pedotransferência; Desvp – desvio padrão; Ds - densidade do solo (g cm^{-3}); Dp - densidade de partículas (g cm^{-3}); Macro - macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro - microporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Pt - porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); $\theta_0, \theta_{-1}, \theta_{-33}, \theta_{-100}, \theta_{-500}, \theta_{-1500}$ = conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 KPa, respectivamente.

Os valores médios do conteúdo de água nos diferentes potenciais matriciais encontram-se em faixas normais esperadas para solos que apresentam textura argilosa. A amplitude de variação dos atributos avaliados foi elevada, fato desejável para o estabelecimento das relações entre os mesmos (GIAROLA et al., 2002). Isso permite o estudo de associação dos atributos com a retenção de água no solo.

4.2 Correlações entre as variáveis e a retenção de água

As características estruturais, granulométricas e mineralógicas são responsáveis pela retenção de água no solo. As principais forças responsáveis pela retenção de água no solo são as forças capilares, ligadas aos poros do solo, e as forças de adsorção, ligadas às partículas granulométricas do solo. Unidas, essas forças dão origem às forças mátricas, originando o potencial mátrico da água no solo (LIBARDI, 2005).

O coeficiente de correlação de Pearson mostra o grau de relação existente entre as características do solo, de forma isolada, e a umidade retida a determinado potencial. Pode-se interpretá-lo como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis. Quanto maior o coeficiente de correlação, maior é a influência de determinado atributo do solo na retenção de água.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados das correlações entre as variáveis e a retenção de água a diferentes potenciais matriciais, obtidos no conjunto de dados utilizado para gerar as FPTs das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS. Observa-se que a Pt foi o atributo que melhor correlacionou-se com a umidade de saturação (0 kPa) e que, de maneira geral, o atributo Micro apresentou as melhores correlações com a retenção de água, especialmente em potenciais mais elevados (até -100 kPa).

Nos potenciais mais baixos (-500 e -1500 kPa), as frações texturais Arg e areia, juntamente com a Micro, foram os atributos que melhor se correlacionaram com a retenção de água (Tabela 2). As frações texturais AF e AGr apresentaram correlação negativa, e a Arg, correlação positiva com a retenção de água. A correlação positiva da Arg com a retenção de água é explicada pelo efeito das partículas menos grosseiras do solo na retenção de água, em contraposição ao efeito das partículas maiores, no caso da areia (SOLANO PERAZA, 2003). Observa-se que as correlações das frações texturais areia e Arg aumentam conforme se eleva a tensão de água no solo (redução no potencial matricial) (Tabela 2), destacando a importância da área superficial das partículas na retenção de água em potenciais mais baixos. Resultados semelhantes foram encontrados por Solano Peraza (2003).

Além da composição granulométrica, alguns atributos estruturais do solo apresentam alta correlação com a retenção de água, especialmente em potenciais mais elevados. Segundo Hillel (1998), em elevados potenciais matriciais, as forças capilares são mais atuantes e, nesses potenciais, a retenção de água é influenciada pela estrutura do solo. Por outro lado, em potenciais mais baixos, a retenção de água no solo depende dos fenômenos de adsorção, os quais são mais influenciados pela textura e pela superfície específica das partículas.

Tabela 2 – Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis e a umidade retida a diferentes potenciais das amostras utilizadas para gerar as funções de pedotransferência das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do RS

Variáveis	Potencial, kPa					
	0	-1	-33	-100	-500	-1500
Camada superficial						
Ds	-0,75	-0,67	-0,45	-0,44	-0,28	-0,31
Dp	0,46	0,49	0,47	0,46	0,52	0,56
Macro	0,16	-0,04	-0,35	-0,35	-0,22	-0,20
Micro	0,77	0,89	0,96	0,94	0,72	0,74
Pt	0,82	0,77	0,58	0,56	0,46	0,50
AGr	-0,62	-0,64	-0,65	-0,65	-0,68	-0,74
AF	-0,67	-0,71	-0,73	-0,73	-0,73	-0,79
Si	0,32	0,30	0,38	0,38	0,31	0,34
Arg	0,68	0,72	0,71	0,71	0,75	0,82
Camada intermediária						
Ds	-0,81	-0,76	-0,60	-0,59	-0,45	-0,48
Dp	0,57	0,56	0,44	0,42	0,44	0,44
Macro	0,02 ^{ns}	-0,14	-0,43	-0,44	-0,34	-0,36
Micro	0,84	0,91	0,96	0,95	0,78	0,81
Pt	0,86	0,81	0,64	0,63	0,53	0,55
AGr	-0,75	-0,76	-0,77	-0,77	-0,74	-0,78
AF	-0,65	-0,68	-0,79	-0,79	-0,76	-0,82
Si	0,11	0,13	0,26	0,26	0,21	0,23
Arg	0,76	0,78	0,80	0,80	0,78	0,84
Camada inferior						
Ds	-0,74	-0,64	-0,27	-0,26	-0,15	-0,19
Dp	0,52	0,46	0,37	0,37	0,43	0,43
Macro	0,08 ^{ns}	-0,13	-0,56	-0,55	-0,45	-0,44
Micro	0,72	0,85	0,96	0,92	0,75	0,77
Pt	0,80	0,70	0,37	0,35	0,28	0,31
AGr	-0,64	-0,65	-0,76	-0,73	-0,75	-0,78
AF	-0,58	-0,60	-0,72	-0,68	-0,72	-0,75
Si	0,04 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,18	0,17	0,20	0,23
Arg	0,63	0,64	0,70	0,67	0,69	0,71

Onde: Ds - densidade do solo (g cm^{-3}); Dp - densidade de partículas (g cm^{-3}); Macro - macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro - microporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Pt - porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5% de probabilidade.

Alguns autores, como Giarola et al. (2002), Oliveira et al. (2002), Solano Peraza (2003) e Urach (2007), encontraram que a composição granulométrica do solo é a característica que melhor descreve a retenção de água no solo. Entretanto, esses autores trabalharam com banco de dados de amostras de solo com estrutura deformada. Isso provavelmente influenciou na baixa correlação dos atributos estruturais com a retenção de água.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, é possível afirmar que, ao se utilizar banco de dados com amostras de estrutura preservada, a modelagem da estimativa da retenção de água nos solos deve considerar, além da textura, os parâmetros estruturais do solo.

4.3 Estimativa da retenção de água na camada superficial de solos do RS

4.3.1 Estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa

A FPT gerada para estimar a retenção de água no potencial de 0 kPa e seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) são apresentados na Tabela 3. Observa-se que apenas atributos estruturais apresentaram contribuição significativa para a composição da FPT.

A Pt foi o atributo que mais contribuiu para a função gerada, apresentando um coeficiente de determinação parcial de 0,67, indicando que, para o banco de dados utilizado, a Pt foi responsável por 67% da variação da retenção de água no potencial de 0 kPa. Esse resultado está de acordo com os valores apresentados na Tabela 2, onde se observa a alta correlação da porosidade total com a retenção de água no potencial de 0 kPa. Spohr (2007) confirma essa relação e utiliza o volume total de poros do solo como equivalente ao volume de água obtido no potencial de 0 kPa.

Tabela 3 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Variáveis	Coefficiente	R ² parcial
Ds	-0,0804	0,004
Dp	ns	
Macro	ns	
Micro	0,5122	0,10
Pt	0,4115	0,67
AGr	ns	
AF	ns	
Si	ns	
Arg	ns	
Intersecção	0,2255	
R ²		0,774

Onde: R² – coeficiente de determinação; R² parcial - contribuição de cada variável para o R²; Ds - densidade do solo (g cm⁻³); Dp - densidade de partículas (g cm⁻³); Macro - macroporosidade (dm³ dm⁻³); Micro - microporosidade (dm³ dm⁻³); Pt - porosidade total (dm³ dm⁻³); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3, a FPT para estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_0 = 0,2255 - 0,0804Ds + 0,5122Micro + 0,4115Pt \quad (3)$$

A capacidade preditiva da equação 3, avaliada em um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem, expressa pela relação 1:1 dos dados observados (presentes no banco) e estimados pela FPT₀₍₁₎, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, calculados com todas as amostras presentes no banco de dados utilizado para validar a FPT₀₍₁₎, é apresentada na Figura 3.

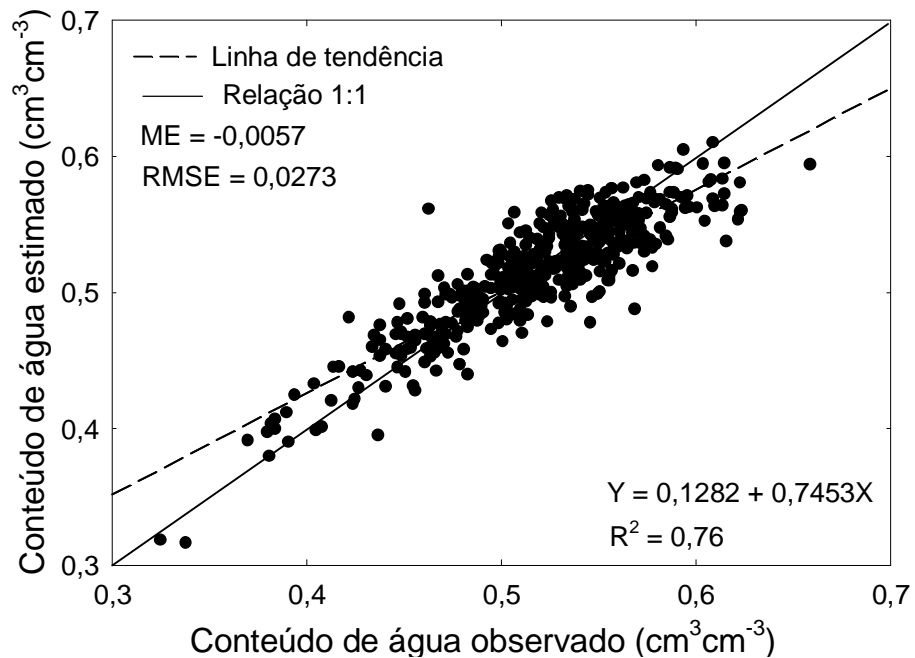


Figura 3 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de 0 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

A análise dos indicadores estatísticos calculados para avaliar a $FPT_{0(1)}$ indica que houve leve subestimativa ($ME = -0,0057 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) do conteúdo de água do solo calculado pela $FPT_{0(1)}$. Comparando a linha pontilhada (linha de tendência) com a linha contínua (relação 1:1), observa-se que a $FPT_{0(1)}$ tende a subestimar os valores do conteúdo de água do solo para valores superiores a $0,51 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$. Houve certa dispersão dos pontos em torno da relação 1:1 ($RMSE = 0,0273 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$), especialmente para valores mais elevados do conteúdo de água do solo, resultando em um coeficiente de determinação R^2 de 0,76. Dessa forma, pode-se afirmar que a $FPT_{0(1)}$ apresentou eficiência satisfatória na estimativa do teor de água no potencial do 0 kPa.

Para identificar o intervalo de valores das variáveis independentes nos quais as FPTs obtidas apresentam maior acurácia, bem como limitar a faixa de utilização das mesmas de acordo com os valores mínimos e máximos das variáveis que as compõem, foram criadas quatro situações de conjunto de dados, em função dos desvios da média de cada variável independente presente em cada FPT. A faixa de variação das variáveis, em cada situação, é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Faixas de variação das variáveis presentes nas pedofunções obtidas para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, em quatro situações de validação dos modelos

Variáveis	Situação 1	Situação 2	Situação 3	Situação 4
	-0,5 a 0,5 σ	-1 a 1 σ	-1,5 a 1,5 σ	Todos os dados
Ds	1,34 – 1,46	1,29 – 1,52	1,23 – 1,57	1,00 – 1,77
Macro	0,06 – 0,10	0,04 – 0,12	0,02 – 0,14	0,001 – 0,28
Micro	0,38 – 0,42	0,36 – 0,44	0,34 – 0,46	0,17 – 0,52
Pt	0,46 – 0,51	0,43 – 0,53	0,41 – 0,56	0,30 – 0,64
AF	10 – 22	5 – 28	1 -34	1 – 70
Si	18 – 26	14 – 29	10 – 33	1 – 50
Arg	45– 59	38 – 67	31 – 74	5 – 85
Dp	2,66 – 2,77	2,61 – 2,82	2,55 – 2,87	1,00 – 1,77

Onde: Ds - densidade do solo (g cm^{-3}); Macro - macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro - microporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Pt - porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); AF – areia fina (%); Si – silte (%); Arg – argila (%); Dp – densidade de partículas (g cm^{-3}); σ – desvio padrão.

A acurácia de uma FPT é variável em função da homogeneidade do banco de dados. Segundo Minasny et al. (2003), quanto mais homogêneo for o banco de dados, maior será a precisão da FPT. Os conjuntos com maior homogeneidade e maior heterogeneidade dos dados das variáveis estão presentes nas situações 1 e 4, respectivamente (Tabela 4).

4.3.1.1 Análise da acurácia da $FPT_{0(1)}$ em diferentes conjuntos de dados

A acurácia da $FPT_{0(1)}$ em função da variação das variáveis Ds, Micro e Pt foi avaliada por meio dos indicadores estatísticos ME e RMSE e é apresentada nas Figuras 4 e 5. Observa-se que, nas quatro situações de cálculo, o ME foi negativo para todas as variáveis (Figura 4), indicando que houve subestimativa do armazenamento de água no potencial de 0 kPa, em todas as situações. O ME diminuiu à medida que se utilizou conjunto de dados com maior faixa de variação das variáveis (maiores desvios da média), para a estimativa do armazenamento de água, nas três variáveis

consideradas (Figura 4). O RMSE também aumentou em função do aumento na faixa de variação das variáveis (Figura 5), indicando que a dispersão dos dados da relação 1:1 é maior à medida que se utiliza uma faixa mais ampla de valores (Tabela 4).

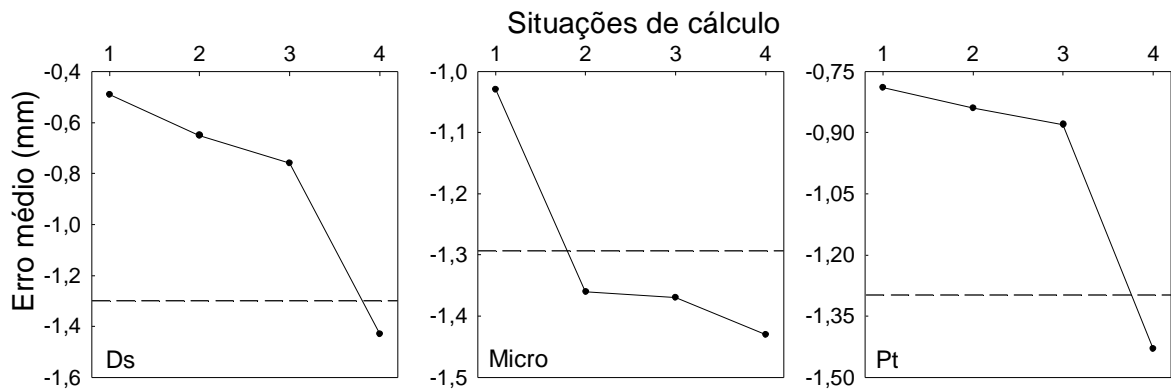


Figura 4 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa, em quatro situações de conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e porosidade total. A linha tracejada representa o valor de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para esse potencial

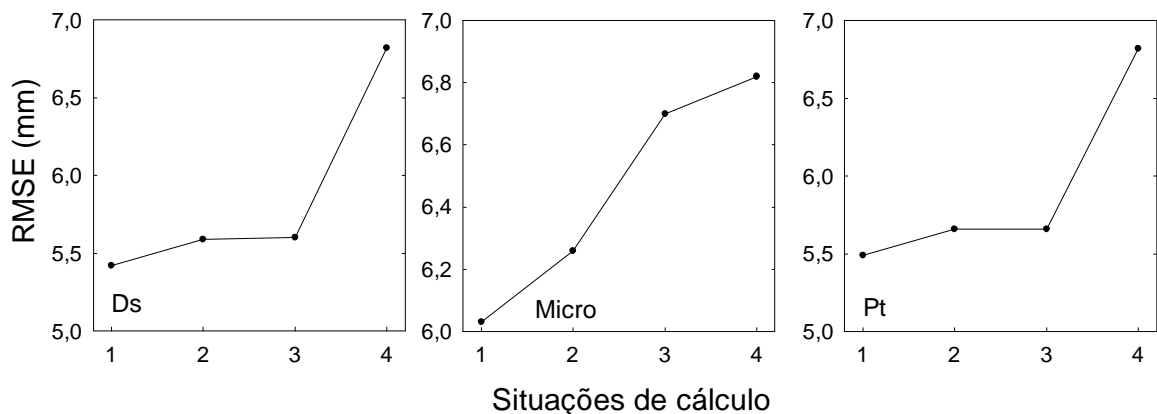


Figura 5 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa, em quatro situações de conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e porosidade total

Os valores de ME foram comparados com percentuais da lâmina média de água armazenada em cada potencial medida no laboratório, como forma de identificar a precisão de cada FPT gerada. Na Tabela 5 são apresentadas as lâminas médias de água armazenada obtidas em laboratório, para cada potencial estudado na camada superficial, e os valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas.

Tabela 5 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas

Potencial (kPa)	Lâmina média observada (mm)	Percentuais da lâmina média (mm)		
		1%	3%	5%
0	129,83	1,29	3,89	6,49
-1	113,62	1,14	3,41	5,68
-33	92,10	0,92	2,76	4,60
-100	87,13	0,87	2,61	4,36
-500	64,16	0,64	1,92	3,21
-1500	55,82	0,56	1,67	2,79

Ao relacionar os valores de ME da Figura 4 com os percentuais da lâmina média para o potencial de 0 kPa, apresentados na Tabela 5, observa-se que as variáveis Ds e Pt apresentaram valores de ME inferiores a 1% do valor da lâmina média observada para o potencial de 0 kPa nas situações 1, 2 e 3 de conjunto de dados avaliados. No entanto, para a Micro, os valores de ME foram inferiores a esse percentual apenas na situação 1 (Figura 4). Dessa forma, pode-se afirmar que, quando se deseja excelente precisão na obtenção dos dados estimados pela $FPT_{0(1)}$, os valores da Micro das amostras devem estar compreendidos entre 0,38 a 0,42 $dm^3 dm^{-3}$ (situação 1), e os valores de Ds e de Pt das amostras devem estar nos limites apresentados na situação 3 (Tabela 4). Assim sendo, considerando que no campo são coletadas duas amostras em cada profundidade, o procedimento laboratorial das amostras que vêm do campo seria o seguinte: com uma das amostras, fazem-se as determinações de Ds, Micro e Pt e

analisam-se os valores obtidos. Se os mesmos se encontram dentro da faixa descrita na situação 1 para a Micro e na situação 3 para a Ds e a Pt (Tabela 4), a $FPT_{0(1)}$ pode ser utilizada no laboratório para a estimativa do conteúdo de água no potencial de 0 kPa com excelente precisão (valor tolerado de 1% de erro na estimativa). Caso os mesmos não se encontrem dentro dessas faixas, e se deseje excelente precisão na estimativa, a segunda amostra coletada na referida profundidade (repetição) deve seguir a rotina de laboratório para a determinação do conteúdo de água no potencial de 0 kPa, ou seja, não se recomenda a utilização da $FPT_{0(1)}$.

Nas situações em que é possível tolerar um maior percentual de erro na estimativa, até um percentual de 3% de erro (considerada na metodologia como uma boa precisão), a $FPT_{0(1)}$ pode ser utilizada com os limites aceitáveis de cada variável, iguais àqueles apresentados na situação 4 (Tabela 4). Pode-se afirmar isso porque os valores de ME observados na Figura 4 para as variáveis Ds, Micro e Pt são inferiores ao valor de 3% da lâmina média de água medida em laboratório para o potencial de 0 kPa (Tabela 5), nas quatro situações de conjunto de dados.

O ME da estimativa do armazenamento de água pela $FPT_{0(1)}$, quando se utilizaram todas as variáveis presentes no banco de dados de validação da $FPT_{0(1)}$, foi de -1,45 mm (situação 4 da Figura 4). Em termos práticos, esse valor significa que, ao se utilizar a $FPT_{0(1)}$ para estimar a lâmina de água armazenada na camada de 0 a 25 cm, no potencial de 0 kPa, subestima-se em 1,45 mm a mesma, quando comparada à lâmina de água obtida caso o conteúdo de água no potencial de 0 kPa fosse medido em laboratório. Esse valor de ME é inferior ao valor de 3% da lâmina média de água armazenada medida em laboratório (Tabela 5) para o potencial de 0 kPa, podendo ser considerado baixo, representando a boa precisão da $FPT_{0(1)}$. Assim, pode-se afirmar que, para fins de interesse agrônômico, onde se necessita de boa precisão na estimativa, a $FPT_{0(1)}$ pode ser utilizada em banco de dados onde os limites das variáveis Ds, Micro e Pt estejam compreendidos entre aqueles apresentados na situação 4 da Tabela 4.

4.3.2 Estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa

Na Tabela 6 são apresentados a FPT para estimar a retenção de água no potencial de -1 kPa e seu respectivo coeficiente de determinação (R^2). A $FPT_{-1(1)}$ foi composta somente por atributos estruturais do solo. A Micro foi o atributo que mais contribuiu para a função gerada, apresentando coeficiente de determinação parcial de 0,80. Esse resultado está de acordo com aqueles obtidos na Tabela 2, onde se observa alta correlação da Micro com a retenção de água no potencial de -1 kPa, e indica que 80% da variação na retenção de água no potencial de -1 kPa foi devido ao percentual de microporos do solo.

Tabela 6 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Variáveis	Coeficiente	R^2 parcial
Ds	-0,0409	0,002
Dp	ns	
Macro	0,2069	0,07
Micro	0,8809	0,80
Pt	ns	
AGr	ns	
AF	ns	
Si	ns	
Arg	ns	
Intersecção	0,1398	
R^2		0,872

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; R^2 parcial - contribuição de cada variável para o R^2 ; Ds - densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); Dp - densidade de partículas ($g\ cm^{-3}$); Macro - macroporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Micro - microporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Pt - porosidade total ($dm^3\ dm^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

Diversos autores destacam a importância do diâmetro e da distribuição do tamanho de poros na retenção de água, especialmente em potenciais mais elevados, onde as forças capilares são mais atuantes (HILLEL, 1998; FABIAN; OTTONI FILHO, 2000; MAJOU et al., 2008). De acordo com os dados da Tabela 6, a $FPT_{-1(1)}$ para

estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-1} = 0,1398 - 0,0409Ds + 0,2069Macro + 0,8809Micro \quad (4)$$

A relação 1:1 dos dados observados (presentes no banco) e estimados pela $FPT_{-1(1)}$, juntamente com os indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, calculados com todas as amostras presentes no banco de dados, são apresentados na Figura 6.

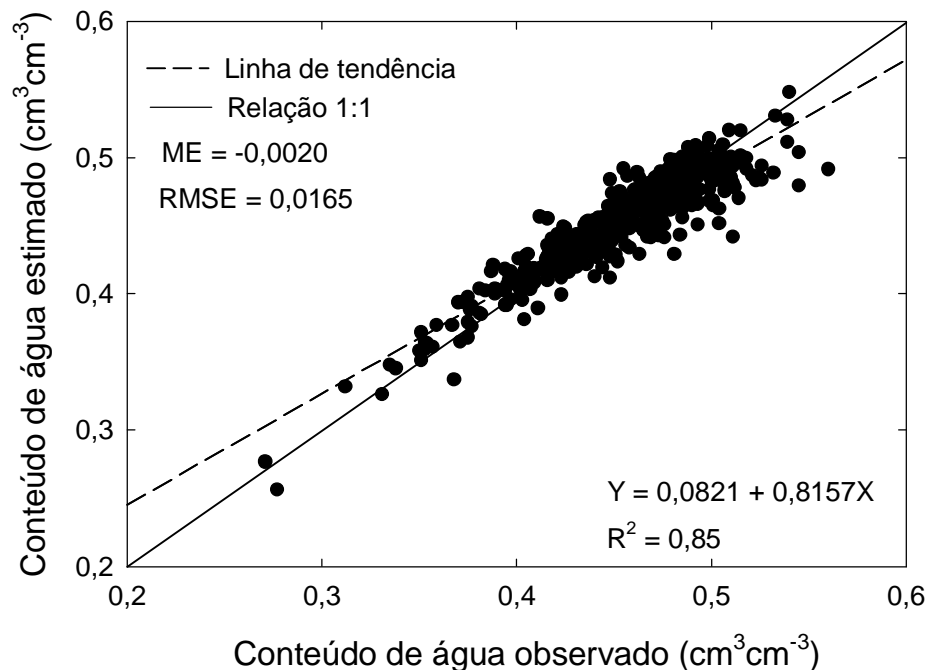


Figura 6 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -1 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Observa-se uma tendência de subestimativa do conteúdo de água do solo no potencial de -1 kPa (ME = -0,0020 cm³cm⁻³), especialmente quando os valores foram superiores a 0,45 cm³cm⁻³. Houve baixa dispersão dos dados em relação à linha 1:1 (RMSE = 0,0165 cm³cm⁻³) e alto coeficiente de determinação (R² = 0,85) (Figura 6),

indicando que a $FPT_{-1(1)}$ apresentou boa capacidade preditiva do conteúdo de água do solo no potencial de -1 kPa.

4.3.2.1 Análise da acurácia da $FPT_{-1(1)}$ em diferentes conjuntos de dados

A acurácia da $FPT_{-1(1)}$ de acordo com a faixa de valores mínimos e máximos das variáveis D_s , Macro e Micro (Tabela 4), nas quatro situações de variação do conjunto de dados, é apresentada nas Figuras 7 e 8.

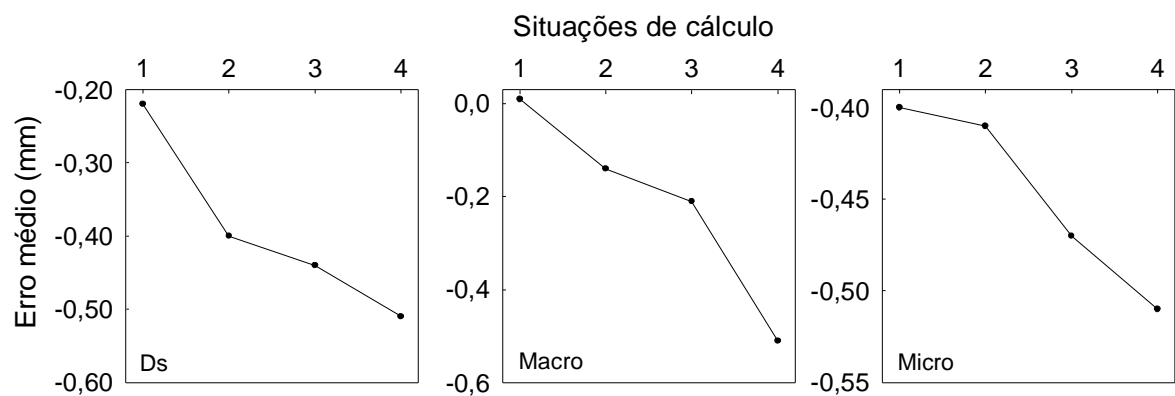


Figura 7 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, macroporosidade e microporosidade

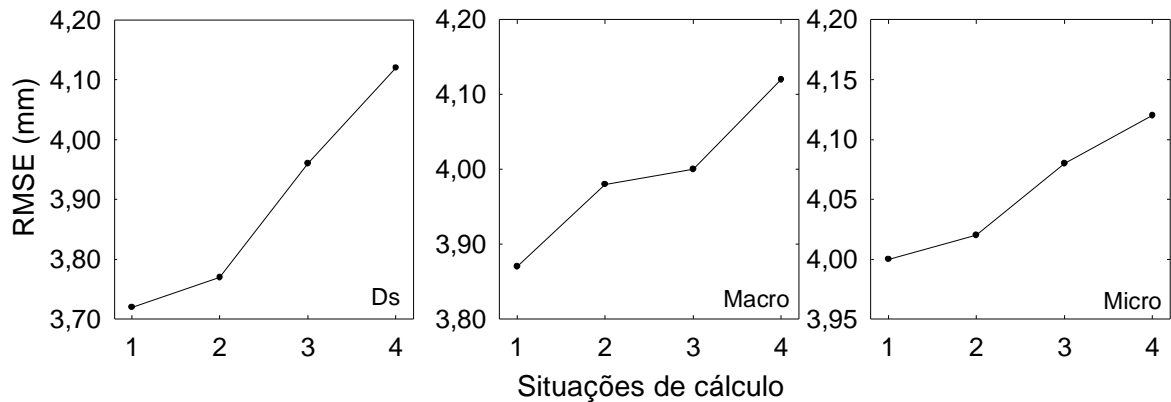


Figura 8 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, macroporosidade e microporosidade

O ME foi negativo em todas as situações, para todas as variáveis (exceção da situação 1 para macro) (Figura 7), indicando que a $FPT_{-1(1)}$ subestimou o armazenamento de água no potencial de -1 kPa (Figura 7). Observa-se um incremento dos valores de ME e RMSE conforme são utilizados conjuntos de dados com maiores amplitudes de variação de cada variável que compõe a $FPT_{-1(1)}$ (Figuras 7 e 8).

Os valores de ME (Figura 7) foram inferiores ao valor de 1% da lâmina média armazenada observada para o potencial de -1 kPa (Tabela 5) nas quatro situações de cálculo. Desse modo, pode-se afirmar que a $FPT_{-1(1)}$ pode ser utilizada para estimar o potencial de -1 kPa, em laboratórios de física do solo, com excelente precisão, quando as amostras de solo apresentarem valores de Ds, Macro e Micro compreendidos entre os limites apresentados na situação 4 da Tabela 4. Assim sendo, os procedimentos para a utilização da $FPT_{-1(1)}$ em laboratórios de física do solo são os seguintes: realizam-se as determinações laboratoriais de Ds, Macro e Micro no conjunto de amostras que dá entrada no laboratório e analisam-se os resultados. Caso os mesmos se encontrem nas faixas descritas na situação 4 (Tabela 4), a $FPT_{-1(1)}$ pode ser utilizada para a estimativa da retenção de água no potencial de -1 kPa. Em caso negativo, a $FPT_{-1(1)}$ não deve ser utilizada. Nesse caso, o procedimento para se obter a retenção de

água no potencial de -1 kPa deve ser a utilização das demais amostras coletadas na mesma profundidade (repetição das amostras utilizadas) na rotina laboratorial para tal.

4.3.3 Estimativa da retenção de água no potencial de - 33 kPa

A FPT gerada para estimar a retenção de água no potencial de -33 kPa e seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) são apresentados na Tabela 7. Observa-se, na composição dessa FPT, a presença de atributos estruturais e texturais do solo. A maior contribuição para o coeficiente de determinação da função gerada foi da estrutura do solo, por meio do atributo Micro, com um R^2 parcial de 0,93. Esse resultado está de acordo com aqueles observados na Tabela 2, destacando a alta correlação da Micro com a retenção de água no potencial de -33 kPa e indica que, no banco de dados avaliado, aproximadamente 93% da variação na retenção de água, no potencial de -33 kPa, pode ser relacionada à variação da Micro.

Tabela 7 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -33 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Variáveis	Coeficiente	R^2 parcial
Ds	0,0362	0,005
Dp	ns	
Macro	ns	
Micro	1,0011	0,928
Pt	ns	
AGr	ns	
AF	-0,0004	0,003
Si	ns	
Arg	ns	
Intersecção	-0,0789	
R^2		0,936

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; R^2 parcial - contribuição de cada variável para o R^2 ; Ds - densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); Dp - densidade de partículas ($g\ cm^{-3}$); Macro - macroporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Micro - microporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Pt - porosidade total ($dm^3\ dm^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

Solano Peraza (2003) e Urach (2007), trabalhando com FPTs em solos do RS, também encontraram a presença de atributos estruturais e texturais nas FPTs geradas para a estimativa do teor de água no potencial de -33 kPa. Nestes trabalhos a Micro foi excluída dos modelos de estimativa e houve contribuição significativa da areia e da Ds nas FPTs geradas.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7, a FPT para estimativa da retenção de água no potencial de -33 kPa pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\theta_{-33} = -0,0789 + 0,0362Ds + 1,0011Micro - 0,0004AF \quad (5)$$

Na Figura 9 são apresentados a relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT₋₃₃₍₁₎ e os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, calculados com todas as amostras presentes no banco de dados.

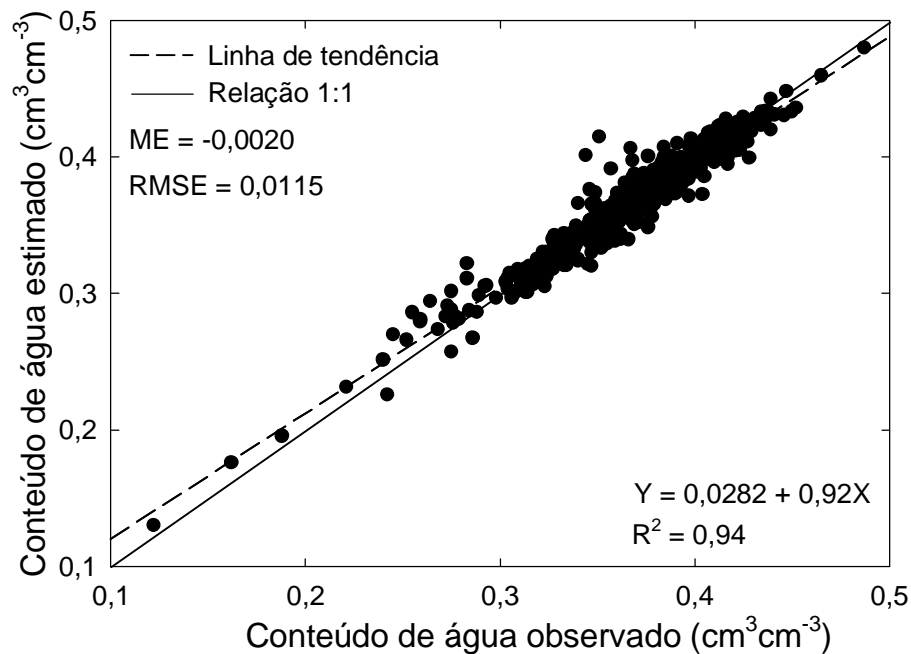


Figura 9 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -33 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Houve baixa dispersão dos pontos em relação à linha 1:1 (RMSE = 0,0115 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) e uma tendência de subestimativa dos dados (ME = -0,0020 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) para valores de conteúdo de água do solo superiores a 0,38 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Figura 9). Esses resultados, juntamente com o alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,93$) (Figura 9), indicam que a FPT₋₃₃₍₁₎ apresentou boa capacidade preditiva do conteúdo de água do solo no potencial de -33 kPa.

4.3.3.1 Análise da acurácia da FPT₋₃₃₍₁₎ em diferentes conjuntos de dados

A acurácia da FPT₋₃₃₍₁₎, de acordo com a faixa de valores mínimos e máximos das variáveis Ds, Micro e AF (Tabela 4), nas quatro situações de variação do conjunto de dados, é apresentada nas Figuras 10 e 11.

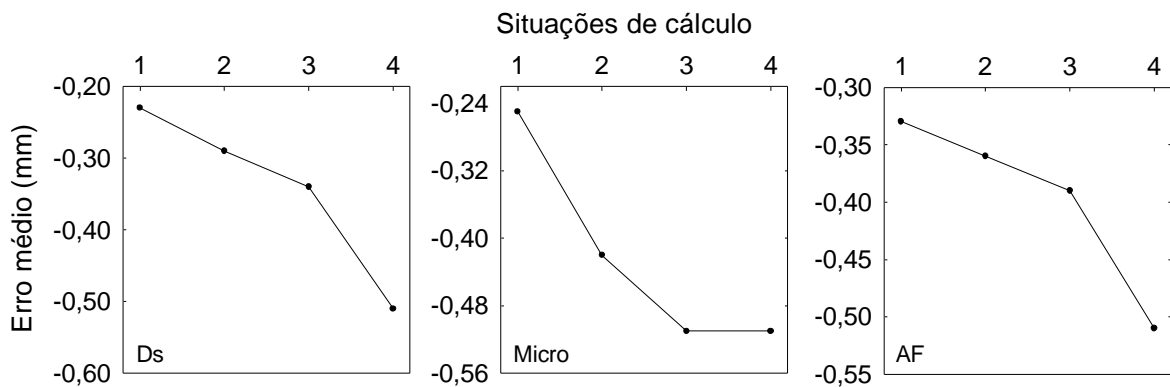


Figura 10 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -33 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina

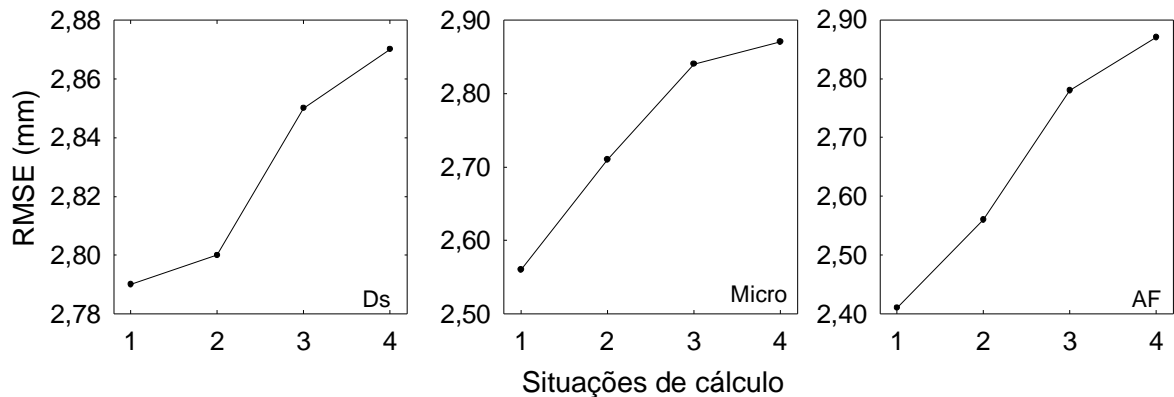


Figura 11 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -33 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina

Observa-se, na Figura 10, que o ME foi negativo nas quatro situações de variação do conjunto de dados, para todas as variáveis, indicando que houve subestimativa do armazenamento de água no potencial de -33 kPa, em todas as situações. Observa-se um incremento do ME e do RMSE conforme são utilizados conjuntos de dados com maiores amplitudes de variação de cada variável que compõe a $FPT_{-33(1)}$ (Figuras 10 e 11). Na avaliação individual de cada variável componente da $FPT_{-33(1)}$ (situações 1, 2 e 3), observa-se que a Micro apresentou os maiores incrementos no ME de acordo com mudança no conjunto de dados (situação 1 para situação 2, situação 2 para situação 3) (Figura 10). Do mesmo modo, a Micro foi a variável que apresentou os maiores valores de ME e RMSE (Figuras 10 e 11), indicando que essa variável exerce maior influência na estimativa do armazenamento de água no potencial de -33 kPa, conforme observado pela maior correlação da Micro com a retenção de água no potencial de -33 kPa (Tabela 2).

Analisando as Figuras 10 e 11, observa-se que os menores erros da estimativa do potencial de -33 kPa foram obtidos quando se utilizou a menor faixa de variação dos dados (situação 1) de cada variável presente na equação. No entanto, os valores de ME obtidos nas quatro situações de variação no conjunto de dados (Figura 10) foram inferiores ao valor de 1% da lâmina média observada para o potencial de -33 kPa

(Tabela 5). Isso indica que a $FPT_{-33(1)}$ pode ser utilizada com excelente precisão, nos laboratórios de física do solo, quando os valores das variáveis Ds, Micro e AF estiverem dentro dos limites apresentados na situação 4 (Tabela 4). Assim sendo, o procedimento laboratorial das amostras que chegam ao laboratório de física do solo seria o seguinte: fazem-se as determinações de Ds, Micro e AF, analisando-se os resultados obtidos. Caso os mesmos se encontrem dentro dos limites descritos na situação 4 (Tabela 4), a $FPT_{-33(1)}$ pode ser utilizada para estimar o potencial de -33 kPa. Em caso negativo, devem-se utilizar as repetições das amostras coletadas e seguir a rotina laboratorial para a determinação desse potencial, ou seja, não se recomenda a utilização da $FPT_{-33(1)}$.

4.3.4 Estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa

A FPT para estimar a retenção de água no potencial de -100 kPa foi composta por atributos estruturais e texturais do solo (Tabela 8).

Tabela 8 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Variáveis	Coefficiente	R ² parcial
Ds	0,0430	0,006
Dp	ns	
Macro	ns	
Micro	0,9891	0,894
Pt	ns	
AGr	ns	
AF	-0,0006	0,005
Si	ns	
Arg	ns	
Intersecção	-0,1014	
R ²		0,905

Onde: R² – coeficiente de determinação; R² parcial - contribuição de cada variável para o R²; Ds - densidade do solo (g cm⁻³); Dp - densidade de partículas (g cm⁻³); Macro - macroporosidade (dm³ dm⁻³); Micro - microporosidade (dm³ dm⁻³); Pt - porosidade total (dm³ dm⁻³); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

A Micro foi o atributo estrutural que mais contribuiu para a função gerada, apresentando um coeficiente de determinação parcial de 0,89 (Tabela 8). Esse resultado indica que, no banco de dados avaliado, 89% da variação na retenção de água no potencial de -100 kPa foi devido à Micro e está de acordo com aqueles obtidos na Tabela 2, onde se observa a alta correlação da Micro com a retenção de água no potencial de -100 kPa.

De acordo com os dados da Tabela 8, a FPT para estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-100} = -0,1014 + 0,0430Ds + 0,9891\text{Micro} - 0,0006AF \quad (6)$$

A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT₋₁₀₀₍₁₎, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, calculados com todas as amostras presentes no banco de dados, são apresentados na Figura 12.

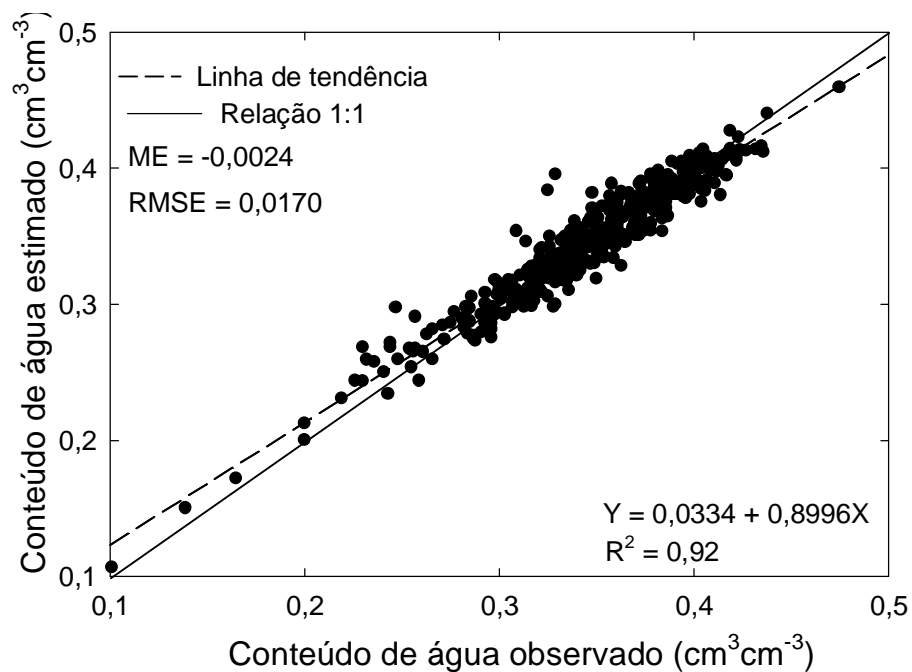


Figura 12 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -100 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

A análise dos indicadores estatísticos calculados indica que houve tendência de subestimativa ($ME = -0,0024 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) do conteúdo de água do solo estimado pela $FPT_{-100(1)}$ (Figura 12), para valores de conteúdo de água superiores a $0,35 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$. Observa-se baixa dispersão dos dados em relação à linha 1:1 ($RMSE = 0,017 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,92$) (Figura 12), podendo-se afirmar que a $FPT_{-100(1)}$ apresentou alta precisão na estimativa do teor de água no potencial do -100 kPa.

4.3.4.1 Análise da acurácia da $FPT_{-100(1)}$ em diferentes conjuntos de dados

A acurácia da $FPT_{-100(1)}$, avaliada de acordo com a variação dos valores mínimos e máximos das variáveis D_s , Micro e AF (Tabela 4), nas quatro situações de variação do conjunto de dados, é apresentada nas Figuras 13 e 14. O ME foi negativo nas quatro situações de cálculo, para todas as variáveis independentes (Figura 13), indicando que a $FPT_{-100(1)}$ subestimou o armazenamento de água no potencial de -100 kPa.

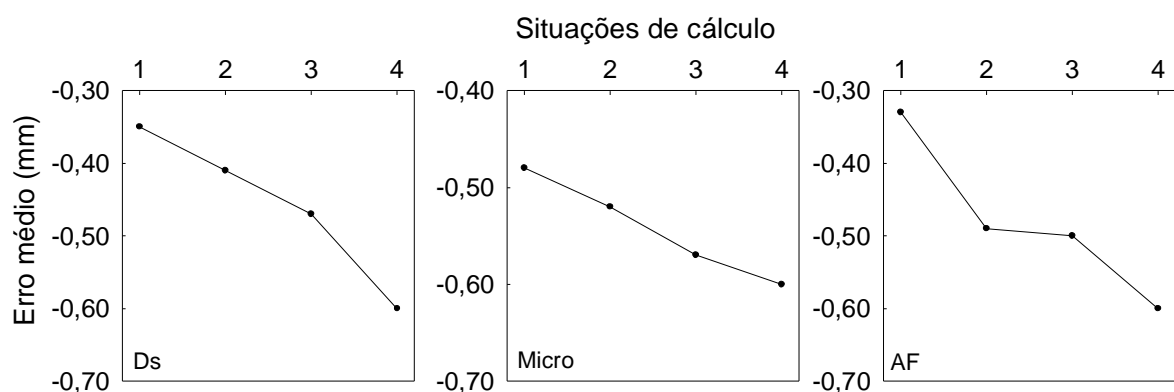


Figura 13 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina

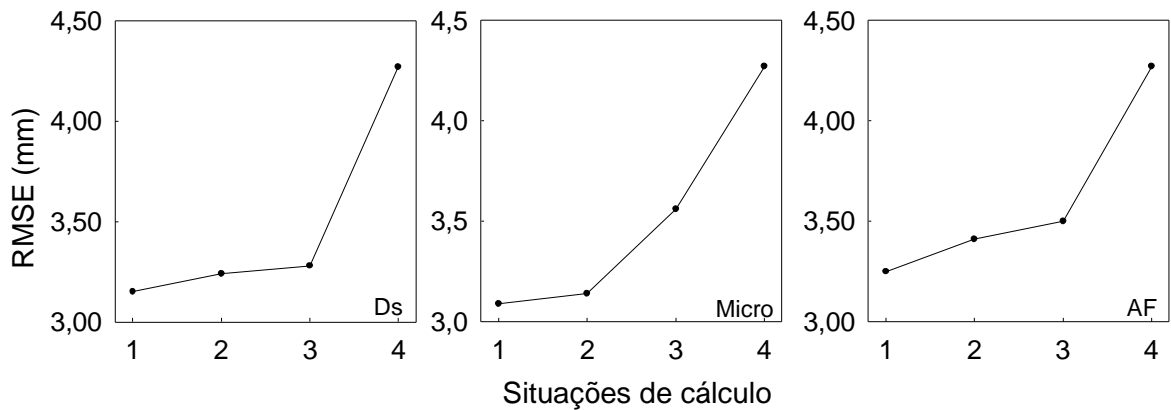


Figura 14 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa, em quatro situações de variação no conjunto de dados, das variáveis densidade do solo, microporosidade e areia fina

Observa-se um incremento do ME e do RMSE conforme são utilizados conjuntos de dados com maior faixa de variação de cada variável que compõe a $FPT_{-100(1)}$ (Figuras 13 e 14). A precisão da estimativa do armazenamento de água pela $FPT_{-100(1)}$ diminui à medida que aumenta a amplitude de variação dos dados das variáveis componentes da mesma.

Os valores de ME nas quatro situações de variação no conjunto de dados (Figura 13) foram inferiores ao valor do percentual de 1% da lâmina de água média observada para o potencial de -100 kPa (Tabela 5). Esses resultados destacam a alta precisão da $FPT_{-100(1)}$ na estimativa do potencial de -100 kPa. Desse modo, pode-se afirmar que a $FPT_{-100(1)}$ pode ser utilizada em laboratórios de física do solo para a estimativa do potencial de -100 kPa com excelente precisão, quando as amostras de solo apresentarem valores de Ds, Micro e AF dentro das faixas apresentadas na situação 4 (Tabela 4) para essas variáveis. Assim, os procedimentos laboratoriais para a utilização da $FPT_{-100(1)}$ são os seguintes: realizam-se as determinações de Ds, Micro e AF no conjunto de amostras que dá entrada no laboratório e analisam-se os resultados. Caso os mesmos se encontrem nas faixas descritas na situação 4 (Tabela 11), a $FPT_{-100(1)}$ pode ser utilizada para a estimativa da retenção de água no potencial de -100 kPa. Em caso negativo, a $FPT_{-100(1)}$ não deve ser utilizada, e outras amostras, coletadas na

mesma profundidade (repetições), devem ser utilizadas, seguindo a rotina laboratorial para a obtenção da retenção de água no potencial de -100 kPa.

4.3.5 Estimativa da retenção de água no potencial de - 500 kPa

A FPT gerada para estimar a retenção de água no potencial de -500 kPa e seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) são apresentados na Tabela 9. Observa-se, na composição dessa FPT, a presença de atributos texturais e estruturais do solo. O teor de argila, com coeficiente de determinação parcial de 0,57, foi o atributo com a maior contribuição para a função gerada. Esse resultado está de acordo com aquele obtido na Tabela 2, o qual indica maior correlação da argila com a retenção de água no potencial de -500 kPa, quando comparada às demais variáveis consideradas, e destaca a importância da textura do solo na estimativa da retenção de água em potenciais mais baixos.

Tabela 9 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Variáveis	Coeficiente	R^2 parcial
Ds	0,2307	0,048
Dp	ns	
Macro	0,2807	0,008
Micro	0,6468	0,061
Pt	ns	
AGr	ns	
AF	ns	
Si	0,0010	0,023
Arg	0,0022	0,571
Intersecção	-0,4888	
R^2		0,711

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; R^2 parcial - contribuição de cada variável para o R^2 ; Ds - densidade do solo (g cm^{-3}); Dp - densidade de partículas (g cm^{-3}); Macro - macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro - microporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Pt - porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

Diversos autores, dentre os quais Hillel (1998), Pachepsky; Rawls (1999), Hodnett; Tomasella (2002) e Rawls et al. (2003), destacam a importância da textura, especialmente do teor de argila, na retenção de água em baixos potenciais. Segundo esses autores, a retenção de água nesses potenciais está relacionada, principalmente, à adsorção das moléculas de água às partículas de solo, devido às cargas existentes nos minerais de argila. A partir dos dados da Tabela 9, a FPT para estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-500} = -0,4888 + 0,2307Ds + 0,2807Macro + 0,6468Micro + 0,0010Si + 0,0022Arg \quad (7)$$

Na Figura 15 são apresentados a relação 1:1 dos dados observados e estimados pela $FPT_{-500(1)}$, e os indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, calculados com todas as amostras presentes no banco de dados. Houve subestimativa do conteúdo de água do solo estimado pela $FPT_{-500(1)}$, (ME = $-0,0103 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$). Comparando a linha tracejada (linha de tendência) com a linha contínua (relação 1:1), verifica-se que a $FPT_{-500(1)}$ subestima os valores do conteúdo de água quando estes são superiores a $0,23 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$. A $FPT_{-500(1)}$ apresentou maior dispersão dos dados em torno da relação 1:1 (RMSE = $0,0310 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e menor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,70$), quando comparada às demais FPTs obtidas, indicando que a mesma apresenta média precisão na estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa.

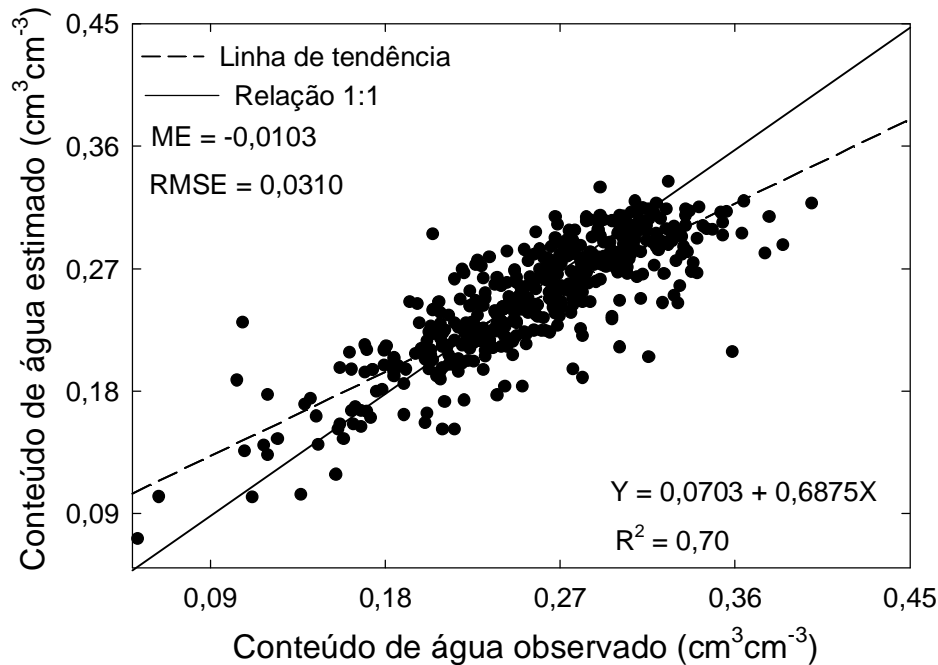


Figura 15 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

4.3.5.1 Análise da acurácia da $FPT_{-500(1)}$ em diferentes conjuntos de dados

A acurácia da $FPT_{-500(1)}$ de acordo com a variação dos valores mínimos e máximos das variáveis Ds, Macro, Micro, Si e Arg (Tabela 4), nas quatro situações de variação do conjunto de dados, é apresentada nas Figuras 16 e 17. Observa-se, na Figura 16, que o ME foi negativo nas quatro situações de variação no conjunto de dados, para todas as variáveis, indicando que a $FPT_{-500(1)}$ subestimou o armazenamento de água em todas as situações avaliadas. Houve um incremento do ME e do RMSE conforme foram utilizados conjuntos de dados com maiores amplitude de variação de cada variável que compôs a $FPT_{-500(1)}$ (Figuras 16 e 17).

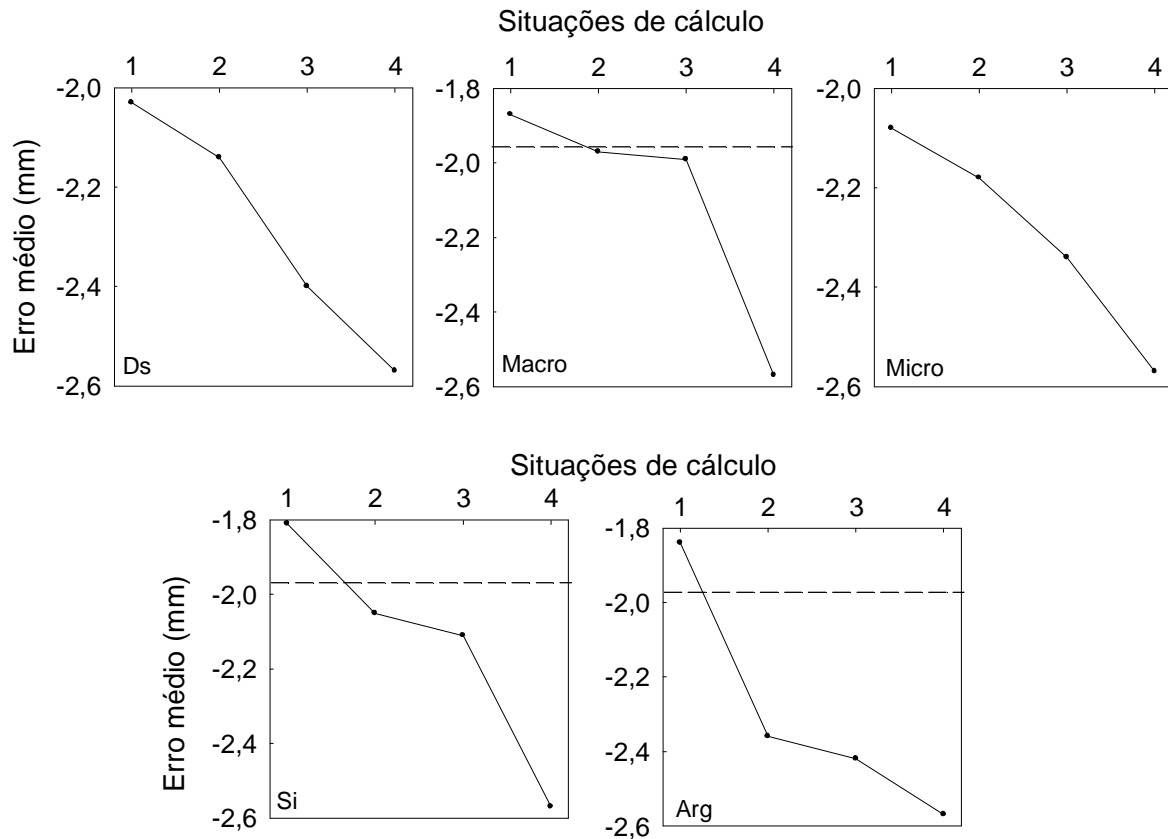


Figura 16 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, silte e argila. A linha tracejada representa o valor de 3% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para esse potencial

Analisando individualmente as variáveis (situações 1, 2 e 3), observa-se que a Arg foi a variável que apresentou os valores de ME e RMSE mais elevados (Figuras 16 e 17), indicando que esta variável foi aquela que mais influenciou na estimativa do armazenamento de água no potencial de -500 kPa. Esses resultados vão ao encontro daqueles apresentados na Tabela 2, os quais indicam a maior correlação do teor de Arg com a retenção de água no potencial de -500 kPa.

Comparando os resultados apresentados na Figura 16 com aqueles apresentados na Tabela 5, observa-se que, apenas na situação 1, as variáveis Macro, Si e Arg apresentaram valores de ME inferiores ao valor de 3% da lâmina média de água observada para o potencial de -500 kPa.

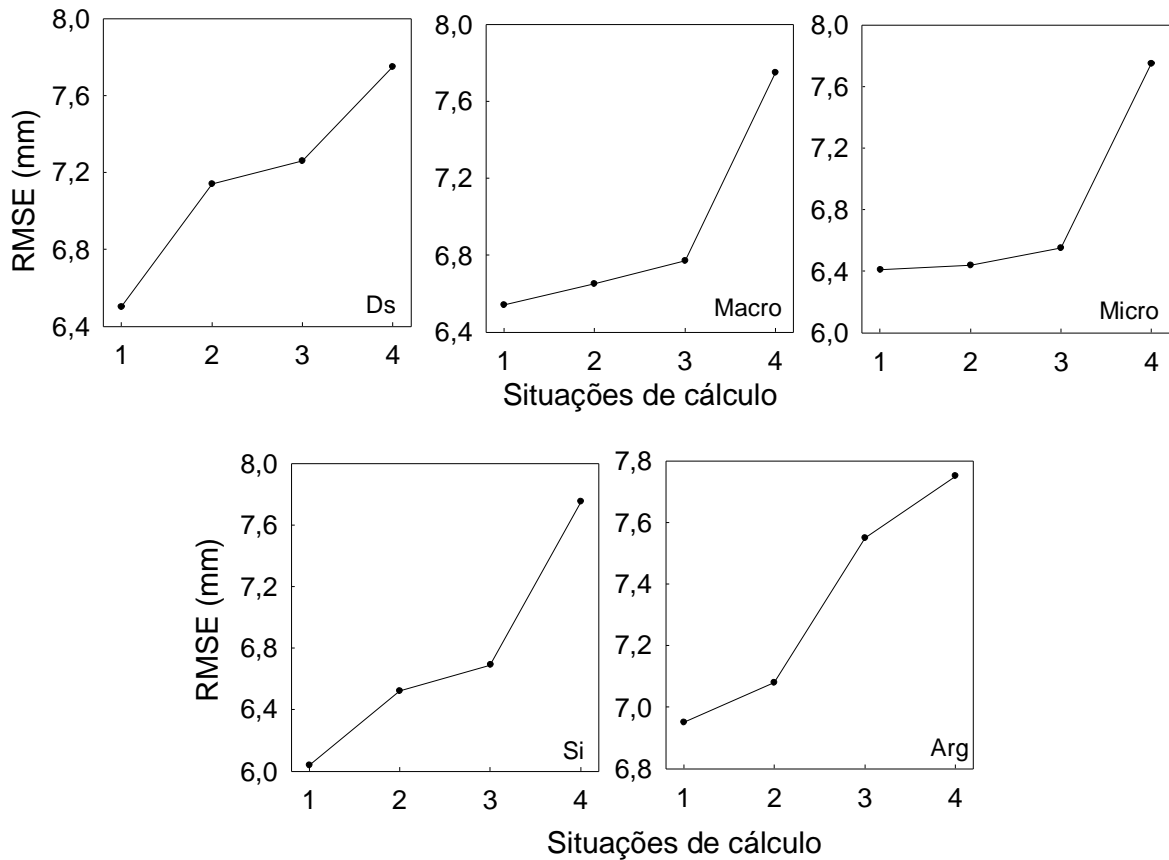


Figura 17 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, silte e argila

Nas demais situações, todas as variáveis apresentaram valores de ME entre 3 a 5% da lâmina média de água observada para este potencial. Isso significa que a precisão da $FPT_{-500(1)}$ foi média e que a utilização da mesma em laboratórios de física do solo limita-se a situações em que é possível estimar o potencial de -500 kPa com média precisão. Nesses casos, para a utilização da $FPT_{-500(1)}$, os valores das variáveis Ds, Macro, Micro, Si e Arg devem estar compreendidos entre aqueles apresentados na situação 4 da Tabela 4.

Em situações que demandam alta precisão na estimativa, a $FPT_{-500(1)}$ não deve ser utilizada e, nesses casos, as amostras devem seguir a rotina laboratorial para a obtenção do teor de água no potencial de -500 kPa.

Cabe ressaltar que, mesmo que o valor máximo de ME encontrado (ME = -2,57 mm) (situação 4, Figura 16) indique que a $FPT_{-500(1)}$ apresenta média precisão na estimativa dos resultados, em termos práticos, ele significa que, ao se utilizar a $FPT_{-500(1)}$ para estimar o armazenamento de água no potencial de -500 kPa na camada de 0 - 25 cm, subestima-se o mesmo em 2,57 mm quando comparado ao valor obtido em laboratório. Esse valor de erro pode ser considerado baixo, principalmente se levados em conta o tempo de processamento das amostras e o custo dos aparelhos necessários para obter esse resultado.

4.3.6 Estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa

Na Tabela 10 são apresentados a FPT obtida para estimar a retenção de água no potencial de -1500 kPa e seu respectivo coeficiente de determinação (R^2). A FPT foi composta por atributos texturais e estruturais do solo. O teor de Arg foi o atributo que mais contribuiu para a função gerada, apresentando um coeficiente de determinação parcial de 0,67 (Tabela 10). Esse resultado está de acordo com aqueles obtidos na Tabela 2, onde se observa a alta correlação da Arg com a retenção de água no potencial de -1500 kPa e indica que, no banco de dados avaliado, 67% da variação na retenção de água no potencial de -1500 kPa foi devido ao teor de Arg.

Na literatura são encontrados diversos autores, já citados neste trabalho, dentre os quais Hillel (1998), Pachepsky; Rawls (1999), Hodnett; Tomasella (2002), Rawls et al. (2003), Solano Peraza (2003), Urach (2007), que destacam a importância do teor de Arg do solo na retenção de água, especialmente em baixos potenciais. Segundo esses autores, a Arg, por ser uma fração muito pequena e com grande área superficial específica, possui cargas capazes de reter água mesmo em altas tensões.

Tabela 10 – Função de Pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Variáveis	Coefficiente	R ² parcial
Ds	ns	
Dp	0,1093	0,038
Macro	-0,3050	0,045
Micro	ns	
Pt	ns	
AGr	ns	
AF	ns	
Si	0,0011	0,054
Arg	0,0024	0,673
Intersecção	-0,1974	
R ²		0,810

Onde: R² – coeficiente de determinação; R² parcial - contribuição de cada variável para o R²; Ds - densidade do solo (g cm⁻³); Dp - densidade de partículas (g cm⁻³); Macro - macroporosidade (dm³ dm⁻³); Micro - microporosidade (dm³ dm⁻³); Pt - porosidade total (dm³ dm⁻³); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

Analisando os resultados das Tabelas 8, 9 e 10, observa-se que, mesmo em potenciais mais baixos, os atributos estruturais do solo estiveram presentes nas FPT geradas, destacando a importância da utilização de amostras com estrutura preservada nos modelos para estimativa da retenção de água no solo. De acordo com os dados da Tabela 10, a FPT para estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-1500} = -0,1974 + 0,1093Dp - 0,3050Macro + 0,0011Si + 0,0024Arg \quad (8)$$

A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT₋₁₅₀₀₍₁₎, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, calculados com todas as amostras presentes no banco de dados, são apresentados na Figura 18. Observa-se, analisando o indicador estatístico ME, que houve tendência superestimativa (ME = 0,0028 cm³cm⁻³) do conteúdo de água do solo estimado pela FPT₋₁₅₀₀₍₁₎ (Figura 18). Ao se comparar a linha tracejada (linha de tendência) com a linha contínua (relação 1:1), observa-se que

a tendência de superestimativa ocorre quando os valores do conteúdo de água são inferiores a $0,24 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$.

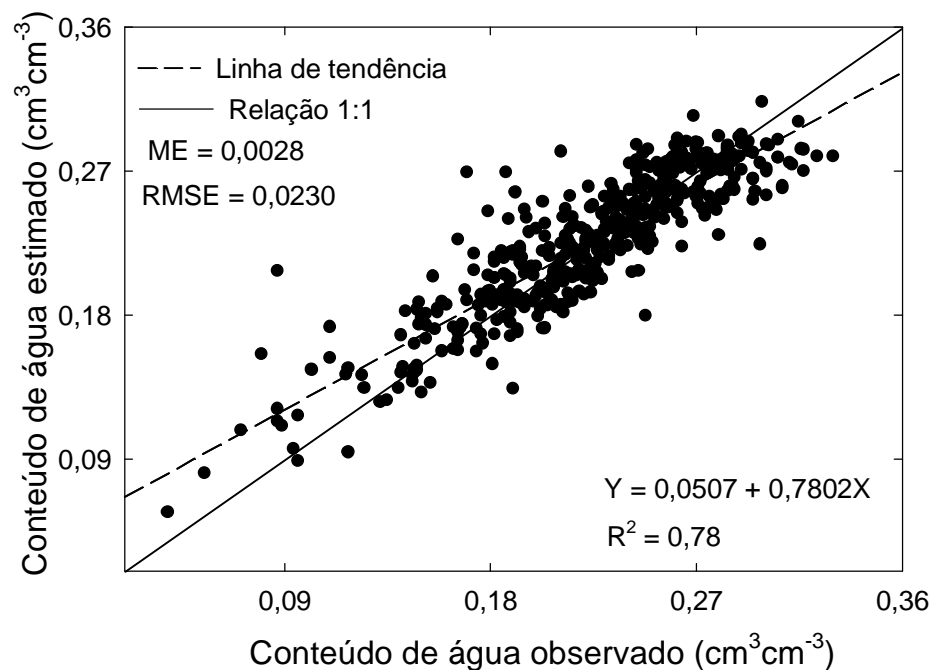


Figura 18 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo no potencial de -1500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

A análise da Figura 18 permite identificar, ainda, certa heterogeneidade na dispersão dos dados quanto à relação 1:1 ($\text{RMSE} = 0,0230 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e ao coeficiente de determinação mediano ($R^2 = 0,78$), podendo-se afirmar que a $\text{FPT}_{-1500(1)}$ apresentou boa precisão na estimativa do teor de água no potencial do -1500 kPa.

4.3.6.1 Análise da acurácia da $\text{FPT}_{-1500(1)}$ em diferentes conjuntos de dados

A acurácia da $\text{FPT}_{-500(1)}$, de acordo com a variação dos valores mínimos e máximos das variáveis D_p , Macro, Si e Arg (Tabela 4), nas quatro situações de variação

do conjunto de dados, é apresentada nas Figuras 19 e 20. O ME foi positivo nas situações 1 e 4 para a variável Si, nas situações 3 e 4 para a variável Arg e nas situações 1, 2, 3 e 4 para as variáveis Dp e Macro (Figura 19). Nesses casos, houve superestimativa do armazenamento de água pela $FPT_{-1500(1)}$. Observam-se incrementos no ME e no RMSE conforme são utilizados conjuntos de dados com maiores faixas de variação de cada variável que compõe a $FPT_{-1500(1)}$ (Figuras 19 e 20). Isso indica que a precisão na estimativa do armazenamento de água pela $FPT_{-1500(1)}$ diminui à medida que aumenta a heterogeneidade dos dados das variáveis que compõem a mesma.

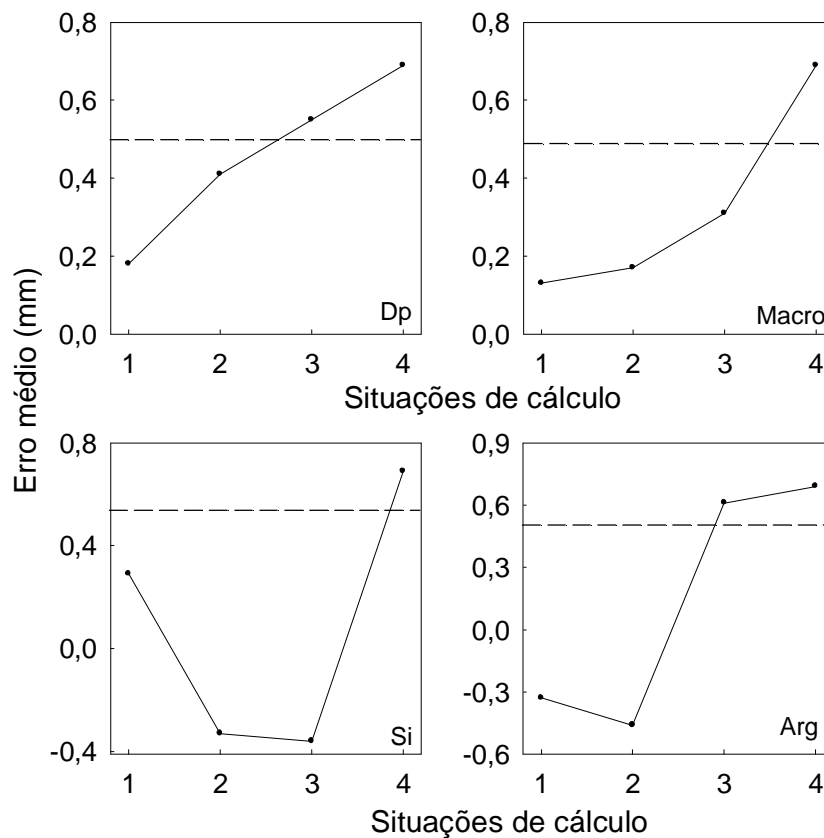


Figura 19 – Erros médios (ME) da estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade de partículas, macroporosidade, silte e argila. A linha tracejada representa o valor de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para esse potencial

Na avaliação individual das variáveis, observou-se que a variação do conjunto de dados do atributo Arg da situação 2 para a situação 3 resultou no maior incremento do ME entre as variáveis estudadas (Figura 19), indicando que a Arg foi o atributo que mais influenciou na precisão da estimativa da $FPT_{-1500(1)}$. Esses resultados estão de acordo com aqueles apresentados na Tabela 2, os quais demonstram a alta correlação da Arg com a retenção de água no potencial de -1500 kPa.

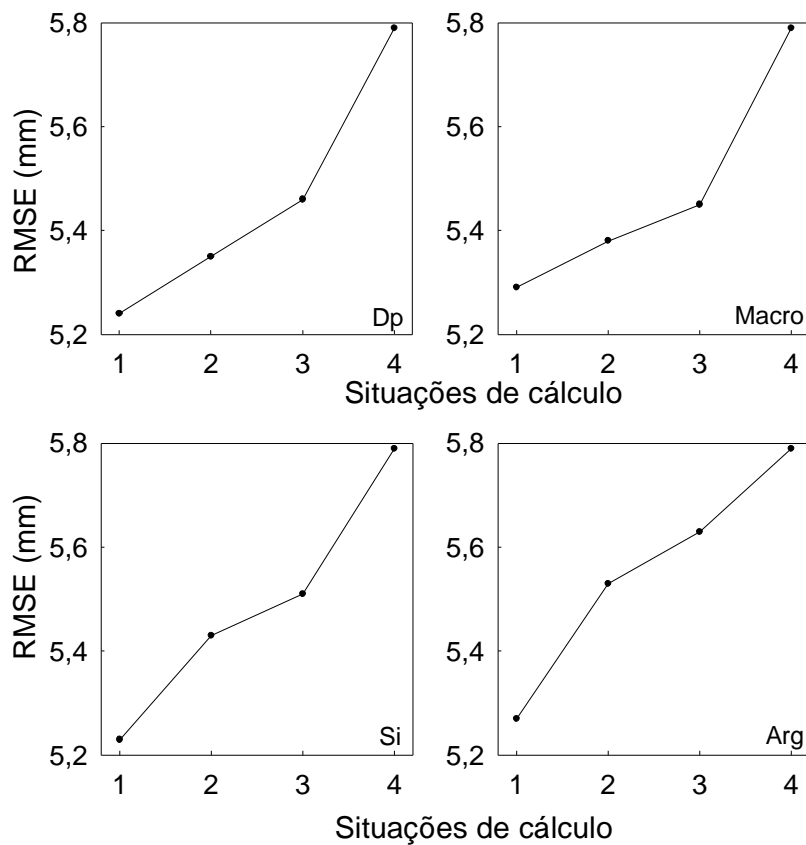


Figura 20 – Raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), da estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa, em quatro situações de variação, das variáveis densidade de partículas, macroporosidade, silte e argila

Analisando a Figura 19, observa-se que os valores de ME nas situações 1, 2 e 3 dos atributos Macro e Si e nas situações 1 e 2 dos atributos Dp e Arg, foram inferiores ao valor de 1% da lâmina média de água armazenada observada para esse potencial

(Tabela 5). Assim, pode-se afirmar que a $FPT_{-1500(1)}$ pode ser utilizada com excelente precisão nos laboratórios de física do solo, quando as amostras de solo apresentarem valores de D_p e Arg dentro dos limites estabelecidos na situação 2 e valores de $Macro$ e Si dentro dos limites estabelecidos na situação 3 (Tabela 4). Dessa forma, os procedimentos laboratoriais para a utilização da $FPT_{-1500(1)}$ são os seguintes: realizam-se as determinações de D_p , $Macro$, Si e Arg no conjunto de amostras que dá entrada no laboratório e analisam-se os resultados. Caso os valores de D_p e Arg das amostras encontrem-se nas faixas descritas na situação 2, e os valores da $Macro$ e Si encontrem-se nas faixas descritas na situação 3 (Tabela 4), a $FPT_{-1500(1)}$ pode ser utilizada para a estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa com excelente precisão. Em caso negativo e desejando-se alta precisão na estimativa, a $FPT_{-1500(1)}$ não deve ser utilizada. Nesse caso, utilizam-se as amostras coletadas como repetição da amostragem, e estas devem seguir a rotina laboratorial para a obtenção da retenção de água no potencial de -1500 kPa.

Em situações que não demandam elevada precisão na estimativa, a $FPT_{-1500(1)}$ pode ser utilizada quando as amostras de solo apresentarem valores de D_p , $Macro$, Si e Arg dentro das faixas estabelecidas na situação 4 (Tabela 4), pois os valores de ME nesse caso foram inferiores a 3% da lâmina média de água armazenada observada para o potencial de -1500 kPa (Tabela 5), indicando que a $FPT_{-1500(1)}$ apresenta boa precisão na estimativa, mesmo nessa faixa mais ampla de valores das variáveis que a compõem. Em termos práticos, o valor de $ME = 0,69$ mm (situação 4, Figura 19) demonstra que a utilização da $FPT_{-1500(1)}$, em vez de se utilizarem procedimentos laboratoriais, para a obtenção do potencial de -1500 kPa, resulta em superestimativa de 0,69 mm no armazenamento de água, na camada de 0 – 25 cm do perfil do solo.

4.4 Acurácia das FPTs na estimativa de faixas da curva característica de água no solo na camada superficial de solos do RS

Para ampliar a utilização das FPTs obtidas para estimar um único ponto da curva característica de água no solo, a acurácia das FPTs foi avaliada quando as mesmas foram utilizadas conjuntamente, estimando a retenção de água em faixas de potenciais da curva característica de água do solo. Utilizaram-se para essa avaliação a relação gráfica 1:1 e os indicadores estatísticos ME e RMSE.

4.4.1 Estimativa da retenção de água na faixa potencial de 0 a -1500 kPa

Na Figura 21 são apresentados os resultados da capacidade preditiva das FPTs obtidas para estimar os potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, quando utilizadas conjuntamente na estimativa da retenção de água na faixa potencial de 0 a -1500 kPa. A utilização das $FPT_{0(1)}$, $FPT_{-1(1)}$, $FPT_{-33(1)}$, $FPT_{-100(1)}$, $FPT_{-500(1)}$ e $FPT_{-1500(1)}$, para estimar a curva de retenção de água do solo (faixa de potencial de 0 a -1500 kPa), resultou em uma leve subestimativa do conteúdo de água do solo ($ME = -0,0028 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e baixa dispersão dos pontos em relação à linha 1:1 ($RMSE = 0,0212 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) (Figura 21). Observa-se que a subestimativa foi um pouco maior nas faixas de valores de 0,22 a 0,35 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ e para valores do conteúdo de água superiores a 0,5 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$.

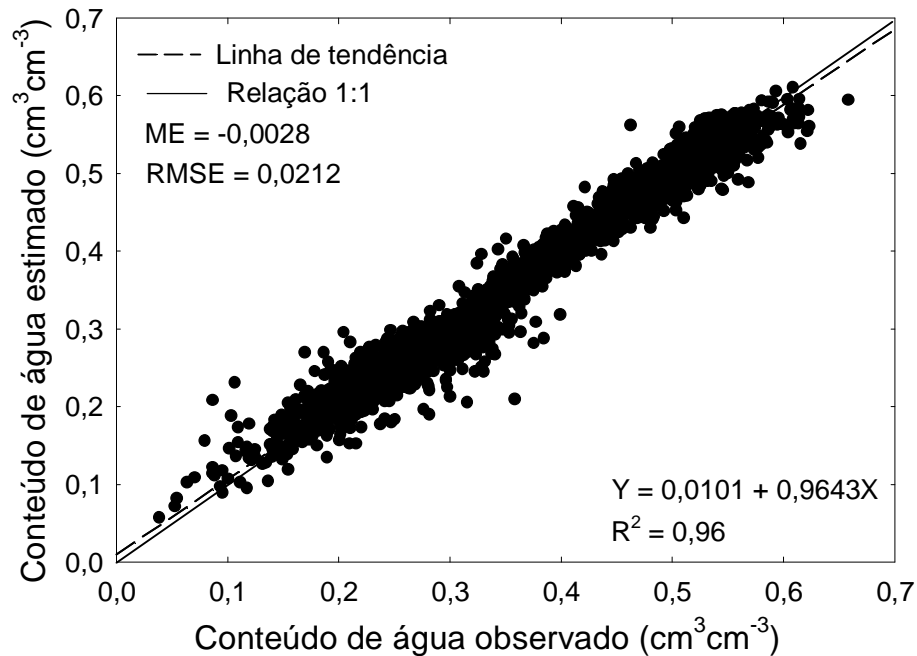


Figura 21 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, na faixa de potencial de 0 a -1500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

A subestimativa do conteúdo de água do solo nessas duas faixas de valores provavelmente ocorreu devido à influência da $FPT_{-500(1)}$ (faixa de valores de 0,23 a 0,35 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) e da $FPT_{0(1)}$ (valores superiores a 0,51 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$). As equações 3 e 7 subestimaram o conteúdo de água do solo nessas faixas de valores, conforme foi apresentado nas Figuras 3 e 15, respectivamente.

Observa-se uma excelente uniformidade dos pontos em torno da linha 1:1 na faixa de valores de 0,35 a 0,51 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Figura 21). Isso provavelmente ocorreu devido à influência das $FPT_{-1(1)}$, $FPT_{-33(1)}$, $FPT_{-100(1)}$. Essas FPTs apresentaram alta precisão na estimativa do conteúdo de água do solo, conforme pode ser observado nas Figuras 6, 9 e 12, respectivamente. As lâminas médias de água armazenada obtidas em laboratório para as três faixas de potencial estudadas na camada superficial e os valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para as faixas de potenciais de 0 a -1500 kPa, 0 a -33 kPa e -33 a -1500 kPa da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas

Faixas de potencial (kPa)	Lâmina média observada (mm)	Percentuais da lâmina média (mm)		
		1%	3%	5%
0 à -1500	90,44	0,90	2,71	4,52
0 à -33	111,85	1,12	3,35	5,59
-33 à -1500	74,80	0,75	2,24	3,74

O valor de $ME = -0,0028$ (Figura 21) transformado em lâmina de água armazenada, na camada de 0 a 25 cm, resulta em $ME = -0,7$ mm. Esse valor é inferior ao valor de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para a faixa de potencial de 0 a -1500 kPa (Tabela 11). Isso destaca a excelente precisão na estimativa da faixa de potencial de 0 a -1500 kPa, com a utilização das $FPT_{0(1)}$, $FPT_{-1(1)}$, $FPT_{-33(1)}$, $FPT_{-100(1)}$, $FPT_{-500(1)}$ e $FPT_{-1500(1)}$. Em termos práticos, o valor de $ME = -0,7$ mm significa que, ao se utilizarem as $FPT_{0(1)}$, $FPT_{-1(1)}$, $FPT_{-33(1)}$, $FPT_{-100(1)}$, $FPT_{-500(1)}$ e $FPT_{-1500(1)}$ para estimar conjuntamente a lâmina de água armazenada na camada de 0 a 25 cm de profundidade, subestima-se em 0,7 mm essa lâmina, quando comparada àquela obtida com valores determinados em laboratório.

4.4.2 Estimativa da retenção de água na faixa potencial de 0 a -33 kPa

Os resultados da capacidade preditiva das FPTs obtidas para estimar os potenciais de 0, -1 e -33, quando utilizadas conjuntamente, na estimativa da retenção de água na faixa potencial de 0 a -33 kPa, são apresentados na Figura 22.

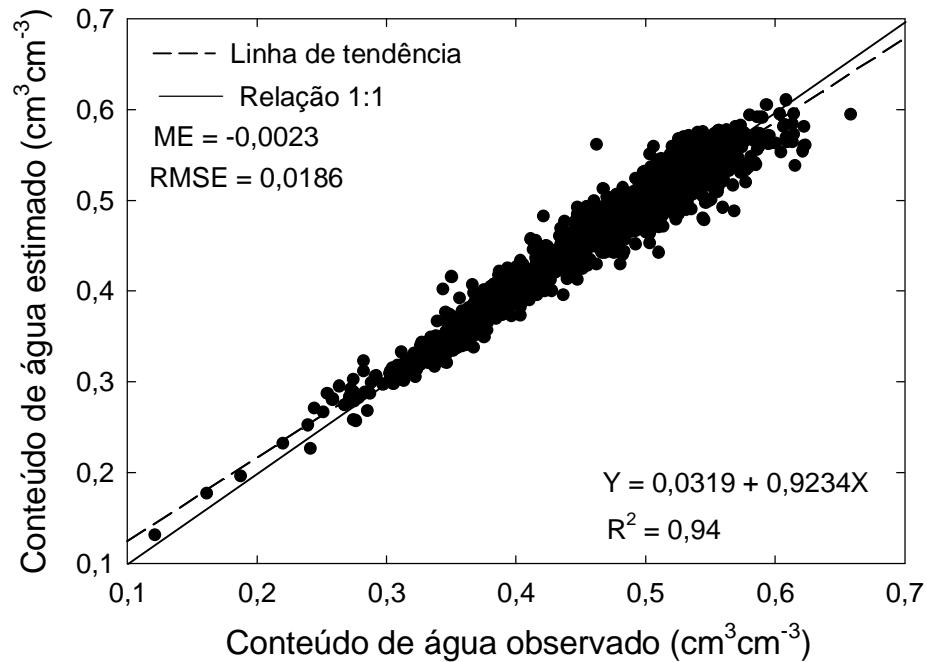


Figura 22 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, na faixa de potencial de 0 a -33 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

Observa-se uma leve tendência de subestimativa do conteúdo de água do solo ($ME = -0,0023 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e baixa dispersão dos pontos em relação à linha 1:1 ($RMSE = 0,0186 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$), ao se utilizarem as $FPT_{0(1)}$, $FPT_{-1(1)}$, $FPT_{-33(1)}$ de forma conjunta para estimar a faixa de 0 a -33 kPa da curva de retenção de água do solo (Figura 22). A subestimativa e a maior dispersão dos pontos ocorrem para valores de conteúdo de água superiores a $0,45 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Figura 22). Isso provavelmente ocorreu devido à influência das $FPT_{0(1)}$, $FPT_{-1(1)}$, que subestimaram o conteúdo de água do solo nessa faixa de valores, conforme apresentado nas Figura 3 e 6, respectivamente. Para valores de conteúdo de água inferiores a $0,45 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, verifica-se boa uniformidade dos dados em relação à linha 1:1 (Figura 22), provavelmente devido à influência das $FPT_{-1(1)}$, $FPT_{-33(1)}$. Essas FPTs apresentaram alta precisão na estimativa do conteúdo de água do solo, conforme pode ser observado nas Figuras 6 e 9, respectivamente.

A análise dos indicadores estatísticos ME e RMSE aponta que os mesmos apresentaram valores baixos (Figura 22). O valor de $ME = -0,0023 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Figura 22),

transformado em lâmina de água armazenada, na camada de 0 a 25 cm, resulta em $ME = -0,57$ mm. Esse valor é inferior ao percentual de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para a faixa de potencial de 0 a -33 kPa (Tabela 11), destacando a excelente precisão das $FPT_{0(1)}$, $FPT_{-1(1)}$, $FPT_{-33(1)}$ na estimativa da faixa de potencial de 0 a -33 kPa. Os valores de ME e RMSE são inferiores àqueles observados quando se estimou toda a curva característica de água (Figura 21), indicando que a precisão na estimativa foi maior quando se estimou apenas a faixa de potenciais mais elevados da curva característica de água no solo (faixa de 0 a -33 kPa).

4.4.3 Estimativa da retenção de água na faixa potencial de -33 a -1500 kPa

Na Figura 23 são apresentados os resultados da capacidade preditiva das FPTs obtidas para estimar os potenciais de -33, -100, -500 e -1500 kPa, quando utilizadas conjuntamente na estimativa da retenção de água na faixa potencial de -33 a -1500 kPa. Observa-se uma leve subestimativa do conteúdo de água do solo ($ME = -0,0028 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e baixa dispersão dos dados em relação à linha 1:1 ($RMSE = 0,0212 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$), ao se utilizarem as $FPT_{-33(1)}$, $FPT_{-100(1)}$, $FPT_{-500(1)}$ e $FPT_{-1500(1)}$, de forma conjunta, para estimar a faixa de -33 a -1500 kPa da curva de retenção de água do solo (Figura 23). A tendência de subestimativa é maior na faixa de valores de 0,23 a 0,35 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Figura 23). Isso provavelmente ocorreu por influência da $FPT_{-500(1)}$ (faixa de valores de 0,23 a 0,35 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) e da $FPT_{-1500(1)}$ (faixa de valores de 0,24 a 0,35 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), conforme pode ser observado nas Figuras 15 e 18, respectivamente.

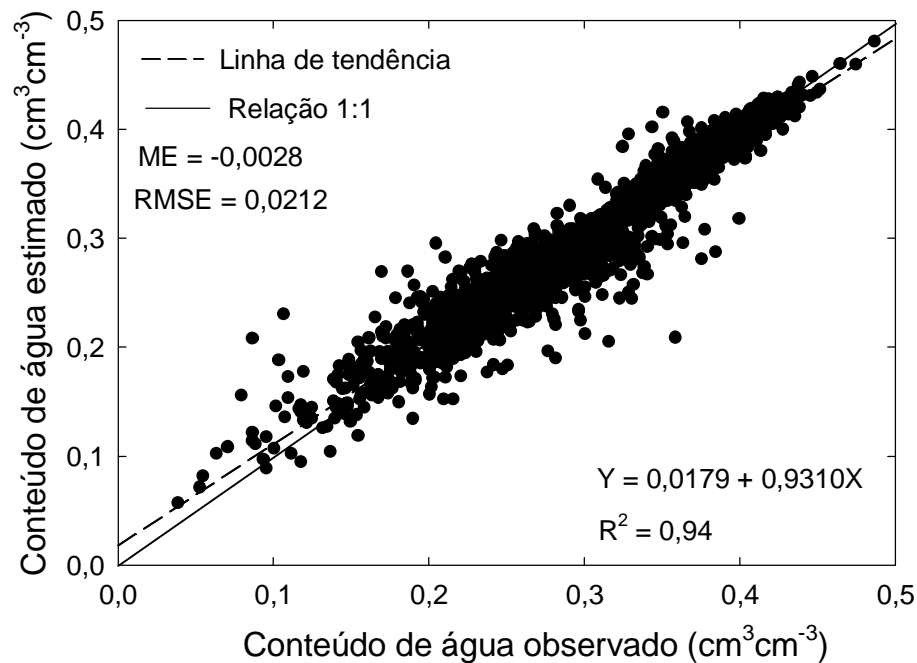


Figura 23 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, na faixa de potencial de -33 a -1500 kPa, da camada superficial de solos do Rio Grande do Sul

A disposição dos dados em torno da relação 1:1, para valores de conteúdo de água superiores a $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, é uniforme (Figura 23). Isso provavelmente ocorreu devido à influência das $FPT_{-33(1)}$, $FPT_{-100(1)}$ na estimativa. Essas FPTs apresentaram alta precisão na estimativa do conteúdo de água do solo, conforme pode ser observado nas Figuras 9 e 12, respectivamente.

O valor de $ME = -0,0028 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 23), transformado em lâmina de água armazenada, na camada de 0 a 25 cm, resulta em $ME = -0,70 \text{ mm}$. Esse valor é inferior ao percentual de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para a faixa de potencial de -33 a -1500 kPa (Tabela 11), destacando a excelente precisão das $FPT_{-33(1)}$, $FPT_{-100(1)}$, $FPT_{-500(1)}$ e $FPT_{-1500(1)}$ na estimativa da faixa de potencial de -33 a -1500 kPa.

4.5 Estimativa da retenção de água nas camadas intermediária e inferior dos solos do RS

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentadas as FPTs obtidas para a estimativa da retenção de água para os potenciais de 0, -1, -33 kPa (Tabela 12) e -100, -500 e -1500 kPa (Tabela 13), nas camadas intermediária e inferior dos solos do RS. Observa-se que, de modo geral, as FPTs obtidas para estimar a retenção de água no solo nessas camadas apresentaram a mesma tendência daquelas obtidas para estimar a retenção de água na camada superficial. A maior contribuição para a composição das FPTs obtidas para estimar os potenciais de 0, -1, -33 e -100 kPa foi dos atributos estruturais do solo, enquanto que, para FPTs obtidas para estimar os potenciais de -500 e -1500 kPa, os atributos texturais do solo foram aqueles que mais contribuíram na composição das mesmas (exceção da FPT obtida para estimativa do potencial de -500 kPa, na camada inferior, onde a maior contribuição foi de um atributo estrutural).

A Pt foi o atributo estrutural do solo que mais contribuiu com as FPTs geradas para a estimativa do potencial de 0 kPa, nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, apresentando coeficientes de determinação parcial de 0,740 e 0,643 para as camadas intermediária e inferior, respectivamente (Tabela 12). Esses resultados estão de acordo com aqueles apresentados na Tabela 2, onde se observa a maior correlação da Pt com a retenção de água no potencial de 0 kPa.

Nas FPTs obtidas para a estimativa dos potenciais de -1, -33 e -100 kPa das camadas intermediária e inferior, e -500 kPa da camada inferior, a Micro foi o atributo estrutural do solo que mais contribuiu para as FPTs geradas. Os coeficientes de determinação parcial observados foram: 0,838 e 0,716 para o potencial de -1 kPa (Tabela 12); 0,915 e 0,915 para o potencial de -33 kPa (Tabela 12); 0,905 e 0,852 para o potencial de -100 kPa (Tabela 13), nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente; e 0,564 para o potencial de -500 kPa da camada inferior do perfil do solo (Tabela 13). Esses resultados estão de acordo com aqueles apresentados na Tabela 2, onde se observam as altas correlações da Micro com a retenção de água

Tabela 12 – Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água nos potenciais de 0, -1 e -33 kPa, das camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2)

Variáveis	Camada intermediária		Camada inferior	
	Coeficiente	R^2 parcial	Coeficiente	R^2 parcial
0 kPa				
Ds	ns		ns	
Dp	ns		ns	
Macro	ns		-0,4821	0,155
Micro	0,4959	0,100	ns	
Pt	0,5818	0,740	1,1118	0,643
AGr	ns		ns	
AF	ns		ns	
Si	ns		ns	
Arg	ns		ns	
Intersecção	0,0360		0,0183	
R^2		0,840		0,798
-1 kPa				
Ds	ns		-0,1526	0,117
Dp	ns		ns	
Macro	0,3161	0,050	ns	
Micro	1,0278	0,838	0,7054	0,716
Pt	ns		ns	
AGr	ns		ns	
AF	0,0004	0,005	0,0005	0,007
Si	ns		ns	
Arg	ns		ns	
Intersecção	0,0037		0,3692	
R^2		0,893		0,840
-33 kPa				
Ds	-0,0520	0,001	0,0643	0,009
Dp	ns		-0,0344	0,002
Macro	-0,2284	0,006	ns	
Micro	0,7998	0,915	0,9774	0,915
Pt	ns		ns	
AGr	ns		-0,0012	0,008
AF	-0,0005	0,005	-0,0005	0,003
Si	ns		ns	
Arg	ns		ns	
Intersecção	0,1425		-0,0065	
R^2		0,927		0,937

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; R^2 parcial - contribuição de cada variável para o R^2 ; Ds - densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); Dp - densidade de partículas ($g\ cm^{-3}$); Macro - macroporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Micro - microporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Pt - porosidade total ($dm^3\ dm^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

Tabela 13 – Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água nos potenciais de -100, -500 e -1500 kPa, das camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2)

Variáveis	Camada intermediária		Camada inferior	
	Coeficiente	R^2 parcial	Coeficiente	R^2 parcial
-100 kPa				
Ds	-0,0731	0,002	0,0703	0,011
Dp	ns		ns	
Macro	-0,3213	0,007	ns	
Micro	0,6942	0,909	1,0092	0,852
Pt	ns		ns	
AGr	-0,0008	0,002	-0,0009	0,005
AF	-0,0005	0,007	-0,0003	0,002
Si	ns		ns	
Arg	ns		ns	
Intersecção	0,2099		-0,1462	
R^2		0,927		0,870
-500 kPa				
Ds	ns		0,2329	0,049
Dp	0,0724	0,016	ns	
Macro	-0,3510	0,030	ns	
Micro	ns		0,3430	0,564
Pt	ns		0,2547	0,004
AGr	ns		-0,0031	0,078
AF	0,0012	0,005	-0,0017	0,049
Si	0,0022	0,067	ns	
Arg	0,0033	0,614	ns	
Intersecção	-0,1502		-0,2611	
R^2		0,732		0,744
-1500 kPa				
Ds	ns		ns	
Dp	0,0465	0,007	0,0699	0,011
Macro	-0,3152	0,034	-0,3084	0,091
Micro	ns		ns	
Pt	ns		ns	
AGr	ns		-0,0032	0,605
AF	0,0008	0,002	-0,0017	0,070
Si	0,0019	0,075	ns	
Arg	0,0031	0,710	ns	
Intersecção	-0,0940		0,1286	
R^2		0,828		0,777

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; R^2 parcial - contribuição de cada variável para o R^2 ; Ds - densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); Dp - densidade de partículas ($g\ cm^{-3}$); Macro - macroporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Micro - microporosidade ($dm^3\ dm^{-3}$); Pt - porosidade total ($dm^3\ dm^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%); ns - não significativo a 5%.

nos potenciais de -1, -33 e -100 kPa das camadas intermediária e inferior, e -500 kPa da camada inferior do perfil do solo, e destacam a importância da estrutura do solo na retenção de água.

A Arg foi o atributo textural que mais contribuiu com as FPTs geradas para a estimativa dos potenciais de -500 e -1500 kPa da camada intermediária, com coeficientes de determinação parcial de 0,614 e 0,710, para os potenciais de -500 e -1500 kPa, respectivamente (Tabela 13). Na FPT obtida para a estimativa do potencial de -1500 kPa da camada inferior, observou-se que a maior contribuição foi da AGr, com coeficiente de determinação parcial de 0,605. Esses resultados também estão de acordo com aqueles apresentados na Tabela 2 e destacam a importância dos atributos texturais do solo na retenção de água em baixos potenciais. A Tabela 14 apresenta o resumo das FPTs apresentadas nas Tabelas 12 e 13, além da identificação de cada FPT para a sequência das discussões.

Na Figura 24 são apresentados a relação 1:1 dos dados observados e estimados pelas $FPT_{0(2)}$, $FPT_{-1(2)}$, $FPT_{0(3)}$, $FPT_{-1(3)}$ (Tabela 14) e seus respectivos indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do RS. A análise do indicador estatístico ME aponta que houve uma leve tendência de subestimativa do conteúdo de água do solo obtido com a utilização da $FPT_{0(2)}$, (ME = -0,0055 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) e da $FPT_{-1(2)}$ (-0,0007 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$). Comparando a linha de tendência (tracejada) com a linha contínua (relação 1:1), constata-se que as $FPT_{0(2)}$, $FPT_{-1(2)}$ subestimam o conteúdo de água do solo para valores superiores a 0,51 e 0,49 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, respectivamente (Figura 24 A). A $FPT_{0(2)}$ apresentou maior dispersão dos pontos ao longo da linha da relação 1:1 (RMSE = 0,0239 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) e valor médio do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,77$), quando comparada à $FPT_{-1(2)}$, que apresentou maior homogeneidade dos dados em torno da relação 1:1 (RMSE = 0,0136 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), com valor mais elevado do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,88$) (Figura 24 A).

Na camada inferior do perfil do solo, as $FPT_{-0(3)}$ e $FPT_{-1(3)}$ também subestimaram os valores do conteúdo de água do solo (ME = -0,0014 e -0,0011 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), especialmente para valores do conteúdo de água superiores a 0,56 e 0,47 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, respectivamente (Figura 24 B).

Tabela 14 – Funções de Pedotransferência para estimativa da retenção de água em diferentes potenciais, das camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul

Camada intermediária		
Potencial	FPT	Equação
θ_0	FPT ₀₍₂₎	0,0360+0,4959Micro+0,5818Pt
θ_{-1}	FPT ₋₁₍₂₎	0,0037+0,3161Macro+1,0278Micro+0,0004AF
θ_{-33}	FPT ₋₃₃₍₂₎	0,1425-0,0520Ds-0,2284Macro+0,7998Micro-0,0005AF
θ_{-100}	FPT ₋₁₀₀₍₂₎	0,2099-0,0731Ds-0,3213Macro+0,6942Micro-0,0008AGr-0,0005AF
θ_{-500}	FPT ₋₅₀₀₍₂₎	-0,1502+0,0724Dp-0,3510Macro+0,0012AF+0,0022Si+0,0033Arg
θ_{-1500}	FPT ₋₁₅₀₀₍₂₎	-0,094+0,0465Dp-0,3152Macro+0,0008AF+0,0019Si+0,0031Arg
Camada inferior		
Potencial	FPT	Equação
θ_0	FPT ₀₍₃₎	0,0183-0,4821Macro+1,1118Pt
θ_{-1}	FPT ₋₁₍₃₎	0,3692-0,1526Ds+0,7054Micro+0,0005AF
θ_{-33}	FPT ₋₃₃₍₃₎	-0,0065+0,0643Ds-0,0344Dp+0,9774Micro-0,0012AGr-0,0005AF
θ_{-100}	FPT ₋₁₀₀₍₃₎	-0,1462+0,0703Ds+1,0092Micro-0,0009AGr-0,0003AF
θ_{-500}	FPT ₋₅₀₀₍₃₎	-0,2611+0,2329Ds+0,3430Micro+0,2547PT-0,0031AGr-0,0017AF
θ_{-1500}	FPT ₋₁₅₀₀₍₃₎	0,1286+0,0699Dp-0,3084Macro-0,0032AGr-0,0017AF

Onde: ⁽²⁾ - camada intermediária; ⁽³⁾ - camada inferior; Ds - densidade do solo (g cm^{-3}); Dp - densidade de partículas (g cm^{-3}); Macro - macroporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Micro - microporosidade ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); Pt - porosidade total ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$); AGr - areia grossa (%); AF - areia fina (%); Si - silte (%); Arg - argila (%);.

A dispersão dos pontos em torno da linha 1:1 (RMSE = $0,0213 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,78$) foram maior e menor, respectivamente, para a FPT₋₀₍₃₎, quando comparada à FPT₋₁₍₃₎ (Figura 24 B), indicando que a FPT₋₁₍₃₎ é mais precisa do que a FPT₋₀₍₃₎.

Os valores de ME observados para as FPT₀₍₂₎ e FPT₋₁₍₂₎, FPT₋₀₍₃₎ e FPT₋₁₍₃₎ (Figura 24 A e B), transformados em lâmina de água armazenada (multiplicados pela espessura da camada), são -1,35, -0,17, -0,35 e -0,27 mm, respectivamente. Esses valores são inferiores ao valor de 1% das lâminas médias armazenadas, observadas para as camadas intermediárias e inferior do perfil do solo (Tabela 15). Esses resultados indicam que as FPT₋₀₍₂₎ e FPT₋₁₍₂₎, FPT₋₀₍₃₎ e FPT₋₁₍₃₎ apresentaram excelente precisão na estimativa da umidade do solo.

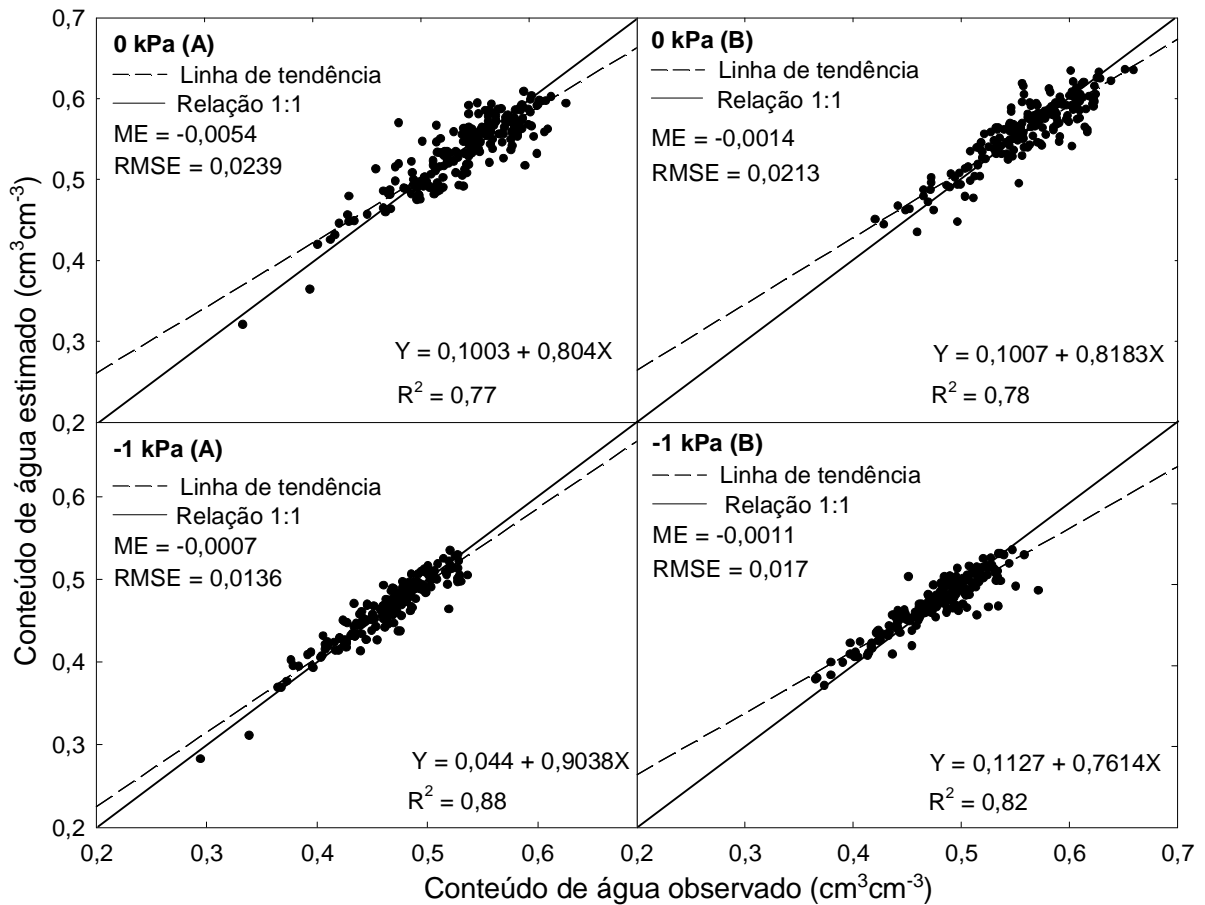


Figura 24 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de 0 e -1 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul

Em termos práticos, os valores de ME (Figura 24) significam que a utilização das FPT₋₀₍₂₎, FPT₋₁₍₂₎, FPT₋₀₍₃₎ e FPT₋₁₍₃₎ para estimar o armazenamento de água em vez de medi-lo em laboratório resulta em erros de subestimativa de lâmina de 1,35 e 0,17mm, para os potenciais de 0 e -1 kPa da camada intermediária, respectivamente, e de 0,35 e 0,27 mm para os potenciais de 0 e -1 kPa da camada inferior, respectivamente.

Os resultados da relação 1:1 dos dados observados e estimados pelas FPT₋₃₃₍₂₎, FPT₋₁₀₀₍₂₎, FPT₋₃₃₍₃₎ e FPT₋₁₀₀₍₃₎ (Tabela 14), e seus respectivos indicadores estatísticos R², ME e RMSE, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do RS, são apresentados na Figura 25.

Tabela 15 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para os potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, das camadas intermediária e inferior do perfil de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas

Potencial (kPa)	Lâmina média observada (mm)	Percentuais da lâmina média (mm)		
		1%	3%	5%
Camada intermediária				
0	135,65	1,36	4,05	6,75
-1	116,47	1,16	3,49	5,82
-33	93,11	0,93	2,79	4,65
-100	88,34	0,88	2,65	4,42
-500	65,01	0,65	1,95	3,25
-1500	57,72	0,58	1,73	2,89
Camada inferior				
0	140,06	1,40	4,20	7,00
-1	119,56	1,19	3,59	5,98
-33	92,81	0,93	2,78	4,64
-100	87,98	0,88	2,64	4,40
-500	65,53	0,65	1,96	3,28
-1500	58,12	0,58	1,74	2,91

Observa-se uma leve tendência de subestimativa do conteúdo de água do solo obtido pelas FPT₋₃₃₍₂₎, FPT₋₁₀₀₍₂₎ (ME = -0,0003, -0,0021), respectivamente (Figura 25 A), e pelas FPT₋₃₃₍₃₎ e FPT₋₁₀₀₍₃₎ (ME = -0,0007 e -0,0017 cm³cm⁻³), respectivamente (Figura 25 B). As FPT₋₃₃₍₂₎, e FPT₋₁₀₀₍₂₎ subestimaram o conteúdo de água do solo quando os valores foram superiores a 0,39 e 0,34 cm³cm⁻³, respectivamente (Figura 25 A), enquanto que nas FPT₋₃₃₍₃₎ e FPT₋₁₀₀₍₃₎ a subestimativa do conteúdo de água do solo ocorreu para valores superiores a 0,38 e 0,34 cm³cm⁻³, respectivamente (Figura 25 B). A disposição dos pontos em torno da linha 1:1 foi homogênea (valores baixos de RMSE), e os valores dos coeficientes de determinação (R²) foram altos para as quatro FPTs avaliadas (Figura 25 A e B), indicando a alta capacidade preditiva das FPTs obtidas.

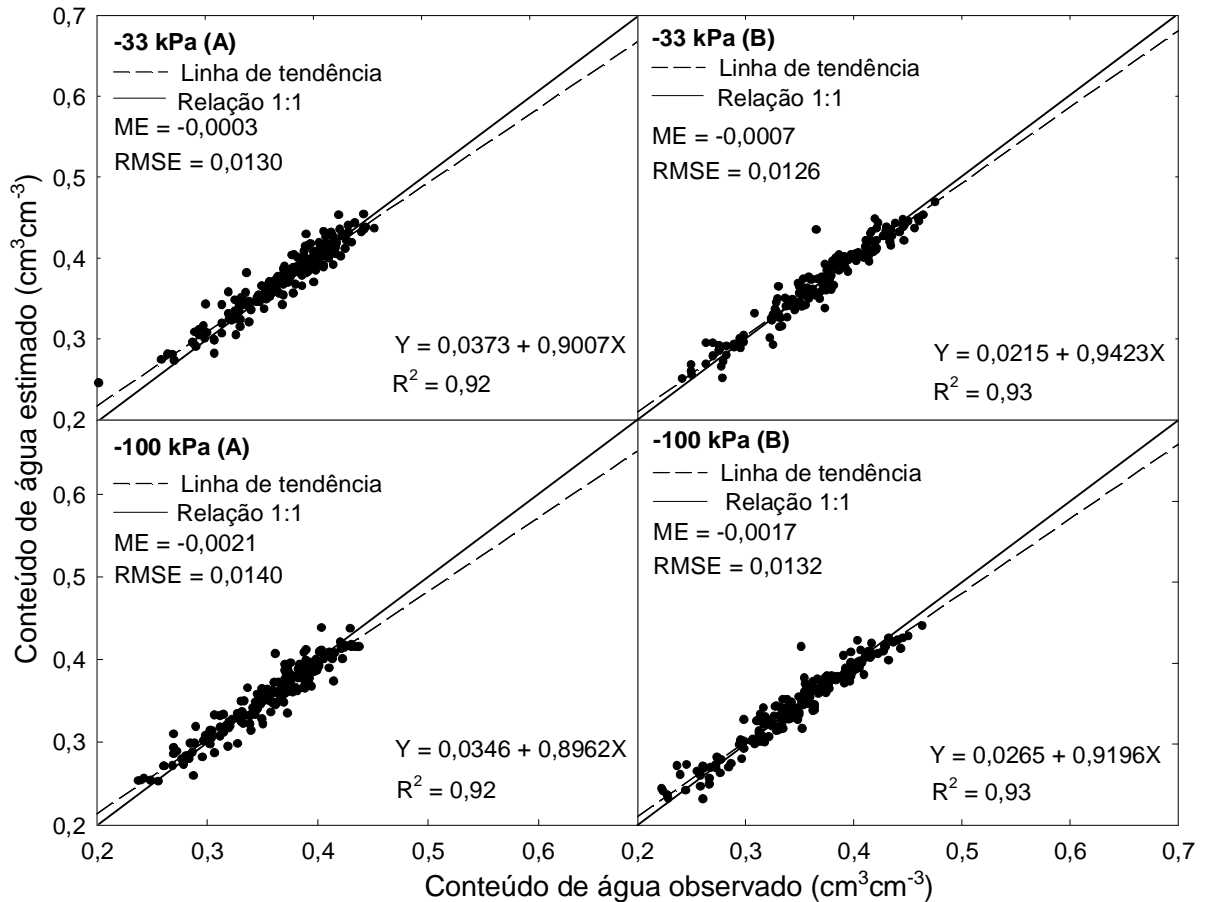


Figura 25 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 e -100 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul

Os valores de ME (Figura 25), em termos de lâmina de água armazenada, representam -0,075 e -0,525 mm para os potenciais de -33 e -100 kPa, respectivamente, da camada intermediária e -0,175 e -0,425 mm para os mesmos potenciais da camada inferior do perfil do solo. Esses valores são inferiores ao percentual de 1% das lâminas médias observadas para essas camadas (Tabela 15) e indicam a excelente precisão das $FPT_{-33(2)}$, $FPT_{-100(2)}$, $FPT_{-33(3)}$ e $FPT_{-100(3)}$ na estimativa da umidade do solo. Em termos práticos, esses valores de ME mostram que a utilização das $FPT_{-33(2)}$, $FPT_{-100(2)}$, $FPT_{-33(3)}$ e $FPT_{-100(3)}$ para estimar o armazenamento de água, em vez de medi-lo em laboratório, resulta em subestimativa da lâmina de água armazenada de 0,075 e 0,525 mm para os potenciais de -33 e -100 kPa,

respectivamente, da camada intermediária e de 0,175 e 0,425 mm para os mesmos potenciais da camada inferior do perfil do solo. Na Figura 26 são apresentados os resultados da relação 1:1 dos dados observados e estimados pelas $FPT_{-500(2)}$, $FPT_{-1500(2)}$, $FPT_{-500(3)}$ e $FPT_{-1500(3)}$ (Tabela 14), e seus respectivos indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, das camadas intermediária (A) e inferior (B), do perfil dos solos do RS.

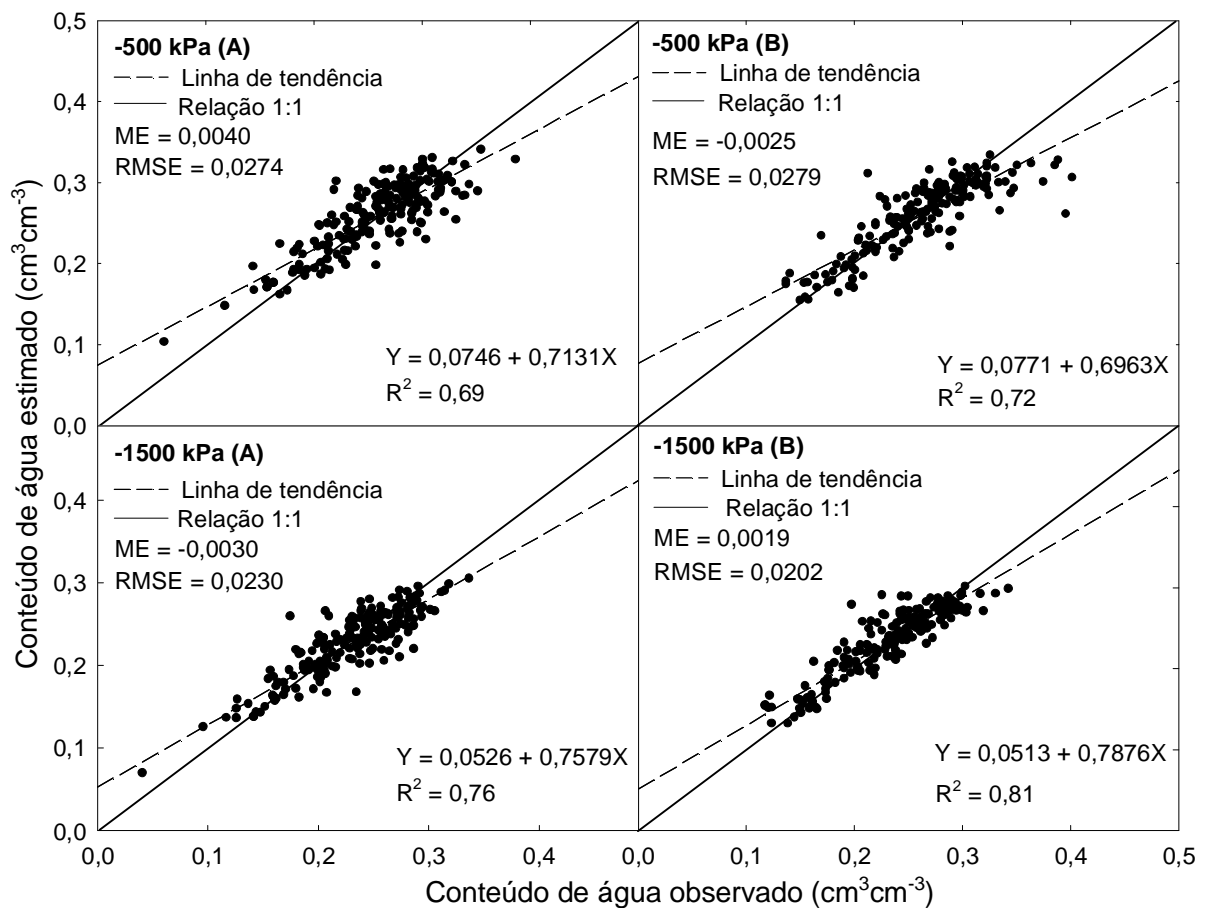


Figura 26 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -500 e -1500 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul

A análise do indicador estatístico ME aponta que houve superestimativa do conteúdo de água do solo obtida com a utilização da $FPT_{-500(2)}$ ($ME = 0,0040 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$)

(Figura 26 A), e com a utilização da $FPT_{-1500(3)}$ ($ME = 0,0019 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) (Figura 26 B). A superestimativa da umidade do solo, pelas $FPT_{-500(2)}$ e $FPT_{-1500(3)}$, ocorreu quando os valores foram inferiores a $0,24$ e $0,23 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, respectivamente. As $FPT_{-1500(2)}$ ($ME = -0,0030 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) e $FPT_{-500(3)}$ ($ME = -0,0025 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$) subestimaram o conteúdo de água do solo quando os valores foram superiores a $0,22$ e $0,25 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, para as $FPT_{-1500(2)}$ e $FPT_{-500(3)}$, respectivamente (Figuras 26 A e 26 B). Observa-se maior dispersão dos pontos em torno da linha 1:1 (valores altos de RMSE) e valores mais baixos dos coeficientes de determinação (R^2), nas $FPT_{-500(2)}$ e $FPT_{-1500(2)}$ (Figura 26 A), quando comparadas às FPTs obtidas para estimar esses potenciais na camada inferior (Figura 26 B), indicando que capacidade preditiva das $FPT_{-500(2)}$ e $FPT_{-1500(2)}$ é mais baixa.

Os valores absolutos de ME em termos de lâmina de água armazenada das $FPT_{-500(2)}$ e $FPT_{-1500(2)}$ ($ME = 1 \text{ mm}$ e $ME = 0,75 \text{ mm}$, respectivamente), foram inferiores ao percentual de 3% das lâminas médias observadas para os potenciais de -500 kPa e -1500 kPa da camada intermediária do perfil do solo (Tabela 15). Isso significa que essas FPTs apresentaram boa precisão na estimativa da umidade do solo nos potenciais de -500 kPa e -1500 kPa da camada intermediária do perfil do solo. Na camada inferior, os valores absolutos de ME das $FPT_{-500(3)}$ e $FPT_{-1500(3)}$, em termos de lâmina de água armazenada, foram: $ME = 0,62 \text{ mm}$ e $ME = 0,47 \text{ mm}$, respectivamente. Esses valores são inferiores ao percentual de 1% das lâminas médias observadas para os potenciais de -500 kPa e -1500 kPa da camada inferior do perfil do solo (Tabela 15), indicando que as $FPT_{-500(3)}$ e $FPT_{-1500(3)}$ apresentaram excelente precisão na estimativa da umidade do solo.

Avaliando os resultados da capacidade preditiva das FPTs obtidas para estimar a retenção de água nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, pode-se afirmar que, com exceção das $FPT_{-500(2)}$ e $FPT_{-1500(2)}$, que apresentaram boa precisão na estimativa, as demais FPTs obtidas apresentaram excelente precisão na estimativa da umidade do solo e podem ser utilizadas em laboratórios de física do solo, quando os valores das variáveis que compõem as mesmas estiverem dentro dos limites apresentados na Tabela 1 para cada variável.

4.6 Acurácia das FPTs na estimativa de faixas da curva característica de água no solo nas camadas intermediária e inferior de solos do RS

Os resultados da capacidade preditiva das FPTs obtidas para estimar os potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa (Tabela 14), quando utilizadas conjuntamente na estimativa da retenção de água nas faixas potenciais de 0 a -33 e de -33 a -1500 kPa das camadas intermediária (A) e inferior (B) do perfil do solo, são apresentados na Figura 27.

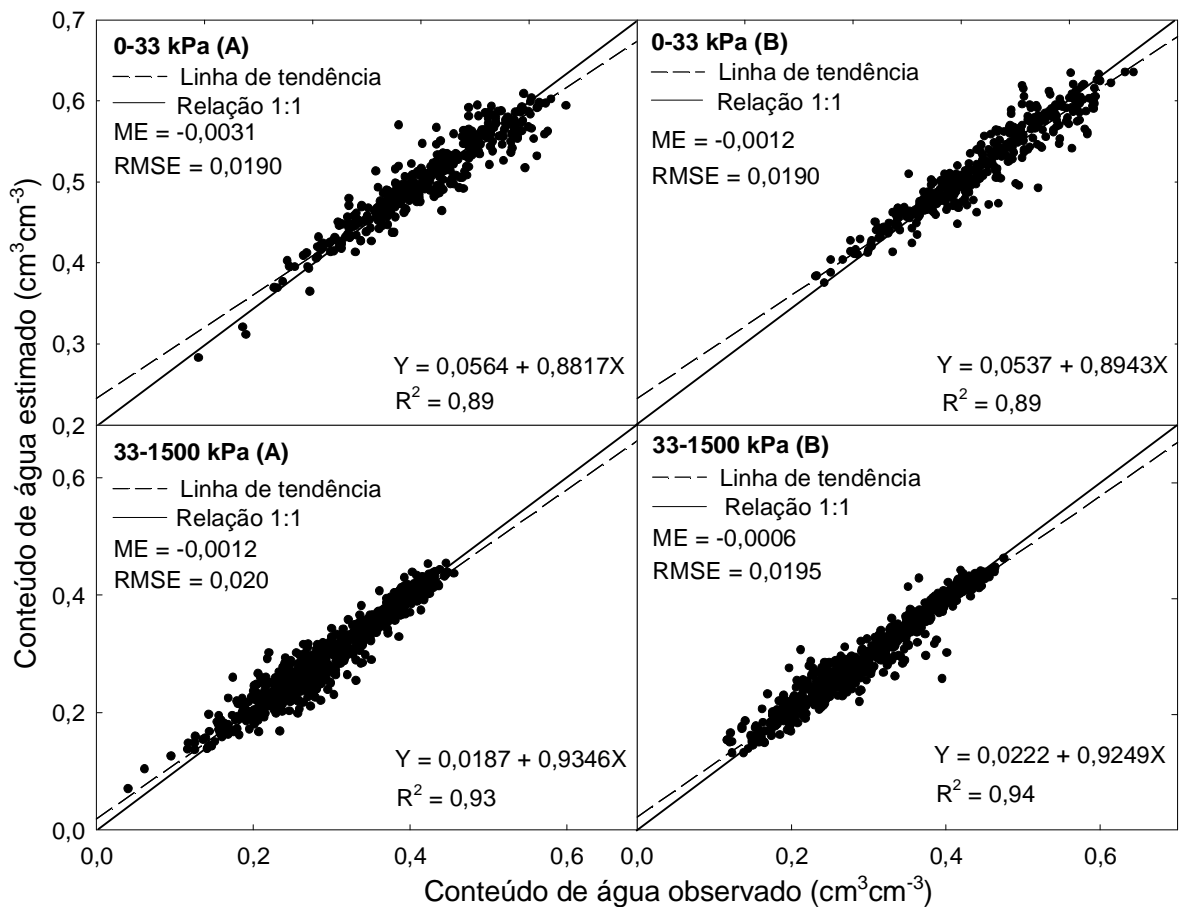


Figura 27 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, nas faixas de potenciais de 0 a 33 e de 33 a 1500 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul

Observa-se uma leve tendência de subestimativa do conteúdo de água do solo (ME negativo), nas duas faixas de potenciais avaliadas (Figura 27 A e B). Na faixa de potencial de 0 a -33 kPa, a subestimativa do conteúdo de água do solo ocorreu quando os valores foram superiores a 0,48 e 0,51 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente (Figura 27 A e B). Para a faixa de potencial de -33 a -1500 kPa, houve subestimativa do conteúdo de água do solo quando os valores foram superiores a 0,30 e 0,33 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente (Figura 27 A e B).

A dispersão dos pontos em relação à linha 1:1 foi maior quando o conteúdo de água do solo foi superior a 0,40 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, na faixa potencial de 0 a -33 kPa (Figura 27 A e B). Isso ocorreu provavelmente devido ao menor ajuste apresentado pelas $FPT_{0(2)}$ e $FPT_{0(3)}$ (Tabela 14), na estimativa da retenção de água no potencial de 0 kPa (Figura 24 A e B). Na faixa de potencial de -33 a -1500 kPa, observou-se que a dispersão dos pontos em relação à linha 1:1 foi maior para valores do conteúdo de água do solo compreendidos entre 0,22 e 0,32 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Figura 27 A e B). Neste caso, provavelmente houve influência das $FPT_{-500(2)}$, $FPT_{-1500(2)}$, $FPT_{-500(3)}$ e $FPT_{-1500(3)}$ (Tabela 14), que apresentaram ajustes mais baixos nas estimativas dos teores de água nos potenciais de -500 e -1500 kPa (Figura 26 A e B).

Os valores de ME, em termos de armazenamento de água, foram de 0,7 e 0,3 mm nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente, para a faixa de 0 a -33 kPa; e de 0,3 e 0,15 mm nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente, para a faixa de -33 a -1500 kPa. Esses valores foram inferiores ao valor de 1% das lâminas médias de água observadas (medidas em laboratório) para essas faixas, nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo (Tabela 16). Assim, pode-se afirmar que a utilização conjunta das $FPT_{0(2)}$, $FPT_{-1(2)}$, $FPT_{-33(2)}$ na camada intermediária, e das $FPT_{0(3)}$, $FPT_{-1(3)}$, $FPT_{-33(3)}$ na camada inferior, para estimativa da faixa de potencial de 0 a -33 kPa nessas camadas, resultou em excelente precisão na estimativa dessa faixa de potencial. Da mesma forma, excelente precisão também foi observada com a utilização conjunta das $FPT_{-33(2)}$, $FPT_{-100(2)}$, $FPT_{-500(2)}$, $FPT_{-1500(2)}$ na camada intermediária e das $FPT_{-33(3)}$, $FPT_{-100(3)}$, $FPT_{-500(3)}$, $FPT_{-1500(3)}$, na camada inferior, para estimativa da faixa de potencial de -33 a -1500 kPa nessas camadas.

Tabela 16 – Lâminas médias de água armazenada, obtidas em laboratório, para as faixas de potenciais de 0 a -1500 kPa, 0 a -33 kPa e -33 a -1500 kPa das camadas intermediária e inferior de solos do Rio Grande do Sul e valores dos percentuais de 1, 3 e 5% dessas lâminas

Faixas de potencial (kPa)	Lâmina média observada (mm)	Percentuais da lâmina média (mm)		
		1%	3%	5%
Camada intermediária				
0 a -1500	92,57	0,92	2,78	4,63
0 a -33	125,74	1,26	3,77	6,29
-33 a -1500	75,99	0,76	2,28	3,80
Camada inferior				
0 a -1500	94,01	0,94	2,82	4,70
0 a -33	129,81	1,30	3,89	6,49
-33 a -1500	76,11	0,76	2,28	3,80

Na Figura 28 são apresentados os resultados da capacidade preditiva das FPTs obtidas para estimar os potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa (Tabela 14), quando utilizadas conjuntamente na estimativa da retenção de água nas faixas potenciais de 0 a -1500 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) do perfil do solo.

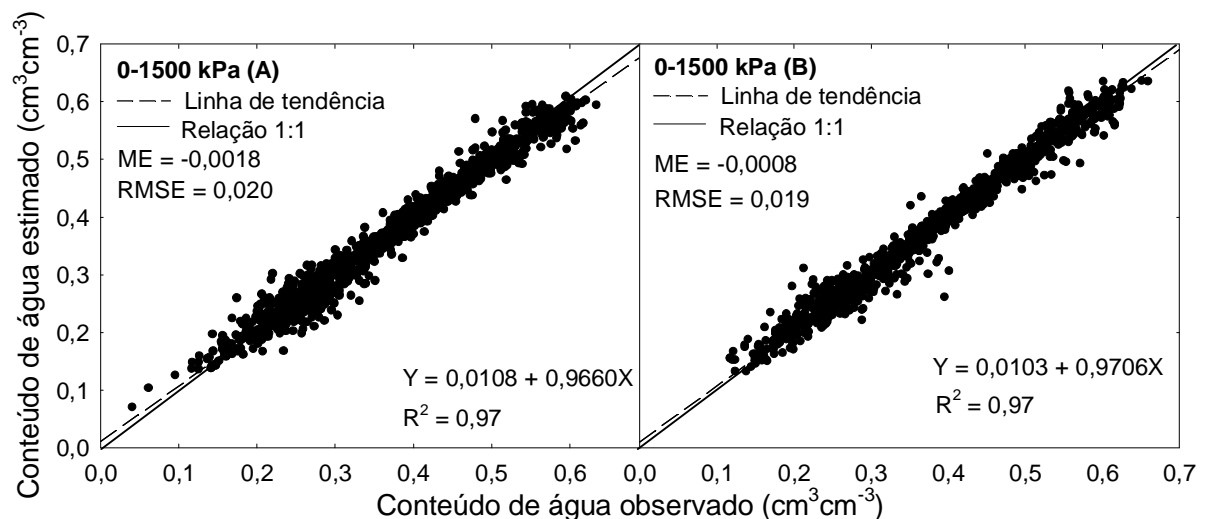


Figura 28 – Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo, nas faixas de potenciais de 0 a -1500 kPa, das camadas intermediária (A) e inferior (B) dos solos do Rio Grande do Sul

Observa-se uma leve tendência de subestimativa do conteúdo de água do solo (ME negativo) nas duas profundidades avaliadas (Figura 28 A e B). A subestimativa ocorreu quando os valores foram superiores a 0,32 e 0,36 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente (Figura 28 A e B). A dispersão dos pontos em relação à linha 1:1 foi homogênea (baixo RMSE), os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram altos e os valores de ME foram baixos (Figura 28 A e B).

Os MEs, em termos de armazenamento de água no solo, foram de 0,45 e 0,20 mm, para as camadas intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente. Esses erros são inferiores ao valor de 1% das lâminas médias de água observadas (medidas em laboratório) para essa faixa, nas camadas intermediária e inferior do perfil do solo (Tabela 16). Isso significa que a utilização conjunta das $\text{FPT}_{0(2)}$, $\text{FPT}_{-1(2)}$, $\text{FPT}_{-33(2)}$, $\text{FPT}_{-100(2)}$, $\text{FPT}_{-500(2)}$, $\text{FPT}_{-1500(2)}$, na camada intermediária e das $\text{FPT}_{0(3)}$, $\text{FPT}_{-1(3)}$, $\text{FPT}_{-33(3)}$, $\text{FPT}_{-100(3)}$, $\text{FPT}_{-500(3)}$, $\text{FPT}_{-1500(3)}$, na camada inferior, resultou em excelente precisão na estimativa da faixa de potencial de 0 a 1500 kPa para essas camadas.

4.7 Erros médios da estimativa da retenção de água em solos do RS

Na Figura 29 são apresentados os valores em módulo do ME da estimativa do armazenamento de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa das camadas superficial, intermediária, inferior e das três camadas conjuntas do perfil de solos do RS. Observa-se que os valores de ME foram mais elevados na camada superficial, quando comparados aos das camadas intermediária e inferior do perfil do solo. Isso ocorreu provavelmente porque, em áreas sob plantio direto, é nessa camada que ocorrem as principais alterações nos atributos estruturais do solo, decorrentes do manejo realizado no mesmo, que podem influenciar os parâmetros hídricos do solo.

Analisando todas as camadas do perfil do solo conjuntamente, observa-se que, a estimativa do armazenamento de água no solo no potencial de -500 kPa, com um ME em módulo de 4,19 mm, e no potencial de 0 kPa, com um ME em módulo de 3,14 mm,

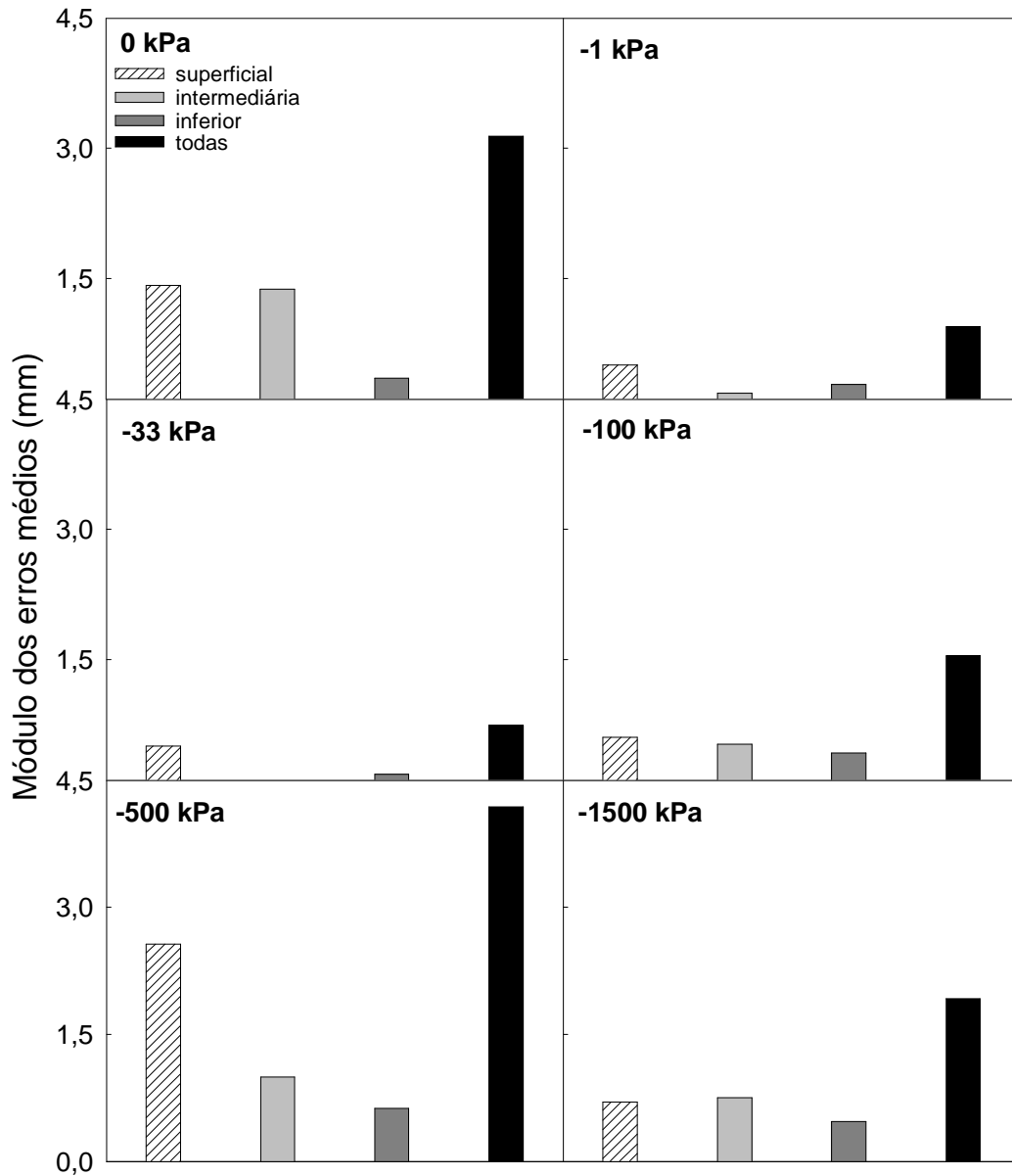


Figura 29 – Erros médios (em módulo) da estimativa do armazenamento de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa, das camadas superficial, intermediária, inferior e das três camadas conjuntas do perfil de solos do Rio Grande do Sul

foram aquelas que apresentaram os maiores valores de ME acumulado (Figura 29). Em termos práticos, esses valores de ME significam que o erro de estimar o armazenamento de água em vez de medi-lo em laboratório, em um perfil de solo de 750 mm de profundidade, é 4,19 mm para o potencial de -500 kPa e 3,14 mm para o

potencial de 0 kPa. Nos demais potenciais avaliados, os valores de ME de todas as camadas do perfil do solo conjuntas foram inferiores a 2 mm (Figura 29), o que comprova a excelente precisão das FPTs geradas.

Os valores de ME da estimativa do armazenamento de água nas faixas de potenciais de 0 a -33 kPa, -33 a -1500 kPa e 0 a -1500 kPa das camadas superficial, intermediária, inferior e nas três camadas conjuntas do perfil de solos do RS são apresentados na Figura 30. Os maiores valores de ME para a estimativa das faixas de potencial de -33 a -1500 kPa e 0 a -1500 kPa foram observados na camada superficial do perfil do solo, seguindo a tendência observada na Figura 29. Na estimativa da faixa de potencial de 0 a -33 kPa, o maior valor de ME foi observado na camada intermediária do perfil do solo.

A estimativa do armazenamento de água na faixa de potencial de 0 a -1500 kPa apresentou valores de ME de -0,70 mm, -0,45 mm e -0,2 mm, para as camadas superficial, intermediária e inferior do perfil do solo, respectivamente. Esses valores, considerando que essa faixa de potencial representa toda a curva característica de água do solo, são proporcionalmente inferiores aos valores de ME observados na estimativa de faixas menores da curva característica de água do solo (faixas de 0 a -33 kPa, -33 a -1500 kPa) e indicam que a utilização dessas FPTs para estimar toda a curva característica de água do solo (faixa de 0 a -1500 kPa) em vez de determiná-la em laboratório, resulta em erros de subestimativa de 0,70 mm na camada superficial, 0,45 mm na camada intermediária e 0,20 mm na camada inferior do perfil do solo.

Considerando todas as camadas do perfil do solo, o maior valor de ME foi observado para a estimativa da faixa de potencial de 0 a -33 kPa (ME = -1,64 mm) (Figura 30). Na estimativa da faixa de potencial de 0 a -1500 kPa, o valor de ME de todas as camadas do perfil do solo foi -1,35 mm, indicando que o erro de estimar a faixa de potencial de 0 a 1500 kPa em vez de determiná-la em laboratório, em um perfil do solo de 750 mm de profundidade, é 1,35 mm. Esse valor de ME é baixo, o que comprova a excelente precisão das FPTs utilizadas na estimativa dessa faixa de potencial.

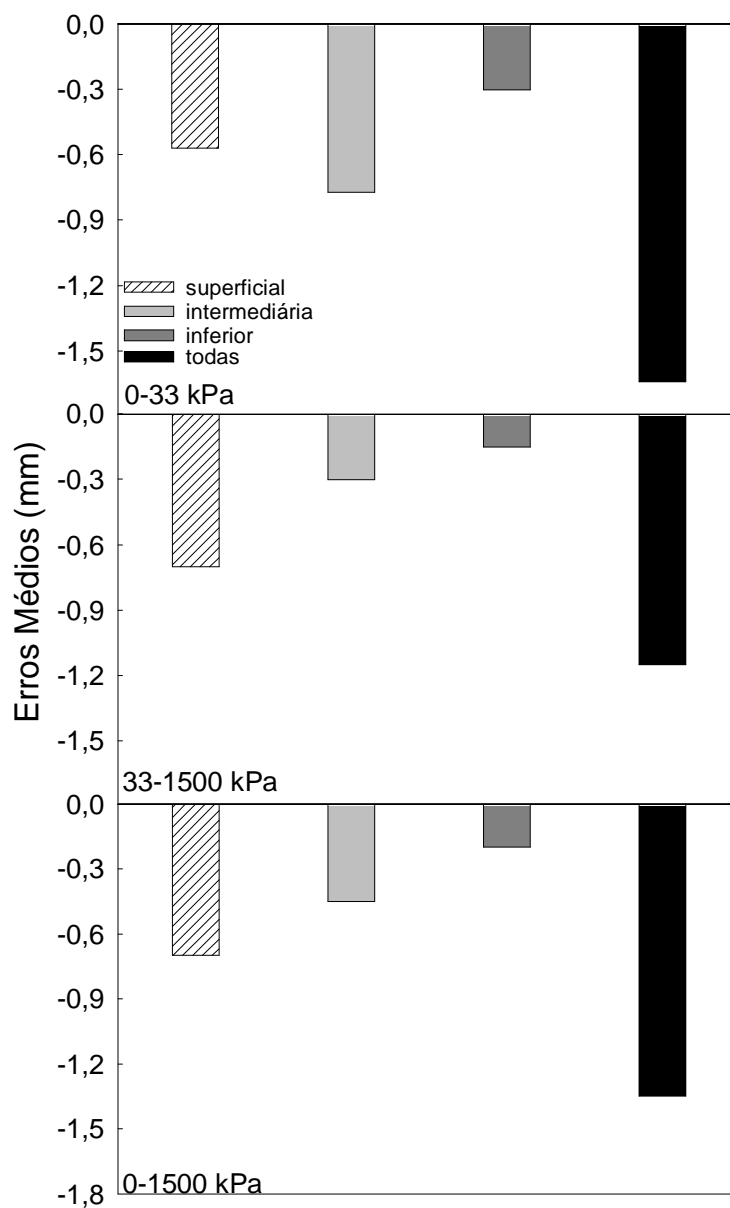


Figura 30 – Erros médios da estimativa do armazenamento de água nas faixas de potenciais de 0 a -33 kPa, -33 a -1500 kPa e 0 a -1500 kPa, das camadas superficial, intermediária, inferior e das três camadas conjuntas do perfil de solos do Rio Grande do Sul

4.8 Uso de FPTs e redução no tempo para a obtenção dos resultados da caracterização física dos solos

Para ilustrar uma situação em que o uso das FPTs geradas representa maior rapidez na obtenção dos resultados da retenção de água no solo, considerou-se, neste trabalho, o tempo necessário para a obtenção dos resultados de retenção de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa de um conjunto de 90 amostras de solo. Esse número de amostras representa a capacidade máxima de processamento, de uma única vez, de amostras de solo do laboratório de física do solo do Sistema Irriga da UFSM.

De acordo com as recomendações da EMBRAPA (1997), as amostras de solo, com estrutura preservada, devem ser saturadas por um período de 48 horas. Em seguida, essas amostras são transferidas para a mesa de tensão, onde permanecem por 48 horas a uma tensão de 1 kPa e por mais 48 horas a uma tensão de 6 kPa, de onde se obtém o percentual de microporos da amostra. Até esse momento são totalizadas 144 horas. Após isso, as amostras são levadas para o aparelho extrator de água de Richards (RICHARDS, 1949), onde permanecem por um período de 96 horas na tensão de 33 kPa para a obtenção do conteúdo de água do solo no potencial de -33 kPa e outras 96 horas na tensão de 100 kPa para a obtenção do conteúdo de água do solo no potencial matricial de -100 kPa. Assim, são necessárias 192 horas para a obtenção do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 e -100 kPa, nas 90 amostras de solo avaliadas. Deve-se considerar, ainda, o tempo de 1 hora, necessário para a pesagem das amostras em cada potencial, totalizando 5 horas (potenciais de 0, -1, -6, -33, -100 kPa).

Por meio de medições realizadas no laboratório de física do solo, observou-se que são necessários, em média, 45 minutos por amostra processada para obtenção do conteúdo de água nos potenciais de -500 e -1500 kPa, no aparelho WP4. Dessa forma, são necessárias 67 horas para a determinação do conteúdo de água do solo nesses potenciais matriciais, nas 90 amostras de solo.

Assim, o tempo total para a obtenção do conteúdo de água do solo nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa em um conjunto de 90 amostras de solo é 408 horas. Isso representa um período de 17 dias de trabalho de uma pessoa.

Para se utilizarem as FPTs, são necessárias as determinações dos atributos texturais e estruturais do solo. O tempo necessário para a determinação da Micro, de acordo com EMBRAPA (1997), são 144 horas. A estas, devem-se adicionar 3 horas, necessárias para a pesagem das amostras nos potenciais de 0, -1 e -6 kPa. Para a determinação da textura, da Ds e da Dp de 90 amostras, o tempo gasto, em média, segundo medições do laboratório de física do solo do Sistema Irriga, são 36,5 horas. Para a obtenção das variáveis Macro e Pt, são necessárias mais 2 horas. Dessa forma, o tempo total para a obtenção dos atributos texturais e estruturais do solo necessários para a utilização das FPTs é de 185,5 horas, representando 7,7 dias de trabalho de uma pessoa.

Através da utilização das FPTs, torna-se possível reduzir em 9,3 dias o tempo necessário para obter as informações do conteúdo de água do solo, nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa. Assim, essa redução substancial de tempo, bem como a possibilidade da obtenção de resultados precisos, sem a necessidade de utilização de aparelhos complexos, torna o acesso às informações dos parâmetros hídricos do solo mais rápido, e fácil de ser obtido. Além disso, torna-se possível diminuir o tempo durante o qual o técnico responsável pelo laboratório de solos deve permanecer no mesmo para obter as informações de um conjunto de amostras, otimizando assim a capacidade de processamento de amostras do laboratório.

5 CONCLUSÕES

A curva característica de água de solos irrigados do Rio Grande do Sul pode ser estimada com exatidão por pedofunções, a partir dos seguintes atributos do solo: areia grossa, areia fina, silte, argila, densidade do solo, densidade de partículas, macroporosidade, microporosidade e porosidade total.

Os erros médios da estimativa da lâmina de água armazenada em um perfil de solo de 750 mm de profundidade, utilizando-se as funções de pedotransferência (FPTs) geradas para solos do Rio Grande do Sul, foram inferiores ao valor de 1% das lâminas médias medidas em laboratório para essa profundidade de perfil do solo.

As FPTs geradas podem ser utilizadas em laboratórios de física do solo para se obterem, com maior rapidez e facilidade, as informações da curva característica de água de solos irrigados do Rio Grande do Sul, desde que os valores das variáveis que compõem cada FPT estejam dentro dos limites de validação das mesmas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINA, P.O.; PERIASWAMY, S.P. Estimating available water-holding capacity of Western Nigerian soils from soil texture and bulk density using core and sieved samples. **Soil Science**, Madison, v. 140, p. 55-58, 1985.

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, p. 27-34, 2004.

ARGENTON et al. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de latossolo vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 425-435, 2005.

ASSAD, et al. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001

BAKER, L. Development of class pedotransfer functions of soil water retention - A refinement. **Geoderma**, v. 144, p. 225-230, 2008.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**: New York. J. Wiley, 1972. 498 p.

BEUTLER, A.N. et al. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 829-834, 2002.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, v. 9, p. 177-213, 1989.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-22, 2005.

BRISTOW, K.L. et al. Obtaining Hydraulic properties for soil water balance models: some pedotransfer functions for tropical Australia. In: GENUCHTEN, M.T.VAN et al (Eds). **Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media**. University of California, p. 1103-1120, 1999.

BRUAND, A.; PÉREZ, P.F.; DUVAL, O. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. **Soil Use and Management**, v. 19, p. 232–242, 2003.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F.L. **Água no solo: parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM: Departamento de Engenharia Rural, 2000. 88 p.

COELHO, E.F.; CONCEIÇÃO, M.A.; SOUZA, V.A.B. Estimativa dos limites de disponibilidade de água em função da densidade global e da textura do solo. **Revista Ceres**. Viçosa, v. 45, p. 183-192, 1998.

DECAGON DEVICES, INC. **Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter**. USA, 2000. 70 p.

DREWRY, J.J.; CAMERON, K.C.; BUCHAN, G.D. Effect of simulated dairy cow treading on soil physical properties and ryegrass pasture yield. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 44, p. 181-190, 2001.

DINIZ, L.S. **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. 2008. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo *in situ* ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1029-1036, maio 2000.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **World Agriculture 2030: global food production will exceed population growth**. Disponível em: <<http://www.fao.org/english/newsroom/news/2002/7828-en.html>>. Acesso em: 28 abr. 2009.

GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J.C. Water retention characteristics of soils with contrasting Clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Australian Journal Soil Research**, v. 38, p. 523-536, 2000.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: Klute, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p. 343-411.

GIAROLA, N.F.B. et al. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 885-893, 2002.

GONZÁLEZ, A.P.; ALVES, M.C. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície, em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p.45-50, 2005

HILLEL, D. **Soil and water: Physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1972. 288 p.

_____. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press. 1980. 413 p.

_____. **Environmental soil physics**. New Cork: Academic Press, 1998. 771 p.

HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, v. 108, p. 155-180, 2002.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um latossolo roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, dez. 2002.

KLEIN, V.A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lajes, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006.

LANZANOVA, M. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1131-1140, 2007.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: EDUSP, 2005. 335 p.

LIN et al. Effects of soil morphology on hydraulic properties: II Hydraulic pedotransfer functions. **Soil Science of Society of America Journal**. Madison, v. 63, p. 955-961, 1999.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, p. 107-136, 2003.

MAJOU, H. AL. et al. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. **Soil Use and Management**, v. 24, p. 383-391, 2008.

MARTINS, S.G. et al. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, Viçosa, v. 8, n. 1, 2002, p. 32-41.

MICHELON, C.J. **Qualidade física dos solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central**. 2005. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MICHELON, C.J. et al. Qualidade Física de Solos Irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1308-1315, set./out. 2007.

MINASNY, B. et al. **Revisão sobre funções de pedotransferência e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50 p.

NASTA, P. et al. Scaling soil water retention functions using particle-size distribution. **Journal of Hydrology**, v. 374, p. 223-234, 2009.

OLIVEIRA, L. 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**, Viçosa, v. 26, p. 315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J.; TIMLIN, D.J. The current status of pedotransfer functions: their accuracy, reliability, and utility in field–and regional-scale modeling. **American Geophysical Union**. Washington, p. 223-234, 1999.

PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J.; LIN, H.S. Hydropedology and pedotransfer functions. **Geoderma**, v. 131, p. 308-316, 2006.

PETRY, M.T. **Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja**. 2000. 127 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

PETRY, M.T. **Simulação da necessidade de irrigação no Estado do Rio Grande do Sul para compensar perdas por deficiência hídrica de milho, soja e feijão**. 2004. 152 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PETRY, M.T. et al. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 531-539, 2007.

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SAXTON, K.E. Estimation of soil water properties. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n. 5, p. 1316-1320, 1982.

RAWLS, W.J. et al. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v. 116, n. 1, p. 61-76, 2003.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, 29-48, julho/dez. 2003.

REICHERT, J.M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 242-254, 2009.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R. et al. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: [s.n.], 2001. 165 p.

REINERT, D.J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1805-1816, 2008

RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. **Soil science**, Madison, v. 58, p. 95-112, 1949.

RIQUELME, U.F.B. **Propriedades físicas e hídricas do solo em sistemas de manejo do feijoeiro**. 2004. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SANTRA, P.; SANKAR, B. D. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. **Geoderma**, v. 146, p. 439-448, 2008.

SHARMA, M.L.; UEHARA, G. Influence of soil structure on water relation in low humic latosols. I. Water retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p.765-770, 1968.

SAS INSTITUTE. **SAS Statistical Package**. Cary: SAS Inc., 1997. version 6.12

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.R. Soil water characteristic estimates by texture and organic Matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 1569-1578, 2006.

SOLANO PERAZA, J.E. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SPOHR, R. **Influência das características físicas do solo nas perdas de água por escoamento superficial no sul do Brasil e Uruguai**. 2007.105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

TAVARES FILHO, J.; MAGALHÃES, F.S. Dispersão de amostras de latossolo vermelho eutroférico influenciadas por pré-tratamento para oxidação da matéria orgânica e pelo tipo de agitação mecânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p.1429-1435, 2008.

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

TOMASELLA, J. et al. Comparison of two approximation techniques to develop pedotransfer functions for Brazilian soil. **Soil Science of Society of America Journal**. Madison, v. 67, p. 1085-1092, 2003.

TORMENA, et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

UNGARO, F.; CALZOLARI, C.; BUSONI, E. Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano–Veneta region of North Italy: water retention properties. **Geoderma**, v. 124, p. 293-317. 2005.

URACH, F. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007, 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

van den B. et al. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferrasols and related soils. **Geoderma**, v. 78, p. 161-180, 1997.

WÖSTEN, J.; PACHEPSKY YA; RAWLS WJ. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p.123-150, 2001.