

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

José Nilton Vieira Nunes

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO
RIO GRANDE DO SUL E DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA
PARA A ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA.**

**Santa Maria, RS
2016**

José Nilton Vieira Nunes

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Ph.D. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Nunes, José Nilton Vieira
Avaliação da qualidade física de solos irrigados do Rio Grande do Sul e de funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água. / José Nilton Vieira Nunes.- 2016.
80 f.; 30 cm

Orientador: Reimar Carlesso
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2016

1. Conteúdo de Água 2. Pedotransferência 3. Propriedades Físicas 4. Qualidade do Solo I. Carlesso, Reimar II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a José Nilton Vieira Nunes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: jniltonflorestal@hotmail.com

José Nilton Vieira Nunes

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 17 de Junho de 2016

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

Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM)

Cleudson José Michelin, Dr. (IFF, São Vicente do Sul)

Santa Maria, RS
2016

RESUMO

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS IRRIGADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA.

AUTOR: José Nilton Vieira Nunes

ORIENTADOR: Reimar Carlesso

O conhecimento das características físico-hídricas dos solos é essencial para um manejo adequado dos mesmos, visando conciliar boas produtividades com a qualidade do solo. Na agricultura, a produtividade das culturas tende a ser maximizada e a degradação do ambiente e do solo tende a um mínimo, enquanto a qualidade física dos solos estiver dentro de um intervalo de valores considerados ideais. Não existe uma maneira simples de avaliar a qualidade física dos solos, sendo que, a criação de índices baseados em algumas propriedades dos solos (densidade, porosidade, curva de retenção, infiltração de água, etc.) pode ajudar nessa avaliação. Entretanto, muitos desses indicadores interagem uns com os outros, dificultando a sua utilização de forma generalizada na avaliação da qualidade do solo. Muitos dos indicadores utilizados são diretas ou indiretamente relacionados ao armazenamento e disponibilidade de água, aeração, densidade do solo, macroporosidade, carbono orgânico, etc, parâmetros estes determinados em laboratórios, cuja obtenção dos resultados é dispendiosa e pouco prática para aplicação em larga escala. Uma alternativa às medições diretas é o uso das funções de pedotransferência (FPT's), as quais podem estimar parâmetros anteriormente medidos, assim como, prever esses mesmos parâmetros para outros locais. Os objetivos desse trabalho foram: (a) desenvolver índices para avaliar propriedades físicas de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul; (b) gerar e validar FTP's para estimar a retenção de água e; (c) testar a precisão de FPT's da literatura para estimar a retenção de água na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP). Um conjunto de 3288 amostras de solo, coletadas em três profundidades do perfil do solo (superficial, intermediária e inferior), pertencentes ao banco de dados da UFSM foi utilizado para classificar a qualidade física dos solos, usando os valores medidos de densidade do solo, macroporosidade e o teor de argila. O conjunto de dados foi fracionado em dois conjuntos, para a calibração e validação das FPT's por meio de indicadores estatísticos. Do total de amostras avaliados, 39% apresentaram alguma indicação de compactação do solo levando-se em consideração a densidade e a macroporosidade do solo. As FTP's geradas demonstraram eficácia na estimativa do conteúdo de água no solo nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa, a partir do teor de argila, silte e areia do solo, densidade do solo, densidade de partícula e porosidade do solo. As FTP's da literatura testadas não demonstraram boa capacidade em estimar o conteúdo de água na CC e PMP, destaque a FPT proposta por Tomasella e Hodnett (1998), no qual se obteve uma eficiência de modelagem de 0,66 na estimativa do PMP.

Palavra-chave: Conteúdo de Água. Pedotransferência. Propriedades Físicas. Qualidade do Solo.

ABSTRACT

ANLYSIS OF SOIL PHYSICAL QUALITY IN IRRIGATED AREAS OF RIO GRANDE DO SUL STATE AND PEDOTRANSFER FUNCTIONS TO ESTIMATE THE WATER RETENTION.

AUTHOR: JOSÉ NILTON VIEIRA NUNES
ODVISOR: REIMAR CARLESSO

Knowledge of the physical and hydric characteristics of the soil is essential for proper management, aimed at conciliate good yields and soil quality. In agriculture, crop productivity tends to be maximized and environmental degradation, and soil tends to a minimum, while the physical quality of the soils is within a range of values considered ideal. There is no simple way to evaluate the physical quality of the soil, and, creating indexes based on some soil properties (density, porosity, retention curve, water infiltration, etc.) may assist in this evaluation. However, many of these indicators interact with each other, hindering its use in a generalized way in the evaluation of soil quality. Many of the indicators used are directly or indirectly related to the storage and availability of water, aeration, soil bulk density, macroporosity, organic carbon, etc., these parameter settings are determined in the laboratory, which is getting expensive and impractical for large-scale application. An alternative to the direct measurement is the use of pedotransfer functions (PFT's), which can estimate previously measured parameters, as well as predicting these same parameters for other locations. The objectives of this study were: (a) develop consistent indexes to evaluate physical properties of irrigated soils of the Rio Grande do Sul State; (b) generate and validate PFT's to estimate and water retention; (c) test the literature PFT's accuracy to estimate the water retention at field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) for database soils. A set of 3288 soil samples from three deeps (surface, intermediate and lower), belonging to the Irriga System database was used to classify the physical quality of the soil by macroporosity and soil clay content. The data set was fractionated into two sets for calibration and validation of FPT's through statistical indicators. Of the total samples evaluated, 39% had some indication of soil compaction. PFT's generated demonstrated efficacy in estimating the water content of the soil in the potential of -1, -6, -33 and -100 kPa, from the texture, bulk density and particle porosity and, most FTP's of literature tested did not show good capacity to estimate the water content in FC and PWP. Featured for FPT proposed by Tomasella and Hodnett (1998), in which it was obtained some ability to predict the water retention in sandy soils in potential CC and PMP.

Keyword: Water Content. Physical Properties Physical Quality.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Locais n Rio Grande do Sul onde foram realizadas as coletas de solo para compor o banco de dados do Sistema Irriga®27
- Figura 2 - Variabilidade textural observadas nas amostras coletadas nas três camadas do perfil dos solos do Estado do Rio grande do Sul utilizadas para gerar e validar as funções de pedotranferência31
- Figura 3 - Resultados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul38
- Figura 4 - Resultados de densidade do solo, nas camadas superficial (0 a 20 cm), intermediária (20 a 40 cm) e inferior (40 a 60 cm) de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul39
- Figura 5 - Resultado da classificação de compactação das amostradas de solos do Estado do Rio Grande do Sul, nas camadas superficial, intermediária e inferior, em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade do solo. (C-D: compactado em função da densidade do solo; C-M: compactado em função da macroporosidade; C-DM: compactado em função da densidade do solo e macroporosidade)40
- Figura 6 - Comparação entre os valores observados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa e estimados pelas Funções de pedotranferência, para solos irrigados do Rio Grande do Sul46
- Figura 7 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 kPa e -1500 kPa das funções de pedotranferencia de Arruda et al. (1987), Dijkerman (1988), Oliveira et al. (2002) e Bruand et al (1994)52
- Figura 8 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 kPa e -1500 kPa das funções de pedotranferencia de Canarache (1993), Lal (1979), Petersen et al. (1968) e Tomasella e Hadnett (1998)53

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Valor de densidade do solo e macroporosidade do solo estabelecidos como críticos para a indicação de ocorrência de compactação dos solos para diferentes intervalos de teor de argila dos solos30
- Tabela 2 - Funções de pedotransferência observadas na literatura e utilizadas para estimar o conteúdo de água no solo sob os potenciais matriciais de -33kPa e de -1500kPa ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) nos solos irrigados do Rio Grande do Sul35
- Tabela 3 - Frequência absoluta, frequência relativa e classe textural das amostras de solos do banco de dados da UFSM, nas três camadas do perfil de solo.....36
- Tabela 4 - Correlação de Pearson (r) entre as variáveis preditoras e a umidade retida em diferentes potenciais das amostras utilizadas para gerar as funções de pedotransferência de solos irrigados do RS.....42
- Tabela 5 - Modelos para a estimativa da retenção de água nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa dos solos irrigados do Rio Grande do Sul, através da seleção “*stepwise*” com seus respectivos critérios de informação de Akaike (AIC) e do coeficiente de determinação (R^2).....43
- Tabela 6 - Indicadores estatísticos utilizados para estimar a retenção de água nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa, a partir das funções de pedotransferência geradas, para alguns solos irrigados do Rio Grande do Sul47
- Tabela 7 - Retenção de água na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e total de água disponível no solo (TAW) para as diferentes classes texturais que compõem o banco de dados utilizado para a validação das funções de pedotransferência49
- Tabela 8 - Indicadores estatísticos para as funções de pedotransferência da literatura testados para alguns solos irrigados do Rio Grande do Sul51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVO GERAL	11
1.2.1	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	SOLO-ÁGUA-PLANTA	12
2.2	ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO	13
2.3	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	17
2.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS	19
2.5	FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA (FPT'S).....	22
2.6	MODELO STEPWISE E CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	LOCAIS DE COLETA E COMPOSIÇÃO DO BANCO DE DADOS.....	27
3.2	COLETA E PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS PARA A CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS.....	28
3.3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO	29
3.4	GERAÇÃO E OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA.....	30
3.5	ANÁLISE DE ERROS.....	33
3.6	ANÁLISE COMPARATIVA.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS IRRIGADOS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	36
4.2	ESTIMATIVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	42
4.3	AVALIAÇÃO DE EQUAÇÕES DA LITERATURA	49
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das plantas depende da utilização dos recursos solo e água. Enquanto o primeiro serve de suporte mecânico e fornecedor dos nutrientes necessários ao crescimento e desenvolvimento, o segundo é indispensável a todos os processos vitais da planta. Para manejar adequadamente esses recursos é necessário conhecer a interação entre o solo, a água e as plantas. A disponibilidade de água às plantas é variável, de acordo com as características do solo, condições climáticas e necessidade da planta; além disso, o aumento ou a redução da disponibilidade hídrica está muito relacionado com o manejo dado ao solo.

As propriedades físicas dos solos são muitas e todas impactam em como o solo, a água e o ar interagem. A estrutura do solo é uma característica comumente utilizada para classificar os solos do ponto de vista da qualidade, e que tem forte influência na produtividade das culturas. Alterações na densidade do solo, porosidade, infiltração de água, resistência à penetração e desenvolvimento radicular são, de acordo com Dexter (2004) e Michelon et al. (2009), indicadores que expressam a qualidade de um solo.

Propriedades físicas dos solos são importantes para avaliar o crescimento das plantas, além de propriedades químicas e biológicas. Solos intensamente cultivados, a exemplo das áreas irrigadas, tendem a apresentar um declínio na qualidade estrutural, em decorrência da compactação do solo, ocasionado por um sistema de rotação de culturas deficiente e/ou aumento do tráfego de máquinas e equipamentos pesados sobre a superfície desse solo (HAMZA, ANDERSON, 2005; MICHELON et al., 2009). A compactação do solo é definida como a redução dos espaços vazios, alterando a estrutura de solos cultivados, isto é, alterando o arranjo espacial, o tamanho e a forma dos agregados, conseqüentemente, diminuindo os espaços porosos entre e dentro desses agregados (DEFOSSEZ, RICHARDS, 2002), podendo ser causado por fenômenos naturais ou pela atividade humana.

É de entendimento comum entre os pesquisadores da área de que não existe uma maneira simples de avaliar a qualidade física dos solos, isto é, é necessário integrar muitas observações e de muitas propriedades do solo para se fazer uma estimativa geral (Dexter, Czyz, 2000). Por exemplo, a criação de índices baseados em diversas propriedades dos solos (densidade do solo, macroporosidade, conteúdo de água, curva de retenção, entre outros), pode facilitar a avaliação da qualidade de

solos (Dexter, 2004; Michelin et al., 2009). As variáveis que caracterizam um solo sob o ponto de vista físico são muitas, incluindo a textura, a estrutura, a densidade e a porosidade. Todas essas variáveis impactam sobre a retenção de água e ar, refletindo-se diretamente na disponibilidade de água às plantas. Informações como o total de água armazenado no perfil do solo e a energia de retenção dessa são fundamentais para a correta determinação de quando irrigar e quanta água aplicar em cada irrigação. Conhecendo-se os limites críticos, pode-se delimitar as faixas de umidade do solo onde os fatores físicos diretamente relacionados à produção das plantas são nulos ou sem restrições econômicas à produtividade das culturas.

A relação entre a energia de retenção da água no solo e o conteúdo de água pode ser descrita através da curva de retenção de água no solo (DEXTER, BIRD, 2001). Essa curva é representada pela energia dada em potencial matricial e o conteúdo de água correspondente. As características físico-hídricas do solo como textura, estrutura, matéria orgânica entre outros estão intrinsicamente relacionados com o comportamento da curva de retenção de água (BEUTLER et al., 2002). A curva de retenção de água pode representar um importante parâmetro para avaliar os solos, pois disponibilidade de água às plantas depende diretamente da energia de retenção de água no solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Assim, os solos adensados e principalmente os solos compactados e com restrição ao desenvolvimento radicular apresentam menos água disponível às plantas.

A água disponível no solo pode ser medida por métodos de campo e laboratório (REICHERT et al., 2009), ambos com restrições relacionadas ao tempo que se leva para a determinação, necessidade de equipamentos caros e mão de obra especializada (laboratório), enquanto que os métodos de campo muitas vezes são menos precisos. Visando superar essas dificuldades, modelos matemáticos, conhecidos como funções de pedotransferência (FPT's) foram propostos por vários pesquisadores para estimar propriedades de solo a partir de dados medidos (BOUMA, 1989; SHAAP et al. (2001), PACHEPSKY e RAWLS, (2004), TOMASELLA e HODNETT (1998); REICHERT et al. (2009); KHODAVERDILOO et al., 2011; MEDEIROS et al. (2014); MEDRADO e Lima, 2014). A utilização desses recursos é um importante processo de estimativa da retenção de água no solo pois, acelera o processo e reduz custos. Contudo, existem limitações ao seu uso generalizado pois, para que as FPT's tenham uma boa acurácia nas estimações da umidade na CC e

PMP, é indispensável que o banco de dados utilizado para a geração dos modelos contenha uma quantidade suficiente de variáveis (NEBEL et al., 2010), como frações granulométricas, densidade do solo, entre outras características físico-hídricas do solo.

Um dos principais problemas atribuídos às FPT's geradas e disponíveis na literatura é que estas possuem aplicabilidade apenas para as regiões ou locais a partir do qual foram geradas. A maioria das FPT's disponíveis na literatura foram desenvolvidas para regiões temperadas (SAXTON et al., 1986), onde as propriedades edafoclimáticas e sistemas de cultivo são diferentes dos observados nas regiões mais continentais e de clima tropical, necessitando que sejam mais testadas e, eventualmente, melhoradas, para que possam ser usadas como representativas de determinada classe de solos ou região. Assim, este trabalho se propõe a analisar a qualidade estrutural de solos irrigados no RS, gerar FPT's para estimar a retenção de água a partir de alguns atributos desses solos, além de testar a eficiência de FPT's propostas na literatura para estimar a retenção de água quando se utilizou o mesmo banco de dados usados para gerar os modelos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as características físico-hídricas dos solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul, através do banco de dados da UFSM. Desenvolver, analisar e validar FPT's para estimar o conteúdo de água no solo em tensões específicas.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a compactação restritiva à produtividade das culturas em solos irrigados, por meio dos atributos físicos, densidade e porosidade do solo.
- Desenvolver FPT's para a estimativa da retenção de água em solos irrigados do RS.
- Identificar os erros gerados pelas FPT's por meio de estimadores estatísticos em relação às determinações de laboratório.
- Avaliar o desempenho dos modelos presentes na literatura quando comparado com os modelos gerados a partir do banco de dados da UFSM.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOLO-ÁGUA-PLANTA

O solo é um sistema trifásico composto de uma fase sólida, constituída por partículas minerais e orgânicas de composição e tamanhos variados, que define um sistema poroso. A fase líquida é composta pela solução do solo, cujo elemento principal é a água, que ocupa parte do sistema poroso e o restante do espaço é ocupado pela fase gasosa (LIMA et al., 2007).

A água presente no solo é influenciada principalmente pela estrutura do solo, arranjo de partículas, textura e teor de matéria orgânica (KLEIN, LIBARDI, 2000; PANACHUKI et al., 2011). O manejo e as práticas culturais utilizadas modificam o solo, mudando a dinâmica de retenção e disponibilidade de água no solo, os quais são fatores determinantes para o desenvolvimento de plantas (BERTOL et al., 2001; SILVA et al., 2005). O armazenamento da água no solo varia em função da quantidade de água que entra no perfil e dos fatores que contribuem para que permaneça armazenada (GONZÁLEZ et al., 2007). Um dos fatores é a condição da superfície do solo, que está relacionada com as propriedades físicas e hídricas do solo, características da água da chuva e a percentagem de cobertura do solo pela vegetação (TABOADA CASTRO, 2001).

A retenção de água nos poros do solo pode de ser explicada essencialmente pela capilaridade e pela força de adsorção que se manifestam no solo. Além da intensidade de retenção, existe relação com a distribuição dos poros e o conteúdo de água existente. O estado de energia da água pode ser caracterizado com o uso do termo potencial total da água, representado pela letra grega ψ , é o somatório de cinco componentes do potencial: térmica, pressão (ψ_p), gravitacional (ψ_g), osmótica (ψ_{os}) e matricial (ψ_m) (CAMPBELL, 1988; LIBARDI, 2010).

No solo, a água possui afinidade com as superfícies das partículas sólidas e com o ar nos poros do solo, resultando no aparecimento de meniscos, que são curvaturas promovidas pela interface ar-água. A curvatura resultante dessa interface é maior quanto menor for o tamanho do poro; a importância da curvatura está no estado de energia da água e. por isso, quanto menor o poro, maior o grau de energia da água no interior do mesmo (PETRY et al., 2007; MOTA et al., 2010). A adsorção ocorre na formação de películas de água que revestem as superfícies dos

sólidos, à medida que os poros esvaziam a película que recobre a superfície da partícula se torna menos espessa, e a energia de adsorção se torna maior. Os fenômenos são simultâneos, contudo, devido às diferentes condições de umidade do solo um fenômeno se sobressai ao outro. Quando o solo se encontra com baixo teor de água a adsorção passa a dominar a retenção de água (HILLEL, 1980), e quando o teor de água estiver na faixa úmida o fenômeno de capilaridade se manifesta com maior expressão (REICHARDT, TIMM, 2004).

A água é um elemento fundamental para o desenvolvimento da planta. O aumento ou a redução da disponibilidade de água está relacionado com as características do solo, as condições climáticas e ao manejo dado ao solo. Petry (2004) e Mirassón et al. (2010) esclarecem que as alterações na produção de um cultivo estão vinculadas com as variações da disponibilidade de água no local, que ocorre especialmente em cultivos não irrigados ou regiões que apresentam uma insuficiência hídrica ocasionadas por períodos de estiagem

2.2 ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO

O conceito clássico da água disponível (AD) no solo foi proposto por Veihmeyer e Hendrickson (1931; 1949) definindo-a como o conteúdo de água no solo entre um limite superior denominado capacidade de campo (CC) e um limite inferior denominado ponto de murcha permanente (PMP). O conceito indica a capacidade de um solo em armazenar e disponibilizar água de maneira acessível às raízes das plantas entre os limites inferior e superior de disponibilidade água no solo (CARLESSO, 1995). Apesar de ser um conceito que não considera as inter-relações existentes entre a água, planta e ambiente do solo, o mesmo tem sido utilizado para definições de épocas de plantios, zoneamento agrícola, projetos de irrigação (AHUJA, NIELSEN, 1990; SILVA et al., 2014).

O conceito de CC é descrito como a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso tenha sido drenado, o que ocorre de dois a três dias depois após adição de água no solo através da chuva ou irrigação (VEIHMEYER; HENDRICKSON 1931; 1949). Contudo, existem dificuldades nas determinações práticas da CC, tais como o tempo e a determinação de drenagem mínima aceitável, perdas laterais que são causadas pelo fluxo lateral, entre outros (REICHARDT, 1998; SOUZA e CUNHA, 2013).

Para determinações indiretas da CC, utiliza-se amostras de solo deformadas ou indeformadas em laboratório. Jamison (1953) apresentou uma recomendação de utilizar o potencial de -33 kPa para representar a CC. No Brasil, os potenciais de -6 , -10 e -33 kPa têm sido comumente atribuídos à estimativa de umidade na CC para diferentes classes de solos (FERREIRA, MARCOS, 1983; BERNARDO, 1987; REICHARDT, 1988; SILVA et al., 1994; MELLO et al., 2002; SOUZA et al., 2002; RUIZ et al., 2003; LEÃO et al., 2004; KLEIN et al., 2006; SOUZA, CUNHA, 2013). Apesar dos métodos de laboratório serem amplamente utilizados para mensurar a CC, eles não são capazes de representar a dinâmica da água no solo, pois, o conteúdo de água relativo aos potenciais de -6 , -10 , -33 kPa são apenas correlacionáveis a umidade na CC, não sendo ela em si (REICHARDT, TIMM, 2004).

Com a finalidade de determinar a CC, Ferreira e Marcos (1983) propuseram a utilização do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, calculada por métodos matemáticos, obtendo-se correlações significativas com CC determinadas em campo. Dexter e Bird (2001) também utilizaram o potencial no ponto de inflexão da curva de retenção de água ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), mas associando a umidade correspondente como sendo a ideal para o preparo do solo. O ponto de inflexão da curva define a mudança no tamanho dos poros que predominam na retenção de água; conforme o potencial diminui após o ponto de inflexão, cresce a proporção de poros menores (DEXTER, 2004). Contudo, a utilização do ponto de inflexão não se ajusta adequadamente em solos que apresentam uma distribuição bimodal de poros (DEXTER, RICHARD, 2009).

Alguns trabalhos têm demonstrado que correlacionar a CC a um potencial específico não resulta em estimativa convincente. De acordo com Landon (1991), Bernardo et al. (2006) e Souza et al. (2013), esse fato ocorre porque não são levados em consideração as propriedades dinâmicas do perfil do solo, como gradientes hidráulicos, histerese, estratificação do solo e a presença de camadas impermeáveis. Portanto, o procedimento mais adequado para determinar a CC é a medição *in situ* para cada tipo de solo, depois de ocorrer a drenagem livre (HILLEL, 1980, REICHARDT, 1988).

As perdas de água por evaporação, percolação, movimentos laterais no perfil e absorção de água pelas raízes tendem a reduzir a umidade do solo a limites muito baixos e, se não houver incorporação da água via chuva ou irrigação, haverá redução na água disponível às plantas (SALVESTRO et al., 2012). Esse processo

acarreta uma significativa redução na absorção de água pelas raízes e, como não há água para suprir a demanda evaporativa da atmosfera, pode ocorrer déficit hídrico na planta. Durante esse período, caso a planta não conseguir se reidratar, após a aplicação de água através de irrigações ou chuva, o solo atinge o limite inferior de água disponível às plantas, conhecido também como PMP (VEIHMEYER, HENDRICKSON, 1931, 1949). O limite inferior de água na zona radicular ou PMP pode ser considerado como uma combinação entre as características da planta (estádio de desenvolvimento, taxa e volume de crescimento da raiz), características do solo (textura e condutividade hidráulica), além de fatores atmosféricos (SKAGGS et al., 1982; BOEDT, VERHEYE, 1985; CARLESSO, 1995; ROMANO e SANTINI, 2002; SALVESTRO et al., 2012).

Usualmente, o PMP é determinado usando-se câmaras de pressão e aplicando um potencial matricial de -1500 kPa (RICHARDS e WEAVER, 1943; KLUTE, 1986), porém, essa determinação tem sido criticada por vários autores (HILLEL, 1980; RITCHIE, 1981; RATLIFF et al., 1983; CARLESSO, 1995; AGUIAR NETO et al., 1999) pois algumas medidas de campo foram implementadas, encontrando-se potenciais diferentes daquele estabelecido, incluindo -2200 a -3000 kPa para o milho (HSIEH et al., 1972), no qual o potencial foi calculado a partir da medição do conteúdo de água no solo. Como a habilidade das plantas em extrair água um pouco antes ou após o potencial de PMP ser atingido, Briggs e Schantz (1912) determinaram um coeficiente de PMP para uma vasta coleção de espécies, incluindo tanto a vegetação nativa como culturas anuais. Veimeyer e Hendrickson (1928) deram sequência ao trabalho de Briggs e Schantz e introduziram o girassol como cultura padrão para a obtenção do PMP (PMP_{sun}). Por esse método, as plantas crescem em containers selados, de forma que, a única perda de água ocorre por transpiração. As plantas são irrigadas até o aparecimento da terceira folha; a partir daí são mantidas em ambientes com baixa demanda evaporativa da atmosfera e são submetidas a déficit até todas as folhas murcharem completamente. Para assegurar que a murcha é permanente, as plantas são colocadas em uma câmara úmida e escura durante a noite. Caso a murcha seja irreversível, o PMP_{sun} terá sido alcançado, podendo-se determinar o teor de umidade ou o potencial.

Um terceiro método, também chamado de ponto de murcha incipiente, foi introduzido por Furr e Reeve (1945) e baseia-se em medir o conteúdo de água no solo quando o par de folhas inferiores de uma planta qualquer, estando ela no

estádio vegetativo, definha ou cai e não recobrem quando submetidos a um ambiente úmido. Tanto o método de medida do PMP usando as câmaras de Richards ou com o girassol, foram muito contestados ao longo dos anos, por muitos pesquisadores. Os argumentos usados por esses pesquisadores são muitos mas, o principal é de que o conteúdo de água no potencial de -1500 kPa tende a ser menor que o conteúdo de água no determinado usando o girassol. Quanto ao girassol, é raro encontrar eventos no campo onde todas as plantas morrem. Além disso, plantas podem extrair água do solo a potenciais menores que -1500 kPa. Sikes e Loomies (1969) com dois solos diferentes, encontraram valores de potenciais variando de -1050 a -1610 kPa para *Nicotiana attenuata*, -1450 a -2140 kPa para milho, -3470 kPa para *Cassia fasciculata*, -2050 a -3860 kPa para *Agropyron intermedium* e -700 a -1100 kPa para o girassol. Estes resultados demonstram que o conceito de que o PMP é independente da espécie e não altera com as características do solo não pode ser utilizado para todas as condições de cultivo e culturas.

O uso da câmara de Richards apresenta algumas limitações, entre elas está a dependência de um sistema pneumático, fragilidade das placas porosas e o contato solo-placa, que nem sempre ocorre de maneira eficiente. O tempo para determinações de potenciais menores em solos que apresentam conteúdo de argila elevado pode ultrapassar a 40 dias (KLEIN, 2008). Ao comparar dados de PMP obtidos em laboratório com o desempenho das plantas a campo, Oliveira e Martins (1966), Costa et al. (1997) concluíram que o conteúdo de água na tensão de 1500 kPa situa-se dentro da faixa de água ainda disponível para a planta, podendo na maioria das vezes ser substituído pelo método biológico. Arruda et al. (1987) preconizam que o valor prático de PMP serve apenas como um guia geral de limite inferior de disponibilidade de água às plantas, e seu valor serve apenas como referência, pois a planta ao atingir o estado de murchamento está perdendo em produção e isso ocorre muito antes do solo atingir o PMP, porém, a atividade no vegetal só cessa ao atingir esse ponto (RICHARDS, WALDLEIGH, 1952; ARRUDA et al., 1987; JONG VAN LIER, 2000).

Devido às atribuições negativas apresentadas pela câmara de Richards, a utilização do psicrômetro modelo WP4 (DECAGON DEVICES, INC.) é um procedimento que vem sendo rapidamente disseminando devido à rapidez nas determinações (COSTA et al., 2008; BITTELLI, FLURY, 2009; KLEIN et al., 2010; SOLONE et al., 2012). O WP4 é um equipamento que utiliza a técnica do ponto de

orvalho para medir o potencial matricial de uma amostra de solo. Ao acondicionar a amostra no equipamento em uma câmara hermeticamente fechada, este relaciona o potencial de água da amostra com a pressão de vapor do ar. O espelho que se encontra resfriado dentro da câmara fechada tem a temperatura controlada por um refrigerador termoelétrico e a condensação do espelho é controlada por uma célula fotodetectora, que é capaz de detectar mudança na reflectância quando ocorre a condensação no espelho. Dessa maneira, um termopar que está conectado ao espelho registra a temperatura em que ocorre a condensação (DECAGON, 2013). Assim, o aparelho exibe o potencial matricial e a temperatura da amostra no visor localizado na parte exterior do aparelho. O modelo atual (WP4-C) apresenta um melhor controle da temperatura da amostra de solo com o interior do equipamento (KLEIN et al. 2010). Esta é uma metodologia que se baseia na Equação de Kelvin, equação que relaciona a pressão de uma fase condensada com a pressão de vapor, porém, a utilização para determinação em elevados potenciais apresenta uma imprecisão (KLEIN, MARCOLIN, 2008; SILVA et al., 2014).

2.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A curva de retenção de água também denominada de curva característica de água no solo é um importante indicador da qualidade física do solo e está relacionado com o desenvolvimento das plantas, por estar associada a variações do conteúdo de água no solo (FREITAS JUNIOR et al., 1984; SILVA et al., 2010; DEBNATH et al., 2012). O solo saturado, ao ser submetido a uma força de sucção, terá parte da água armazenada nos poros sendo drenada, sendo substituída pelo ar. Com o aumento da força de sucção, a água será drenada dos poros menores ocorrendo mais entrada de ar no interior dos mesmos. Assim, a película que envolve as partículas do solo se torna cada vez menos espessa, ocasionando um aumento na força de adsorção, sendo necessárias maiores forças de sucção para drenar a água no solo (DEXTER, 2004; TAVARES et al., 2008). Conforme a estrutura do solo é alterada pela compactação, resulta na redução ou na perda da estabilidade dos agregados, alterando a distribuição dos poros e a retenção e disponibilidade da água no solo (SHARMA, UEHARA, 1968; MORAES et al., 1993). Dessa maneira, a curva de retenção da água do solo é descrita pelo teor de água e o potencial matricial de água no solo. Durante o processo de drenagem do solo há um decréscimo lento e

contínuo dessas variáveis, as quais estão vinculadas à estrutura e a distribuição dos poros no solo (BEUTLER et al., 2002), sendo possível utilizar a curva para estimar alguns atributos do solo como a porosidade, CC, PMP, balanço hídrico, condutividade hidráulica não-saturada, entre outros (SÁ et al. 2010; REZAEI et al., 2011)

No campo, o método usado para a determinação da curva de retenção de água requer a instalação de tensiômetros e tem a vantagem de possibilitar a determinação da relação potencial matricial e umidade do solo ao mesmo tempo, no entanto, os métodos de laboratório podem processar simultaneamente um grande número de amostras de diferentes solos e com maior facilidade (URACH, 2007). Nos laboratórios, inicialmente a centrifugação de amostras de solos era utilizada para correlacionar o conteúdo de água no solo a um determinado potencial (VEIHMEYER et al., 1924; SILVA, AZEVEDO, 2002). Porém, após o surgimento da câmara de Richards (1943), da mesa de tensão e do psicrômetro, a metodologia da centrífuga praticamente não é mais utilizada

A determinação da curva de retenção é importante para o manejo de áreas irrigadas e estudos do movimento da água no solo (COSTA et al., 2008). Alguns trabalhos discutem as limitações das metodologias na obtenção da curva de retenção de água no solo. Gubiani et al. (2013) coletaram amostras deformadas de solos para determinar o conteúdo de água nos potenciais de -500 kPa e -1500 kPa, utilizando o psicrômetro WP4-T e o extrator de placas porosas. Os valores determinados no WP4-T apresentaram conteúdo de água inferior em relação aos que foram determinados com o extrator de placas porosas, quando submetidos ao potencial de -500 kPa. Para o potencial de -1500 kPa, o conteúdo de água determinado pelo WP4-T foi superior. Bittelli e Flury (2009) também verificaram diferenças entre a câmara de Richards e o WP4-T na determinação do conteúdo de água nos potenciais inferiores a -10 kPa.

O uso de FPT's pode ser uma alternativa viável para superar essas limitações, utilizando equações que relacionam a característica de retenção de água com outras características do solo (PACHEPSKY, RAWLS 1999). Utilizando a equação proposta por van Genuchten (1980), é possível desenvolver FTP's para obter as curvas de retenção de água no solo (van de BERG et al., 1997; TOMASELLA, HODNETT, 1998; MELLO et al., 2005)

2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS

A textura e a estrutura dos solos são propriedades que influenciam na capacidade do solo de reter e conduzir a água. No entanto, o preparo do solo é uma atividade capaz de modificar o comportamento físico, atuando diretamente na estrutura do solo (VIEIRA et al., 2007) e, conseqüentemente, modifica suas propriedades hídricas. O solo possui partículas com diferentes tamanhos e a proporção relativa dessas em determinada massa de solo é definida como textura do solo. Essa propriedade física do solo é pouco ou nada alterada ao longo do tempo, pois está ligada aos fatores de formação do solo, principalmente, ao material de origem e interfere na compactação do solo (SUZUKI et al., 2008) e no teor de água disponível às plantas (REICHERT et al., 2009).

A topografia e a declividade do solo também se relacionam com a distribuição das frações granulométricas (LEÃO et al., 2011). A paisagem possui “geofomas” variadas e conforme o relevo se apresenta, interfere no movimento da água, podendo auxiliar na formação de erosões e depressões (CAMPOS et al. 2007). A textura do solo apresenta impacto na curva de retenção de água, especialmente quanto ao teor de argila do solo, isto porque, a quantidade de argila define boa parte da distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim, a área de contato entre as partículas sólidas e a água (REICHARDT, 1987; BEUTLER et. al, 2002; KLEIN, 2010; GRIGOLON, 2013). Os poros de pequeno diâmetro fazem com que grande quantidade de água permaneça retida no solo em tensões elevadas, o que, em muitos casos, a torna não extraível pelas plantas, especialmente nos solos mais argilosos (GIAROLA et al., 2002). Em solos arenosos, os poros normalmente apresentam maior diâmetro, sendo rapidamente esvaziados a baixas tensões pela ação do potencial gravitacional atuando no solo (HILLEL, 1982; URACH, 2007).

Petry (2000) observou que solos muito argilosos apresentam maior quantidade de água total armazenada do que solos de textura franco-arenosa, porém, os solos com textura franco arenosa apresentam maior disponibilidade de água às plantas. A diferença textural afeta os valores de PMP e CC; solos de textura arenosa apresentam menor capacidade de retenção de água, o que remete a valores inferiores, comparados aos solos argilosos (MOLINE et al., 2013).

A estrutura do solo é uma importante propriedade física para explicar a dinâmica da água no solo, sendo definida como arranjo das partículas do solo e do

espaço poroso entre si, incluindo o tamanho e a forma dos agregados ou torrões formados pelas partículas primárias (MARSHAL, 1962; LEPSCH, 2002). Não existe solo sem uma estrutura, mesmo não havendo a formação de agregados. Segundo Lipiec e Ratano (2003), a estrutura do solo influencia na movimentação de água, aeração, densidade e porosidade do solo. Para Michelin (2010), um solo sem estrutura apresenta uma disponibilidade inadequada de água e oxigênio às plantas.

A avaliação da estrutura do solo pode ser realizada em condições de campo ou em laboratórios. Solos bem estruturados oferecem melhores condições para o desenvolvimento das plantas (RICHARD et al., 2005), sendo importante a busca de índices que possam servir como referência para qualificar a estrutura do solo. A qualidade da estrutura do solo pode ser avaliada pela quantidade e tamanhos dos poros, pela estabilidade de agregados (ARGENTON et al. 2005), Ds e índice S (DEXTER, 2004). O índice S é baseado no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo. O autor propôs que o ponto de inflexão dado pela 2ª derivada da curva de retenção de água no solo contém o valor de umidade ótima para o preparo do solo.

Um importante atributo a ser considerado na avaliação da qualidade estrutural dos solos é a porosidade do solo (MARTINS et al., 2002), em que a quantidade, o diâmetro e a continuidade dos poros afetam a infiltração de água no solo (LANZANOVA et al., 2007). Nos macroporos ocorre o movimento livre do ar e da água do solo, enquanto que, nos microporos, o movimento do ar é dificultado, ocorrendo somente o movimento da água por capilaridade. Em consequência, solos arenosos apresentam predominantemente maior quantidade de macroporos, ocasionando o movimento da água e do ar mais rápido comparado aos solos argilosos, no quais, devido à presença predominante de microporos, o movimento desses elementos ocorre de forma mais lenta (MICHELON, 2010). Solos arenosos usualmente não formam agregados estáveis como os argilosos, a estrutura é instável e o solo pode apresentar compactação ou estar com baixa permeabilidade (BAVER et al., 1972; ARGENTON et al., 2005). Nos solos argilosos a agregação resulta na formação da porosidade entre os agregados, que ocasiona o aumento no volume do espaço poroso (BRADY, WEIL, 2008). A agregação do solo coordena os movimentos de água, ar e calor do solo, além de interferir no desenvolvimento das raízes. Sistemas de manejo que incrementam a matéria orgânica no solo normalmente auxiliam na estabilidade de agregados (BALESDENT et al., 2000).

Alguns valores críticos de macroporosidade foram propostos na literatura. Para Tormena et al. (2002), valores abaixo de $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ de macroporosidade são críticos para o desenvolvimento da planta. Michelin (2007) atribuiu valores críticos de macroporosidade em função do teor de argila do solo, ou seja, aumentos no teor de argila do solo podem levar a redução dos valores críticos de macroporosidade.

Outra característica importante é a Ds. Hamza e Anderson (2005) e Klein (2006) afirmam que esse atributo é afetado pelo manejo do solo, o qual altera os espaços porosos, influenciando nas características físico-hídricas dos solos. Chinn e Pillai (2008) comentam que a compactação do solo é dependente do conteúdo de água, podendo causar mudanças significantes na estrutura, em termos de redução da porosidade total e da continuidade dos poros, distribuição do seu diâmetro e estabilidade deles. Klein e Libardi (2002) e Lima et al. (2014) afirmam que, em sistemas irrigados, o manejo inadequado da água pode acarretar em solos compactados e conseqüente diminuição da disponibilidade de ar às plantas.

De acordo com Reichert et al. (2009), o aumento da Ds não necessariamente é prejudicial à cultura, pois contribui com a quantidade de água armazenada, no entanto, quando atinge limites críticos, pode ocasionar perdas na produtividade das culturas. A Ds de solos minerais usualmente varia de $0,9$ a $1,8 \text{ g cm}^{-3}$, dependendo da textura e do teor de matéria orgânica, assim, a Ds pode ser usada como medida direta do estado de compactação do solo e alguns limites críticos de Ds têm sido propostos na literatura (JONES et al., 1983, REINERT et al., 2008; KLEIN, 2008). Argenton et al (2005) observaram que, em um Latossolo Vermelho argiloso, a deficiência de aeração inicia quando a Ds se aproxima de $1,30 \text{ g cm}^{-3}$. Reichert et al. (2003) indicaram densidades críticas de solo de acordo com a classes texturais: $1,30$ a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos, $1,40$ a $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ para os franco-argilosos e de $1,70$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ para os franco-arenosos.

Para eliminar o efeito da textura e matéria orgânica na Ds, Klein (2006) descreve sobre uso da densidade relativa como indicador de qualidade física de solos, visando estabelecer um valor limitante de compactação à produtividade da cultura. Para utilizar a densidade relativa é necessário determinar uma referência de densidade do solo, obtida a partir de um ensaio de Proctor normal (560 kPa), e o indicador consiste na relação entre a Ds no campo com a densidade de referência (Ds_{ref}). A densidade relativa é comumente utilizada por vários pesquisadores (BEUTLER et al., 2005; NHANTUMBO CAMBULE, 2006; MARCOLIN et al., 2011;

CUSTÓDIO et al., 2015). Torres e Saraiva (1999), em um Latossolo Roxo cultivado com soja, encontraram que a densidade relativa acima de 0,84 ocasionou decréscimo da produtividade. Silva et al. (2008) observaram que, em um Latossolo Vermelho, com valores de densidade relativa a partir de 0,79 e 0,81 há decréscimo na produtividade de soja e milho.

Dessa maneira, a D_s é um atributo de fundamental importância, pelo fato de auxiliar a compreensão da compactação do solo, construção de indicador de qualidade física do solo e para o manejo do solo, particularmente em sistemas irrigados, transformando conteúdo de água no solo em lâmina de irrigação (MICHELON, 2010).

2.5 FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA (FPT'S)

Bouma (1989) descreveu o significado de FPT como “transformando dados que possuímos em dados que necessitamos”, ou seja, descreve funções (modelos matemáticos) que relacionavam atributos do solo fáceis de mensurar, como textura e matéria orgânica, com características hidráulicas do solo, sendo essas mais difíceis de mensurar (SANTOS, 2012; BOUMA, van LANEN, 1987). Essencialmente, são funções preditivas que convertem dados medidos em dados que precisamos (WÖRSTEN et al., 2001).

Para que as FPT's possibilitem ter uma acurácia em sua estimação, é fundamental um banco de dados consistente e representativo do local. Existem vários métodos para definir os modelos, a exemplo de árvores de regressão, redes neurais, sistema de lógica difusa, regressão linear múltipla, entre outros (JANA et al., 2007; CHAGAS et al., 2007; SOARES et al., 2014).

As propriedades hidráulicas do solo enquadram-se nos atributos de difícil obtenção, pois requerem, além de um elevado custo, mão de obra especializada e uma demanda de tempo (MICHELON et al., 2010; PERAZA, 2003; GHANBARIAN-ALAVIJEH, MILLÁN, 2010). Logo, as FPT's são usualmente utilizadas por pesquisadores para estimar o conteúdo de água no solo a partir de propriedades físicas do solo. A precisão das FPT's depende da quantidade e homogeneidade dos dados utilizados. Segundo Oliveira et al. (2002), a homogeneidade dos dados varia devido as diferenças entre os métodos analíticos utilizados.

Vários autores consideram a textura do solo como a característica mais importante na obtenção de modelos matemáticos que estimam o conteúdo de água no solo (BRISTOW et al., 1999; ASSAD et al., 2001; BRUAND, 2003). Mas, para Ungaro (2005), Saxton e Rawls (2006) e Majou et al. (2008), existem outros parâmetros que merecem atenção, tais como, tamanho de partículas, quantidade de matéria orgânica, porosidade e D_s . O comportamento dessas variáveis apresenta correlações com o teor atual de água que o solo (GIAROLA et al., 2002; SAXTON e RAWLS, 2006; MEDEIROS et al., 2004). Teores de argila, silte e matéria orgânica apresentam uma correlação positiva com o teor de água na capacidade de campo, enquanto que a D_s manifesta uma correlação negativa (REICHERT et al., 2010). A magnitude das relações das características do solo com a faixa úmida do solo tem sido utilizada para interpretar melhor as inter-relações existentes no solo e para manipular as FPT's (SAXTON, RAWLS, 2006).

A fase coloidal da matéria orgânica possui propriedades na retenção de água (BAYER et al., 1999), promovendo a granulação das partículas minerais, diminuindo a D_s . Essa influência direta na agregação de partículas do solo e indireta com a D_s , porosidade, aeração e infiltração de água são implicações importantes no solo, sendo utilizadas em algumas FPT's (RIVERS e SHIPP, 1978; GUPTA e LARSON, 1979; RAWLS et al., 1982; AHUJA et al., 1985; SAXTON et al., 1986; MACEDO, 1991).

A utilização de FPT's para solos com características homogêneas e próximos aos locais de origem do banco de dados têm sido descritos por Arruda et al. (1987), Vereecken et al. (1989), Wösten et al. (1995), Salchow et al. (1996), Pachepsky e Rawls (1999), Wagner et al. (2001), Wösten e Van Genuchten (2001). Devido a geologia, clima e técnicas de medição empregadas, o desempenho das FPT's em locais distintos de sua origem, apresenta baixa capacidade preditiva (SANTOS et al., 2004, REICHERT et al., 2009). O número de amostras para a geração e para validação de uma FPT é destacado em alguns trabalhos (OLIVEIRA et al., 2002; TOMASSELLA et al., 2003; REICHERDT et al., 2009; MICHELON et al., 2010), porém, sem indicar um número específico. Neter et al. (1996) propuseram que, para comparar a teoria e encontrar uma evidencia empírica com base nos resultados de uma simulação, é necessário subdividir os dados em dois grupos para o desenvolvimento e para a validação, utilizando 60% e 40% dos dados, respectivamente.

2.6 MODELO STEPWISE E CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO.

Do ponto de vista estatístico, a escolha de um modelo apropriado é fundamental para a análise correta dos dados disponíveis (BOZDANGAN, 1987). Segundo Mazerolle (2004), a definição do melhor modelo é discutível, uma vez que, o modelo deve estar em equilíbrio entre a qualidade de ajuste e pelo número de parâmetros presentes. Logo, é indispensável buscar um modelo que contenha o mínimo de parâmetros possíveis a serem estimados e, simultaneamente, que explique bem a dinâmica da variável resposta. No conjunto de variáveis independentes como a textura do solo, matéria orgânica, D_s , densidade de partículas, entre outras, existe a possibilidade de algumas variáveis influenciarem minimamente o conjunto de uma variável dependente, tal como o conteúdo de água no solo em uma tensão específica.

O procedimento *stepwise* é uma combinação de dois procedimentos: o avançado (*forward*) e seu contrário, o movimento pra trás (*backward*), que é uma aplicação conjunta dos critérios de inclusão e exclusão de variáveis. Segundo Diniz (2008), esse processo inicia do mesmo modo que o *forward*, no qual a variável independente de maior correlação com a variável resposta é selecionada, porém, em cada inclusão de uma nova variável, verifica-se, na presença das outras variáveis do modelo, alguma que não esteja agregando contribuição significativa à resposta. Dentre as que não estão contribuindo significativamente, as de menor contribuição são eliminadas. Por outro lado, uma variável que já foi eliminada poderá retornar posteriormente ao modelo.

Em função disso, é necessário estabelecer um critério de seleção dessas variáveis. De acordo com Alves et al. (2013), um dos critérios de seleção mais utilizados é o teste F. Porém, existem outras possibilidades como a correlação linear múltipla, erro quadrático total, critério de informação de Akaike Hoking (1976), dentre outras. O critério de informação de Akaike (AIC) é baseado no máximo da função de verossimilhança como medida do ajustamento e busca escolher, dentro de um grupo de modelos, o que apresentar menor divergência ou distância de Kullback-Lebler (1951)(K-L) como base para a seleção de modelos.

Bolfarine e Sandoval (2000) definiram a função de verossimilhança como: "Sejam X_1, \dots, X_n amostras aleatórias de tamanho "n" da variável aleatória X com função de densidade (ou de probabilidade) $f(x|\varphi)$, com $\varphi \in \Phi$, em que Φ é o

espaço paramétrico [...]”. A função de verossimilhança de φ correspondente à amostra aleatória observada, calculada como o produto das funções de densidade, é dada por:

$$L(\theta; x) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \varphi) \quad (1)$$

Para estimar o máximo da função de verossimilhança, que é o método para se obter um estimador para o parâmetro φ , é necessário maximizar a função. Diante disso, deve-se calcular a primeira derivada de $L(\varphi; x)$ em função do parâmetro θ , igualando-a a zero. Assim serão obtidos os pontos críticos; se existir aquele ponto que maximiza a função é denominado estimador de máxima verossimilhança de φ . Isto é:

$$\frac{\delta L(\varphi; x)}{\delta \varphi} = 0 \quad (2)$$

Para o caso em que se tem mais de um parâmetro, as derivadas tomadas são as parciais com relação a cada um dos parâmetros envolvidos. Segundo Konishi e Kitagawa (2008), os estimadores de máxima verossimilhança são assintoticamente eficientes, pois, a função de verossimilhança é mais sensível aos pequenos desvios dos parâmetros do modelo de seus valores verdadeiros.

A distância de K-L é definida por:

$$I(g; f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) \log[g(x)] dx - \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) \log[f(x)] dx \quad (3)$$

Onde:

g = distribuição da qual são gerados os dados

f = distribuição utilizada para aproximar g

A divergência de K-L é uma medida de distância entre o modelo verdadeiro e o modelo candidato. Nesse exemplo $f(x)$, em comparação ao modelo verdadeiro, $g(x)$ de um conjunto $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ com “n” observações independentes, conforme o

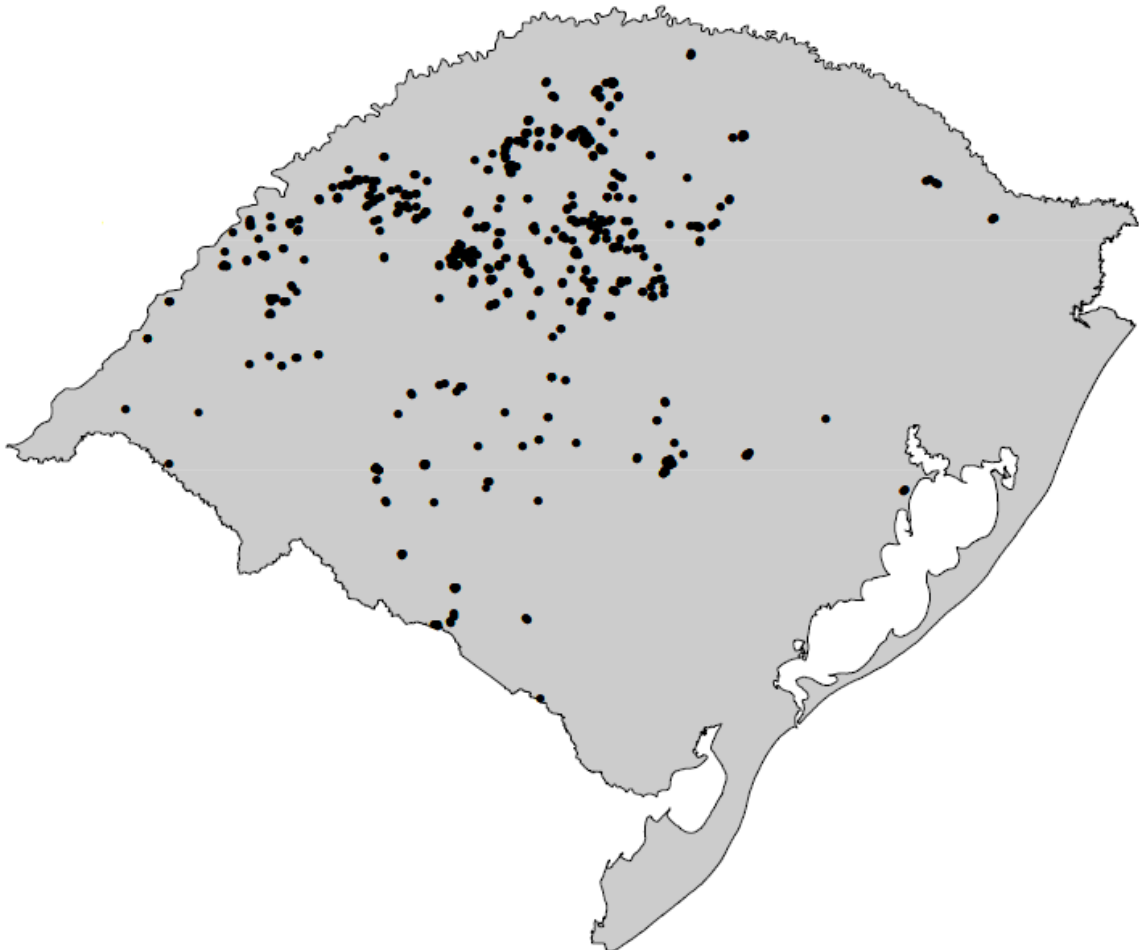
modelo verdadeiro é intangível, ocorre uma medida de distância entre um bom modelo e vários modelos candidatos, para evidenciar um modelo que se destaque. Assim, Akaike (1973) desenvolveu uma estimativa utilizando o ponto máximo à função de Log-verossimilhança obtida através dos dados, associada com a informação de K-L, acrescida com uma penalidade associada ao número de parâmetros. Burnham e Anderson (2004) recomendam usar o AIC quando o número de observações for maior do que pelo menos 40 vezes o número de parâmetros

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAIS DE COLETA E COMPOSIÇÃO DO BANCO DE DADOS

O trabalho foi realizado utilizando-se o banco de dados de análises físicas de áreas irrigadas do Sistema Irriga®, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria. O banco de dados possui informações das propriedades físicas do solo de áreas irrigadas do Estado do Rio Grande do Sul (RS) (Figura 1).

Figura 1 - Locais onde foram realizadas as coletas de solo para compor o banco de dados do Sistema Irriga® no Rio Grande do Sul.



Cada área amostrada para a caracterização física foi georreferenciada com a determinação da latitude e longitude, além da altitude do local. Nas áreas irrigadas que eram uniformes em relação à textura do solo foram realizadas amostragens a

cada 40 ha. Nas áreas desuniformes em relação à textura do solo, realizou-se uma amostragem em cada local da área irrigada que apresentava diferença de textura.

O banco de dados está composto pelas seguintes frações granulométricas do solo: argila (Arg), silte (Si), areia grossa (AGr) e areia fina (AF). Adicionalmente, o banco é composto pela densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (Pt), além das informações do conteúdo de água nos potenciais de 0, -1, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa de amostras do solo de áreas irrigadas do Estado do RS. O banco de dados é formado por 3.288 amostras de solo. Destas, 1.644 são da camada superficial (0-20 cm de profundidade), 822 da camada intermediária (20-40 cm de profundidade) e 822 da camada inferior (40-60 cm de profundidade) dos perfis do solo, cujas amostragens foram feitas entre julho de 2009 até junho de 2015.

3.2 COLETA E PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS PARA A CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

As amostras de solo da camada superficial do perfil foram na maioria das vezes coletadas nas profundidades de 10, 30 e 50 cm, representando as camadas de 0 a 20 cm; 20 a 40 cm e 40 a 60 cm, respectivamente. A coleta de amostras com estrutura preservada foi realizada com o auxílio de extrator, no qual era acoplado um cilindro de metal de aproximadamente 5,5 cm de diâmetro e 3 cm de altura, resultando no volume médio de 73 cm³.

Para a determinação da densidade das partículas (Dp) e textura do solo, em cada camada do perfil, amostras de solo com aproximadamente 500 gramas de solo foram coletadas. As determinações analíticas de textura, Dp, Ds e porosidade foram efetuadas de acordo com os métodos descritos no manual de análise de solo EMBRAPA (EMBRAPA, 1997). Para a análise da textura do solo, utilizou-se o método do densímetro (VETTORI, 1996), a Dp foi obtida pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al. 2006) e a Ds, pelo método do anel volumétrico (ARCHER, SMITH, 1972).

As amostras de solo com estrutura preservada foram processadas no laboratório de análises físicas do Sistema Irriga®. Após saturação por 48 horas, as amostras foram pesadas e, posteriormente, seguiram para a mesa de areia, na qual foram submetidas a tensão de -1 kPa por 48 horas -6 kPa por mais 48 horas. Para

definir a porcentagem de microporosidade de cada amostra, foi utilizada a umidade referente a tensão de -6 kPa (OLIVEIRA, 1968). A porosidade total (P_T) foi calculada a partir da D_s e D_p , através da seguinte expressão: $P_T = (D_p - D_s) / D_p$. A Macro foi calculada pela diferença entre a P_T e a Micro.

Após a determinação da microporosidade em mesa de areia, as amostras indeformadas foram transferidas para o aparelho extrator de água idealizado por Richards (RICHARDS, 1949), aplicando-se tensões de -10 kPa, -33 kPa e -100 kPa, por um período mínimo de 96 horas para cada potencial. Após esse procedimento, as amostras foram submetidas a secagem em estufa a 105°C até atingirem massa constante.

O conteúdo de água dos solos dos potenciais de -500 e -1500 kPa foi determinado por psicrometria, com a utilização de um WP4 (DECAGON DEVICES, Inc.). A avaliação foi realizada com o processamento de cinco a sete amostras desestruturadas, previamente secas ao ar, borrifadas com água, pesadas e levadas ao WP4, onde se realizou a leitura do potencial em que a amostra se encontrava. Ao final desse processo, as amostras foram levadas à estufa para secagem até massa constante. A diferença entre as duas pesagens correspondeu ao conteúdo de água no potencial indicado pelo WP4. A determinação do potencial no WP4 e a umidade referente para cada sub-amostra determina o traçado da curva de retenção de água no solo do qual foi obtido o conteúdo de água nos potenciais -500 e -1500 kPa.

3.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

As amostras de solos presentes no banco de dados foram submetidas a análise de frequências absolutas, relativas e teores médios das frações texturais para cada camada de profundidade estabelecida na coleta de dados. A avaliação da qualidade estrutural dos solos foi feita utilizando a metodologia proposta por Michelin (2007). Os parâmetros da D_s , macro e conteúdo de argila do solo foram agrupados em faixas de textura, em função do teor de argila, assim descritas: 0-200, 200-300, 300-400, 400-500, 500-600, 600-700 e >700 g kg⁻¹ de argila. Em cada faixa de teor de argila se estabeleceu um valor crítico de D_s e macroporosidade. (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de densidade do solo e macroporosidade estabelecidos como críticos para a indicação de ocorrência de compactação dos solos em cada faixa de teor de argila dos solos.

Faixa de argila (g kg ⁻¹)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)	Macroporosidade (%)
0-200	1,60	10
200-300	1,55	10
300-400	1,50	8
400-500	1,45	8
500-600	1,40	6
600-700	1,35	6
>700	1,30	6

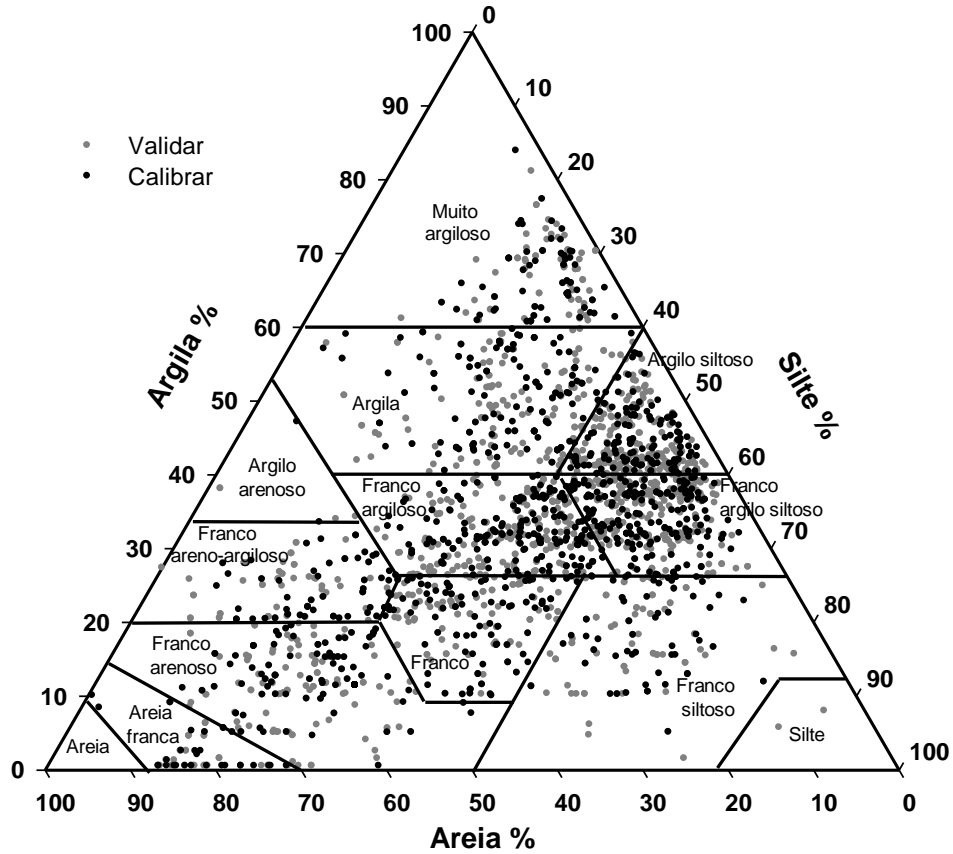
Adaptado de Michelin et al. (2009)

Para cada amostra de solo foi atribuído um valor e , através do valor obtido a unidade foi classificada em relação a indicação de compactação. Os níveis estabelecidos são: NC: solo não compactado, quando o solo não apresenta valores acima dos valores críticos estabelecidos de D_s e abaixo da macroporosidade para cada faixa de argila, C- D_s : compactada em função da D_s , quando a amostra do solo apresenta valor acima do valor crítico de D_s dentro da faixa de argila, C-M: compactada em função da macro, quando a amostra do solo apresenta um valor abaixo do valor crítico da macro dentro da faixa de argila e C- D_s -Macro: compactada em função da D_s e macro, quando a amostra do solo apresenta valor acima do valor crítico de D_s e abaixo da macro dentro da faixa de argila.

3.4 GERAÇÃO E OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

O banco de dados foi dividido aleatoriamente em dois conjuntos de dados: um conjunto foi utilizado para gerar as FPT's (60% do banco de dados de cada camada) e o outro foi utilizado para validar os modelos gerados (40% do banco de dados de cada camada) (Figura 2).

Figura 2 - Variabilidade textural de amostras de solo coletadas nas três camadas em perfis dos solos do Estado do Rio grande do Sul utilizadas para gerar e validar as FTP's. Santa Maria, RS, 2016.



Para detectar se existem diferenças entre os dois conjuntos, foi realizado o teste “t” de amostras independentes.

$$t = \frac{\hat{A}_1 + \hat{A}_2}{\left(\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_{a1}^2 + (n_2 - 1)S_{a2}^2}{n_1 + n_2 - 2}} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right)} \quad (4)$$

Onde: n_1 é o número de amostras do conjunto 1, n_2 é número de amostras do conjunto 2, \hat{A}_1 é a média do conjunto 1, \hat{A}_2 é a média do conjunto 2, S_{a1}^2 é a variância do conjunto 1 e, S_{a2}^2 é a variância do conjunto 2.

Os pressupostos estatísticos, para a análise de regressão foram realizados através da avaliação da homocedasticidade (variância constante dos erros) utilizando o teste de Bartlett; o diagnóstico da normalidade dos resíduos foi realizado aplicando o teste de Shapiro-Wilk (TABACHNICK, FIDELL 1996; ABBAD, TORRES 2000; FIGUEREDO et al., 2011). A análise de regressão múltipla foi feita por meio da técnica “stepwise”, visando obter os melhores modelos para as FPT’s. A regressão linear múltipla apresenta a seguinte equação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + e \quad (5)$$

Sendo: Y é a variável dependente, X_p é a p -ésima variável observada, β_p é o coeficiente associado a p -ésima variável, e é o erro que apresenta a distribuição normal.

O conteúdo de água em determinado potencial é a variável dependente e AF, AGr, Si, Arg, Ds, Dp, Macro, Micro e Pt são variáveis independentes. Deste modo, foram geradas FPT’s para estimar os valores de umidade nos potenciais de -1,-6, -33, -100 kPa da curva de retenção de água no solo, realizando-se uma análise de correlações das variáveis dependentes com os respectivos potenciais. Os dados foram submetidos a análise estatística utilizando o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM). Para a definição do melhor modelo utilizou-se o critério de informação de Akaike, que é dado por:

$$AIC = -2 \sum_{i=1}^n \ln L(\varphi_i; x_i) + 2(k) \quad (6)$$

Sendo: x_i o i -ésimo valor da resposta; φ_i a estimativa de x_i e, k é o número de parâmetros.

O segundo termo da equação adicionado à função de log-verossimilhança é chamado de função de penalidade. Essa função tenta corrigir o viés proveniente na comparação de modelos que possuem diferentes números de parâmetros. Considerando que os dados apresentaram uma distribuição normal, a expressão do AIC pode ser simplificada, chegando-se às seguintes equações:

$$AIC = n \ln(\hat{\mu}_i) + 2(k) \quad (7)$$

$$\hat{\mu}_i = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (8)$$

Sendo: $\hat{\mu}_i$ a média do estimador de máxima verossimilhança.

3.5 ANÁLISE DE ERROS

A análise de erros das FPT's geradas é a relação dos dados simulados com dados observados por meio de indicadores estatísticos. Os indicadores utilizados (equações 09 a 15) foram: o coeficiente de determinação (R^2), regressão linear forçada à origem (b_0), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e do erro absoluto (AAE), erro relativo médio (ARE), modelo de eficiência (EF) e a porcentagem do viés (PBIAS). O R^2 é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, em relação aos valores observados. Valores obtidos próximos de 1,0 indicam, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. O b_0 indica a relação entre os dados observados e simulados e se o valor ficar mais próximo de 1,0, maior será essa relação.

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 \right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2 \right]^{0,5}} \right\}^2 \quad (10)$$

Sendo: O_i os valores observados; P_i os valores simulados; O o valor médio observado e; P é o valor médio simulado.

Os erros de estimativa das modelagens foram determinados pela RMSE, indicador que expressa a acurácia da modelagem. Quando o valor de RMSE é igual a zero, indica que houve ajuste perfeito entre os dados estimados e observados. A vantagem desse estimador é que apresenta valores do erro nas mesmas dimensões

(unidades) da variável analisada. O AAE e o ARE fornecem informações sobre o tamanho médio dos erros, sendo o ARE estimado em porcentagem.

$$\text{RMSE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (11)$$

$$\text{AAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (12)$$

$$\text{ARE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (13)$$

O viés (PBIAS) mede a tendência para os valores dos dados simulados, podendo ser maior ou menor para seus valores correspondentes. O valor ideal de PBIAS é zero; valores próximos de zero indicam uma simulação do modelo exato. Valores positivos indicam subestimativa do viés e valores negativos indicam superestimativa do viés (GUPTA et al., 1999). Para o valor de PBIAS, van Liew et al. (2007) apresentaram a seguinte classificação: $|P_{\text{BIAS}}| < 10\%$, muito bom; $10\% < |P_{\text{BIAS}}| < 15\%$, bom; $15\% < |P_{\text{BIAS}}| < 25\%$, satisfatório e $|P_{\text{BIAS}}| > 25\%$ insatisfatório.

$$\text{PBIAS} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (14)$$

A eficiência de modelagem (EF) proposta por Nash e Sutcliffe (1970) foi utilizada para avaliar a qualidade da modelagem, sendo utilizada também para determinar a magnitude relativa da variância residual em comparação à variância dos dados medidos, definida pela razão entre o erro quadrado médio e a variância nos dados observados. Quando o valor de EF se aproxima de zero ou negativo, significa que a média dos valores observados é tão boa ou melhor que o que foi simulado.

$$\text{EF} = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (15)$$

3.6 ANÁLISE COMPARATIVA

Além das análises das FPT's para os potenciais de -1, -6, -33, -100 da curva de retenção de água no solo, verificou-se o desempenho de FPT's presentes na literatura. Utilizou-se equações de Lal (1979), Arruda et al. (1987), Dijkerman (1988), Oliveira et al. (2002), Tomasella e Hodnett (1998), Petersen et al. (1968), Bruand et al. (1994) e Canarache (1993), (Tabela 2), as quais foram desenvolvidas em locais distintos. Foram selecionadas funções que apresentam equações em dois potenciais da curva de retenção de água (-33 e -1500 kPa). Os valores do conteúdo de água estimados nos potenciais de -33 e -1500 kPa usando essas PTF's foram correlacionados com os dados medidos (observados). As FPT's da literatura foram comparadas aplicando-se os mesmos procedimentos de análise de erros anteriormente citados (equações 09 a 15).

Tabela 2 - Funções de pedotransferência presentes na literatura e utilizadas para estimar o conteúdo de água no solo nos potenciais matriciais de -33 kPa e de -1500 kPa ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em solos irrigados do Rio Grande do Sul.

Autores (ano)	Região	Ψ kPa	Equação de regressão	Nº
Lal (1979)	NIG	-33	$\theta = 0,065 - 0,004\text{Arg}$	119
		-1500	$\theta = 0,006 - 0,003\text{Arg}$	
Arruda et al. (1987)	BRA	-33	$\theta = 3,8 \times 10^{-4} \text{Ar} + 0,0015 \text{Si} + 0,0034 \text{Arg} + 0,0308 \text{Ds}$	-
		-1500	$\theta = -2,1 \times 10^{-4} \text{Ar} + 0,0020 \text{Si} + 0,00054 \text{Arg} + 0,0216 \text{Ds}$	
Dijkerman (1988)	SLE	-33	$\theta = 0,3697 - 0,0035 \text{Ar}$	166
		-1500	$\theta = 0,0074 - 0,0039 \text{Arg}$	
Oliveira et al. (2002)	BRA	-33	$\theta = 0,00333 \text{Si} + 0,00387 \text{Arg}$	467
		-1500	$\theta = 3,8 \times 10^{-4} + 0,0015 \text{Si} + 0,0034 \text{Arg} + 0,0308 \text{Ds}$	
Tomasella e Hodnett (1998)	BRA	-33	$\theta = 0,01 \cdot (0,426 \cdot \text{Si} + 0,404 \cdot \text{Arg} + 4,046)$	196
		-1500	$\theta = 0,01 \cdot (0,15 \cdot \text{Si} + 0,396 \cdot \text{Arg} + 0,91)$	
Petersen et al. (1968)	USA	-33	$\theta = 0,01 \cdot (11,83 + 0,96 \cdot \text{Arg} - 0,008 \cdot \text{Arg}^2)$	1267
		-1500	$\theta = 0,01 \cdot (1,74 + 0,76 \cdot \text{Arg} - 0,005 \cdot \text{Arg}^2)$	
Bruand et al. (1994)	FRA	-33	$\theta = (0,043 + 0,004 \cdot \text{Arg}) / (0,47 + 0,00411 \cdot \text{Arg})$	20
		-1500	$\theta = (0,008 + 0,00367 \cdot \text{Arg}) / (0,471 + 0,00411 \cdot \text{Arg})$	
Canarache (1993)	ROM	-33	$\theta = 0,01 \cdot \text{Ds} \cdot (2,65 + 1,105 \cdot \text{Arg} - 0,01896 \cdot \text{Arg}^2 + 0,0001678 \cdot \text{Arg}^3)$	113
		-1500	$\theta = 0,01 \cdot \text{Ds} \cdot (0,2805 \cdot \text{Arg} + 0,0009615 \cdot \text{Arg}^2)$	

Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); Arg: argila (%), Ar: areia (%); e Si: silte (%), θ : conteúdo de água no potencial específico, BRA: Brasil, NIG: Nigéria, SLE: Serra Leoa, USA: Estados Unidos da América, FRA: França, ROM: Romênia, Nº: Número de amostras usadas na determinação das FPT's.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS IRRIGADOS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Na tabela 3 são apresentados os resultados da frequência textural do total de solos do banco de dados utilizados para elaborar e validar as FPT's. Observa-se maior ocorrência de solos de textura franca na camada superficial, na faixa de argila entre 0 - 400 g kg⁻¹, correspondendo a 70,24% dos solos amostrados.

Tabela 3 - Frequência absoluta, frequência relativa e classe textural dos solos do banco de dados de áreas irrigadas do Rio Grande do Sul, separadas em classes de argila, nas camadas superficial, intermediária e inferior do perfil desses solos.

Faixas de Argila (g kg ⁻¹)	Frequência Absoluta	Frequência Relativa (%)	Frações Texturais (g kg ⁻¹)			Classe Textural
			Areia	Silte	Argila	
Camada Superficial						
0 - 200	316	19,24	542,95	342,88	114,17	Franco arenoso
200 - 300	400	24,00	348,76	404,42	246,82	Franco argilo arenoso
300 - 400	440	27,00	201,81	456,09	342,10	Franco argiloso
400 - 500	266	16,00	167,83	389,91	442,26	Argiloso
500 - 600	118	7,00	159,89	297,78	542,33	Argiloso
> 600	102	6,30	54,15	170,82	775,02	Muito argiloso
Total	1642					
Camada Intermediária						
0 - 200	163	19,78	602,24	299,46	98,31	Franco arenoso
200 - 300	147	17,93	349,58	392,27	258,16	Franco argilo arenoso
300 - 400	217	26,43	175,06	477,34	347,60	Franco argiloso
400 - 500	157	19,04	135,70	421,22	443,08	Argiloso
500 - 600	85	10,35	156,14	293,05	550,81	Argiloso
> 600	33	6,47	69,96	245,85	684,19	Muito Argiloso
Total	822					
Camada Inferior						
0 - 200	142	17,33	587,27	309,29	103,44	Franco arenoso
200 - 300	107	12,99	397,12	349,63	253,25	Franco argilo arenoso
300 - 400	242	29,38	184,60	466,17	349,23	Franco argiloso
400 - 500	170	20,72	124,25	433,61	442,14	Argiloso
500 - 600	96	11,68	149,88	309,47	540,65	Argiloso
> 600	65	7,91	66,20	230,95	702,86	Muito Argiloso
Total	822					

Nas camadas intermediária e inferior, a classe de textura do solo franco argilosa abrangeu 26,5% e 30% das amostras, respectivamente, apresentando valores médios de 175, 477e 348 g kg⁻¹ de areia, silte e argila. Nessa camada houve

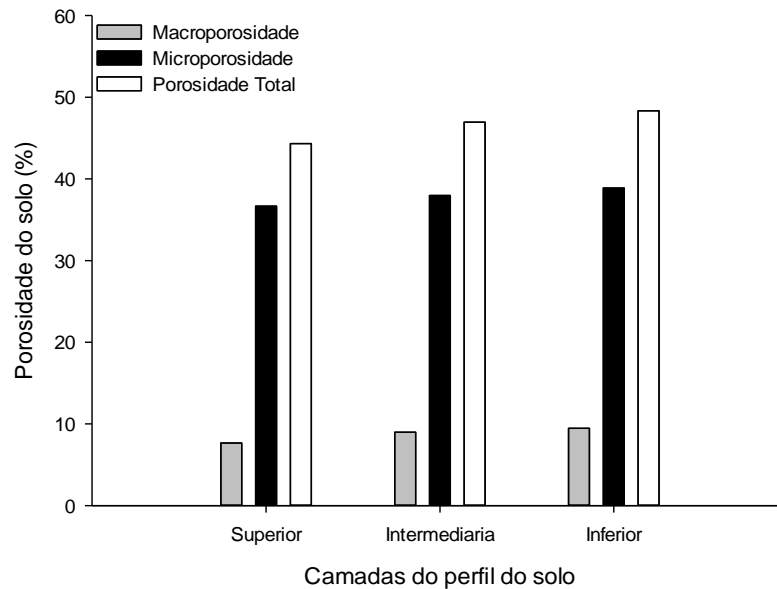
um incremento de 6,4% na classe de solos muito argilosos, em relação à camada superficial, isso é, solos que apresentam mais de 600 g kg^{-1} de argila. Verificou-se um aumento no conteúdo de argila em profundidade, passando de 29,3% na camada superficial para 40,31% para a camada inferior. De acordo com Michelin et al. 2007, os solos do Planalto médio do RS são predominantemente argilosos (mais de 400 g kg^{-1} de argila), enquanto os solos da região Central e Campanha são de textura mais grosseira, devido ao material de origem, que é composto de arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos (STRECK et al., 2008).

Na Figura 3 são apresentados os valores médios de macroporosidade, microporosidade e porosidade total observados em cada camada. Menores valores para essas variáveis foram observados na camada superficial, indicando o efeito do cultivo intensivo desses solos na distribuição e tamanho de poros. De acordo com Hossne et al. (2015), o espaço aéreo requerido pelo sistema radicular das plantas para assegurar as trocas gasosas no solo é da ordem de 10 a 20%, sendo que as raízes respondem positivamente a níveis de oxigênio superiores a 10%, ocorrendo drástica inibição no crescimento radicular com níveis de oxigênio inferiores a 5%. Entretanto, para uma específica porosidade de aeração, a permeabilidade ao transporte de gases está muito mais relacionada a estrutura do solo, ao tamanho e continuidade dos poros (LIPIEC e HATANO, 2003). Isso significa que, para um mesmo nível de compactação, a permeabilidade ao ar é maior em solos de textura grosseira que em solos de textura fina (LIPIEC, 2002). Estudos desenvolvidos por Carter (1990), Lipiec e Hatano (2003) e Hossne et al. (2015) demonstram que, para a manutenção da atividade aeróbica dos solos, o volume de macroporos deve ser mantido entre 8 a 14%, quando associado com uma D_s entre $1,44$ e $1,29 \text{ g cm}^{-3}$ (CARTER, 1988).

Os valores médios de macroporosidade encontrados neste trabalho foram de 7,77, 8,46 e 9,32% para as camadas superficial, intermediária e inferior, respectivamente, valores esses inferiores aos valores estabelecidos como críticos na literatura (CARTER, 1990; MICHELON et al., 2007). A alteração no tamanho de poros (diminuição da macroporosidade) ocasionada pela compactação incrementa a D_s e a resistência do solo ao crescimento e desenvolvimento radicular. Entretanto, como a D_s e a tensão de cisalhamento variam inversamente com o conteúdo de água no solo, o efeito do aumento da compactação em função da diminuição da macroporosidade é minimizado em áreas irrigadas, atribuindo-se o prejuízo ao

desenvolvimento radicular à ausência de adequada oxigenação (SCHUMACHER e SMUCKER, 1984).

Figura 3 - Resultados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo nas camadas superficial, intermediária e inferior de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul.



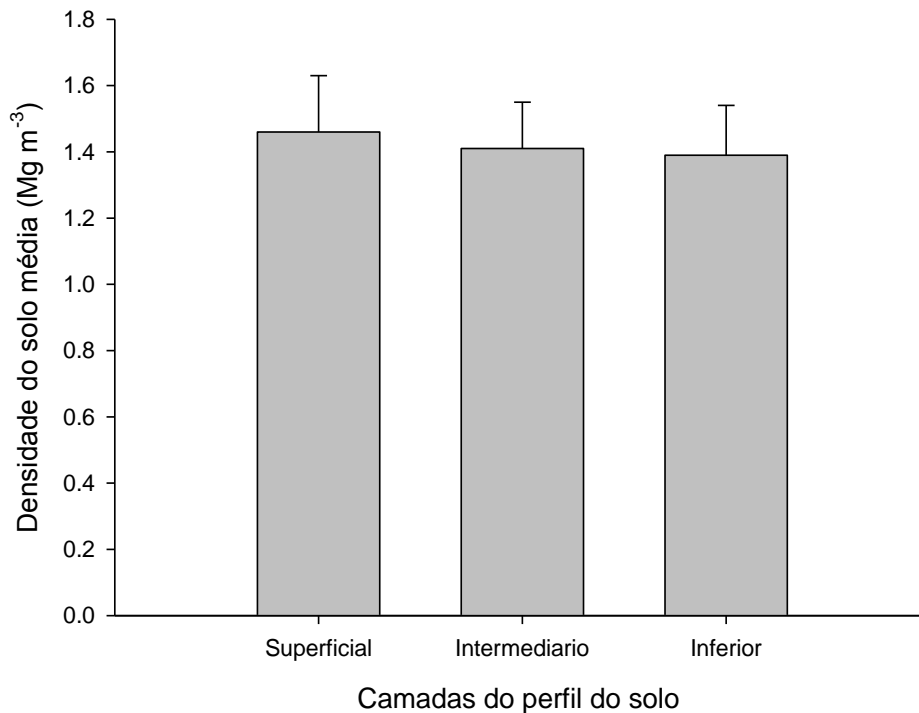
Na camada superficial, aproximadamente 44% dos solos estão na faixa de 0-300 g kg⁻¹(francos) e 43% dos solos estão na faixa de 300-500 g kg⁻¹ (franco argilosos e argilosos). Para essa faixa de argila, o valor crítico estabelecido nesse trabalho foi de 10% e 8%, respectivamente. Desta forma, é provável que solos coletados nesta camada superficial apresentem situação crítica em termos de macroporosidade. De acordo com Silva (2003) e Bergamim et al. (2010), um dos principais indicadores de compactação do solo é a redução do tamanho dos poros, além de apresentar aumento de densidade e resistência mecânica à penetração.

A porosidade total do solo é afetada pela textura e estrutura (OLIVEIRA et al., 1992, GRIGOLON, 2013). Em solos de textura média e argilosa, onde é comum a ocorrência de agregados porosos, com elevado teor de matéria orgânica, os espaços porosos por unidade de volume são elevados; já em solos de textura arenosa, a porosidade total é usualmente reduzida (CARVARLHO et al., 2011).

Na figura 4 são apresentados os valores de Ds média, máxima e mínima para cada camada. A camada superficial apresentou valores médios de Ds de

1,46 Mg m⁻³, valores estes ligeiramente superiores àqueles verificados na camada intermediária e inferior (1,41 e 1,39 g cm⁻³, respectivamente). A Ds é um atributo

Figura 4 - Resultados de densidade do solonas camadas superficial (0 a 20 cm), intermediária (20 a 40 cm) e inferior (40 a 60 cm) de amostras de solo coletadas em áreas irrigadas no Estado do Rio Grande do Sul.



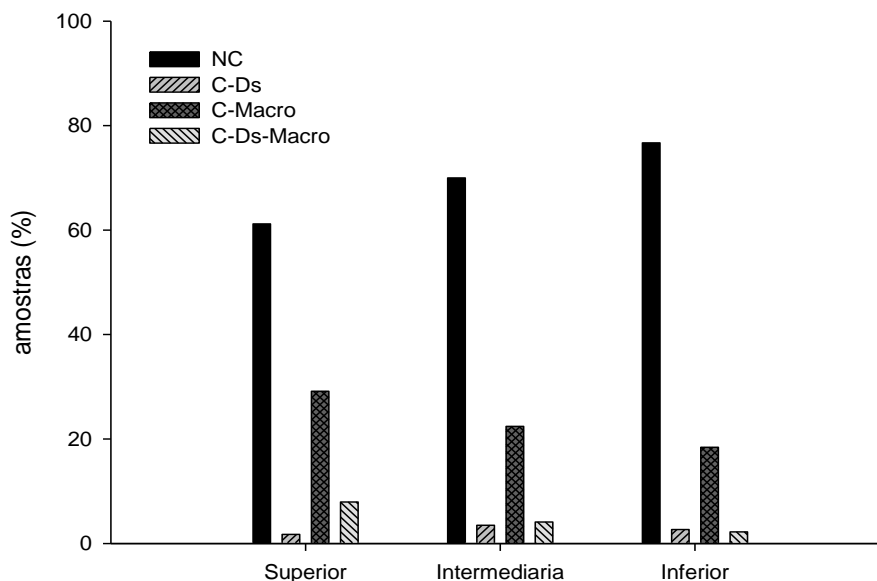
relacionado à textura e mineralogia, podendo ser significativamente afetado pelo manejo do solo. Entretanto, de acordo com Moraes et al. (2016), valores críticos de Ds normalmente são restritos à camada superficial do solo, seja em áreas sob plantio direto ou convencional. Valores críticos de Ds dependem das culturas, textura do solo, mineralogia, forma das partículas e matéria orgânica (Reichert et al. 2009), afetando a estrutura, conteúdo de água e resistência mecânica. Jones (1983) estabeleceu valores críticos da Ds ao crescimento radicular em função da textura do solo (teores de argila e silte), encontrando uma relação levemente negativa entre o teor de argila+silte e a Ds restritiva ao desenvolvimento radicular.

A Ds média observada na camada superficial foi maior que valor crítico (1,45 Mg m⁻³) estabelecido por Michelin et al. (2007), para solos com teores de argila superiores a 400 g kg⁻¹. Valores críticos Ds que restringem o crescimento radicular das plantas têm sido propostos em vários trabalhos (SILVA et al., 1994; REICHERT

et al., 2009). Equações de regressão que relacionam a Ds com teores de argila e ou argila+silte foram usadas por Jones (1983) e Reichert et al. (2009) e podem melhorar os limites críticos estabelecidos, desde que sejam relacionados com valores de Ds considerados como referência para cada teor de argila e, preferencialmente, relacionados com o conteúdo de água no solo. Silva et al. (1997), Limal et al. (2007), Silveira et al. (2008), Suzuki et al (2008) e Secco et al. (2009) verificaram que, solos cultivados em plantio direto, no decorrer dos anos, apresentaram um aumento nos valores de Ds na camada superficial.

O maior percentual de amostras com problemas de compactação foi observado na camada superficial (Figura 5), onde aproximadamente 40% das amostragens apresentaram-se compactadas em função da Ds, macroporosidade e Ds+Macro. Menores problemas de compactação foram observados nas camadas intermediária e inferior (29% das amostras apresentaram compactação em função da Ds, da Macro ou da Ds+Macro). O parâmetro físico do solo mais afetado, tanto na camada superficial, como nas camadas intermediária e inferior foi a macroporosidade, com valores de 29, 22 e 18%, respectivamente.

Figura 5 - Resultado da compactação das áreas amostradas do Estado do Rio Grande do Sul, nas camadas superficial, intermediária e inferior, em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade do solo. (C-Ds: compactado em função da densidade do solo; C-Macro: compactado em função da macroporosidade; C-Ds-Macro: compactado em função da densidade do solo e macroporosidade).



Como a P_T incrementou ligeiramente com o aumento da profundidade de coleta (Figura 3), e do pequeno efeito do aumento da D_s na elevação dos níveis de compactação, pode-se inferir que o adensamento do solo foi causado basicamente pela redução dos espaços vazios (elevação da microporosidade). Estudos indicam que ciclos repetidos de contração e expansão podem melhorar ou recuperar a estrutura do solo (CHINN; PILLAR, 2008), diminuindo os efeitos da compactação pelo uso continuado do plantio direto. Estudando a qualidade física de alguns solos irrigados no Brasil Central, Michelin et al. (2007) não verificaram aumento da D_s e macroporosidade nessas áreas, o que pode estar associado ao regime de chuvas, com uma estação seca no outono-inverno e estação chuvosa na primavera-verão. Bavoso et al. (2012) verificaram melhora na estrutura do solo em função de ciclos de umedecimento e secagem, com efeito mais significativo em solos com maiores teores de argila. Portanto, os problemas estruturais verificados em solos irrigados do RS, em função da diminuição da macropororidade e aumento na D_s , podem estar relacionados tanto ao fato dos solos estarem sempre com um elevado teor de umidade devido ao regime de chuvas e/ou irrigação, como ao sistema de monocultivo adotado nessas áreas, ou seja, a ausência de uma adequada rotação de culturas, afetando a estrutura desses solos.

Em trabalho pioneiro relacionando o efeito da textura à D_s , Jones (1983) encontrou que, para um mesmo potencial (-33 kPa), o valor crítico que restringe o desenvolvimento radicular pode ser estimado pelas seguintes equações: $Ds_{crítica} = 1,77 - 0,00063 \text{ argila}$ ($R^2=0,82$) e $Ds_{crítica} = 1,83 - 0,00043 (\text{argila}+\text{silte})$ ($R^2 = 0,76$). Embora sejam equações desenvolvidas para solos temperados e cultivados em sistema convencional, podem ser usados como referência em estudos para as condições do presente estudo.

Quanto menor o teor de argila, menor é a susceptibilidade do solo em atingir graus de compactação devido a teores de macroporosidade menores que 10%. Entretanto, embora os solos mais arenosos tenham mais macroporosos, há uma precária interconexão entre esses poros (HAKANSSON, 2005), não contribuindo muito para as trocas gasosas, necessitando, portanto, de um volume maior de poros para uma adequada aeração. Em solos argilosos, por outro lado, a continuidade dos poros é mais bem estabelecida, fazendo com que um volume menor que 10% de macroporos seja muitas vezes suficiente para assegurar as trocas gasosas no solo. Como em solos sob plantio direto a continuidade dos poros melhora gradativamente,

os limites críticos de macroporosidade podem ser menores que àqueles de solos revolvidos. Essa pode ser uma explicação para a não ocorrência demasiada de compactação em áreas de plantio direto (GUBIANI et al., 2015) e irrigadas, como observado nesse trabalho.

4.2 ESTIMATIVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Na tabela 4 são apresentadas as correlações entre o conteúdo de água retido nos potenciais utilizados para a obtenção das FPT's. Observa-se que o atributo Micro apresentou melhores correlações com a umidade dos solos em todos os potenciais, o que era esperado, devido a predominância de solos argilosos e siltosos no banco de dados. A Ds do solo apresentou uma correlação negativa com os potenciais, sendo que a correlação diminui com a redução dos potenciais, de -1 a -100 kPa. A relação negativa da Ds com o conteúdo de água provavelmente seja devido a solos arenosos terem menor retenção de água, porém, serem mais densos (REICHERT et al., 2009). Segundo ASSAD et al. (2001), em elevados potenciais matriciais, as forças capilares são mais atuantes e, nesses potenciais, a retenção de água é influenciada pela estrutura do solo, observando que a correlação da Ds com a retenção de água diminuiu com o aumento da tensão aplicada.

Tabela 4 – Correlação de Pearson (r) entre as variáveis preditoras e a umidade retida em diferentes potenciais das amostras utilizadas para gerar as funções de pedotransferência de solos irrigados do RS.

Potencial (kPa)	Ds	Dp	Macro	Micro	AGr	AF	Si	Arg	Si+Arg
-1	-0.69	0.36	-0.16	0.92	0.76	-0.48	0.14	0,57	0,57
-6	-0.61	0.42	-0.33	1.00	0.71	-0.57	0.19	0,65	0,65
-33	-0.55	0.44	-0.33	0.97	0.67	-0.60	0.22	0,69	0,66
-100	-0.54	0.42	-0.33	0.94	0.65	-0.60	0.22	0,68	0,68

Micro: microporosidade (%), Macro: macroporosidade (%), Ds: densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$), Dp: densidade de partícula, Arg: argila ($g\ kg^{-1}$), AF: areia fina ($g\ kg^{-1}$), AGr: areia grossa ($g\ kg^{-1}$) e Si: silte ($g\ kg^{-1}$) e Si+Arg ($g\ kg^{-1}$).

A retenção de água apresentou correlação positiva com o teor de argila dos solos, corroborando com as observações de Hillel (1998) e Reichert et al. (2009), que observaram maior retenção de água nesses solos, atribuindo isso a maior superfície específica das argila. Tanto a capilaridade como a adsorção determinam o

potencial matricial e são responsáveis pela retenção de água nos solos. A capilaridade ocorre na faixa úmida dos solos sendo, portanto, mais influenciada pela estrutura ou pelos constituintes que favorecem a estruturação dos solos, enquanto que a adsorção é mais influenciada pela textura. Assim, a modelagem da estimativa da retenção de água nos solos deve considerar, além da textura, os parâmetros estruturais do solo.

Na tabela 5, são apresentados os modelos desenvolvidos pelo método *stepwise* para estimar a retenção de água nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa e seus respectivos valores de AIC e do R².

Tabela 5 – Modelos para a estimativa da retenção de água nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa dos solos irrigados do Rio Grande do Sul, através da seleção “*stepwise*” com seus respectivos critérios de informação de Akaike (AIC) e do coeficiente de determinação (R²).

Modelos	R ²	AIC
$\theta_{-1\text{kPa}}$		
$\theta = \text{Micro}$	0,75	-17477,44
$\theta = \text{Micro} + \text{Ds}$	0,78	-18005,46
$\theta = \text{Micro} + \text{Ds} + \text{AGr}$	0,81	-18046,72
$\theta = \text{Micro} + \text{Ds} + \text{AGr} + \text{Macro}$	0,85	-18051,49
$\theta = \text{Micro} + \text{Ds} + \text{AGr} + \text{Macro} + \text{Si}$	0,88	-18053,01*
$\theta_{-6\text{kPa}}$		
$\theta = \text{Arg}$	0,82	-14602,63
$\theta = \text{Arg} + \text{Ds}$	0,89	-15221,49
$\theta = \text{Arg} + \text{Ds} + \text{Macro}$	0,95	-17775,14
$\theta = \text{Arg} + \text{Ds} + \text{Macro} + \text{Dp}$	0,97	-20008,75
$\theta = \text{Arg} + \text{Ds} + \text{Macro} + \text{Dp} + \text{AGr}$	0,99	-20062,63
$\theta = \text{Arg} + \text{Ds} + \text{Macro} + \text{Dp} + \text{AGr} + \text{Si}$	0,99	-20067,03*
$\theta_{-33\text{kPa}}$		
$\theta = \text{Micro}$	0,85	-19361,90
$\theta = \text{Micro} + \text{AF}$	0,87	-19511,37
$\theta = \text{Micro} + \text{AF} + \text{Ds}$	0,90	-19638,33
$\theta = \text{Micro} + \text{AF} + \text{Ds} + \text{AGr}$	0,91	-19711,42
$\theta = \text{Micro} + \text{AF} + \text{Ds} + \text{AGr} - \text{Si}$	0,94	-19749,63
$\theta = \text{Micro} + \text{AF} + \text{Ds} + \text{AGr} - \text{Si} + \text{Dp}$	0,95	-19753,12
$\theta = \text{Micro} + \text{AF} + \text{Ds} + \text{AGr} - \text{Si} + \text{Dp} + \text{Arg}$	0,95	-19753,23*
$\theta_{-100\text{kPa}}$		
$\theta = \text{Micro}$	0,82	-17886,46
$\theta = \text{Micro} + \text{Arg}$	0,87	-18058,26
$\theta = \text{Micro} + \text{Arg} + \text{Ds}$	0,91	-18141,63
$\theta = \text{Micro} + \text{Arg} + \text{Ds} + \text{Si}$	0,95	-18232,06*

Micro: microporosidade (%), Macro: macroporosidade (%), Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}), Dp: densidade de partícula, Arg: argila (g kg^{-1}), AF: areia fina (g kg^{-1}), AGr: areia grossa (g kg^{-1}) e Si: silte (g kg^{-1}). *Modelo escolhido.

Analisando-se as variáveis que compõem os modelos no potencial de -1 kPa (Tabela 5), a primeira variável a ser adicionada foi a micro, demonstrando que entre as demais variáveis, a micro possui a maior relação com o conteúdo de água nesse potencial específico, adquirindo um valor de AIC de -17477,44 e o modelo candidato utilizando essa única variável apresenta um R² de 0,75. Mesmo com a penalização, em função de adição de parâmetros, que é promovida quando se utiliza o AIC, outros atributos foram importantes, como a Ds, AGr, Macro e Si que, quando adicionados, contribuíram para redução dos valores de AIC e que, conseqüentemente, aumentaram também o valor de R². Rawls et al., (1982) e Puckett et al. (1985) demonstram a importância da Ds na predição do conteúdo de água no solo no potencial de -1Kpa, no qual a ausência dessa variável aumentou os valores de RMSE.

O modelo escolhido para estimar o conteúdo de água no solo para o potencial de -1 kPa foi o último (Tabela 5), no qual a presença das cinco variáveis reduziu o valor do AIC para -18053,01 e incrementou o R² para 0,88. A presença da micro e macro era esperada, visto que alguns autores destacam a importância desses atributos na retenção de água em potenciais mais elevados (HILLEL, 1998; AL MAJOU et al., 2008). Borgesen e Schaap (2005), analisando FPT's com diferentes números de parâmetros para estimar o conteúdo de água no potencial de -1; -10; -100, -1500 kPa observaram que, o aumento do número de variáveis nos modelos reduziu os valores de AIC, ao mesmo tempo que incrementou o valor de RMSE. A FPT para estimar a retenção de água no potencial de -1 kPa é expressa com os seguintes coeficientes:

$$\theta_{-1\text{ kPa}} = 0,2323 + \text{Micro} \times 8,334 \cdot 10^{-3} - \text{Ds} \times 8,05 \cdot 10^{-2} + \text{AGr} \times 2,947 \cdot 10^{-3} + \text{Macro} \times 4,817 \cdot 10^{-4} - \text{Si} \times 8,447 \cdot 10^{-5}$$

Para o desenvolvimento dos modelos no potencial -6 kPa (Tabela 5), excluiu-se o parâmetro microporosidade do solo, uma vez que, a microporosidade é calculada a partir do conteúdo volumétrico de água retido nesse potencial, gerando elevada correlação entre as variáveis. A primeira variável a entrar no modelo foi o teor de argila, para um valor de AIC de -14602,63 e do R² de 0,82. Mais cinco variáveis foram adicionadas no modelo final: Ds, Macro, Dp, AGr e Si, pois

reduziram o valor do AIC até -20067,03, elevando o valor de R² para 0,99. Dessa maneira, escolheu-se o modelo a seguir

$$\theta_{-6 \text{ kPa}} = 0,4495028 + \text{Arg} \times 3,048 \cdot 10^{-4} - \text{Ds} \times 0,3343557 - \text{Macro} \times 8,62664 \cdot 10^{-3} \\ + \text{Dp} \times 0,1757625 - \text{AGr} \times 1,598 \cdot 10^{-4} - \text{Si} \times 1,02 \cdot 10^{-5}$$

As FPT's geradas para estimar a retenção de água no potencial de -33 kPa e seus respectivos valores de AIC e R² incluíram tanto atributos estruturais como texturais do solo (tabela 5). Urach (2007) e Michelin et al. (2010), trabalhando com FPT's para solos do RS, também apresentam parâmetros texturais e estruturais nas equações obtidas. A microporosidade foi a primeira variável a compor a FPT demonstrando a elevada correlação desse atributo com a retenção de água no potencial de -33 kPa, corroborando o trabalho de Michelin et al. (2010). Como era esperado, a retenção de água nos potenciais mais elevados foi afetada por um grande número de fatores, incluindo a distribuição do tamanho de partículas, estrutura, Ds, entre outros, sendo mais difícil escolher um modelo simplificado, o que também foi observado por Tomasella et al. (2000) e Reichert et al. (2009). A maior correção desses atributos com a retenção de água nesse potencial se deve a grande variabilidade na mineralogia dos solos que compõem o banco de dados. Assim, a FPT gerada para estimar a retenção de água no potencial de -33 kPa pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\theta_{-33 \text{ kPa}} = 88,119309 + \text{Micro} \times 1,0181 \cdot 10^{-2} - \text{AF} \times 0,882640 + \text{Ds} \times 3,1472 \cdot 10^{-2} \\ + \text{AGr} \times 0,882573 - \text{Si} \times 0,882573 - \text{Dp} \times 1,005 \cdot 10^{-3} + \text{Arg} \times 1,01 \cdot 10^{-4}$$

Para a retenção de água no potencial de -100 kPa, a microporosidade foi o atributo que compôs o modelo, com apenas uma variável, indicando sua correspondência com a retenção de água nesse potencial. Além desse, os atributos Arg, Ds e Si foram inseridos nos modelos e reduzindo os valores de AIC e elevando o valor de R² (tabela 5). O último modelo proposto para gerar a FPT no potencial de -100 kPa obteve o valor de AIC de -18232,06 e R² de 0,95. Esse modelo possui quatro variáveis, motivo pelo qual foi o modelo escolhido para estimar a retenção de água para essa tensão. A equação pode ser expressa como:

$$\theta_{-100 \text{ kPa}} = -0,151999 + \text{Micro} \times 1,00406 \cdot 10^{-2} + \text{Arg} \times 7,414 \cdot 10^{-4} - \text{Ds} \\ \times 3,73415 \cdot 10^{-2} + \text{Si} \times 3,640 \cdot 10^{-4}$$

Na figura 6 está apresentada a relação entre os dados observados e os dados estimados pelas FPT's do conteúdo de água do solo nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa. Os indicadores estatísticos para os referidos modelos são apresentados na tabela 6. Verifica-se que o coeficiente linear de regressão (b_0) ficou próximo a 1,0 demonstrando uma relação adequada entre os dados simulados e observados. Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,88 nos quatro potenciais utilizados para estimar a retenção de água (em nível de 5% de probabilidade de erro), indicando que a maior parte das variações pode ser explicada pelos modelos propostos (MADAMBA et al., 1996; RESENDE et al., 2010). A capacidade preditiva da FTP gerada aumenta com o incremento do R^2 .

Figura 6 - Comparação entre os valores estimados pelas funções de pedotransferência e o conteúdo de água no solo nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa, em alguns solos irrigados do Rio Grande do Sul. A linha reta a partir da origem representa a linha 1:1.

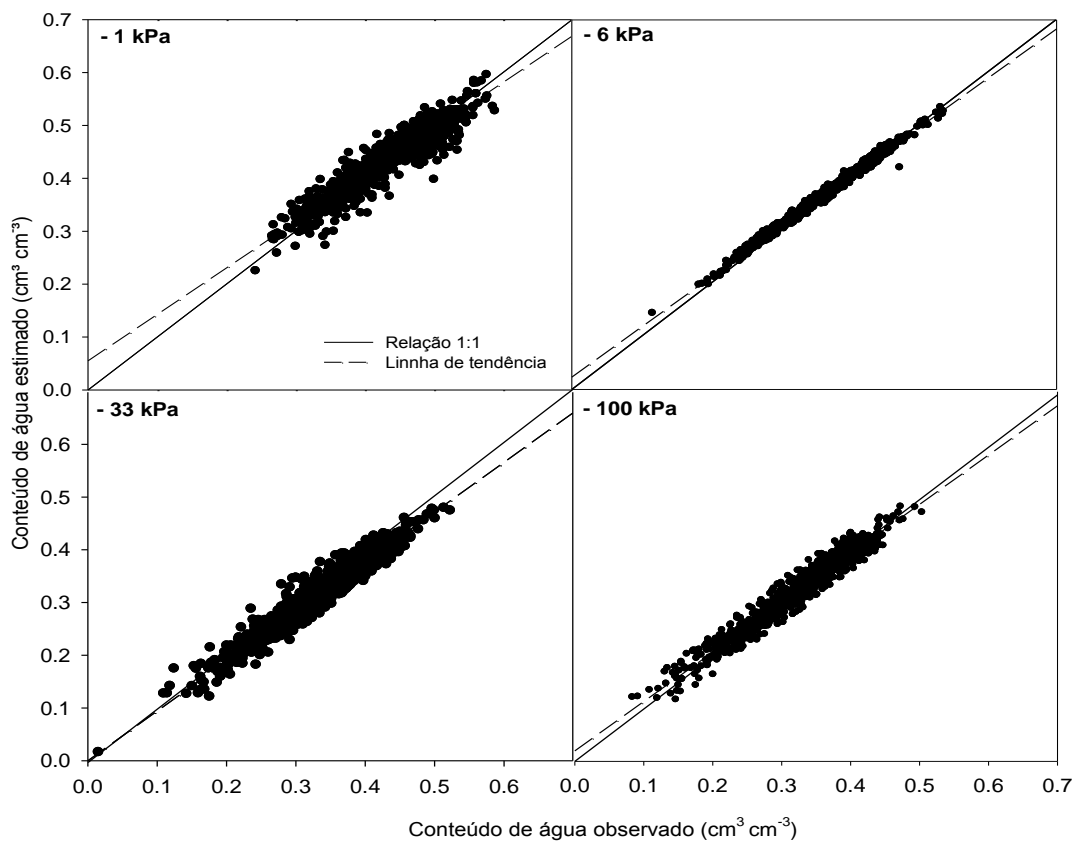


Tabela 6 - Indicadores estatísticos obtidos na estimativa da retenção de água nos potenciais de -1, -6, -33 e -100 kPa, a partir da funções de pedotransferência geradas, para alguns solos irrigados do Rio Grande do Sul.

Tensões	Indicadores*						
	b_0	R^2	RMSE $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	AAE $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	ARE	PBIAS %	EF
$\theta_{(1 \text{ kPa})}$	0,99	0,88	0,02	0,02	3,99	-0,20	0,88
$\theta_{(6 \text{ kPa})}$	1,00	0,99	0,01	0,01	1,42	-0,33	0,99
$\theta_{(33 \text{ kPa})}$	0,94	0,94	0,03	0,02	6,82	5,6	0,87
$\theta_{(100 \text{ kPa})}$	0,99	0,95	0,02	0,01	4,46	0,59	0,95

* b_0 : Coeficiente linear de regressão; R^2 : Coeficiente de determinação; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; AAE: Erro médio absoluto; ARE: Erro relativo médio; EF: Eficiência de modelagem; PBIAS: Percentagem de viés;

O RMSE do conteúdo de água no solo variou de 0.01 a 0.03 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, indicando um bom desempenho das FPT's em estimar a retenção de água para cada um dos potenciais (Tabela 6). Para Junior et al. (2003), a utilização do RMSE apresenta vantagens em relação ao R^2 , contudo, não estabelece quais as fontes ou tipos de erros (sistemático e não sistemático). Como os erros das estimativas foram equivalentemente baixos, a variação residual tendeu a zero, indicando excelente capacidade preditiva do modelo (MORIASE et al., 2007). O AAE variou entre 0,01 e 0,02 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, podendo ser considerado pequeno, devido a unidade de medida; desta forma, o indicador do erro relativo médio (ARE) é mais apropriado para analisar o erro das estimativas

Outra alternativa para compreender melhor a magnitude dos erros das FPT's consiste em transformar o desvio padrão da estimativa dada pelo RMSE, que está expressa na unidade de $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, em um desvio padrão da estimativa, em lâmina de água armazenada no perfil do solo. Assim, multiplica-se o valor de RMSE pela espessura do perfil, obtendo-se um RMSE da lâmina armazenada, de 20; 10; 30 e 20 mm m^{-1} , para as FPT's nas tensões de 1; 6; 33; 100 kPa, respectivamente.

Em FPT's desenvolvidas por Borgesen e Schaap (2005) para estimar os conteúdos de água de nos potenciais de -1kPa a -100 kPa, os valores de RMSE variaram de 0,037 a 0,051 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Os autores observaram que os valores menores do erro foram referentes às FPT's que contém em suas equações as variáveis densidade do solo, conteúdo de matéria orgânica e distribuição do tamanho das partículas. Al Majou et al. (2007) observaram que atributos estruturais do solo como

a D_s , quando incorporada nas FPT's, reduziram os valores de RMSE comparadas às FPT's texturais, porém, os autores ressaltam que as FPT's mais simples possuem uma boa precisão e não devem ser descartadas para estimar o conteúdo de água no solo.

A menor eficiência de modelagem foi de 0,87, verificada na FPT para estimar o conteúdo de água no potencial de -33 kPa, indicando que a magnitude da variância residual é comparável com os dados medidos em todos os potenciais avaliados. Conforme Silva et al. (2008), quando o valor de EF resultar maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto que, valores de inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável.

O PBIAS é o indicador que descreve a tendência nos valores do modelo matemático em sub ou superestimar os dados estimados. Os valores de PBIAS encontrados nos potenciais -1 e -6 kPa são de -0,2 e -0,33, indicando uma pequena superestimativa nos dados simulados em relação aos dados observados. A FPT para estimar o conteúdo de água no potencial de -33 kPa apresentou o maior viés entre as FPT's. O menor ajuste dos dados estimados pelas FPT's em relação aos dados medidos em laboratório para o potencial de -33 kPa, para todos os parâmetros estatísticos utilizados (tabela 6), pode ter sido causado pela larga variabilidade textural, assim como, dos parâmetros estruturais do solo que compõem o banco de dados. A microporosidade e o teor de argila foram os atributos do solo de maior relação com a retenção de água nesse potencial, enquanto que a D_s teve relação negativa (tabela 4). A elevada correlação negativa da D_s (-0,55) com a retenção de água na capacidade de campo indica uma frequência maior de solos cuja densidade é superior a densidade considerada referência para uma mesma classe de solo (faixa de argila), indicando a contribuição do manejo do solo na degradação da qualidade desses solos.

Assim, as FPT's propostas para esse trabalho podem ser utilizadas para estimar o conteúdo de água nos solos para seus respectivos potenciais, desde que sejam aplicadas a solos com características semelhantes aos solos do qual foram derivados. As FPT's devem ser suficientemente precisas para as regiões fisiográficas do Estado do Rio Grande do Sul onde foram feitas as coletas de solos para a formação do banco de dados.

4.3 AVALIAÇÃO DE EQUAÇÕES DA LITERATURA

Na tabela 7 é apresentada a variação da retenção de água entre as classes de solo utilizadas para a geração das FTP's e para avaliar as equações da literatura. As diferenças entre as classes são significativas, assim como a sobreposição, quando se associa o desvio padrão à média. Isso significa que erros podem ocorrer quando se utiliza o valor médio de cada classe para estimar a retenção de água. O valor médio do conteúdo de água medido para o potencial de -33 kPa foi de $0.34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto o valor médio estimado foi de $0.35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Pachesky et al. (2003) observaram grande variabilidade entre os valores médios de umidade entre as classes. Observando os desvios padrões (tabela 7), verifica-se que ocorreu maior variabilidade nos solos francos (até 50% de argila). Solos muito argilosos apresentaram maior conteúdo médio de água na CC e no PMP, porém, o total de água disponível (TAW) para esses solos, considerando 1 m de perfil, foi menor, variando de 106 a 122 mm. Esses resultados indicam que a maior retenção de água no solo não representa um aumento no total de água disponível no mesmo. Resultados semelhantes foram encontrados por Carlesso, Santos (1999) e Neto et al. (2013) ao analisarem retenção e a água disponível em solos de texturas diferentes.

Tabela 7 – Retenção de água na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e total de água disponível no solo (TAW) para as diferentes classes texturais que compõem o banco de dados utilizado para a validação das funções de pedotransferencia.

Classes texturais	N amostras	θ_{cc} (-33 kPa)	θ_{PMP} (-1500 kPa)	TAW
		$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	mm m^{-1}
Franco arenoso	621	0,255 ($\pm 0,063$) [*]	0,124($\pm 0,042$)	111 - 153
Franco argilo arenoso	654	0,316 ($\pm 0,049$)	0,173($\pm 0,032$)	126 - 160
Franco argiloso	899	0,355 ($\pm 0,046$)	0,219($\pm 0,031$)	121 - 151
Argiloso ¹	593	0,376 ($\pm 0,046$)	0,242 ($\pm 0,027$)	115 - 153
Argiloso ²	299	0,393 ($\pm 0,027$)	0,254 ($\pm 0,028$)	138 - 140
Muito Argiloso	200	0,401 ($\pm 0,026$)	0,287 ($\pm 0,034$)	106 – 122
Média**	3266	0,349	0,217	133

^{*} Valores entre parênteses representam o desvio padrão da média; ¹ - classe de solos argilosos da faixa de 40 a 50% de argila; ² - classe de solos argilosos na faixa 50 a 60% de argila. TAW – total de água disponível em 1 m de perfil.

** Média do conteúdo de água na CC e PMP observada em laboratório e valores do TAW para a média das observações.

Os resultados dos indicadores estatísticos que avaliaram o desempenho das FPT's da literatura para os potenciais de -33 e -1500 kPa são apresentados na Tabela 8. Com exceção do modelo proposto por Petersen et al. (1968) para o potencial de -33 kPa, todos os outros modelos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) baixos. Observando os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 8 e figura 7, para a equação de Arruda et al. (1987), verifica-se que, de uma maneira geral, a equação proposta por esses autores não apresentou uma boa concordância entre os dados observados e estimados para os potenciais de -33 kPa e -1500 kPa, indicando uma proporção semelhante de sub e superestimação, ou seja, o modelo não foi eficiente em mostrar a variação dos valores observados do conteúdo de água no solo para esses potenciais. Embora os valores médios do conteúdo de água observado na CC e no PMP (Tabela 7) e estimado para esses dois potenciais (tabela 8) tenham sido próximos, observa-se uma superestimação do conteúdo de água no potencial mais baixo, fato que pode ter sido influenciado pela D_s , uma vez que, a relação é dada em volume de água por volume de solo.

Tabela 8 - Indicadores estatísticos para as funções de pedotransferência da literatura testados para alguns solos irrigados do Rio Grande do Sul.

Equação	Tensão	b_0	R^2	θ					EF
				θ	RMSE	AAE	ARE	PBIAS	
				(cm ³ cm ⁻³)			(%)		
Arruda et al. (1987)	33kPa	1,03	0,53	0,35	0,07	0,05	19	-5,40	0,05
	1500kPa	0,76	0,58	0,20	0,05	0,05	34	30,6	-0,20
Tomasella; Hodnett (1998)	33kPa	1,00	0,46	0,31	0,04	0,04	15,2	-1,20	0,25
	1500kPa	0,98	0,72	0,23	0,02	0,02	11,1	1,40	0,66
Bruand et al. (1994)	33kPa	0,83	0,51	0,32	0,08	0,06	18,5	16,00	-0,15
	1500kPa	1,03	0,70	0,23	0,04	0,03	17,1	-3,10	0,55
Canarache (1993)	33kPa	1,05	0,31	0,36	0,06	0,05	14,7	-3,20	-1,8
	1500kPa	0,76	0,68	0,21	0,06	0,06	29,7	25,30	-0,27
Dijkerman (1988)	33kPa	0,57	0,53	0,29	0,07	0,05	19,5	-5,40	0,05
				θ	RMSE	AAE	ARE	PBIAS	
				(g g ⁻¹)			(%)		
Dijkerman (1988)	1500kPa	0,69	0,67	0,12	0,05	0,05	33,9	30,60	-0,20
	33kPa	0,83	0,51	0,18	0,08	0,06	18,5	16,00	-0,15
Bruand et al., (1994)	1500kPa	1,02	0,70	0,14	0,04	0,03	17,1	-3,10	0,55
	33kPa	1,05	0,31	0,21	0,06	0,05	14,7	-3,20	-1,8
Canarache (1993)	1500kPa	0,76	0,68	0,12	0,06	0,06	29,7	25,30	-0,27
	33kPa	0,91	0,68	0,21	0,04	0,04	16,7	-4,90	-1,83
Lal (1979)	1500kPa	1,07	0,46	0,13	0,04	0,03	17,6	11,40	-2,86
	33kPa	0,85	0,55	0,15	0,04	0,03	22,3	17,8	-2,3
Oliveira et al (2002)	1500kPa	0,64	0,63	0,10	0,04	0,03	25,5	22,3	-5,9
	33kPa	0,72	0,84	0,19	0,10	0,10	18,9	28,5	-1,18
Petersen et al. (1968)	1500kPa	1,01	0,63	0,14	0,07	0,08	17,5	11,3	0,08

b_0 : Coeficiente linear de regressão; R^2 : Coeficiente de determinação; θ_{est} : Média do conteúdo de água estimado pela FPT; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; AAE: Erro médio absoluto; ARE: Erro relativo médio; EF: Eficiência de modelagem; PBIAS: Percentagem de viés.

Figura 7 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 e -1500 kPa para as funções de pedotranferência de Arruda et al. (1987), Bruand et al (1994), Canarache (1993), e Tomasella e Hodnett (1998).

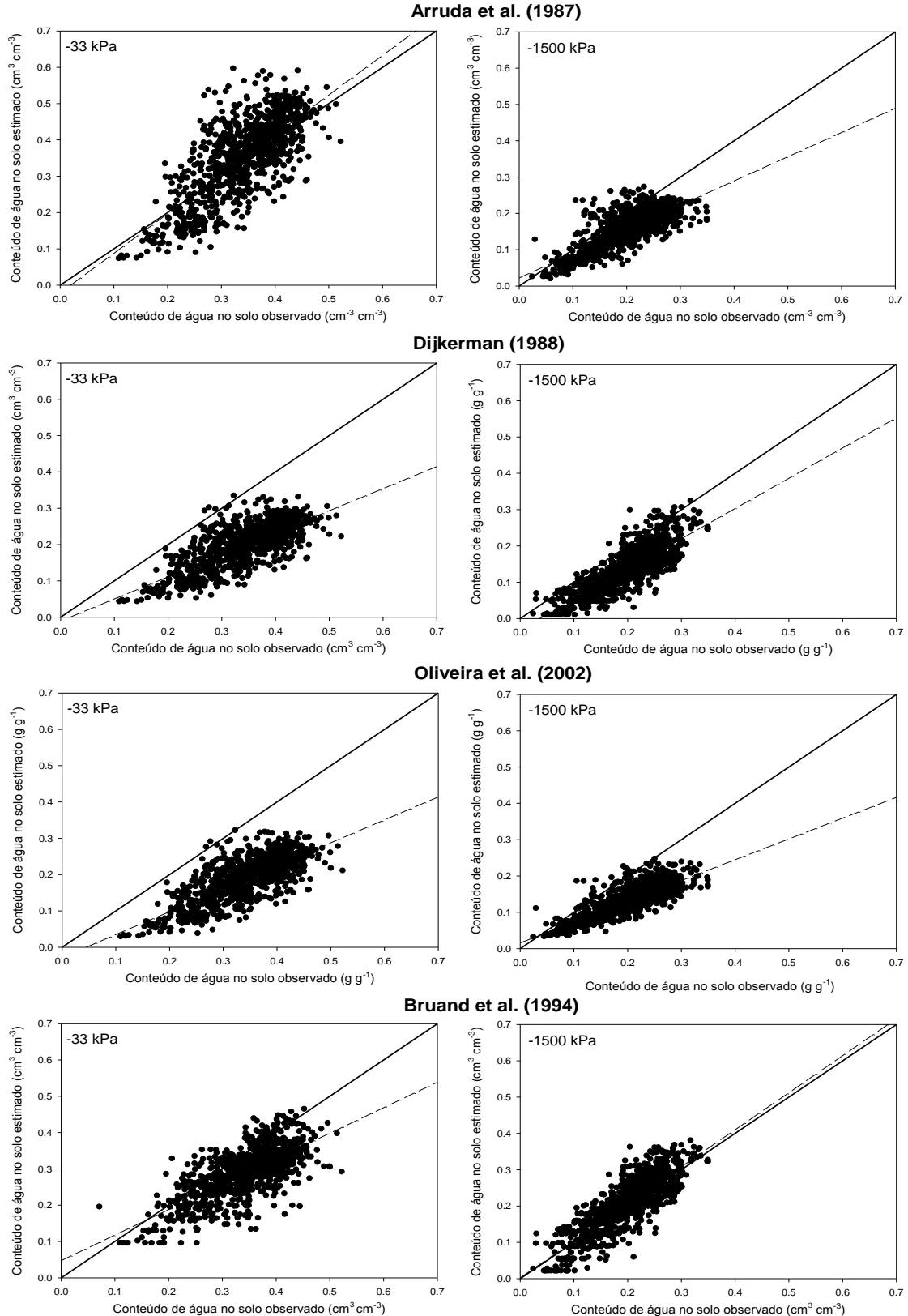
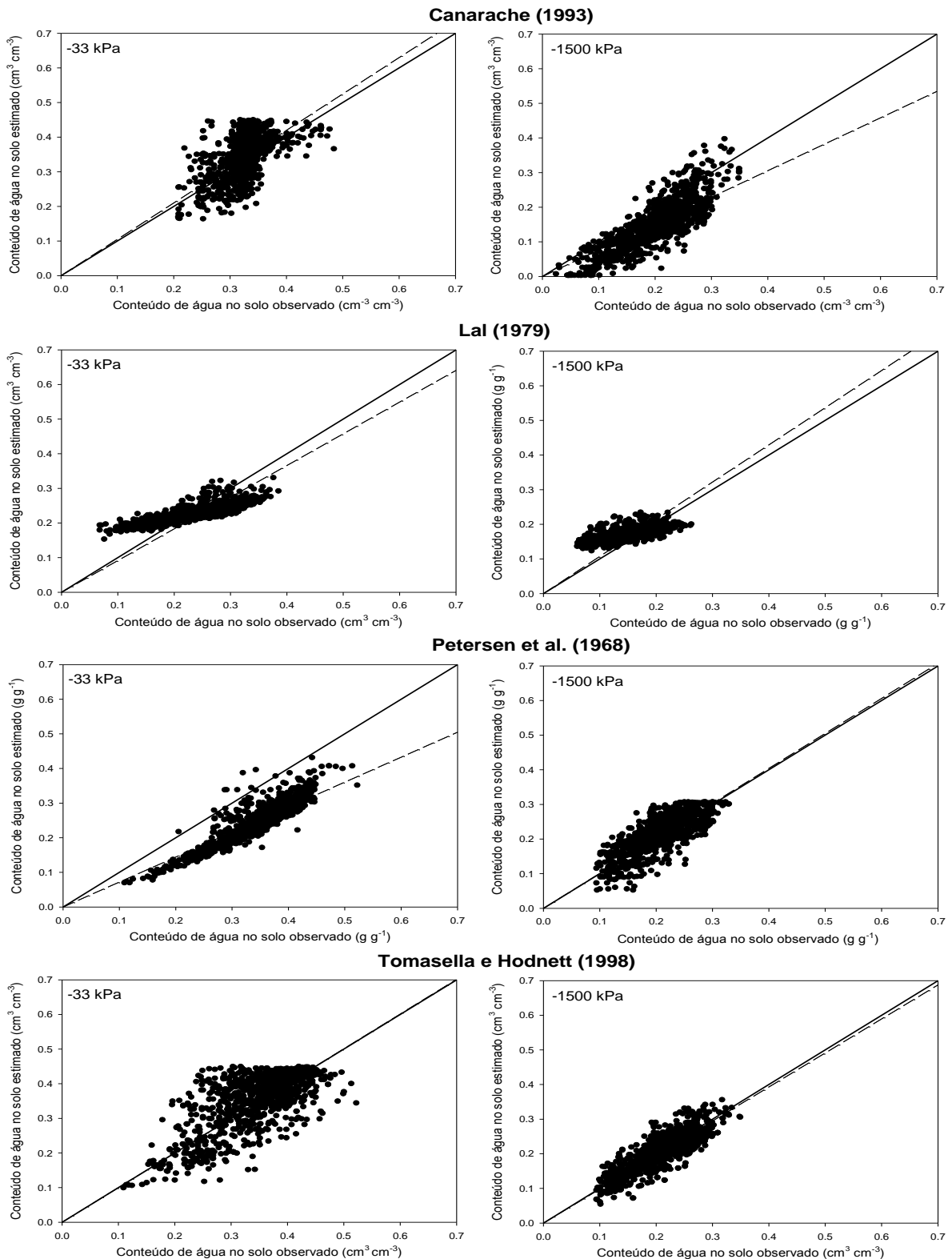


Figura 8 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água do solo nos potenciais de -33 e -1500 kPa para as funções de pedotransferência de Dijkerman (1988), Oliveira et al. (2002), Lal (1979) e Petersen et al. (1968) e Tomasella e Hodnett (1998).



Um método comum para avaliar as FPT's é relacionar os valores observados com os valores simulados e a correlação entre eles é usada para a avaliação do modelo, porém, embora esse método seja satisfatório para montar um modelo empírico, é inadequado para modelos mecanísticos (KOBAYASHI e SALAM, 2000), sendo necessário usar outros índices estatísticos para avaliar o desempenho do modelo. Assim, Givi et al. (2004) recomendam o uso do RMSE para avaliar a acurácia das FPT's. Para FPT no potencial de -33 Kpa de Arruda et al. (1987), o valor de RMSE variou de 0,07 a $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, (Tabela 8), indicando uma elevada variabilidade na retenção de água nas diferentes classes de textura. As equações foram destinadas em prever o conteúdo de água em nível local, não se esperando que elas possam representar uma boa acurácia para os solos do Rio Grande do Sul. Os valores de EF para os potenciais matriciais de -33 kPa e -1500 kPa foram negativos (-0,05 e -0,20 respectivamente), o que expressa uma variabilidade maior quando se usa a equação, em relação à média das observações.

Utilizando a FPT de Dijkerman (1988) para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 e -1500 kPa observa-se que, de uma maneira geral, houve uma subestimação dos valores de umidade do solo para o potencial de -33 kPa e o valor de PBIAS foi positivo acima de 10%. As FPT's propostas pelo autor utilizam apenas atributos texturais (areia e argila); para a estimativa da retenção de água no potencial de -33kPa, o autor encontrou correção negativa entre a retenção de água e o teor de areia, ao contrário do potencial de -1500 kPa, onde a relação foi positiva com teor de argila., Segundo Donatelli et al. (2004), a capacidade preditiva da FPT diminui quando se utilizada apenas os teores de areia e argila. O RMSE obtido foi de $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,05 \text{ g g}^{-1}$ para os potenciais de -1500 kPa . Observando os valores de EF (Tabela 8) verifica-se que houve baixa capacidade preditiva desses modelos, indicando que a média aritmética entre os valores observados expressa melhores resultados que os FPT's propostas pelo autor, corroborando que FPT's mais simples apresentam erros elevados nas estimativas e eficiência inadequada.

Outra particularidade é que o trabalho de Dijkerman (1988) foi realizado em Serra Leoa, local com clima e geologia diferentes do banco de dados testado. Segundo Wagner et al. (2001) e Wösten e van Genuchten. (2001) o desempenho das FPT's depende de alguns fatores, como a semelhança do local aplicado com a base de dados, além das técnicas de medidas empregadas.

Observando os indicadores estatísticos apresentados na tabela 8 para as FPT's de Oliveira et al. (2002), verifica-se que essas equações não apresentaram boa concordância entre os dados observados e estimados, uma vez que, o b_0 variou de 0,55 a 0,63; para os potenciais de -33 e -1500 kPa, respectivamente, com valores de R^2 entre 0,55 e 0,63 para esses dois potenciais. As FPT's Oliveira et al., (2002) foram desenvolvidas a partir de dados de 98 perfis de solos, totalizando 467 horizontes localizados no Estado de Pernambuco. Avaliando o desempenho estatístico dessas FPT's tem-se endossada a concepção de que o uso de FPT's para locais diferentes daquelas onde foram desenvolvidas pode resultar em erros significativos (COELHO et al. 1998). A densidade do solo é geralmente benéfica para o desenvolvimento das FPT's; apesar desse atributo estar presente nas equações sugeridas pelos autores, os valores de EF foram negativos independente do potencial matricial (tabela 8). Baumer, Brasher (1982) demonstraram a importância das propriedades mineralógicas do solo na retenção de água e sugerem como critério para prever a retenção de água no solo. E a utilização de equações geradas a partir da base de dados com predominância de solos com características que diferem consideravelmente dos solos onde o modelo está a ser avaliado pode causar uma maior dispersão e menor precisão da estimativa de retenção de água (GIAROLA et al. 2002).

Para os potenciais matriciais de -33 kPa e -1500 kPa o RMSE, obtido foi de $0,04 \text{ g g}^{-1}$. Azooz et al. (1996) observaram que, em solos sob planto direto e cultivo convencional, obtiveram diferentes valores de retenção de água no solo para diversos potenciais. O manejo pode causar um aumento na densidade do solo, ou mudar a distribuição do tamanho dos poros de bimodal para unimodal, acarretando uma possível mudança na capacidade de retenção de água do solo (WOSTEN et al. 2001). Assim a diferença de manejo dos solos do Estado de Pernambuco em relação aos solos irrigados do Rio grande do Sul, pode ser uma explicação pela má capacidade preditiva das FPT's da retenção de água nos potenciais matriciais propostos por Oliveira et al. (2002).

Os resultados do desempenho da FPT proposta por Tomasella; Hodnett (1998) para os potenciais de -33 e -1500 kPa são apresentados na tabela 8. O trabalho de Tomasella; Hodnett (1998) foi realizado na região norte do Brasil, mais especificamente na Amazônia Brasileira, com solos tropicais. Os modelos propostos usam somente dados de textura (silte e argila) para estimar a retenção de água nos

potenciais de -33 e -1500 kPa. A FPT proposta para o potencial de -1500 kPa apresentou valores de R^2 de 0,72, considerado muito bom. Os valores de RMSE e AAE obtidos foram de $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o valor de PBIAS de 1,14 demonstrando a boa capacidade preditiva dessa FPT. O que corrobora essa afirmação é o valor de EF de 0,66, superior entre as FPT's. Esse resultado se assemelha aos trabalhos de Nebel et al. (2010), Khodaverdiloo et al. (2011), nos quais os valores estimados ficaram mais próximos dos valores medidos nos potenciais de -1500 kPa do que potenciais mais altos. Isso relaciona que a retenção de água no solo a altos potenciais está mais condicionada com os fenômenos e arranjo das partículas do solo do que aqueles condicionados pelas forças de adsorção das partículas, especificamente a textura (JUNIOR et al. 2014). A distribuição do tamanho das partículas é utilizada na maioria das FPT's; entretanto, há diversos sistemas de classificação do diâmetro das partículas utilizados internacionalmente. Conforme a distribuição das partículas está relacionada com a capacidade de retenção de água no solo (Jaynes; Tyler, 1984), não é recomendado utilizar FPT's com dados de diferente sistema de classificação do diâmetro de partículas do qual foram desenvolvidas (WOSTEN et al. 1999).

Para as FPT's propostas por Petersen et al. (1968), cujo trabalho foi realizado nos Estados Unidos, localizado na Região Centro-Atlântico do país, os indicadores estatísticos também são apresentados na tabela 8 Observando os indicadores estatísticos, pode-se verificar que, de uma maneira geral, a equação proposta por esses autores não apresentou uma boa concordância entre os dados observados e estimados para nenhum potencial matricial, pois o b_0 variou de 0,72 para o potencial de -33 kPa e 1,01 para o potencial de -1500 kPa, enquanto o R^2 permaneceu entre 0,84 a 0,63 para o potencial de -33 kPa e -1500 kPa, respectivamente; indicando, que a FPT no apresenta um ajustamento estatístico linear ligeiramente melhor, entre os dados observados e estimados, para o potencial de -33 kPa do que para o potencial de -1500 kPa.

Apesar da boa capacidade preditiva das FPT's de Petersen et al. (1968), em função do b_0 e R^2 (Tabela 8), os erros de estimativa das modelagens, representava pelo RMSE, AAE e ARE, foram elevados, indicando um viés de subestimação do modelo para a retenção de água na CC e superestimação no PMP. As FPT's para o potencial de -33 e -1500 kPa são equações simples que utilizam apenas o teor de argila no solo e, no geral, não apresentaram um bom desempenho. Resultado

semelhante foi encontrado por Medeiros et al. (2014) em FPT's que utilizavam apenas atributos texturais. Outro efeito que contribui para a capacidade preditiva de uma FPT é a mineralogia da fração argila. O desenvolvimento de uma FPT para solos que apresentam uma mineralogia típica da argila, não deve apresentar uma boa capacidade preditiva para solos com mineralogia diferente, uma vez que a mineralogia afeta a curva de retenção de água no solo (GAISER et al. 2000).

Os resultados do desempenho das FPT's' propostas por Bruand et al. (1994) para os potenciais de -33 e -1500 kPa são apresentadas na tabela 8. Observando os indicadores estatísticos, pode-se verificar que, de uma maneira geral, a equação proposta por esses autores não apresentou uma boa concordância entre os dados observados e estimados, uma vez que, o b_0 variou de 0,83 e 1,03; para os potenciais de -33 kPa e -1500 kPa, respectivamente. O R^2 variou de 0,51 a 0,70 para os potenciais matriciais de -33 e -1500 kPa, indicando que a variações dos dados pode ser explicada pelas FPT's. O RMSE variou de 0,08 a 0,04 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para os potenciais de -33 e -1500 kPa, enquanto o AAE variou de de 0,06 e 0,03 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ respectivamente, indicando que a equação para a estimativa do conteúdo de água no solo no potencial de -1500 kPa apresenta uma acurácia maior comparada ao modelo que estima a umidade no potencial de -33 kPa.

As FPT's propostas por Bruand et al., (1994) foram realizados na França, na região de Borgonha e utilizam somente o teor de argila presente no solo. Nos potenciais mais elevados, o conteúdo de água no solo é diretamente dependente do teor de argila, fazendo com que exista uma menor variação entre os valores simulados e preditos do conteúdo de água no solo. Nos potenciais mais baixos existe uma maior variação do conteúdo de água, devido à dinâmica superior da água no solo (FONTANA et al. 2010). A EF foi negativa para o potencial de -33 kPa, indicando que, nesse caso, é melhor utilizar a média aritmética dos dados observados que os valores simulados pela FPT. Os valores positivos para a PBIAS indicam a subestimativa dos valores simulados, corroborando a importância de utilizar a FPT em locais similares as que foram realizadas, não extrapolando para regiões geográficas diferentes e banco de dados homogêneos (NEMES et al. 2009).

Analisando as propriedades de retenção de água de 219 horizontes na França, Bruand et al., (2003) observaram que as FPT's que contém a D_s forneceram estimativas com maior precisão do conteúdo de água que as FPT's que utilizavam apenas atributos texturais. Este trabalho foi realizado em Cambissolos, Luvissolos e

Fluvisolos e os autores sugerem que, para o desenvolvimento de FPT's deve-se ter como critérios a mineralogia da argila, o tipo de material de origem e a pedogênese, pois são variáveis que influenciam na dinâmica da água no solo (BRUAND; TESSIER, 2000).

O trabalho de Canarache (1993) foi realizado na Romênia, no Leste Europeu. O R^2 para estimar o conteúdo de água usando a FPT de Canarache (1993) para o potencial matricial de -33 kPa foi de 0,31; para o potencial no PMP o R^2 aumentou para 0,68, mesmo que o número de atributos usado na equação tenha diminuído. A análise dos valores de RMSE revela que a FPT de Canarache (1993) apresentou um erro de $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para os dois potenciais matriciais (Tabela 8). A EF foi negativa para ambos os potenciais, o que indica a má capacidade de prever a retenção de água no solo para este trabalho com solos do Rio Grande do Sul.

O resumo dos indicadores estatísticos para as FPT's propostas por Lal (1979) é apresentado na tabela 8 e a comparação entre os dados observados e estimados na figura 8. O trabalho de Lal foi realizado na Nigéria, região da África Ocidental. As FPT's propostas pelo autor são simples regressões lineares. Obteve-se um melhor ajuste entre os dados estimados e observados para o potencial de -33 kPa em relação ao potencial de -1500 kPa, com valores de R^2 que variaram de 0,68 a 0,46, respectivamente. O valor de RMSE obtido foi de $0,04 \text{ g g}^{-1}$ para ambos os potenciais. A EF foi negativa, o que indica um péssimo desempenho desse modelo em estimar a retenção de água no solo nesses potenciais. Mayr; Jarvis (1999) observaram que FPT's que utilizam apenas a variável areia como parâmetro de entrada também não apresentaram bom desempenho na capacidade preditiva do conteúdo de água no solo.

Observações baseadas na análise das equações da literatura utilizadas (LAL, 1979, ARRUDA et al. 1987, DIJKERMAN, 1988, OLIVEIRA et al., 2002, TOMASELLA e HODNETT, 1998, PETERSEN et al., 1968, BRUAND et al., 1994 e CANARACHE, 1993), demonstram que, de forma geral, as equações da literatura não se igualaram na capacidade preditiva da retenção de água nos potenciais específicos das FPT's propostas do trabalho. As observações também permitem dizer que, devido às características heterogêneas dos solos que compõem cada um dos bancos de dados utilizados para gerar as FPT's, equações específicas são necessárias para descrever as características físico-hídricas dos solos.

Tomasella et al. (2000) observaram o desempenho de FPT's desenvolvidas para solos temperados e não obtiveram boas estimativas do conteúdo de água para solos tropicais. Os autores também destacam que as estimativas não melhoram quando restringiram o intervalo textural para que as FPT's geradas a partir de solos temperados fossem utilizadas para outros grupos de solo. Observações semelhantes foram feitas por Reichert et al. (2009).

5 CONCLUSÃO

As amostras de solo coletadas em áreas irrigadas por aspersão no Estado do Rio Grande do Sul foram classificadas, com maior frequência, na faixa de 0-400 g kg⁻¹ de argila na camada superficial. Sendo a camada com o maior percentual de amostras com problemas de compactação, no qual 40% das amostragens apresentaram-se compactadas em função da D_s, Macro e D_s+Macro. E o parâmetro físico mais afetado pela compactação na camada superficial foi a macroporosidade, representando 29% das amostras de solo, o que condiz que esses solos podem apresentar condições adversas para o crescimento radicular das plantas.

Utilizar atributos do solo, como areia grossa, areia fina, silte, argila, densidade do solo, densidade de partículas, macroporosidade, microporosidade para estimar a retenção de água no solo através de FPT's propostas por esse trabalho, demonstraram eficiência em prever o conteúdo de água no solo nos potenciais de -1; -6; -33; -100 kPa. Assim FPT's propostas por esse trabalho permitem que laboratórios de física do solo, pesquisadores ou pessoas com interesse na área, utilize-as para estimar o conteúdo de água no solo na curva característica de água de solos que se assemelham aos utilizados nesse trabalho.

O maior valor de R² entre as FPT's de 0,84 obtido pela equação de Petersen (1968) não foi suficiente para indicar uma boa capacidade preditiva, outros índices estáticos como RMSE de 0,10 g g⁻¹ e EF de -1,18 obtidos pela FPT, indica a necessidade de diversos índices para avaliar corretamente o desempenho das FPT's.

As FPT's de Tomasella; Hodnett (1998) para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 e -1500 kPa para solos do estado do Rio Grande do Sul, obtiveram os valores de EF de 0,25 e 0,66 em conjunto com os valores de RMSE de 0,04 e 0,02 cm³ cm⁻³, respectivamente. Os valores dos índices sugerem uma certa precisão em prever a retenção de água no solo nos determinados potenciais, porém os valores são inferiores aos índices estatísticos referentes às FPT's desenvolvidas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABBAD, G.; TORRES, C. V. Regressão múltipla stepwise e hierárquica em Psicologia Organizacional: aplicações, problemas e soluções. *Red Estudos de Psicologia*. 2000.
- AGUIAR NETO, A. O.; RODRIGUES, J. D.; NASCIMENTO JÚNIOR, N. A. Análise de crescimento na cultura da batata (*Solanum tuberosum* ssp *Tuberosum*) submetida a diferentes lâminas de irrigação: razão tubérculo-parte aérea, área foliar específica, razão de área foliar e razão de massa foliar. *Irriga*, Botucatu, 4(1), 13-24. 1999
- AHMADI, S. H.; ANDERSEN, M. N.; PLAUBORG, F.; POULSEN, R. T.; JENSEN, C. R.; SEPASKHAH, A. R.; HANSEN, S. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. ***Agricultural Water Management*** (2010), 97(11), 1923-1930.
- AHUJA, L.R.; NIELSEN, D.R. Field soil - water relations. In: STEWART, B.A. & NIELSEN, D.R., eds. Irrigation of agricultural crops. Madison, ***American Society of Agronomy***, p.143-189. 1990
- AHUJA, L.R.; NAMEY, J.W.; WILLIAMS, R.D. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. ***Soil Science Society of America Journal***, 1985. Madison, v.49, pp.1100-1105.1985
- AKAIKE, H. An information criterion (AIC). ***Mathematical Society***, 1976, v. 14, n. 153, p. 5-9, 1976.
- AL MAJOU, H.; BRUAND, A.; DUVAL, O.; LE BAS, C.; VAUTIER, A. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. ***Soil Use and Management***, (2008). 24(4), 383-391.
- ALVES, M. F.; LOTUFO, A. D. P.; LOPES, M. L. M. Seleção de variáveis stepwise aplicadas em redes neurais artificiais para previsão de demanda de cargas elétricas. ***Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics***, v. 1, n. 1, 2013.
- ALVES, W. W. A.; OLIVEIRA, F. A.; AZEVEDO, C. A. V.; ALBUQUERQUE, J. H. Métodos de determinação e níveis de água disponível no solo: efeito sobre a cultura do algodoeiro herbáceo. ***Revista Caatinga***, v.23, p.91-94, 2010.
- ARAUJO, M.A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira. Ciência do Solo*. v.28, pp.337-345, 2004.
- ARAUJO, M.A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. ***Revista Brasileira Ciência do Solo***, v.28, pp.337-345, 2004.

ARCHER, J.R.; SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity for soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.23, p.475-480, 1972.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. D. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, (2005), 29, 425-435.

ARRUDA, F.B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.11, pp.11-15, 1987.

ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO, J. R. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, (2001). 9(3), 588-596.

AZOOZ, R. H.; ARSHAD, M. A.; FRANZLUEBBERS, A. J. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in northwestern Canada. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 4, p. 1197-1201, 1996.

BALLAND, V.; POLLACCO, A. P.; ARP, P. Modeling soil hydraulic properties for a wide range of soil conditions. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.219, p.300-316, 2008.

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

BAUMER, O. M. Predicting unsaturated hydraulic parameters. In: **Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside**. 1992. p. 341-354.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; SANTOS, G. D. A.; CAMARGO, F. D. O. Dinâmica e função da matéria orgânica. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. **Gênesis**, Porto Alegre, 9-26.1999

BAVOSO M.A., SILVA A.P., FIGUEIREDO G.C., TORMENA C.A., GIAROLA N.F.B. Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2012;36:1892-1904.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A. D.; SOUZA, F. R. D. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34(3), 681-691. 2010

BERNARDO, S.; SOARES. A. A.; MONTOVANI. E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa, Imprensa Universitária. 625p, 2006.

- BERTOL, O.J.; RIZZI, N.E.; BERTOL, I.; ROLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 31:781-792, 2007.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29, p. 843-849, 2005.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 829-834, 2002.
- BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in water retention curves determined with pressure plates and their effects on soil hydraulic functions. **Soil Science Society of America**, 73:1453-1460, 2009.
- BOÉDT, L.; VERHEYE, W. Evaluation of profile available water capacity. The conceptual approach. **Pedologie**, Ghent, v.35, p.55-65, 1985.
- BOLFARINE, H.; SANDOVAL, M. C. Introdução à inferência estatística. São Paulo: **Sociedade Brasileira de Matemática**, 2000. 125 p.
- BORGESSEN, C.D. & SCHAAP, M.G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. **Geoderma**, 127:154-167, 2005.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **ADVANCES IN SOIL SCIENCE**. 9,177-213. 1989.
- BOZDONGAN. H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**. v.52, n.3, 345-370, Sep. 1987.
- BRADY, N. C., WEIL, R. R. Soil water: Characteristics and behavior. **The nature and properties of soils**. Prentice Hall, New Jersey, 177-217. 2008
- BRADY, N.C. **The nature and properties of soils**. MacMillan, 9 ed, New York, 1984.
- BRANDÃO, V. D. S.; SILVA, D. D.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, E. O. Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solos sob chuva simulada. **Engenharia Agrícola**, 27(1), 129-138. 2007
- BRIGGS, L.J.; SHANTZ, H.L. **The wilting coefficient for different plants and its indirect determination**. Washington DC. United States: Department of Agriculture, Bureau of Plant Industries, 83p. (Bulletin n.30), 1912.

BRISTOW, K.L.; SMETTEM, K.R.J.; ROSS, P.J.; FORD, E.J.; ROTH, C.; VERBURG K. Obtaining hydraulic properties for soil water balance models: some pedotransfer functions for tropical Australia. Proc. Int. Workshop on the Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, University of California, Riverside, CA (1997)

BRUAND, A.; BAIZE, D.; HARDY, M. Prediction of water retention properties of clayey soils: validity of relationships using a single soil characteristic. **Soil Use and Management**, 10(3), 99-103. 1994.

BRUAND A; TESSIER D. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: Significance of parent material and soil history. **European Journal of Soil Science**. 51, 679- 688, 2000.

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

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: understanding aic and bic in model selection. **Sociological Methods and Research**, Beverly Hills, v. 33, n. 2, p. 261-304, 2004.

CAMPBELL, G.S. Soil water potential measurement: An overview. **Irrigation Science**, v. 9, n. 1, p. 265-273, 1988.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, p. 149-157, 2007.

CANARACHE, A. Physical-technological maps: A possible product of soil survey for direct use in agriculture. **Soil Technol.** 6:3–16. 1993.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35(1), 77-86. 2011.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.25, p.183-88, 1995.

CARLESSO, R., SANTOS, R. F. Disponibilidade de água às plantas de milho em solos de diferentes texturas. **Revista brasileira de ciência do solo**,23(1), 17-25. 1999.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo**: Parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação. Santa Maria, Imprensa Universitária 88p: UFSM, 2000.

CARTER, M. R. Relationship of Strength Properties to Bulk Density and Macroporosity in Cultivated Loamy Sand to Loam Soils. **Soil & Tillage Research**, v.15, p.257-268, 1990.

CARTER, M. R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mould-board ploughing and direct drilling. **Soil & Tillage Research**, v.12, p.37-51, 1988a

CARVALHO, L. D.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; CAVALIERI, K. M.; SANTOS, C. F. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 15, 940-949. 2011.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; CARVALHO JÚNIOR, W. Utilização de redes neurais artificiais para predição de classes de solo em uma bacia hidrográfica no Domínio de Mar de Morros. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2421-2428. 2007.

CHINN, C.; PILLAI, U. P. P. Self-repair of compacted Vertisols from Central Queensland, Australia. **Geoderma**, Amsterdam, 144:491- 504, 2008.

CIRINO, C. G.; GUERRA, H. O. C. Utilização das relações energia/umidade na caracterização físico-hídrica dos solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 12, pp. 1973- 1978, 1994.

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

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(3), 933-942. 2008.

COSTA, A. D.; NANNI, M. R.; JESKE, E. Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente por diferentes metodologias. **Revista Unimar**, 19, 827-844. 1997.

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 32:515-523, 2008.

CUSTÓDIO, G. D., RIBON, A. A., FERNANDES, K. L., HERMÓGENES, V. T. L., & BARROS, L. R. Densidade do solo e densidade relativa-indicadores da qualidade física de um Latossolo Amarelo sob diferentes manejos de pastagens e mata nativa. **Campo Digital**, 10(1). 2015.

DANTAS, J. D. A. N.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, CE1. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, 16(1), 18-26. 2012

- DE SOUZA, E. J.; DA CUNHA, F. F. Métodos para estimativa da umidade do solo na capacidade de campo. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v.11, n.1, p.43-50 2013
- DECAGON DEVICES, INC. **Operator's manual version 3 WP4 Dewpoint PotentiaMeter**. Pulmann: Decagon Devices. 77p. 2003
- DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil and Tillage Research**, 67(1), 41-64. 2002
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, 120(3), 201-214. 2004
- DEXTER, A.R.; BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil e Tillage Research**. 57:203- 212, 2001.
- DIJKERMAN, J. C. An ustult-aquult-tropept catena in Sierra Leone, West Africa, II. land qualities and land. **Geoderma**, v.42, n. 1, p.29-49, 1988.
- DINIZ, L.S. **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. 2008. 197 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- DINIZ NETO, M. A., VASCONCELOS, R. C. M. D., CAVALCANTE, L. F., PIMENTA FILHO, E. C., SILVA, I. D. F. D. Water availability of two soil-types and at different cropping ages on the agronomic performance of Jureminha. **Revista Ciência Agronômica**, 44(1), 24-33. 2013
- DONATELLI. M.; WÖSTEN. J. H. M.; BELOCCHI. G. Methods to evaluate pedotransfer functions, *Developments in Soil Science*, **Elsevier**, Volume 30, Pages 357-411, 2004
- EISENHAUER, J. G. Regression through the origin. **Teaching Statistics**, v. 25, n. 3, p. 76-80, 2003.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 212 p. 1997.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo de Algodão Irrigado**. 2003. Disponível em: < <http://www.ceset.unicamp.br/~sandro/st571/Solos%20%20EMBRAPA%20ALGOD%C3O.doc> >
- ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. In: VAN DOREN, D.M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. (Ed.) Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Madison: ASA. cap.6, p.91-104. 1982

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1, 1-27. 2010

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática**, 7(1), 96-101. 1983

FIÈS, J.C; PANINI, T. Infiltrabilité et caractéristiques physiques des croûtes formées sur massifs d'agrégats initialement secs ou humides soumis a dès pluies simulées. **Agronomie**, Paris, v.1, p.205-220, 1995.

FIGUEIREDO FILHO, D.; NUNES, F.; ROCHA, E. C.; SANTOS, M. L.; BATISTA, M.; SILVA JÚNIOR, J. A. O que fazer e o que não fazer com a regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de mínimos quadrados ordinários (MQO). **Revista Política Hoje**, 20(1).2011

FONTANA, A.; SANTOS, H. G. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira Ciência Agrária**. Recife, 5(4), 560-569. 2010

FREITAS JÚNIOR, E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 19(11), 1423-1428. 1984

FURR, J.; REEVE, J. The range of soil moisture percentages through which plants undergo permanent wilting in some soils from semi-arid, irrigated areas. **J. Agric. Res**, 71, 149-170. 1945

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.**, 38:523-536, 2000.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solo da região sul do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 26, pp. 885-893, 2002.

GIVI, J. A. V. A. D.; PRASHER, S. O.; PATEL, R. M. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. **Agricultural water management**, 70(2), 83-96. 2004

GONZÁLEZ, A. P., ALVES, M. C. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições superfície, , em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha,. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 9(1), 45-50. 2005. ISSN 1807-1929. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000100007> >.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, v.32, p.180-186, 1968

GRIGOLON, G. B. **Curvas de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidades e tensão na câmara de Richards.** 82p. 2013. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Piracicaba, SP. 2013.

GUBIANI P.I., REICHERT J.M., REINERT D.J. Indicadores hídricomecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2013a;37:1-10.

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; CAMPBELL, C.; REINERT, D. J.; GELAIN, N. S. Assessing Errors and Accuracy in Dew-Point Potentiometer and Pressure Plate Extractor Measurements. **Soil Science Society of America Journal**, 77(1), 19-24. 2013

GUBIANI P.I.; VAN LIER, Q. J.; DRESCHER, M. S.; MEZZOMO, H. C.; VEIGA, C.M.C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.39, p.100-108, 2015.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content, and bulk density. **Water Resources Research**, v.20, pp.1633-1635, 1979.

HAKANSSON, I., **Machinery-induced compaction of arable soils.** Reports from the division of soil management, Uppsala, 2005. no. 109, 153 pp.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and tillage research**, 82(2), 121-145. 2005

HILLEL, D. Internal drainage and redistribution following infiltration. **Applications of soil physics.** 1980. New York: Academic, 50-72.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics.** New York, Academic Press, caps. 2, 4, 8, 12 e 13, 1980.

HILLEL, D. **Environmental soil physics.** San Diego, Academic Press. p.309-339. 1998.

HILLEL, D. Soil and water: physical principles and processes. Elsevier, 287p. 2012. Hydrology. **Elsevier**, Amsterdam, The Netherlands. 2004.

JAMISON, V. C. Changes in air water relationships due to structural improvement of soils. **Soil Science.** 76:143-151, 1953.

JANA, R. B.; MOHANTY, B. P.; SPRINGER, E. P. Multiscale pedotransfer functions for soil water retention. **Vadose Zone Journal**, 6(4), 868-878. 2007.

JAYNES, Dan B.; TYLER, E. Jerry. Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. **Soil Science**, v. 138, n. 4, p. 298-305, 1984.

JONES, C. A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. **Soil Science Society of America Journal**, 47(6), 1208-1211. 1983.

JONG VAN LIER, Q. D.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Índices da disponibilidade de água às plantas. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1, 95-106. 2000.

JUNIOR, A. D. A.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P. C.; SILVA, A. D. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, 11(1), 63-68. 2003.

KHODAVERDILOO, H.; HOMAEI, M.; VAN GENUCHTEN, M. T.; DASHTAKI, S. G. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. **Journal of Hydrology**, v.399, n. 1- 2, p.93-99, 2011.

KLEIN V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Editora da Universidade Passo Fundo, 212p, 2008.

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

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, 40(7). 2010.

KLEIN, V. A., LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26(4), 857-867. 2002

KLEIN, V. A.; MARCOLIN C. D. Utilização do psicrômetro WP4-T para determinação do potencial da água no solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Embrapa/SBCS 2008.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.646-650, 2006.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.7, p.1550-1556, jul, 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. **Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods**, 635-662. 1986

KONISHI, S.; KITAGAWA, G. Information criteria and statistical modeling. New York: Springer, 2008. 321 p.

KULLBACK, S.; LEIBLER, R. A. "On information and sufficiency". **Annals of Mathematical Statistics** (1951). 22 (1): 79–86..

LAL, R. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. **Geoderma**, 21:209-223, 1979.

LANDIM, P.M.B. Análise estatística de dados geológicos multivariados. Rio Claro: Laboratório de Geomatématica/ DGA/IGCE/UNESP-Rio Claro-SP, 128p. 2000

LANDON, J. **Booker tropical soil manual**. Logman, New York, 1991.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. D. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1131-1140, 2007.

LEÃO, M. G. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D.; PEREIRA, G. T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 644-651, 2011.

LEÃO, T.P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S. e EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 28, pp. 415-423, 2004.

LEINZ, V.; LEORNARDOS, O. H. **Glossário Geológico**. São Paulo: Editora Nacional, 1982.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. Oficina de Textos. São Paulo. 2002.

LETEY, J. O. H. N. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in soil science*. Springer New York 277-294. 1985.

LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrological Research**, v.12, p.173-189, 2007.

LIMA, C. G. D. R.; CARVALHO, M. D. P.; MELLO, L. M. M. D.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1233-1244. 2007.

LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A.; SILVA GOMES, A.; HARTWIG, M. P.; PASSIANOTO, C. C. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. **Current Agricultural Science and Technology**, Pelotas – RS, 12(2). 2014

LIMA, C. L. R.; REINERTI, J. M. R. D. J. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**,37(4), 1166-1169. 2007.

LIPIEC, J., Soil physical properties and crop growth in relation to soil Compaction. 1992. Jpn. J. **Soil Sci. Plant Nutr.** 93, 21– 30.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. (2003). **Geoderma**, Amsterdam 116(1), 107-136.

MACEDO, J. R.; MENEGUELLI, N. D. A.; OTTONI FILHO, T. B.; SOUSA LIMA, J. A. Estimation of field capacity and moisture retention based on regression analysis involving chemical and physical properties in Alfisols and Ultisols of the state of Rio de Janeiro. **Communications in soil science and plant analysis**, 33(13-14), 2037-2055. 2002.

MACEDO, J. R. **Determinação de retenção hídrica por correlação múltipla e de variabilidade espacial em solos podzólicos de Seropédica**, RJ. Rio de Janeiro: UFRRJ, 1991. 174p. 1991. Dissertação de Mestrado.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*. V.29. p.75-97, 1996.

MARCOLIN, C. D., KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(2), 349-354. 2011

MARSHALL, T. J. The nature, development and significance of soil structure. **Society of Soil Science Communications IV and V**, NZ, 243-257. 1962.

MARTIN, S. L.; MOONEY, S. J.; DICKINSON, M. J.; WEST, H. M. The effects of simultaneous root colonisation by three *Glomus* species on soil pore characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, v.49, p.167-173, 2012.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, 8(1), 032-041. 2002.

MAYR, T.; JARVIS, N. J. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks–Corey type model. 1999. **Geoderma**, 91(1), 1-9.

MAZEROLLE, M. J. **Mouvements et reproduction des amphibiens em tourbières perturbées**. 2004. 205 p. Thesis (Doctorat en Sciences Forestières) - Université Laval, Québec, 2004.

MEDEIROS SILVEIRA, F.; SANTI, G. R.; JOSÉ, D. Estimativa da retenção de água através de pedofunções para alguns solos brasileiros. **Anais... XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água**. Santa Maria, 25. 2004

MEDEIROS, J. C.; COOPER, M.; DALLA ROSA, J., GRIMALDI, M., COQUET, Y. Assessment of pedotransfer functions for estimating soil water retention curves for the amazon region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38(3), 730-743. 2014.

MEDRADO, E., LIMA, J. E. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. *AGeoderma Regional*, 1, 59-66. 2014

MELLO, C. R. D.; OLIVEIRA, G. C. D.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M. D.; LOPES, D. Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. 2005.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da microrregião Campos das Vertentes, MG. *Pesquisa. Agropecuária. Brasileira*. v. 37, n. 9, pp. 1319- 1324, 2002.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, 40(4), 848-853. 2010.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHR, R. B., DE ANDREDA, J. G. Physical quality of irrigated soils in some regions of Central Brazil/Qualidade física dos solos irrigados de algumas regioes do Brasil Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13(1), 39-46. 2009

MIRASSÓN, H. R.; FARALDO, M. L.; FIORETTI, M. N.; MIRAVALLÉS, M.; BREVEDAN, R. E. Relationship between leaf greenness index and leaf water status in wheat under different tillage systems. **Phyton** (Buenos Aires), 79, 183-187. 2010.

MOLINE, E. F. V.; BARBOZA, E.; SIMÕES, L. P.; FERREIRA FILHO, G. S.; SOUZA, F. L. F.; SCHLINDWEIN, J. A. Ponto de murcha permanente em solos arenoso e argiloso utilizando o tomateiro como cultura indicadora. **Global science and technology**, 2013, v. 6, n. 1,. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.14688/1984-3801.v06n01a15> >.

MORAES, S.O.; LIBARDI, PL.; NETO, D D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção da água pelo solo. **Scientia Agrícola**, 50(3):383-392. 1993.

MOTA, J. C. A.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. D. S.; ASSIS JÚNIOR, R. D.; AMARO FILHO, J. Armazenagem de água e produtividade de meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. **Revista brasileira de ciência do solo**, 34(5), 1721-1731. 2010.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: part 1. A discussion of principles. **Journal. Hydrology**. 1970. 10 (3), 282–290. 1970.

NEBEL, A. L. C.; TIMM, L. C.; CORNELIS, W.; GABRIELS, D.; REICHARDT, K.; AQUINO, L. S.; PAULETTO, E. A.; REINERT, D. J. Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowland soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.669-680, 2010.

NEMES, A.; TIMLIN, D. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Evaluation of the pedotransfer functions for their applicability at the US National Scale. **Soil Science Society of America Journal**, 73(5), 1638-1645. 2009

NETER, J.; KUTNER, M.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied Linear Statistical Models**. Fourth Edition, McGraw-Hill. 1996.

NHANTUMBO, A. B.; CAMBULE, A. H. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. **Soil and Tillage Research**, 87(2), 231-239. 2006

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal: Funep, p. 1, 1992.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 3, p. 197-200, jan./fev. 1968.

OLIVEIRA, L. B.; MARTINS, A. M. C. Considerações sobre a umidade a 15 atmosferas e a umidade de murchamento (método fisiológico), em solos do Nordeste. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 1(1), 91-95. 1966

OLIVEIRA, L. B.; QUEIROZ, E. N. Curvas características de retenção de umidade de solos do Nordeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Série Agronomia, Rio de Janeiro, v.10, p.69-75,1975.

OLIVEIRA, L.B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V. e MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade 119 retida a potencias específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 26, p. 315-323, 2002.

OLIVEIRA, R. C.; COELHO, E. F.; JÚNIOR, E. B. S.; SILVA, A. J. P. Análise da extração de água pelo sistema radicular de três cultivares de plátanos water extraction by root system of three plantains cultivars. **Anais... XX Reunião Internacional da Associação para a Cooperação em Pesquisa e Desenvolvimento Integral das Musáceas (Bananas e Plátanos) 9 a 13 de setembro de 2013 – Fortaleza, CE 2013**

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F.; COSTA, Y. D.; PEDROSA, E. M. Compactação de um Argissolo Amarelo distrófico submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, 14(9). 2010.

OTTONI, M.V. **Classificação Físico-Hídrica de Solos e Determinação da Capacidade de Campo in situ a partir de Testes de Infiltração**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) COPPE/UFRJ, 2005.

PACHEPSKY, Y.A., RAWLS, W.J. Development of Pedotransfer Functions in Soil

PACHEPSKY, Y.A., RAWLS, W.J. Soil structure and pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science*, London, v.54, p. 443–451, 2003.

PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J.; TIMLIN, D.J. The current status of pedotransfer

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. D.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 35(5), 1777-1785. 2011.

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

PETERSEN, G. N.; CUNNINGHAM, R. L.; MATELSKI, R.P. Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. Moisture retention as related to texture. **Soil Science Society of America**. Proc., 32: 271-275, 1968.

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.; ZIMMERMANN, F. L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C. J.; KUNZ, J. H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e prepare convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 531-539, 2007.

PIEDALLU, C.; GÉGOUT, J. C.; BRUAND, A.; SEYNAVE, I. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. **Geoderma**, 160(3), 355-366. 2011

PORTELA, J. C.; COGO, N. P.; BAGATINI, T.; CHAGAS, J. P.; PORTZ, G. Restauração da estrutura do solo por sequências culturais implantadas em semeadura direta, e sua relação com a erosão hídrica em distintas condições físicas de superfície. **Revista brasileira de ciência do solo**. Campinas. Vol. 34, n. 4, p. 1353-1364. 2010.

POULOVASSILIS, A. The influence of the initial water content on the redistribution of soil water after infiltration. **Soil Science**, Baltimore, v.135, p.275-281, 1983.

PUCKETT, W. E.; DANE, J.H.; HAJEK, B.F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**. J, 49 (1985), pp. 831–836

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2015

RAMOS, T. B.; HORTA, A.; GONÇALVES, M. C.; MARTINS, J. C.; PEREIRA, L. S. Development of ternary diagrams for estimating water retention properties using geostatistical approaches. **Geoderma**, 230, 229-242. 2014.

RATCLIFF, L.F.; RITCHIE, J.T; CASSEL, D.K. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory measured properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 770-775, 1983.

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

RAWLS, W.J.; GISH, T.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advance Soil Science**. 16: 213-234, 1991.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.211-216, 1988.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Manole.1990

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

REICHERT J.M.; SUZUKI L.; REINERT D.J.; HORN R., HAKANSSON I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**. 102: 242-254. 2009.

REICHERT, J. M., ALBUQUERQUE, J. A., REINERT, D. J., KAISER, D. R., & GILKES, R. J. Water retention estimation and plant availability for subtropical Brazilian soils. **Anais...** In 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World (p. 1-6). 2010.

REID, J. B., HASHIM, O., GALLAGHER, J. N. Relations between available and extractable soil water and evapotranspiration from a bean crop. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 9, p. 193-209, 1984.

REINERT, C. A. S. D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, 34(3). 2004.

REINERT, D. J. Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowland soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.669-680, 2010.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, v. 1, 114-133. 2001.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

REZAEI, L.; SHABANPOUR, M.; DAVATGAR, N. Estimating the soil water retention curve from soil particle size distribution using the Arya and Paris model for Iranian soils. **Turkish Journal of Agriculture Forestry**, v. 35, p. 649-657, 2011.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. (1943). Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**, 56(5), 331-340.

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

RICHARDS, L.A.; WEAVER, L. R. Fifteen– atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**. v. 56, pp. 331-340, 1944.

RICHARDS, L.A.; WALDLEIGH, C.H. Soil water and plant growth. Soil physical conditions and plant growth. Madison: ASA, 31p. 1952.

RITCHIE, J.T. Soil water availability. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 58, p. 327-338, 1981.

RIVERS, E.D.; SHIPP, R.F. Soil water retention as related to particle size in selected sands and loamy sands. *Soil Science*, v.126, pp.94-100, 1978.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: Field. In: Dane, J. H ; Topp, C. (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002.p.721-38. 2002

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

RUSSELL, M. B. *Pore size distribution as a measure of soil structure*. **The Soil Science Society of America**. Proc. 6:108-112. 1941.

SÁ, P. C. C.; VALE, C. N. C.; MAIA, C. E.; LEVIEN, L. A. Índice S de área sob a curva de retenção de água para avaliar qualidade física do solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, n. 2, p. 110-114, 2010.

SALVESTRO, A. C.; FREITAS, P. S.; REZENDE, R.; DALLACORT, R.; VIEIRA, C. V. Permanent wilting point of bean cultivated in Dystric Nitosols and Rhodic Ferralsols. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(1), 462-466. 2012.

SANTOS NASCIMENTO, P.; BASSOI, L. H.; SILVA PAZ, V. P.; VAZ, C. M. P.; MENDONÇA NAIME, J. Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. **Irriga**, 15(2), 193. 2010

SANTOS, E. E. F.; RIBEIRO, M. R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um Latossolo e um Argissolo da região do submédio São Francisco: Atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24(4), 875-884. 2000.

SANTOS, W. J. R. **Funções de Pedotransferencia para solos do RioGrande do Sul; mapeamento de solos e caracterização morfométrica de microbacia hidrográfica piloto nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo**. 115p, Dissertação (Mestrado em Ciencia do Solo) Lavras, MG: UFLA, 2012.

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.

SECCO D.; REINERT D. J; REICHERT J.M.; SILVA V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, 39:58-64, 2009

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

SILVA ÁLVARO, M. A. S.; ALBUQUERQUE, L. M. J. A.; MIELNICZUK, C. B. J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, 35(3). 2005.

SILVA FREDDI, O.; BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; LEONE, C. L. Densidade do solo relativa e parâmetro " S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, 8(2), 27-36. 2008

SILVA, A. D.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21(4), 677-684. 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **The Soil Science Society of America**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, B. M.; SILVA, É. A. D.; OLIVEIRA, G. C. D.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38 (2), 464-475. 2014.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 37(10), 1487-1494. 2002

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**. 12:258-265, 2008.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F.; JÚNIOR, J. A.; SILVA, J. G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, 24(3). 2008.

SOARES, F. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; RUSSI, J. L.; VIVAN, G. A. Redes neurais artificiais na estimativa da retenção de água do solo. **Ciência Rural**, 44(2), 293-300. 2014.

SOLONE, R.; BITTELLI, M.; TOMEI, F.; MORARI, F. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. **Jornal Hydrology**, 470/471:65-74, 2012.

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, I. F.; NETO, M. S. A. Avaliação de métodos de determinação de água disponível em solo cultivado com algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, pp. 337-341, 2002.

SOUZA, L. D.; REICHARDT, K. Estimativas da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 183-189, 1996.

SUZUKI L. E. A. S.; REINERT D. J.; REICHERT J. M.; LIMA C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:963-73.2008

SYKES, D. J.; LOOMIS, W. E. Plant and soil factors in permanent wilting percentages and field capacity storage. *Soil Science*, v. 104, p. 162-173, 1969.

TABACHNICK, B.; FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics**. 1996. (3a ed.). New York: Harper Collins

TABOADA CASTRO, M. M. **Morfología de superficies cultivadas: En relación con la infiltración, la formación del excedente de agua y la erosión**, Tesis Doctoral 2001. UDC, 2001. 541p. 2001.

TAVARES, M. H. F.; FELICIANO, J. J. DA S.; VAZ, C. M. P. Análise comparativa de métodos para a determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 417-524, 2008.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**. 163:190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y. A.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**, 67(4), 1085-1092. 2003.

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

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 26, 305-314. 2002

TORMENA, C.A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 22, pp. 573-581, 1998.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. 2. Ed. São Carlos: Rima. 248 p. 2005

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. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de água e solo) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2007.

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.55, p.225-45, 1992

van den BERG, M.; KLAMT, E.; van REEUWIJK, L. P.; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, 78(3), 161-180. 1997.

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, 44:892-898, 1980

VASCONCELOS, R. D.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. D.; COSTA, Y. D.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34(2), 309-316. 2010.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, 68:75-95, 1949.

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

VEIHMEYER, V.; ISRAELSEN, O.W. CONRAD, J. P. The moisture equivalent as influenced by the amount of soil used in its determination. University California Coliege of Agriculture. Technical Paper, 16, 1924

VETTORI, L. **Métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 34p, 1969.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira Ciencia do Solo**, 31, 1271-1280. 2007.

WAGNER, B.; TARNAWSKI, V.R.; HENNINGS, V.; MÜLLER, U.; WESSOLEK, G. PLAGGE, R. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. **Geoderma**, v.102, p. 275-297, 2001.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v .90, n..5, p. 8995-9005, 1985.

WINTER, E.J. **A água, o solo e a planta**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1976, 170p.

WÖSTEN, J. H. M.; van GENUCHTEN, M. TH. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.1762-1770, 1988.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Ya A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of hydrology**, v. 251, n. 3, p. 123-150, 2001.

WUTKE, E. B.; ARRUDA, F. B.; FANCELLI, A. L.; PEREIRA, J. C. N. A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G.M.B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 621-633, 2000.