



**HERBERT MORAES MOREIRA RAMOS**

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA  
DA DENSIDADE E ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE  
SOLOS DO ESTADO DO PIAUÍ**

**TERESINA – PI**

**2017**



**HERBERT MORAES MOREIRA RAMOS**

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DA DENSIDADE E  
ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS DO ESTADO DO PIAUÍ**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

**Orientador:** Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares

**Co-orientador:** Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior

**TERESINA – PI**

**2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Serviço de Processamento Técnico da Universidade Federal do Piauí  
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco

R175f Ramos, Herbert Moraes Moreira.  
Funções de pedotransferência para estimativa da  
densidade e atributos físico-hídricos de solos do estado  
do Piauí / Herbert Moraes Moreira Ramos. – 2017.  
50 f.

Tese (Doutorado em Agronomia-Agricultura Tropical)  
– Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.  
“Orientador: Prof. Dr. Gustavo Souza Souza”.  
Coorientador: Prof. Dr. Anderson Soares de Andrade  
Júnior”.

1. Pedometria. 2. Água no solo. 3. Regressão linear  
múltipla. I. Título.

CDD 631.42

HERBERT MORAES MOREIRA RAMOS

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DA  
DENSIDADE E ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS  
DO ESTADO DO PIAUÍ

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

APROVADA em 20 de dezembro de 2017.

Comissão Julgadora:



Dr. Alexandre Hugo Cezar Barros – Embrapa Solos



Dr. Francisco de Brito Melo – Embrapa Meio-Norte



Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho – CTT/UFPI



Prof. Dr. Luís Alfredo Pinheiro Leal Nunes – CCA/UFPI



Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares – CCHL/UFPI  
(Orientador)



Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior – Embrapa Meio-Norte  
(Coorientador)

TERESINA-PI

2017

Aos meus queridos pais, Pedro Moreira Ramos e Maria do Socorro Moraes Ramos.

Aos meus irmãos, Maria das Graças Moraes Moreira Ramos, Valbert Moraes

Moreira Ramos e Maria de Fátima Rodrigues Barbosa.

Pelo carinho, apoio, pela motivação e compreensão em todos os momentos da  
minha vida.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo amor, esperança, fé, força, conquistas e presença constante em minha vida e que me deu forças para transpor mais esta etapa da vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal do Piauí, pelo apoio e oportunidade.

À CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos meus pais Pedro Moreira Ramos e Maria do Socorro Moraes Ramos, pelo apoio, compreensão e amor.

Aos meus irmãos: Maria das Graças, Valbert, Fátima e ao cunhado Paulo Henrique pelo apoio.

Ao Professor Dr. Gustavo Souza Valladares pela orientação, compreensão, pelos ensinamentos e oportunidades.

Ao Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior pela coorientação, colaboração, oportunidades, companheirismo, incentivo, conselhos e amizade.

Ao Professor Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho, pelo apoio e ensinamentos científicos.

À Embrapa Meio-Norte, pela disponibilização de sua estrutura física para a realização do trabalho.

Ao Colégio Técnico de Teresina, pela disponibilização do laboratório de física do solo para a realização do trabalho.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Agronomia, pelos ensinamentos científicos.

À pesquisadora Dr. Rosa Maria Cardoso Mota de Alcântara e ao Professor Prof. Ms. José Bento de Carvalho Reis pela ajuda na realização desse trabalho.

Aos técnicos do laboratório de solo e água da Embrapa Meio-Norte, José Afonso Lima de Abreu e José Moreira Fernandes, pela colaboração e ensinamentos.

Aos amigos doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agenor Francisco Rocha Junior, Fábio N. do Nascimento, Carlos Humberto Aires Matos Filho, Ricardo Silva de Sousa, João Rodrigues da Cunha, Gilson Lages Fortes Portela, José Edmir Girão Filho e Marinete Martins de Sousa Monteiro, pelo apoio nos momentos de dificuldades.

Meus eternos agradecimentos.

“Ignorar as leis que regem nosso planeta é atentar contra a própria vida. Somente uma espécie sem consciência para poluir a água que bebe, o ar que respira e o solo que o sustenta.”  
(Paulo Ursai)

## RESUMO

Conduziu-se esse trabalho com o objetivo de verificar se modelos de função de pedotransferência, baseados em atributos do solo, são alternativas às medições laboriosas dos atributos físico-hídricos (densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível) para solos no Estado do Piauí. Amostras de solo foram coletadas em quarenta e dois perfis de solo no Estado do Piauí, em cada solo foram coletadas amostras com estrutura deformada e indeformada, nas profundidades de: 0 a 20; 20 a 40; e 40 a 60 cm, em minitrincheiras. Os atributos do solo determinados foram: análise granulométrica (teor de argila, silte, areia fina, areia grossa e total de areia), densidade do solo, os teores de carbono orgânico total, fósforo, cálcio, magnésio, sódio, potássio, alumínio, acidez potencial, nitrogênio, soma de bases, CTC efetiva, CTC a pH 7,0, CTC da argila e saturação por bases. Foram determinados ainda, a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível. As classes de solos selecionadas para esse trabalho foram: Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Amarelo, Plintossolo Argilúvico, Plintossolo Háplico, Cambissolo Háplico, Chernossolo Háplico, Planossolo Nátrico e Neossolo Quartzarênico. Para se obter as funções de pedotransferência utilizou-se análise de regressão linear múltipla. Um procedimento “forward stepwise” foi utilizado para análise exploratória na seleção de variáveis preditoras. Foram elaboradas funções de pedotransferência para todas as classes de solo determinadas e todos os dados foram agrupados. Foram gerados dois modelos de função de pedotransferência: 1) incluindo todos os dados dos atributos determinados e 2) apenas a análise granulométrica e carbono orgânico total. A densidade do solo variou entre 1,1 e 1,9  $\text{Mg m}^{-3}$  com média de 1,4  $\text{Mg m}^{-3}$ , a capacidade de campo variou entre 0,18 e 0,58 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) com média de 0,34 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), o ponto de murcha permanente variou entre 0,06 e 0,42 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) com média de 0,15 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e a água disponível variou entre 0,05 e 0,29 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) com média de 0,19 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ). Os atributos físico-hídricos podem ser estimados com razoável precisão, a partir dos atributos físicos e químicos dos solos de fácil mensuração em solos no Estado do Piauí.

**Palavras-Chave:** Pedometria, água no solo, regressão linear múltipla



## ABSTRACT

The objective of this study was to verify if soil-based pedotransfer function models are alternatives to the labor-intensive measurements of the physical-water attributes (soil density, field capacity, permanent wilting point and available water), for soils in the State of Piauí. Soil samples were collected in forty - two soil profiles in the State of Piauí, in each soil were sampled with deformed and undisturbed structure, in the depths of: 0 to 20; 20 to 40; and 40 to 60 cm, in mini-trenches. The soil attributes determined were: granulometric analysis (clay content, silt, fine sand, coarse sand and total sand), soil density, total organic carbon, phosphorus, calcium, magnesium, sodium, potassium, aluminum, potential acidity, nitrogen, base sum, effective CTC, CTC at pH 7.0, clay CTC and base saturation. Field capacity, permanent wilting point and available water were also determined. The soil classes selected for this work were: Yellow Latosol, Red Yellow Latosol, Red Yellow Latosol, Yellow Latosol, Argilúvico Plinthosol, Hapless Plinthosol, Haplic Cambisol, Haplic Chernosol, Nátrico Planosol and Quartzarênicos Neosol. In order to obtain the pedotransfer functions, multiple linear regression analysis was used. A forward stepwise procedure was used for exploratory analysis in the selection of predictor variables. Pedotransfer functions were developed for all the determined soil classes and all data was grouped. Two models of pedotransfer function were generated: 1) including all the data of the determined attributes and 2) only the particle size analysis and total organic carbon. The soil density varied between 1.1 and 1.9 Mg m<sup>-3</sup> with a mean of 1.4 Mg m<sup>-3</sup>, the field capacity varied between 0.18 and 0.58 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) with a mean of 0.34 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), the permanent wilting point ranged from 0.06 to 0.42 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) with a mean of 0.15 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) and the available water ranged from 0, 05 and 0.29 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) with a mean of 0.19 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>). The physical-hydrological attributes can be estimated with reasonable precision, from the physical and chemical attributes of the soil of easy measurement in soils in the State of Piauí.

**Key words:** Pedometry, soil water, multiple linear regression

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Valores orientativos dos conteúdos de água do solo na saturação ( $\theta_{sat}$ ), na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e disponibilidade total de água (DTA). .....	18
<b>Tabela 2.</b> Número e percentagem de perfis por classes de solos selecionados....	25
<b>Tabela 3.</b> Número de dados utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de Pedotransferência.....	27
<b>Tabela 4.</b> Classificação dos índices de desempenho conforme Camargo e Sentelhas.....	29
<b>Tabela 5.</b> Estatística descritiva das variáveis utilizadas para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência considerando todas as classes de solo.....	30
<b>Tabela 6.</b> Estatística descritiva das variáveis da densidade do solo, capacidade do campo, ponto de murcha permanente e água disponível, por classes de solo.....	32
<b>Tabela 7.</b> Matriz de correlação entre os atributos do solo e a densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível, para o desenvolvimento das funções de pedotransferência.....	32
<b>Tabela 8.</b> Funções de pedotransferência e seus respectivos índices de regressão por classe de solo e agrupado todos os dados (Geral), para modelos I (todos os atributos do solo e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total) .....	35
<b>Tabela 9.</b> Avaliação do desempenho dos modelos de regressão, os indicadores estatísticos e o índice de confiança para todos os solos (Geral) e por classe de solo para estimativa da densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível.....	36
<b>Tabela 10.</b> Classificação, localização e coordenadas geográficas dos perfis da minitrincheiras da área onde as amostras dos solos foram coletadas para geração das funções de pedotransferência.	

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização das minitrincheiras abertas para amostragem de solo e isoietas pluviométricas da área de estudo (Estado do Piauí) (Fonte: CPRM, 2011) .....	24
<b>Figura 2.</b> Minitrincheiras abertas para amostragem de solo da área de estudo (Estado do Piauí) (Fonte: Herbert 2016) .....	25
<b>Figura 03.</b> Representação dos principais procedimentos para elaboração, avaliação e validação das funções de pedotransferência.....	27
<b>Figura 04.</b> Relação entre os valores medidos e estimados de $D_s$ , CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para todas as classes de solos (Geral), pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.....	38
<b>Figura 05.</b> Relação entre os valores medidos e estimados de $D_s$ , CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os latossolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.....	39
<b>Figura 06</b> Relação entre os valores medidos e estimados de $D_s$ , CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os Neossolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.....	40
<b>Figura 07.</b> Relação entre os valores medidos e estimados de $D_s$ , CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os Plintossolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.....	41
<b>Figura 08.</b> Relação entre os valores medidos e estimados de $D_s$ , CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os Argissolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.....	42

**SUMÁRIO**

<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 Objetivo geral .....	13
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
2.1 Água no solo.....	14
2.2 Atributos físico-hídricos .....	15
2.3 Funções de pedotransferência .....	19
2.4. Ajuste e validação de funções de pedotransferência .....	21
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	28
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	42
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	43
<b>APÊNDICE A</b> .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

O Estado do Piauí está situado entre a Pré-Amazônia Úmida e o Nordeste Semi-Árido do Brasil, constituindo-se em uma zona de transição climática, com características desses dois domínios geoambientais (ANDRADE JÚNIOR et al., 2005) e são identificadas duas características climáticas: tropical quente e úmido e semiárido. O clima tropical é predominante em grande parte do território estadual. O Estado do Piauí tem condições adequadas para o desenvolvimento agrícola (água, solos e clima) e destaca-se atualmente como um dos principais produtores e exportadores de diversos produtos agrícolas (MEDEIROS, 2017).

A agricultura é essencialmente dependente da água, isto a torna importante dentro dos estudos agronômicos no que se refere à dinâmica da água, e da mesma forma, dentro da área da Ciência do Solo (BORTOLINI, 2016). Compreender as variáveis que envolvem a água na zona vadosa do solo é de grande importância para o entendimento da dinâmica hídrica no ambiente. O conhecimento e o manejo adequados dos atributos físico-hídricos também são de fundamental importância para promoção de um desenvolvimento agropecuário sustentável. Esses possuem relação direta com a capacidade de armazenamento de água no solo e sua disponibilidade para as plantas. Portanto, é necessário conhecer os fatores que interferem nas relações existentes entre a água e o solo, de forma a explorar e manejar eficientemente estes recursos (RIBEIRO, 2005).

A determinação dos atributos físico-hídricos é trabalhosa e demorada (HENRIQUE et al, 2014), o que inviabiliza a análise de numerosos conjuntos de amostras, necessários para a simulação de balanço hídrico visando o zoneamento de riscos climáticos e do manejo da água e solo, como exemplo. Métodos de estimativa da capacidade de retenção de água e dos atributos físico-hídricos (densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível), baseados em parâmetros de fácil determinação e ou disponíveis em levantamentos de solos, têm despertado interesse da comunidade científica. Segundo Benites et al. (2007), a medição da densidade do solo é essencial para estimar a reserva de carbono do solo, entretanto, a amostragem de campo, especialmente em profundidades variadas e a medição direta da densidade requer trabalho intenso, demorado e, muitas vezes, torna-se impraticável.

As funções de pedotransferências (FPT) permitem que informações básicas de solo sejam transformadas em outras, de obtenção mais difícil e, geralmente, de custo

elevado. Barros et al. (2013) abordam que essas FPT auxiliam em diversos modelos de simulação, aplicados ao transporte de água, ar, energia térmica e solutos, a estabilidade da estrutura, compactação, resistência à penetração do sistema radicular, química e manejo do solo e, por fim, a agricultura de precisão.

Nas pesquisas mais frequentes, vários autores utilizaram FPT para estimar principalmente a capacidade de retenção de água, utilizando modelos de regressão que correlacionam variáveis físicas e químicas do solo, principalmente, a granulometria, a densidade do solo e a matéria orgânica (SOUZA et al., 2016), e FPT para estimativa da disponibilidade de água em solos em que utilizam a matéria orgânica, a argila, a argila somada ao silte e a areia para estimar a densidade do solo (BEUTLER et al., 2017; SOUZA et al., 2016; LIMA, 2016; BORTOLINI, 2016; SILVA et al., 2015; NASCIMENTO, 2015; PÁDUA et al., 2015; BARROS; FEARNSIDE, 2015; BOSCHI et al., 2014; RAMOS et al., 2014; SOUZA et al., 2014; MARCOLIN; KLEIN, 2011; BENITES et al., 2007). Porém, as FPT publicadas mostram grandes diferenças de desempenho quando aplicadas em outros ambientes que não aqueles em que foram ajustadas, assim, o mais seguro é utilizar uma FPT desenvolvida para dados da área de aplicação ou para uma área com solos de gênese semelhante (NEMES et al., 2010). No Estado do Piauí, existe uma grande carência de informações sobre os atributos físico-hídricos do solo, que são de fundamental importância para a agricultura irrigada e determinação do zoneamento agrícola, por exemplo.

Nesse sentido, conduziu-se esse trabalho com o objetivo de verificar se modelos de funções de pedotransferência baseados em atributos do solo, obtidos mais facilmente, são alternativas às medições laboriosas da densidade do solo e atributos físico-hídricos de solos do Estado do Piauí.

### **1.1. Objetivo geral**

Desenvolver modelos de funções de pedotransferência por meio de regressão linear múltipla para a estimativa da densidade do solo, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Água no solo

A água é um componente essencial para todos os seres vivos. Embora seja uma das mais simples substâncias químicas da natureza, possui propriedades únicas que promovem uma ampla variedade de processos físicos, químicos e biológicos, estes processos influenciam consideravelmente em quase todos os aspectos do desenvolvimento e comportamento do solo, desde o intemperismo dos minerais à decomposição da matéria orgânica e, do crescimento das plantas à contaminação do lençol freático (LIBARDI, 2005).

O solo representa um importante papel no ciclo da água na natureza, por ser importante reservatório e, sobretudo é o responsável pela disponibilidade de água às plantas e pelo abastecimento de cursos hídricos. A armazenagem e movimentação de água no solo é resultado da interação das características do solo, portanto, em todos os cultivos agrícolas é necessário conhecer as características do solo no qual estes serão implantados, pois, cada ambiente possui características específicas de solo e assim, capacidade de armazenamento e disponibilidade de água distintas (BORTOLINI, 2016).

A água é retida no solo devido a fenômenos de capilaridade e de adsorção. A capilaridade está ligada à afinidade entre partículas sólidas e a água, tendo a necessidade da presença de interfaces água-ar para ocorrer. As interfaces água-ar são chamadas de meniscos, e a curvatura destes varia dependendo do tamanho do poro, quanto menor o poro, tanto mais retida se encontra a água. Como o solo possui uma variedade grande de poros tanto em forma como em diâmetro, aplicando uma energia determinada, esvaziam-se primeiro os poros maiores e, à medida que se aumenta a energia, esvaziam-se os poros menores. É importante considerar que a capilaridade atua na retenção de água nos solos na faixa úmida, enquanto que a adsorção, na faixa mais seca (REICHARDT; TIMM, 2004).

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

A avaliação do processo da redistribuição da água no solo, em condições de campo, demanda considerável tempo e apreciável custo, porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e estão sujeitas a frequentes alterações no tempo (LOYOLA; PREVEDELLO, 2003).

## 2.2 Atributos físico-hídricos

A densidade do Solo ( $D_s$ ) também conhecida como densidade global (bulk density) ou massa específica aparente seca ou ainda, densidade do meio seco, expressa a relação da massa de uma amostra seca a 105°C por unidade de volume de solo (KLEIN, 2008).

A  $D_s$  é uma das características importantes na avaliação dos solos. Esta característica está associada à estrutura, à densidade das partículas e à porosidade do solo, podendo ser usada como indicadora de processos de degradação da estrutura do solo, que pode ser alterada em função do uso e do manejo do solo.

A  $D_s$  tem relação com textura do solo (BUENO; VILAR, 1998; REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 2005; BRADY; WEIL, 2008), solos arenosos apresentam densidade superior ao solo argiloso, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A  $D_s$  nos solos arenosos pode variar de 1,3 a 1,8  $\text{Mg m}^{-3}$ , enquanto que nos solos argilosos esta variação pode ir de 0,9 a 1,6  $\text{Mg m}^{-3}$  e para solos orgânicos de 0,2 a 0,6  $\text{Mg m}^{-3}$ .

Existem inúmeros métodos de estimativa da  $D_s$  que podem ser agrupados em métodos destrutivos e não destrutivos. Os métodos destrutivos são aqueles que dependem da retirada de uma amostra representativa do solo, deve se apresentar com o mínimo possível de perturbação, ou seja, deve refletir o solo como ele se apresenta na sua condição natural, pode-se citar como método destrutivos o do anel ou cilindro volumétrico (cilindro de Uhland) e o método do torrão impermeabilizado. Os métodos não destrutivos determinam os valores de  $D_s$  no próprio campo ou através de métodos indiretos envolvendo o uso de FPT (COELHO et al., 1998).

Apesar da  $D_s$  advir da razão entre massa e volume, é fato que existe dificuldade em se obter informações seguras sobre a densidade em diferentes classes de solo, o que vem estimulando a obtenção de muitas predições da  $D_s$  utilizando relações entre esse parâmetro e outras variáveis mais comumente disponíveis em inventários pedológicos (BARROS; FEARNSSIDE, 2015).



O conceito de capacidade de campo pressupõe condições de umidade estática e representa um ponto de equilíbrio com relação ao conteúdo de água na drenagem interna do solo, entretanto, por razões práticas, esse conceito, ainda que impreciso, é muito útil na gestão da água do solo. Portanto, a capacidade de campo é o índice de umidade que determinado solo alcança e mantém, logo após ser inundado (ou fartamente irrigado) e deixado drenar livremente, sem a extração, por meio da evapotranspiração, ou seja, é o limite superior do índice de umidade que um solo pode sustentar quando todos os macroporos ou poros de transmissão forem drenados. Solos de textura arenosa adaptam-se ao conceito proposto de capacidade de campo com mais exatidão, pois a condutividade hidráulica não saturada decresce mais intensamente em relação aos solos de textura mais fina, com a diminuição da umidade do solo a partir da umidade de saturação, tornando o fluxo muito pequeno rapidamente, em questão de poucas horas. Essa umidade na capacidade de campo, supostamente agora não mais passível de ser drenada, corresponderia, então, ao limite superior de umidade disponível no solo para uso vegetal.

A estimativa da CC por meio da umidade associada a um determinado potencial matricial, apesar das limitações (REICHARDT, 1988; VAN LIER, 2000), tem uso consolidado na literatura, justificado pela facilidade e menor tempo para determinação em laboratório. Estudos clássicos, em países de clima temperado, têm associado a CC à umidade retida no potencial matricial da água no solo de -33 kPa (1/3 bar) para solos argilosos, e de -10 kPa para solos arenosos.

Estudos realizados para solos brasileiros têm mostrado que esses potenciais não se aplicam da mesma forma, isto é, Latossolos argilosos, principalmente oxidícos, têm mostrado melhor correlação para -10 kPa ou -6 kPa (REICHARDT, 1988; ANDRADE; STONE, 2011). Nesses casos, o critério clássico do potencial matricial de -33 kPa deve ser levado para potenciais maiores, de -10 a -6 kPa.

O ponto de murcha permanente foi definido, originalmente, como sendo o teor de umidade do solo em que a planta murcha e não consegue retornar a sua turgescência natural quando colocada a uma atmosfera saturada de vapor durante 12 horas (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949). Seria conceitualmente a umidade residual ou o limite inferior de água no solo onde a turgidez da planta é irreversível (TAIZ; ZEIGE, citados por BEZERRA et al., 1985).

Quando a tensão de água no solo se torna alta, a planta é incapaz de absorver a água remanescente no solo em quantidades suficientes para atender sua demanda

evapotranspirativa, resultando no murchamento permanente (EVANS et al., 1996). Portanto, esse limite do teor de umidade, onde a máxima sucção exercida pela raiz da planta é incapaz de suprir a demanda hídrica mínima de sobrevivência vegetal, é atingido pelo efeito integrado das condições de planta e atmosféricas (BOEDT; VERHEYE, 1985). Mesmo com essas considerações, o teor de umidade no ponto de murcha permanente é comumente considerado como uma característica estática do solo (REICHARDT, 1988).

Considera-se que a tensão associada à umidade no ponto de murcha permanente seja a de -1500 kPa, sendo a mesma empregada como um método físico e indireto para a determinação dessa variável hídrica do solo (SILVA et al., 1994; SOUZA et al., 2002; REICHARDT; TIMM, 2004). O ponto de murcha permanente é obtido pela remoção da umidade de amostras preferencialmente indeformadas do solo em câmaras de pressão, sendo este o protocolo mais utilizado na sua determinação.

O conceito de AD é tido como aquela contida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente e é indispensável para o correto manejo da água e orientação de projetos de irrigação (REICHARDT; TIMM, 2004). Definiram-se, portanto, como limite superior e inferior, a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), respectivamente.

A determinação da capacidade de campo e o ponto de murcha permanente pode ser realizada de forma tradicional, em laboratório, utilizando amostras não deformadas ou deformadas de solo fazendo uso da clássica metodologia da mesa de tensão ou câmaras de pressão (RICHARDS, 1965).

Estes parâmetros permitem estabelecer a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potenciais matriciais, interpretando as características do armazenamento de água. Dentre os fatores que afetam a retenção da água em um solo estão o teor de matéria orgânica, a textura do solo e a mineralogia da fração argila, pois estas determinam a área e a intensidade de contato entre as partículas sólidas e a solução do solo, bem como as proporções de poros de diferentes tamanhos (BRADY; WEIL, 2008).

A técnica mais usada para determinar a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente é o princípio da câmara proposta por Richards (1965), que corresponde a uma câmara de pressão hermeticamente fechada. Esta câmara possui internamente uma placa porosa, onde é permitido, a partir do tamanho dos poros, dentro de certos limites, somente o fluxo de água e não o de ar. A placa conhecida

como placa de alta pressão de entrada de ar é o elemento chave para o controle do potencial matricial da água neste equipamento. Com esta técnica é possível determinar a retenção de água no solo em amostras de estrutura não deformadas e deformadas (URACH, 2007).

As limitações inerentes aos métodos convencionais se devem à elevada ocupação de espaço físico nos laboratórios, à forte dependência da habilidade da pessoa responsável por operar os equipamentos e ao elevado tempo necessário para determinação da curva de retenção (SOARES, 2013). Além disso, problemas como custo, morosidade e inexatidão, ainda persistem (OLIVEIRA et al., 2002). Diante deste cenário, surge um crescente interesse pelo estabelecimento de métodos indiretos como as FPT para estimar a CC, PMP e AD.

Na literatura são encontradas algumas FPT para estimativa da disponibilidade de água em solos (LIMA, 2016; BORTOLINI, 2016; SILVA et al., 2015; NASCIMENTO, 2015; BOSCHI et al., 2014; RAMOS et al., 2014; SOUZA et al., 2014).

Na Tabela 1 são apresentados valores orientativos para umidades de saturação de solos, CC, PMP e disponibilidade total de água, que podem ser utilizados na ausência de informações locais (PEREIRA et al., 2010).

**Tabela 1** – Valores orientativos dos conteúdos de água do solo na saturação ( $\theta_{sat}$ ), na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e disponibilidade total de água (DTA).

Textura do solo	Conteúdos de água			DTA mm m <sup>-1</sup>
	$\theta_{sat}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_{cc}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_{PMP}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	
Arenoso	0,32 – 0,42	0,10 – 0,15	0,03 – 0,06	60 – 70
Areia franca	0,32 – 0,47	0,12 – 0,19	0,05 – 0,10	70 – 90
Franco arenosa	0,34 – 0,51	0,17 – 0,26	0,06 – 0,13	110 – 130
Franco	0,42 – 0,51	0,22 – 0,31	0,09 – 0,16	130 – 150
Franco siltoso	0,42 – 0,55	0,23 – 0,34	0,08 – 0,15	150 – 190
Siltoso	0,42 – 0,55	0,30 – 0,33	0,10 – 0,11	200 – 220
Franco argilo siltoso	0,40 – 0,49	0,20 – 0,30	0,12 – 0,18	80 – 120
Franco argiloso	0,47 – 0,51	0,28 – 0,38	0,16 – 0,22	120 – 160
Franco argilo arenoso	0,49 – 0,53	0,32 – 0,40	0,16 – 0,22	160 – 180
Argilo arenoso	0,47 – 0,53	0,28 – 0,40	0,19 – 0,30	90 – 100
Argilo siltoso	0,49 – 0,55	0,38 – 0,50	0,23 – 0,34	150 – 160
Argiloso	0,51 – 0,58	0,40 – 0,55	0,30 – 0,42	100 – 130

Fonte: Pereira et al. (2010).

### 2.3 Funções de pedotransferência

A expressão “função de pedotransferência” (FPT) foi introduzida por Bouma (1989) para padronizar outros termos anteriormente utilizados com a mesma finalidade e com o significado de “transformar dados que possuímos em dados que necessitamos”. Funções de pedotransferência podem ser definidas como funções utilizadas para fazer estimativas de propriedades dos solos a partir de outras propriedades medidas rotineiramente com maior facilidade e menor custo (MCBRATNEY et al., 2002). Essas funções surgiram no estágio inicial do desenvolvimento da ciência quantitativa do solo, numa tentativa de estimar algumas propriedades do solo a partir de outras, e quando se tornou mais claro que todas as propriedades e processos estão relacionados e que algumas dessas propriedades determinam outras (SHEIN; ARKHANGEL'SKAYA, 2006).

Atualmente, as FPT são largamente utilizadas na ciência do solo, hidrologia e agrometeorologia para estimar a condutividade hidráulica, curva de retenção e parâmetros relacionados à infiltração. Diversos modelos utilizam essas funções para simular o transporte de água, de ar e de solutos, regimes de temperatura dos solos e da planta, manejo, compactação, estabilidade da estrutura e resistência à penetração mecânica, química do solo e agricultura de precisão (BARROS, 2010).

Determinar diretamente a condutividade hidráulica, a CC, o PMP e a curva característica de retenção de água no solo é um trabalho oneroso e demorado (HENRIQUE et al., 2014). Mesmo nos métodos conduzidos em laboratórios, com menores erros sistemáticos, persistem problemas de morosidade, custo e inexatidão. Na literatura predominam trabalhos que apresentam FPT para a condutividade hidráulica saturada e não saturada, bem como para a curva de retenção de água no solo (BARROS, 2010).

Há uma predominância de trabalhos que apresentam FPT para solos de regiões de clima temperado (WÖSTEN et al., 2001), os quais apresentam diferenças importantes em relação aos solos tropicais (TOMASELLA; HODNETT, 2004).

No Brasil, os primeiros trabalhos desenvolvidos sobre FPT datam da década de 1980, principalmente no estado de São Paulo. Em pesquisas recentes diversos autores (BEUTLER et al., 2017; SOUZA et al., 2016; LIMA, 2016; BORTOLINI, 2016; SILVA et al., 2015; PÁDUA et al., 2015; BARROS; FEARNSSIDE, 2015; BOSCHI et al., 2014; RAMOS et al., 2014; DE SOUZA et al., 2014; MARCOLIN; KLEIN, 2011) utilizaram FPT para estimar principalmente a disponibilidade de água e atributos

físicos, utilizando modelos de regressão que correlacionam variáveis físicas e químicas do solo, principalmente, textura, densidade do solo e matéria orgânica. Segundo Vereecken et al. (2010), no desenvolvimento de FPT para a estimativa da disponibilidade de água, dados de granulometria constituem a principal variável de entrada utilizada nessas equações.

Na Região Nordeste do Brasil, as primeiras equações para solos do semiárido foram apresentadas por Silva et al. (1990), através de um modelo matemático sequencial, simulou os principais parâmetros físico-hídricos do solo. Em Pernambuco, Oliveira et al. (2002) desenvolveram FPT para prognóstico do teor de água do solo na CC e no PMP a partir de dados granulométricos e de  $D_s$  e Nascimento (2015), desenvolveu funções de pedotransferência para estimar o conteúdo de água no solo a partir das frações granulométricas (areia, silte e argila),  $D_s$  e teor de carbono orgânico em solos cultivados com cana-de-açúcar na zona da mata norte.

No Estado do Piauí, são escassas as referências sobre pedotransferência, e existe uma grande carência de informações a respeito dos atributos físicos do solo e sobre a disponibilidade de água em solos.

No Brasil a pedotransferência é um assunto relativamente novo e uma ferramenta pouco desenvolvida e testada. O uso mais frequente de FPT é limitado à estimativa da CC e PMP, muitos dos quais para sistemas de irrigação, balanços hídricos simplificados, monitoramento e previsão meteorológica (ROSSATO, 2001).

Os principais métodos de estimativa da retenção de água no solo por meio de FPT são: 1) métodos de regressão por potencial matricial; 2) métodos do modelo físico; 3) métodos de regressão por parâmetro (SOARES, 2013).

A técnica de estimativa por potenciais matriciais permite relacionar potenciais específicos (-6, -10 e -1500 kPa) a um determinado teor de água em função da propriedade do solo. Embora este procedimento seja muito usado, sua limitação está no fato de não permitir o conhecimento da curva de retenção inteira. A técnica é utilizada, por exemplo, para se estimar o teor de água na CC e no PMP e, sua vantagem reside na simplicidade, quanto as técnicas de regressão relativamente simples a serem aplicadas (COSTA, 2012).

O método do modelo físico inclui esquemas de Arya e Paris (1981), que consiste em três passos: 1) a distribuição dos raios dos poros é estimada a partir da distribuição do tamanho das partículas; 2) o conteúdo de água é estimado a partir da distribuição do tamanho das partículas via equação da conservação de massa; 3) os

potenciais matriciais são estimados com base na distribuição dos raios dos poros por meio da equação de capilaridade.

No método de regressão por parâmetro, descreve-se a retenção de água (CC e PMP) no solo por uma equação empírica. Conforme Tietje e Tapkenhinrichs (1993), a vantagem de se utilizar a regressão múltipla é que as características com menor peso podem ser excluídas, utilizando técnica “stepwise” e “backward elimination”, diminuindo as variáveis independentes e evitando problemas de multicolinearidade. A FPT paramétrica prediz a relação entre uma variável dependente ( $y$ ) e variáveis independentes ( $x$ ) (NASCIMENTO, 2015).

O método de regressão stepwise é o mais utilizado no contexto para geração de FPT e trata-se de um procedimento padrão para seleção de variáveis que combina dois outros membros, o “forward selection” e “backward elimination”. O algoritmo progressivamente adiciona novas variáveis ao modelo, iniciando daquela com maior correlação com a resposta, como no método forward selection e incorpora um mecanismo de eliminação de variáveis igual ao método de backward elimination. O forward selection é um método iterativo que começa com uma variável ( $x$ ) e, progressivamente, adiciona mais variáveis ao modelo de regressão até que um critério de parada seja feito. A variável inicial deve apresentar máxima correlação com a variável de resposta ( $y$ ). A cada interação, um novo modelo é construído e o efeito da variável incluída é avaliado pelo test-F. A variável com o valor de F maior do que um F-crítico é incluída no modelo (SOARES, 2013; NASCIMENTO, 2015).

#### **2.4 Ajuste e validação de funções de pedotransferência**

Na validação de um modelo, o objetivo principal é aumentar a confiança acerca de sua precisão (DONATELLI et al., 2004), uma vez que um dos princípios da validação se refere à impossibilidade de realização de todos os testes para uma “validação completa” (BALCI, 1997). Para o aumento da confiabilidade, não somente a acurácia deve ser avaliada, mas também outras características que podem afetar a aplicação do modelo.

Dada a dificuldade de obtenção de bases de dados representativas, o desenvolvimento, a calibração e a avaliação de FPT podem conduzir a resultados arbitrários, portanto, cabe ao usuário a decisão de qual FPT é mais adequada para determinada aplicação. Isto implica na necessidade de avaliar as FPT utilizando

diferentes critérios com o objetivo de melhorar a confiança na utilização destas funções (BOSCHI, 2014).

Na avaliação de FPT, frequentemente busca-se a correspondência entre os valores estimados e os medidos. Uma abordagem que vem sendo aplicada é a avaliação das incertezas em um contexto de uma aplicação específica, após a incorporação das FPT em outros modelos; trata-se de uma avaliação funcional (VERECKEN et al., 1992; WOSTEN et al., 2004; BARROS, 2010).

A acurácia da FPT é obtida por meio da comparação dos valores observados com os estimados, no mesmo conjunto de dados utilizado no desenvolvimento da função. Na análise da confiança, os valores observados são diferentes daqueles utilizados para a sua geração (WÖSTEN et al., 2001).

Existe uma grande diversidade de estatísticas para avaliar tanto a acurácia quanto a confiança (PACHEPSKY et al., 1999). No entanto, conforme ressaltado por Donatelli et al. (2004), normalmente, apenas um número limitado de testes é realizado, devido à limitação de tempo e de recursos. Outro fator é a aceitação por parte dos usuários de diferentes limiares de confiança, de acordo com a aplicação do modelo, o que leva a um menor ou maior número de testes exigidos. Como regra geral, quanto maior o número de testes que não demonstram ineficiência de um modelo, maior a confiança na sua utilização.

Nemes et al. (2010) reavaliaram a FPT desenvolvida por Rawls et al. (1982) e verificaram que os erros não foram distribuídos de forma aleatória, mas correlacionados com as variáveis, especialmente com a matéria orgânica ( $R^2 = 0,32$ ). Os autores corrigiram este problema com a transformação dos dados (matéria orgânica em carbono orgânico), e utilizaram a técnica do *k*-vizinhos mais próximo como uma alternativa para geração da FPT.

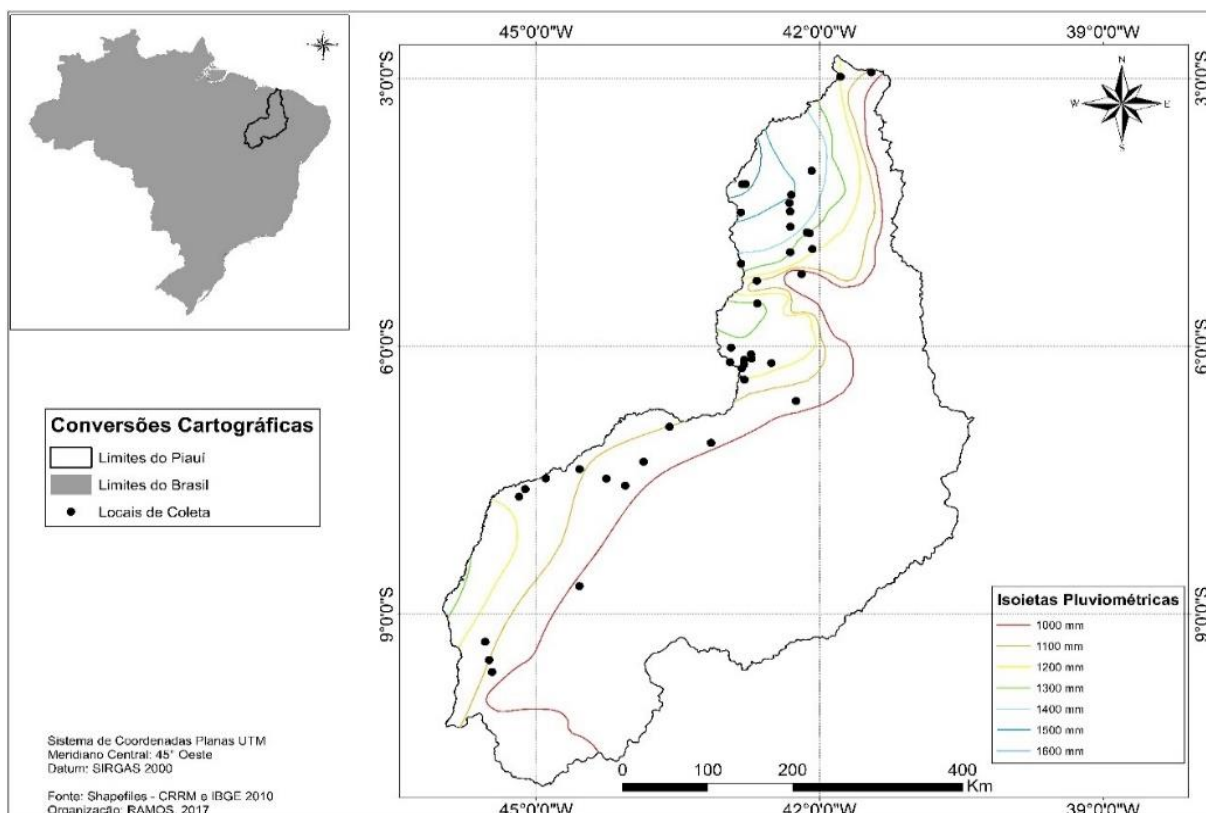
A elevada dependência da FPT em relação ao conjunto de dados utilizados na sua geração, associada à falta de métodos e de estudos que identifiquem de forma mais específica suas limitações, constituem um dos principais problemas que dificultam o uso destas funções. De acordo com McBratney et al. (2002), embora exista um grande número de FPT e um esforço contínuo para geração de novas funções, seja a partir de conjuntos de dados já explorados, ou mesmo a partir de dados novos, são raras as iniciativas na tentativa de utilização das funções já existentes. Dessa forma, nota-se uma grande necessidade de estudos que busquem identificar, de forma mais específica, as limitações de FPT, com o objetivo de fornecer

suporte para seleção da melhor FPT, ou do melhor conjunto de FPT, de acordo com as características de determinado conjunto de dados.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras de solo em quarenta e dois (42) perfis no Estado do Piauí em áreas de mata nativa. As áreas foram selecionadas em função da precipitação anual entre 1000 a 1600 mm de acordo com o mapa de isoietas de precipitações médias anuais do Brasil (Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2011). A classificação climática da área de estudo segundo Köppen, é do tipo Aw<sup>n</sup> (tropical subúmido quente) (ANDRADE JÚNIOR et al., 2005).

Na Figura 1 estão apresentadas a localização dos perfis da minitrincheiras e as isoietas pluviométricas da área onde os solos foram coletados.



**Figura 1.** Localização dos perfis minitrincheiras abertas para amostragem de solo e isoietas pluviométricas da área de estudo (Estado do Piauí) (Fonte: CPRM, 2011).

Para caracterização do solo foram abertas minitrincheiras e coletadas amostras com estrutura deformada e indeformada, nas profundidades de: 0 a 0,2; 0,2 a 0,4; e 0,4 a 0,6 m (Figura 2).





**Figura 2.** Minitrincheiras abertas para amostragem de solo da área de estudo (Estado do Piauí) (Fonte: RAMOS, 2016).

As classes de solos selecionadas para esse trabalho foram: LATOSSOLO AMARELO (LA), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (LVA), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO (PVA), ARGISSOLO AMARELO (PA), ARGISSOLO ACINZENTADO (PAC), PLINTOSSOLO ARGILÚVICO (FT), PLINTOSSOLO HÁPLICO (FX), CAMBISSOLO HÁPLICO (CX), CHERNOSSOLO ARGILÚVICO (MT), CHERNOSSOLO HÁPICO (MX), PLANOSSOLOS HÁPLICO (SX), PLANOSSOLO NÁTRICO (SN) e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ). Essas classes representam os solos mais utilizados na agricultura de sequeiro no Estado do Piauí (JACOMINE, 1983). Na Tabela 2. são apresentados os números e percentagem de perfis por classes de solos.

**Tabela 2.** Número e percentagem de perfis por classes de solos selecionados.

CLASSES DE SOLO	Nº perfis	%
LATOSSOLO AMARELO (LA)	12	30
PLINTOSSOLO ARGILÚVICO (FT)	7	17
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO (PVA)	5	12
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ)	5	12
ARGISSOLO AMARELO (PA)	3	7
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (LVA)	2	5
CHERNOSSOLO HÁPICO (MX)	2	5
PLANOSSOLO HÁPLICO (SX)	1	5
ARGISSOLO ACINZENTADO (PAC)	1	2
PLINTOSSOLO HÁPLICO (FX)	1	2
CAMBISSOLO HÁPLICO (CX)	1	2
CHERNOSSOLO ARGILÚVICO (MT)	1	2
PLANOSSOLO NÁTRICO (SN)	1	2
<b>TOTAL</b>	<b>42</b>	<b>100</b>

Os atributos determinados foram: análise granulométrica (teor de argila, silte, areia fina, areia grossa e total de areia), densidade do solo ( $D_s$ ), teor de carbono orgânico total (COT), potencial hidrogeniônico (pH), fósforo (P), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ), sódio ( $Na^+$ ), potássio ( $K^+$ ), alumínio ( $Al^{3+}$ ), acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ), nitrogênio total (N), soma de bases (S), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC a pH 7,0), capacidade de troca

de cátions da fração argila (CTC da argila) e saturação por bases (V). As análises foram realizadas com o manual de métodos de análise de solo (Donagema et al., 2011) e os solos foram escolhidos baseados no mapa pedológico do Estado do Piauí (JACOMINE, 1983), foi realizado checagem de campo e aferidos de acordo com a granulometria e a análise química e física das amostras de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

Os atributos físicos-hídricos foram: a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), a água disponível (AD), resultante da diferença da umidade volumétrica do solo entre a CC e o PMP (Equação 01).

$$AD = (CC - PMP) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

AD: água disponível ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),

CC: capacidade do campo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e

PMP: ponto de murcha permanente ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ).

Para a determinação da CC foi utilizado o método da mesa de tensão em potenciais matriciais específicos (-6 kPa) e para o PMP a câmara de pressão de Richards em potencial matricial de -1500 kPa de acordo com o manual de métodos de análise de solo (DONAGEMA et al., 2011).

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, com análise da média, mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (BUDIMAN, et al., 2003). Foi avaliado a existência de dados anômalos (outliers), a normalidade dos dados foi testada pelas análises do coeficiente de assimetria e curtose, onde os valores mais próximos de zero, para a assimetria, e menores que três, para a curtose tendem à distribuição normal e o teste de Shapiro-Wilk. Para aferir a relação entre as variáveis foram feitas análises de correlação de Pearson.

As funções de pedotransferência foram elaboradas de acordo com as seguintes etapas:

1ª) Divisão aleatória dos dados em dois subconjuntos a) 80% dos dados para desenvolvimento e b) 20% para validação.

2ª) Desenvolvimento das funções de pedotransferência de caráter generalizado (Geral), considerando os dados de todas as classes de solo determinadas.

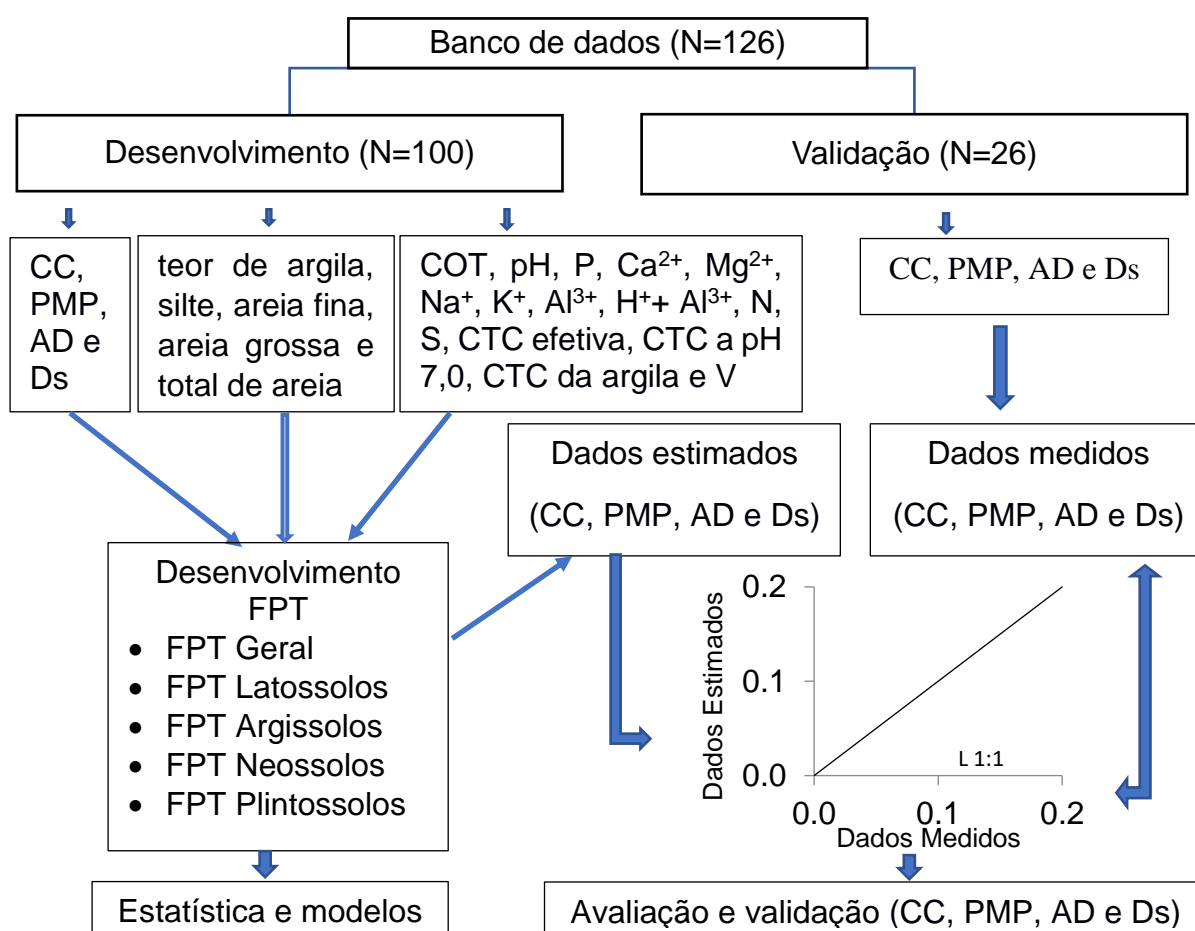
3ª) Desenvolvimento das funções de pedotransferência específica para as classes de solos, LATOSSOLO, ARGISSOLO, NEOSSOLO QUARTZARÊNICO e

PLINTOSSOLO. Para as demais classes (CHERNOSSOLO, PLANOSSOLO e CAMBISSOLO) o número de dados foi muito reduzido para validação (Tabela 3).

**Tabela 3.** Número de dados utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de Pedotransferência.

Classes de solos	Total	Desenvolvimento	Validação
GERAL	126	100	26
LATOSSOLOS	42	34	8
ARGISSOLOS	27	22	5
NEOSSOLOS	15	12	3
PLINTOSSOLOS	24	19	5

Na Figura 3 é apresentada a representação dos principais procedimentos para elaboração, avaliação e validação das funções de pedotransferência.



**Figura 3.** Representação dos principais procedimentos para elaboração, avaliação e validação das funções de pedotransferência.

Para obtenção das funções de pedotransferência utilizou-se análise de regressão linear múltipla. O procedimento “forward stepwise” foi utilizado para a análise exploratória relacionando a Ds, CC, PMP e AD aos atributos físicos e químicos do solo para seleção de variáveis predictoras. Essa opção faz a seleção das principais variáveis dentre um conjunto de variáveis independentes a um nível de significância pré-fixado (10), gerando um coeficiente para cada uma das variáveis independentes selecionadas (PAULA, 2004).

Foram gerados dois (2) modelos de funções de pedotransferência para estimativa dos atributos físico-hídricos (Ds, CC, PMP e AD): Modelo I utilizando como variáveis independentes todos os dados dos atributos do solo determinados (análise granulométrica, carbono orgânico total, pH, teores de fósforo, cálcio, magnésio, sódio, potássio, alumínio, acidez potencial, capacidade de troca de cátions a pH 7,0) para seleção de variáveis preditoras, e modelo II utilizando como variáveis independentes o teor de argila, silte, areia fina, areia grossa, total de areia e o teor carbono orgânico total.

A avaliação do desempenho dos modelos de regressão foi realizada graficamente à relação 1:1 dos valores estimados verso valores medidos e aplicado indicadores estatísticos como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro médio (EM) e a raiz do quadrado do erro médio (RMSE) obtidos pelas Equações 2, 3 e 4 respectivamente (BUDIMAN, et al., 2003). Foi realizado ainda o índice de confiança (IC) pela Equação 7, obtido pelo produto do índice de Willmott, Equação 5 e do coeficiente de correlação de Pearson, Equação 6. O IC foi classificado de acordo com Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 4).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i) (M_i - \bar{M}_i)}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i)^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}_i)^{0,5}} \quad \text{Eq. 2}$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - E_i) \quad \text{Eq. 3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2} \quad \text{Eq. 4}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{M}_i)^2}{[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}_i|) + \sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}_i|)]^2} \quad \text{Eq. 5}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i) (M_i - \bar{M}_i)}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i)^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}_i)^{0,5}]} \quad \text{Eq. 6}$$

$$IC = r \cdot d \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$E_i$  = o valor estimado,  $M_i$  = valor medido,  $\bar{E}_i$  e  $\bar{M}_i$  = são as médias dos valores estimados e medidos respectivamente,  $n$  = número total de dados e IC = índice de confiança que integra de forma conjunta a precisão ( $r$ ) e a exatidão ( $d$ ).

**Tabela 4.** Classificação dos índices de desempenho conforme Camargo e Sentelhas.

Valores de "IC"	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
< 0,30	Péssimo

Fonte: CAMARGO E SENTELHAS (1997).

O EM é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores (quando positivo) ou de subestimar (quando negativo). Quanto mais próximo de zero for o EM maior será a acurácia do modelo. A RMSE quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da linha 1:1. Quando o valor de RMSE é igual a zero, indica que houve ajuste perfeito entre os dados estimados e medidos (BARBOZA, 2011).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva para os atributos do solo considerando todas as classes de solo para o desenvolvimento e validação com os valores de média, valor mínimo, valor máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose e o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para as variáveis utilizadas na geração da FPT estão apresentados na Tabela 5.

A Ds variou entre 1,1 e 1,9 Mg m<sup>-3</sup> com média de 1,4 Mg m<sup>-3</sup>, com coeficiente de variação de 13,0 %, desvio padrão de 0,2 e desvio de assimetria e curtose de 0,2 e -0,4 respectivamente. A CC variou entre 0,18 e 0,58 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) com média de 0,34 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), com um coeficiente de variação de 25%, desvio padrão de 0,08 e desvio de assimetria e curtose de 0,7 e 0,6 respectivamente.

O PMP variou entre 0,06 e 0,42 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) com média de 0,15 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), com coeficiente de variação de 50 %, desvio padrão de 0,07 e desvio de assimetria e curtose de 1,3 e 1,2 respectivamente. A AD variou entre 0,05 e 0,29 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), com média de 0,19 (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>). O coeficiente de variação foi de 25 %, o desvio padrão foi de 0,05, o desvio de assimetria de -0,28 e a curtose de -0,02 respectivamente.

**Tabela 5.** Estatística descritiva das variáveis utilizadas para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência considerando todas as classes de solo.

Variável	Média	Mín.	Max.	DP	CV	Ass.	Curt.	S-W	P- Valor
Desenvolvimento									
COT (dag kg <sup>-1</sup> )	1,1	0,0	4,0	4,0	62	1,0	1,9	0,93	0,00
pH	5,3	4,0	8,4	0,9	17	1,4	1,9	0,88	0,00
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	9,3	5,9	41,4	5,2	57	3,9	17,1	0,50	0,00
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,7	0,0	17,1	3,9	233	2,6	5,8	0,49	0,00
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,5	0,0	18,3	3,2	208	3,6	13,5	0,48	0,00
Sódio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,3	0,0	2,7	0,5	155	3,5	13,2	0,54	0,00
Potássio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,2	0,0	0,7	0,2	84	1,7	2,6	0,82	0,00
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,6	0,0	2,0	0,5	77	0,8	0,2	0,94	0,00
Acidez potencial (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,3	0,0	11,7	2,2	68	1,5	2,7	0,89	0,00
Nitrogênio total (dag kg <sup>-1</sup> )	0,3	0,1	1,4	0,2	72	2,1	6,3	0,81	0,00
Soma de bases (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,7	0,1	35,3	7,1	192	3,0	8,4	0,51	0,00
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,3	0,5	35,4	6,9	162	3,0	8,5	0,52	0,00
CTC a pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,0	1,2	35,3	7,1	102	2,6	6,6	0,66	0,00
CTC da argila (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	36,3	6,9	141,9	28,1	77	1,6	2,3	0,82	0,00
Saturação por bases (%)	35,9	1,9	100,0	27,8	77	1,0	-0,1	0,87	0,00
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	224	44	610	145	65	0,8	-0,2	0,91	0,00
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	137	8,0	433	90	65	0,9	0,5	0,94	0,00
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	240	44	715	165	69	1,0	0,1	0,89	0,00
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	399	100	761	153	38	0,4	-0,3	0,98	0,06
Total de areia (g kg <sup>-1</sup> )	639	200	927	184	29	-0,5	-0,6	0,95	0,00
Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )	1,4	1,1	1,9	0,2	13	0,2	-0,4	0,99	0,26
CC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,34	0,18	0,58	0,08	25	0,7	0,6	0,94	0,00
PMP (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,15	0,06	0,42	0,07	50	1,32	1,25	0,86	0,00
AD (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,19	0,05	0,29	0,05	25	-0,28	-0,02	0,99	0,59
Validação									
COT (dag kg <sup>-1</sup> )	0,9	0,0	4,0	0,8	88	2,3	7,6	0,80	0,00
pH	5,3	4,4	8,4	1,0	18	2,2	5,1	0,73	0,00
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	9,1	6,1	24,2	4,0	44	2,7	8,1	0,67	0,00
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,2	0,0	17,1	3,5	279	4,2	19,2	0,40	0,00
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,1	0,0	12,3	2,5	231	4,1	18,0	0,40	0,00
Sódio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,2	0,0	1,7	0,3	140	4,0	18,6	0,53	0,00
Potássio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,2	0,0	0,5	0,1	69	1,4	2,1	0,85	0,01
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,5	0,0	1,3	0,4	68	0,5	-0,3	0,96	0,32
Acidez potencial (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,1	0,0	11,7	2,4	79	1,8	5,0	0,86	0,02
Nitrogênio total (dag kg <sup>-1</sup> )	0,0	0,0	0,1	0,0	102	3,2	11,3	0,61	0,00
Soma de bases (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,7	0,3	30,2	6,1	224	4,1	17,9	0,40	0,00
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,2	0,5	30,4	6,0	186	4,1	18,2	0,41	0,00
CTC a pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,8	1,2	33,4	6,5	111	3,4	13,7	0,59	0,00
CTC da argila (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,6	0,9	10,6	2,8	79	1,3	0,7	0,81	0,00
Saturação por bases (%)	35,0	3,9	100,0	27,2	78	1,6	1,4	0,77	0,00
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	206	48	565	152	74	0,9	0,2	0,88	0,06
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	100	24	293	66	67	1,3	1,7	0,88	0,05
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	300	78	715	197	66	0,6	-0,9	0,90	0,02
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	394	100	761	178	45	0,3	-0,4	0,96	0,42
Total de areia (g kg <sup>-1</sup> )	694	236	917	193	28	-1,1	0,5	0,87	0,05
Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )	1,6	1,2	1,8	0,2	11	-0,9	0,8	0,91	0,29
CC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,3	0,2	0,6	0,1	30	0,4	0,1	0,96	0,33
PMP (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,2	0,1	0,3	0,1	50	1,1	0,3	0,85	0,00
AD (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,2	0,1	0,3	0,1	32	-0,4	-0,3	0,97	0,66

Mín = mínimo; Max. = máximo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação (%); Ass = assimetria; Curt. = curtose; S-W = teste de normalidade de Shapiro-Wilk (para  $\alpha = 5\%$ ); CC = capacidade de campo, PMP = ponto de murcha permanente, AD = água disponível, COT = teor de carbono orgânico total; pH = potencial hidrogeniônico; CTC = capacidade de troca de cátions.

Essa variação na CC e no PMP deve-se provavelmente às características estruturais, granulométricas e a heterogeneidade das amostras coletadas. Em elevados potenciais matriciais, as forças capilares são mais atuantes e, nesses potenciais, a retenção de água é influenciada pela estrutura do solo (MICHELON, 2010). Por outro lado, para baixos potenciais matriciais no solo, a retenção depende dos fenômenos de adsorção, os quais são mais influenciados pela textura e pela superfície específica das partículas (REICHARDT; TIMM, 2004).

Os coeficientes de variação para a maioria das variáveis são altos (>30%), com exceção do pH, CC, AD, total de areia, densidade de partícula e Ds. Segundo Pádua et al. (2015), tal comportamento está de acordo com a complexidade, diversidade e interatividade dos fatores, processos que controlam os atributos físico-hídricos dos solos e a causa da dificuldade e inacurácia comumente reportadas para sua modelagem.

A normalidade das variáveis pelo teste de Shapiro-Wilk ( $P > 0,05$ ), foi verificada para os teores de areia fina, Ds e AD para os dados de desenvolvimento e para os teores de alumínio, argila, silte, areia fina, Ds, CC e AD para os dados de validação, sendo que as demais variáveis não apresentaram normalidade pelo referido teste. Os dados mostraram simetria positiva ( $>0$ ), indicando distribuição esquerda-inclinada (à esquerda do valor mediano) com exceção das variáveis total de areia e AD. Resultados semelhantes foram encontrados por Lima (2016), que realizando a caracterização físico-hídrica do solo da área do Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina, observou que os valores dos coeficientes de assimetria e curtose ficaram próximos de zero, indicando que esses se aproximam de uma distribuição normal.

Na Tabela 6 estão apresentadas a estatística descritiva da Ds, CC, PMP e AD, por classes de solo, os máximos valores de Ds foram de  $1,9 \text{ Mg m}^{-3}$  para Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos, respectivamente e os mínimos  $1,1$  e  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$  foram observados para Latossolos e Argissolos, respectivamente. Para a CC, PMP e AD, os máximos valores foram de  $0,54$ ,  $0,33$  e  $0,29 \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)}$ , observados para os Latossolos, respectivamente e os mínimos valores foram de  $0,18$  e  $0,06 \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)}$  para os Neossolos Quartzarênicos e  $0,05 \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)}$  para os Plintossolos, respectivamente. Os coeficientes de variação, foram altos ( $CV > 15\%$ ), com exceção para Ds. A maioria dos desvios padrões foram baixos.

**Tabela 6.** Estatística descritiva das variáveis da densidade do solo, capacidade do campo, ponto de murcha permanente e água disponível, por classes de solo.

Classes de Solos	Variável	Estatística descritiva				
		Média	Mín.	Max.	DP	CV
LATOSSOLOS	DS (Mg m <sup>-3</sup> )	1,4	1,1	1,7	0,17	12
	CC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,38	0,27	0,54	0,08	21
	PMP (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,16	0,07	0,32	0,07	41
	AD (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,21	0,12	0,29	0,04	18
ARGISSOLOS	DS (Mg m <sup>-3</sup> )	1,6	1,2	1,8	0,14	9
	CC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,33	0,25	0,41	0,04	13
	PMP (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,13	0,06	0,22	0,04	28
	AD (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,20	0,11	0,28	0,04	21
NEOSSOLOS	DS (Mg m <sup>-3</sup> )	1,7	1,5	1,9	0,12	7
	CC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,25	0,18	0,34	0,05	21
	PMP (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,09	0,06	0,13	0,02	18
	AD (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,15	0,08	0,24	0,05	33
PLINTOSSOLOS	DS (Mg m <sup>-3</sup> )	1,7	1,5	1,9	0,12	7
	CC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,32	0,18	0,43	0,06	18
	PMP (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,16	0,08	0,33	0,07	44
	AD (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,16	0,05	0,26	0,05	32

Mín = mínimo; Max. = máximo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação (%); Ass = assimetria; Curt. = curtose; CC = capacidade de campo; PMP = ponto de murcha permanente; AD = água disponível.

Na Tabela 7 estão apresentados os dados da correlação de Pearson entre as variáveis (atributos do solo) e Ds, CC, PMP e AD.

**Tabela 7.** Matriz de correlação entre os atributos do solo e a densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível.

Atributos	Coeficiente de correlação			
	Ds	CC	PMP	AD
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	1,00	-0,52*	-0,33*	-0,41*
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	0,35*	-0,61*	-0,48*	-0,34*
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	-0,32*	-0,22*	-0,33*	0,13 <sup>ns</sup>
Total de areia (g kg <sup>-1</sup> )	0,57*	-0,73*	-0,71*	-0,20*
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	-0,66*	0,70*	0,66*	0,28*
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	-0,09 <sup>ns</sup>	0,35*	0,39*	0,02 <sup>ns</sup>
pH	0,29*	0,03 <sup>ns</sup>	0,22*	-0,28*
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	0,15 <sup>ns</sup>	0,26*	0,36*	-0,09 <sup>ns</sup>
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,03 <sup>ns</sup>	0,45*	0,58*	-0,11 <sup>ns</sup>
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,01 <sup>ns</sup>	0,53*	0,66*	-0,06 <sup>ns</sup>
Sódio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,18*	0,24*	0,46*	-0,28*
Potássio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,07 <sup>ns</sup>	0,26*	0,47*	-0,28*
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,51*	0,20*	0,08 <sup>ns</sup>	0,28*
Acidez potencial (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,58*	0,39*	0,32*	0,22*
Nitrogênio total (dag kg <sup>-1</sup> )	-0,40*	0,49*	0,52*	0,05 <sup>ns</sup>
Teor de carbono orgânico (dag kg <sup>-1</sup> )	-0,36*	0,41*	0,38*	-0,01 <sup>ns</sup>
Soma de bases (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,12 <sup>ns</sup>	0,51*	0,66*	0,11 <sup>ns</sup>
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,03 <sup>ns</sup>	0,53*	0,68*	-0,10 <sup>ns</sup>
CTC a pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00 <sup>ns</sup>	0,63*	0,76*	-0,15 <sup>ns</sup>
CTC da argila (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,15 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,27*	-0,28*
Saturação por bases (%)	0,17 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,33*	-0,21*

\*Correlações significativas a 5% de probabilidade e ns = correlações não significativas; Ds = densidade do solo; pH = potencial hidrogeniônico; CC = capacidade de campo (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>); PMP = ponto de murcha permanente (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>); AD = água disponível (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>).

Para a Ds as maiores correlações são observadas com teor de argila (r= -0,66), acidez potencial (r= -0,58), total de areia, (r= 0,57) e o teor de alumínio (r= -0,51). As



maiores correlações para a CC são observadas com o total de areia ( $r=-0,73$ ), teor de argila ( $r=0,70$ ), teor de areia grossa ( $r=-0,61$ ), a CTC a pH 7,0 ( $r=-0,63$ ), CTC efetiva ( $r=-0,53$ ) e a soma de bases ( $r=-0,51$ ). Para o PMP foram o total de areia ( $r=-0,71$ ) e teor de argila ( $r=0,66$ ). Quanto a AD não apresentou correlação forte, as maiores foram como Ds ( $r=-0,41$ ), teor de areia grossa ( $r=-0,34$ ), teor de alumínio ( $r=0,28$ ), CTC da argila ( $r=-0,28$ ), teor de sódio ( $r=-0,28$ ) e o teor de magnésio ( $r=-0,28$ ).

O total de areia apresentou uma correlação positiva e o teor de argila apresentou uma correlação negativa forte para a densidade do solo e correlação negativa para a CC, PMP e AD. Tais tendências corroboram com a proposição de que as frações granulométricas exercem papel significativo no controle dos atributos físico-hídricos dos solos. Resultados semelhantes foram encontrados por Marcolin e Klein (2011), que estimando a densidade relativa do solo a partir de uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima no Estado do Rio Grande do Sul, observaram que o teor de argila e a matéria orgânica do solo influenciaram a densidade do solo. Segundo Pádua et al. (2015), o efeito negativo do teor de argila é explicado pelo fato de que solos mais argilosos possuem maior microporosidade e pela maior retenção de carbono orgânico do solo em solos com maior teor de argila.

Quanto às correlações entre os atributos químicos e os atributos físico-hídricos, uma possível explicação para essas correlações é que maiores teores de carbono orgânico induzem a menor relação massa do solo seco por volume total ocupados por eles. As concentrações de  $H^+$  e  $Al^{3+}$  estão relacionadas à formação de agregados, onde os cátions flocculantes aproximam as partículas permitindo boa agregação e, conseqüentemente, maior porosidade total, o que implica em redução dos valores de Ds e maior retenção de água. Resultados semelhantes foram observados por Bortolini et al. (2016), que observaram correlação significativa da disponibilidade de água no solo com as variáveis: alumínio, saturação por alumínio, saturação por bases, atividade de argila, CTC efetiva e CTC a pH 7. Segundo os mesmos autores estas variáveis podem ter se correlacionado devido a sua alta relação da acidez com a presença de material orgânico no solo. De acordo com Pádua et al. (2015), os teores de  $H^+$  +  $Al^{3+}$  e a CTC a pH 7,0, por sua vez, estão indiretamente relacionados à Ds, pois dependem do teor de COT, uma vez que os grupos carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica liberam o  $H^+$  protonado na determinação do  $H^+$ + $Al^{3+}$ .

O procedimento de análise exploratória (forward stepwise) dos dados mostrou as variáveis preditoras que influenciaram significativamente ( $p<0,010$ ), a Ds, CC, PMP

e AD permitindo, com isso, obter uma função de pedotransferência capaz de descrever satisfatoriamente esses atributos físico-hídricos do solo. As equações dos modelos I e II com os preditores e respectivos regressores, para o agrupamento de todas as classes de solos (Geral) e por classe, estão apresentadas na Tabela 8.

As variáveis selecionadas nas equações, para todas as classes de solos no modelo I, foram o teor de argila, a acidez potencial, o teor de sódio, o teor de magnésio, o teor de areia grossa, o teor de fósforo e a CTC da argila, e no modelo II foram o teor de argila, o teor de areia fina e o carbono orgânico total. Os modelos gerados para os Latossolos foram o teor de argila, o teor de magnésio, a CTC da argila, a saturação por bases e o teor de sódio para o modelo I e o total de areia para o modelo II. Para os Argissolos foram o teor de alumínio, o teor de potássio, o teor de areia fina, a acidez potencial e o total de areia para o modelo I e o teor de areia fina e o carbono orgânico total para o modelo II. Quanto aos Neossolos as variáveis foram o teor de potássio e o teor de silte para o modelo I, e o teor de areia grossa para o modelo II. Para os Plintossolos as variáveis teor de potássio, teor de sódio, nitrogênio total e o carbono orgânico total para o modelo I, e para o modelo II o teor de areia grossa, carbono orgânico total e o teor de silte.

De forma geral, a granulometria e o carbono orgânico total foram mais influentes na modelagem para a  $D_s$ , o teor de argila foi identificado em três modelos e o carbono orgânico total em quatro modelos. Esses resultados foram semelhantes aos observados por Gomes (2014), desenvolvendo FPT para estimar a densidade do solo em solos da Bacia do Solimões, para a autora as variáveis incluídas na função foram: carbono orgânico, hidrogênio, SB (soma de bases), pH em água, areia total, alumínio trocável e argila. Segundo a mesma autora, dentre as variáveis preditoras selecionadas no desenvolvimento de FPT, as que estão diretamente relacionadas à densidade do solo são o carbono orgânico total (matéria orgânica) e a textura do solo. A matéria orgânica (carbono orgânico total) influencia várias características do solo, principalmente as relacionadas à formação de agregados e a conferência de cargas negativas, aumentando a capacidade de troca de cátions do solo. Em relação à formação de agregados, a decomposição da matéria orgânica atua como agente cimentante, unindo e estabilizando as partículas tanto unitárias quanto secundárias do solo (BATISTA et al., 2013).

**Tabela 8.** Funções de pedotransferência e seus respectivos índices de regressão por classe de solo e agrupado todos os dados (Geral), para modelos I (todos os atributos do solo e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total).

Modelo	Equações
<b>GERAL</b>	
Ds I	$1,670 - 0,0006*AR - 0,0202*H^{+}+Al^{3+} + 0,1649*Na^{+} - 0,0168*Mg^{2+} + 0,0002*AG + 0,0067*P - 0,0115*CTC$ da AR
Ds II	$1,875 - 0,0009*AR - 0,0002*AF - 0,0622*COT$
CC I	$0,607 - 0,00027*TA + 0,0096*Mg^{2+} - 0,0002*AG - 0,00037*S$
CC II	$0,645 - 0,00033*TA - 0,0002*AG - 0,0003*S$
PMP I	$0,066 + 0,008*CTC + 0,00024*AR - 0,00008*AG + 0,0662*K^{+} - 0,00889*Ca^{2+} - 0,02275*Al^{3+} + 0,00394*CTC$ da AR
PMP II	$0,375 - 0,3452*TA$
AD I	$0,338 - 0,00014*AG - 0,0478*Na^{+} - 0,112*K^{+} + 0,0027*Mg^{2+} - 0,0197*pH + 0,0006*V$
AD II	$0,249 - 0,000147*AG - 0,000157*S$
<b>LATOSSOLOS</b>	
Ds I	$2,076 - 0,0014*AR + 0,2604*Mg^{2+} - 0,1247*CTC$ da AR - $0,0080*V + 0,3531*Na^{+}$
Ds II	$1,128 - 0,0006*TA - 0,0629*COT$
CC I	$0,122 + 0,0004*AR + 0,0138*P + 0,0049*T$
CC II	$0,224 + 0,0004*AR + 0,0303*COT$
PMP I	$0,0303 + 0,00027*AR + 0,0378*COT - 0,0632*S$
PMP II	$0,074 + 0,00033*AR + 0,0382*COT - 0,0001*AG$
AD I	$-0,27 + 0,021*P + 0,058*pH + 0,087*Al^{3+} - 0,021*CTC$ da AR + $0,002*V - 0,0244*S$
AD II	$0,2368 - 0,00004*TA$
<b>ARGISSOLOS</b>	
Ds I	$2,015 - 0,1428*Al^{3+} - 0,7727*K^{+} - 0,0008*AF - 0,0375*H^{+}+Al^{3+} + 0,0004*TA$
Ds II	$1,807 - 0,0008*AF + 0,0973*COT$
CC I	$0,3062 + 0,0003*AF + 0,0123*H^{+}+Al^{3+} - 0,0674*COT - 0,00012*TA$
CC II	$0,1821 + 0,00034*AF + 0,00022*AR - 0,0347*COT$
PMP I	$-0,0301 + 0,0441*Al^{3+} + 0,0266*pH - 0,0082*Ca^{2+} + 0,0003*AR - 0,0002*Silte$
PMP II	$0,0858 + 0,00021*AR - 0,0002*Silte + 0,0001*AF$
AD I	$0,1963 + 0,0002*AF - 0,1486*K^{+} - 0,0539*COT$
AD II	$0,1105 + 0,0002*AF$
<b>NEOSSOLOS</b>	
Ds I	$1,754 - 1,2720*K^{+} + 0,0032*Silte$
Ds II	$1,563 + 0,0003*AG$
CC I	$0,254 + 0,0006*AF + 0,0154*T + 0,3970*N - 0,0014*Silte + 0,0903*Na^{+} - 0,0505*pH + 0,1332*Ca^{2+} - 0,0154*CTC$ da AR + $0,0511*COT - 0,0819*t + 0,0006*V$
CC II	$0,0507 + 0,0004*AF + 0,1039*COT - 0,0007*Silte$
PMP I	$0,127 - 0,0783*Al^{3+} - 0,0151*T + 0,00004*AF$
PMP II	$0,1174 - 0,00034*AR$
AD I	$-1,7516 + 0,0006*AF - 0,0205*T + 0,0026*AR + 0,5965*N + 0,0016*TA + 0,2269*Na^{+} + 0,0630*Mg^{2+}$
AD II	$-0,0303 + 0,0004*AF + 0,1086*COT - 0,0006*Silte$
<b>PLINTOSSOLOS</b>	
Ds I	$1,734 - 0,7487*K^{+} + 0,1338*Na^{+} + 0,4477*N - 0,0829*COT$
Ds II	$1,642 + 0,0003*AG - 0,1131*COT + 0,0003*Silte$
CC I	$0,5358 - 0,0002*AG + 0,0140*Ca^{2+} - 0,0379*pH - 0,0340*COT + 0,00005*AF$
CC II	$0,4098 - 0,0002*AG - 0,0001*Silte - 0,0397*COT$
PMP I	$0,4082 + 0,2541*K^{+} - 0,0133*T - 0,0591*pH + 0,0015*V - 0,00007*AG$
PMP II	$0,2682 - 0,0002*TA$
AD I	$0,1604 - 0,2541*K^{+} - 0,0002*AG - 0,0193*T + 0,0001*TA + 0,0427*Mg^{2+} + 0,0221*H^{+}+Al^{3+}$
AD II	$0,0888 + 0,0002*AF$

Ds = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ); CC = capacidade de campo( $cm^3\ cm^{-3}$ ); PMP = ponto de murcha permanente( $cm^3\ cm^{-3}$ ); AD = água disponível( $cm^3\ cm^{-3}$ );  $Mg^{2+}$  = magnésio;  $Al^{3+}$  = alumínio;  $Na^{+}$  = sódio; COT= carbono orgânico total, T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; AR= argila, P = fósforo;  $Ca^{2+}$  = cálcio;  $H^{+}+Al^{3+}$  = acidez potencial; S = soma de bases, AG = areia grossa; TA= totais de areia;  $K^{+}$  = Potássio;  $Al^{3+}$  = Alumínio; N= nitrogênio; V= saturação por bases; t = CTC efetiva e AF = areia fina.

Na Tabela 9 estão apresentados a avaliação do desempenho dos modelos de regressão, os indicadores estatísticos e o índice de confiança. A maioria das variáveis mostrou alta capacidade de predição. Quanto mais os valores do EM e RMSE se aproximarem de 0, e quanto mais os valores de IC e  $R^2$  se aproximarem de 1, mais apropriada é a FPT (CAMPELO JUNIOR et al. 2014).

**Tabela 9.** Avaliação do desempenho dos modelos de regressão, os indicadores estatísticos e o índice de confiança para todos os solos (Geral) e por classe de solo.

Modelo	$R^2$	EM	RMSE	d	r	IC	Desempenho
GERAL							
Ds I	0,62	0,00016	0,1140	0,99	0,79	0,78	Muito Bom
Ds II	0,47	0,00024	0,1341	0,99	0,68	0,68	Bom
CC I	0,73	-0,00001	0,0449	0,99	0,85	0,85	Muito Bom
CC II	0,62	-0,00002	0,0530	0,99	0,79	0,79	Muito Bom
PMP I	0,77	0,00001	0,0367	0,99	0,88	0,88	Muito Bom
PMP II	0,51	-0,00002	0,0538	0,99	0,71	0,71	Bom
AD I	0,38	0,00002	0,0396	0,99	0,62	0,61	Mediano
AD II	0,14	0,0002	0,0463	0,99	0,42	0,41	Sofrível
LATOSSOLOS							
Ds I	0,87	0,00024	0,0587	0,99	0,93	0,93	Ótimo
Ds II	0,64	0,00071	0,0989	0,99	0,80	0,79	Muito Bom
CC I	0,80	-0,00002	0,0348	0,99	0,89	0,89	Muito Bom
CC II	0,78	-0,00005	0,0367	0,99	0,88	0,87	Muito Bom
PMP I	0,89	-0,00007	0,0221	0,99	0,94	0,94	Ótimo
PMP II	0,88	-0,00010	0,0234	0,99	0,94	0,93	Ótimo
AD I	0,43	0,00010	0,0281	0,99	0,65	0,65	Mediano
AD II	0,10	-0,00310	0,0193	0,98	0,31	0,30	Péssimo
ARGISSOLOS							
Ds I	0,72	-0,00242	0,0657	0,98	0,89	0,87	Muito Bom
Ds II	0,33	-0,00037	0,1153	0,98	0,58	0,57	Mediano
CC I	0,60	-0,00296	0,0235	0,98	0,77	0,76	Bom
CC II	0,39	-0,00178	0,0288	0,98	0,62	0,61	Bom
PMP I	0,61	0,00056	0,0225	0,98	0,78	0,76	Bom
PMP II	0,23	0,00270	0,0280	0,97	0,48	0,47	Sofrível
AD I	0,20	-0,00041	0,0317	0,98	0,46	0,45	Sofrível
AD II	0,16	-0,00304	0,0330	0,98	0,41	0,40	Sofrível
NEOSSOLOS							
Ds I	0,46	-0,00067	0,0857	0,98	0,68	0,66	Bom
Ds II	0,15	-0,00133	0,1075	0,97	0,36	0,35	Péssimo
CC I	0,99	0,00020	0,0009	0,99	1,00	0,99	Ótimo
CC II	0,86	0,00000	0,0188	0,99	0,93	0,91	Ótimo
PMP I	0,51	0,00007	0,0115	0,97	0,71	0,69	Mediano
PMP II	0,33	-0,00060	0,0135	0,95	0,58	0,55	Mediano
AD I	0,98	0,00020	0,0072	0,99	0,99	0,98	Ótimo
AD II	0,80	0,00020	0,0214	0,99	0,90	0,89	Muito Bom
PLINTOSSOLOS							
Ds I	0,66	-0,00125	0,0673	0,98	0,81	0,80	Muito Bom
Ds II	0,19	-0,00000008	0,1045	0,97	0,43	0,42	Mau
CC I	0,91	-0,00012500	0,0172	0,99	0,95	0,94	Ótimo
CC II	0,61	-0,00004167	0,0357	0,99	0,78	0,77	Bom
PMP I	0,90	0,00004167	0,0218	0,99	0,95	0,93	Ótimo
PMP II	0,20	0,00758333	0,0483	0,98	0,45	0,44	Sofrível
AD I	0,87	-0,00008333	0,0178	0,99	0,93	0,92	Ótimo
AD II	0,25	-0,00008333	0,0427	0,97	0,50	0,48	Sofrível

$R^2$  = coeficientes de determinação; EM = erro médio; RMSE = raiz do quadrado do erro médio d = índice de Willmott e IC = Índice de Confiança

Os coeficientes de determinação em geral foram maiores que 50 % ( $R^2 > 0,50$ ). Verifica-se uma diminuição nos valores de  $R^2$ , do modelo I em relação ao modelo II, evidenciando melhores ajustes na capacidade preditiva. Solano (2003), trabalhando com solos do Rio Grande do Sul, e Oliveira et al. (2002), em Pernambuco encontrarão resultados semelhantes: à medida que aumenta o número de variáveis como preditoras o desempenho das FPT melhora.

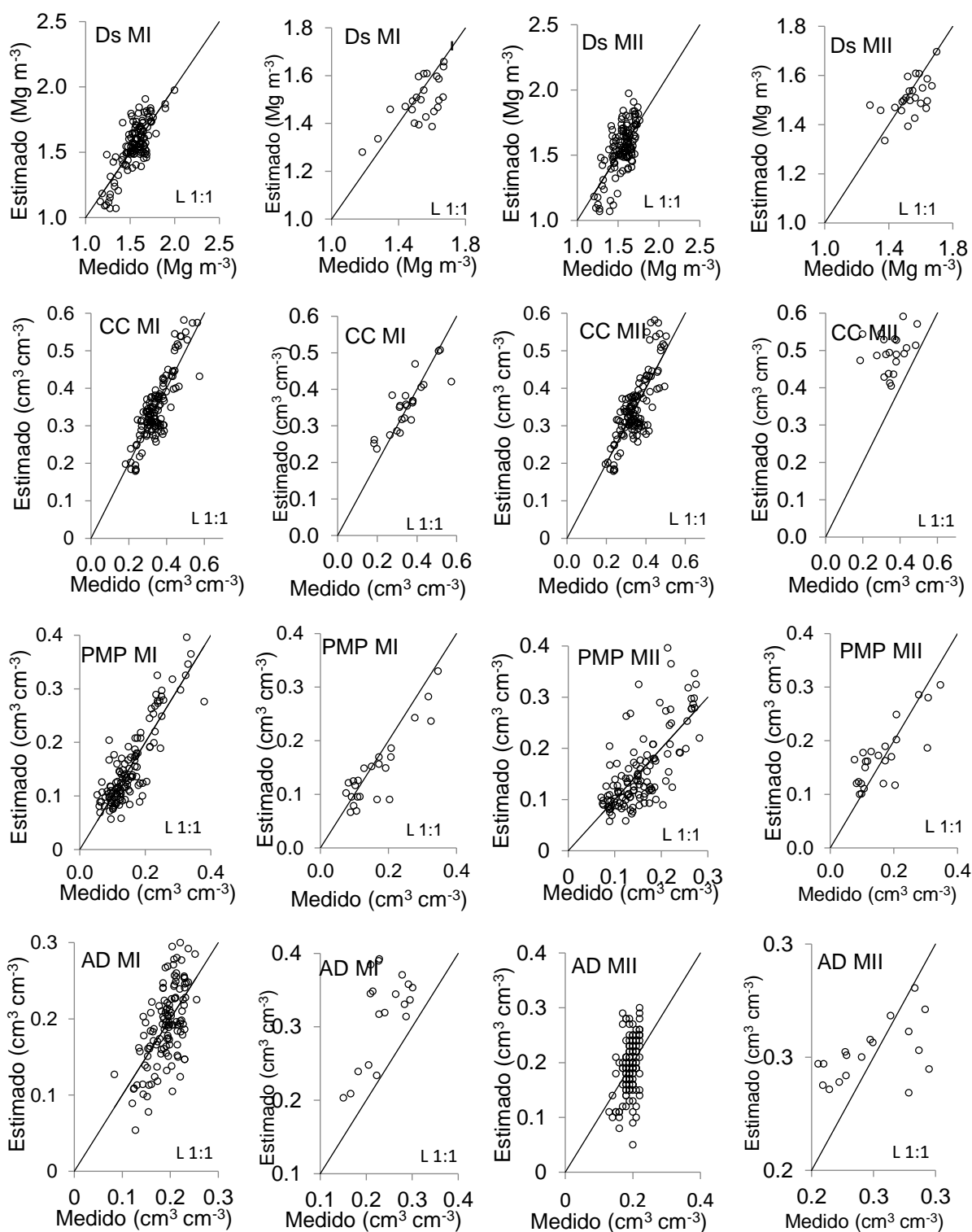
Os índices de confiança apresentaram desempenho ótimo e muito bom, para Ds, CC e PMP, as classes de solos Latossolo, Argissolo, Neossolo e Plintossolo, com exceção para a AD que apresentou desempenho ótimo e muito bom, para os Neossolos e para os demais medianos e sofríveis. Resultados semelhantes foram obtidos por Lima (2016), que observou desempenho como muito bom, para a CC e PMP e a AD foi classificada como sofrível.

Quanto aos erros médios dos modelos gerados, indicam que a maioria tende a subestimar apresentando valores negativos. Lima (2016), desenvolvendo funções de pedotransferência (FPT) para estimar o conteúdo de água no solo no Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina – PE, observou que os valores do erro-médio foram negativos para a maioria das variáveis e valores superestimados e subestimados para CC e PMP, respectivamente, também foram encontrados por Michelin et al. (2010).

As raízes do quadrado do erro médio, para a maioria dos modelos, foram baixas, mostrando um bom ajustamento. As exceções foram os modelos para a água disponível que apresentaram uma alta dispersão para a maioria dos modelos e baixa dispersão nos modelos gerados para as classe do Neossolo Quartzarênico e o modelo I do Plintossolo.

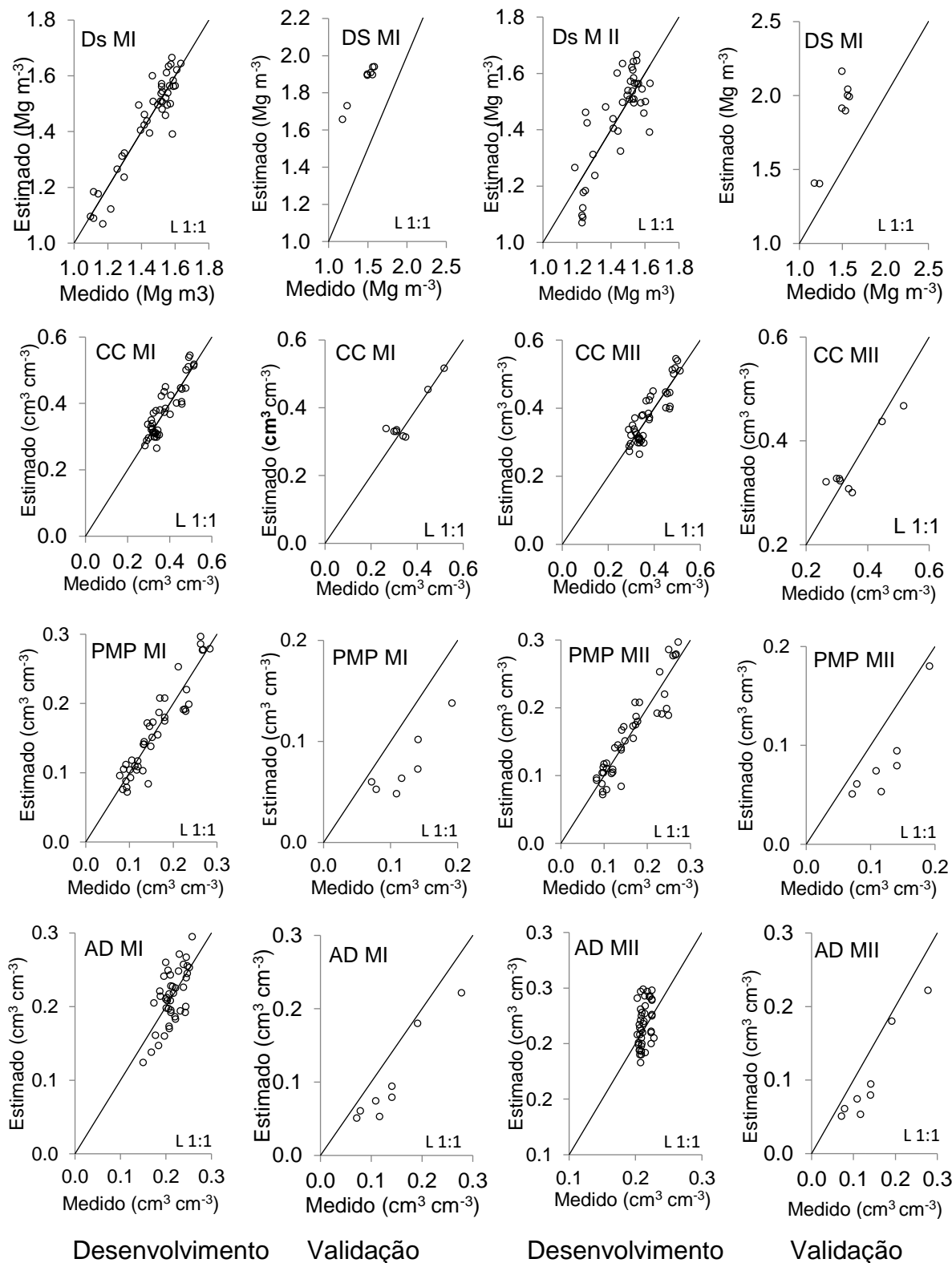
As Figuras 04, 05, 06, 07 e 08 mostram os resultados da validação graficamente através da relação entre valores estimados e medidos pelos modelos de FPT gerados, para a Ds, CC, PMP e AD para todas as classes de solos (Geral) e por classe de solo (Latossolo, Argissolo, Neossolo Quartzarênico e Plintossolo). Observa-se que para a CC, PMP e Ds, as distribuições dos pontos se deram, basicamente em torno da linha, mostrando uma boa concordância das estimativas. Quanto a AD, observa-se uma maior dispersão dos pontos, devido a presença de valores anômalos (pontos distantes da linha principal 1:1). Esses valores contribuíram negativamente para a eficiência das FPT, comprovados pela raiz do quadrado do erro médio de predição. Resultados semelhantes foram obtidos por Nascimento (2015), que observou equações para o

conteúdo de água no solo bastante precisas para os potenciais matriciais de -10, -33 e -1500 kPa.

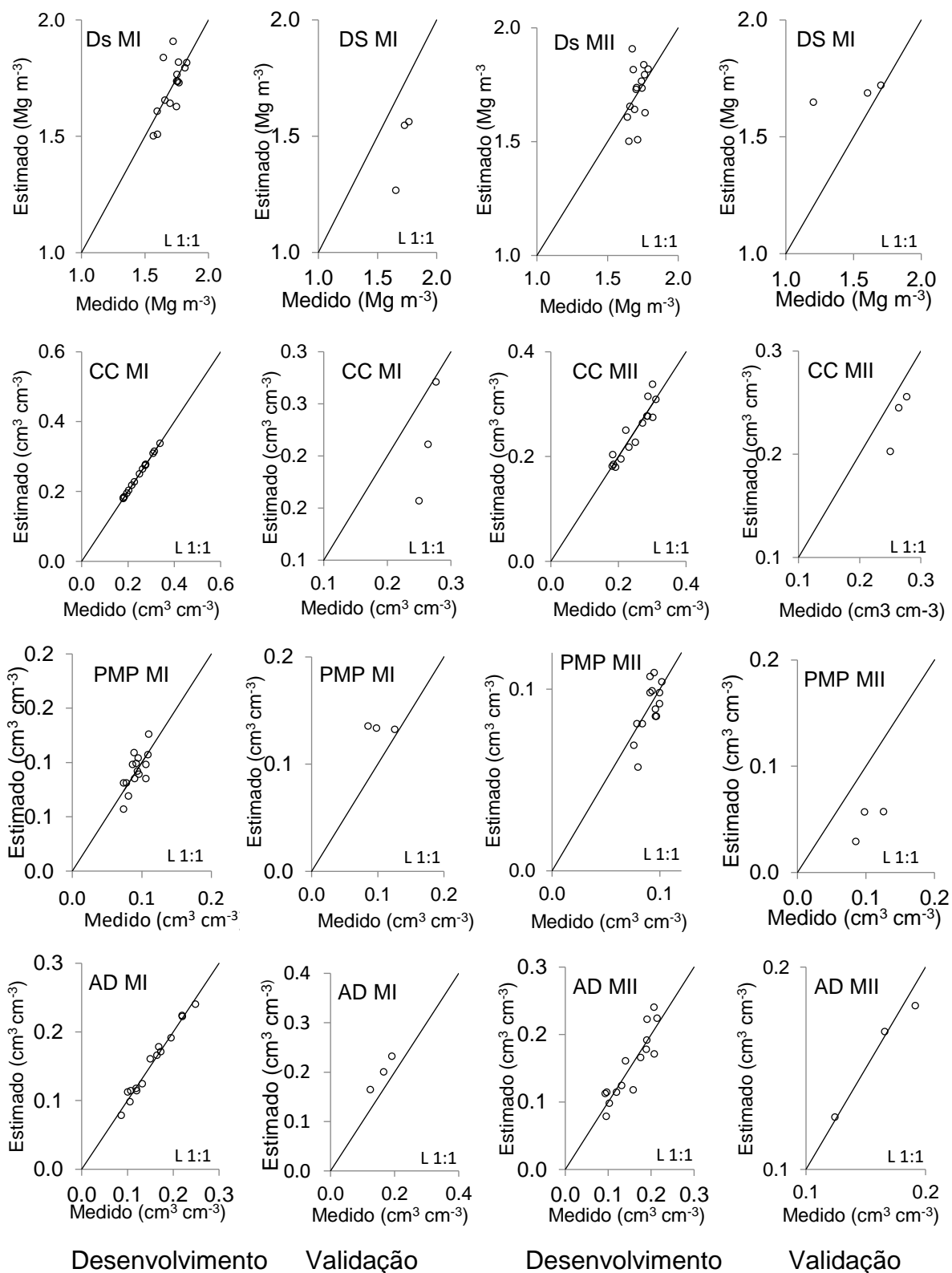


Desenvolvimento      Validação      Desenvolvimento      Validação

**Figura 04.** Relação entre os valores medidos e estimados de Ds, CC, PMP e AD pelos modelos I e II para todas as classes de solos (Geral), pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.

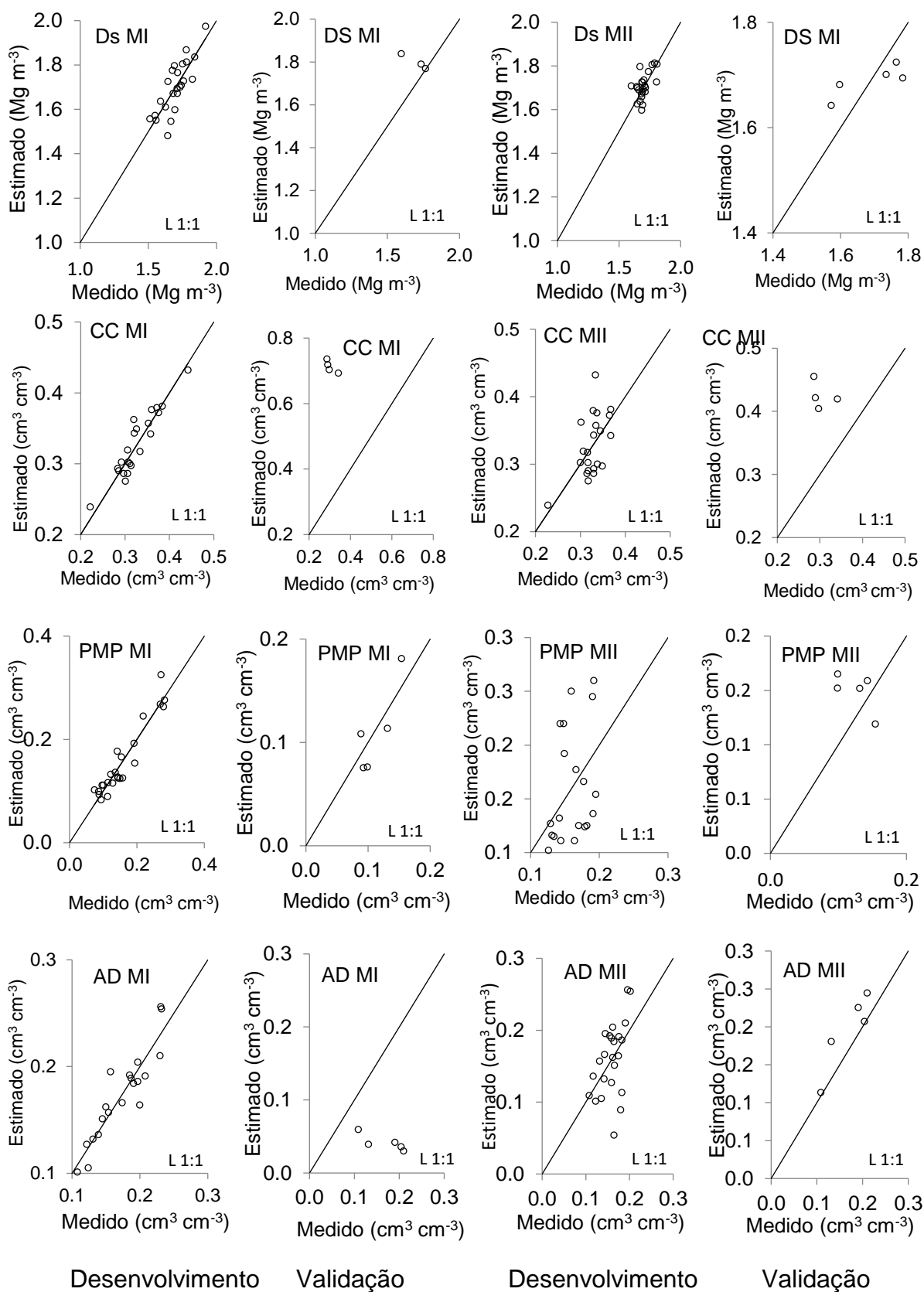


**Figura 05.** Relação entre os valores medidos e estimados de Ds, CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os latossolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.

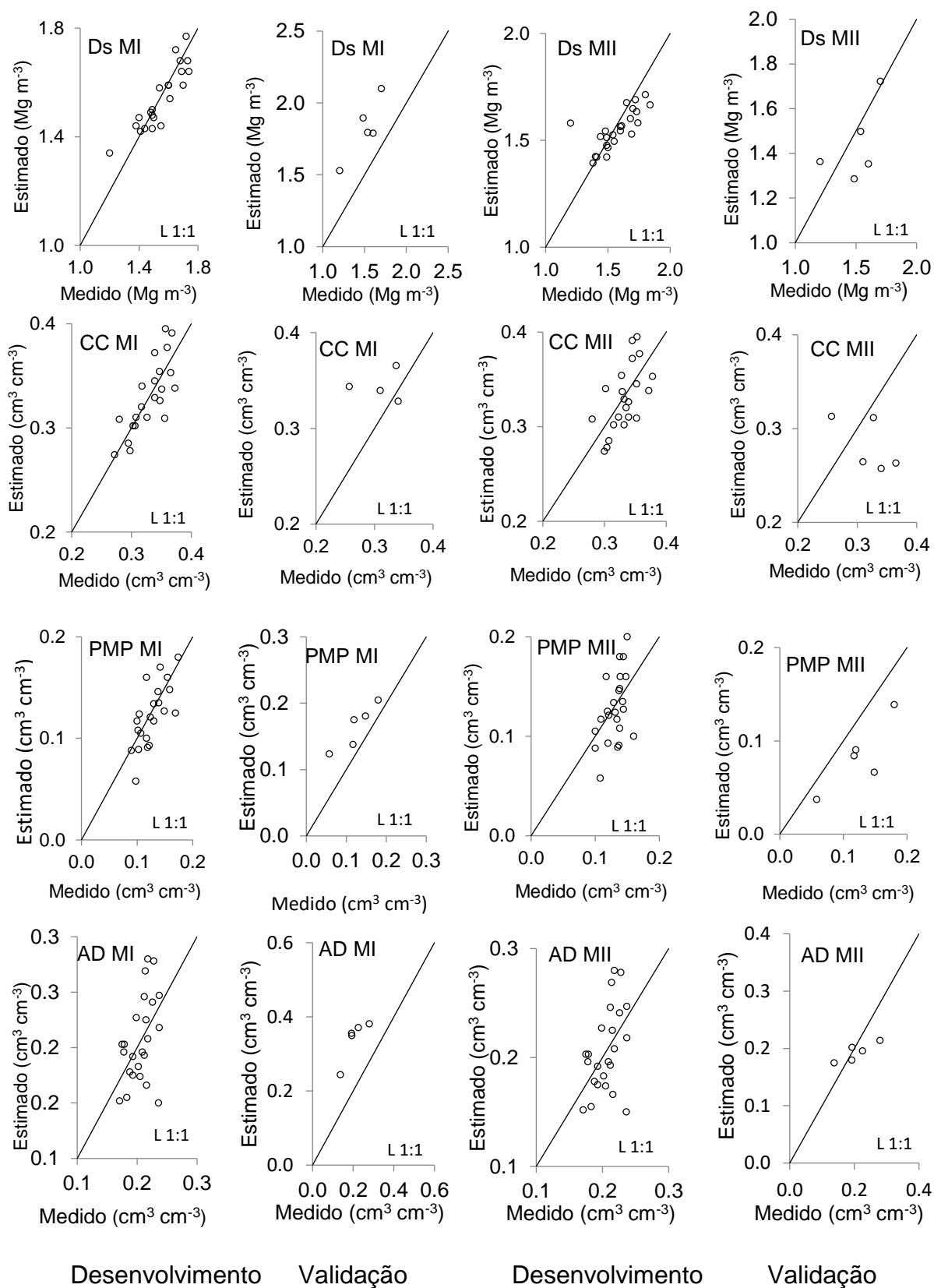


**Figura 06.** Relação entre os valores medidos e estimados de Ds, CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os Neossolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.





**Figura 07.** Relação entre os valores medidos e estimados de Ds, CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os Plintossolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.



**Figura 08.** Relação entre os valores medidos e estimados de Ds, CC, PMP, e AD pelos modelos I e II para os Argissolos, pelo conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo e pelo conjunto de dados utilizados para validação do modelo.

## 5 CONCLUSÕES

A densidade do solo, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível, podem ser estimados com razoável precisão, a partir das funções de pedotransferência, para todas as classes de solos, utilizando como variáveis preditoras o teor de argila, a acidez potencial, o teor de sódio, o teor de magnésio, o teor de areia grossa, o teor de fósforo, a CTC da argila, o teor de areia fina e o carbono orgânico total, em solos no Estado do Piauí.

A funções de pedotransferência, com melhor desempenho na predição dos atributos físico-hídricos, foi o modelo para os Latosolos, que incluiu o teor de argila, o teor de magnésio, a CTC da argila, a saturação por bases, o total de areia e o teor de sódio como variáveis preditoras.

As funções de pedotransferência elaboradas podem subsidiar o planejamento agrícola e o manejo de irrigação, podem ser utilizadas em laboratórios de física do solo para obter, com maior rapidez e facilidade a densidade do solo, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível, no Estado do Piauí.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE JÚNIOR, A.S, BASTOS, A. E., BARROS, C. A. H., SILVA, O. C. da, & GOMES, N. A. A Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, n. 2, 2005.
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111–116, jan. 2011.
- ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.
- BALCI, O. Principles of simulation model validation, verification, and testing. **Trans. S.C.S.I.**, v.14, p. 3-12, 1997.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, p. 1535 – 1548, 2013.
- BARBOZA, F. S. **Funções de pedotransferência para solos do Sul do Uruguai**, 2011. 94p, (Dissertação Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria.
- BARROS, A. H. C., LIER, Q. D. J. V., MAIA, A. D. H. N., & SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 379-391, 2013.
- BARROS, A. H. C. **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BARROS, H. S.; FEARNSIDE, P. M. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central amazonia, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v, 39, n, 2, p, 397-407, 2015.
- BENITES, V. M., MACHADO, P. L., FIDALGO, E. C., COELHO, M. R., & MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil, **Geoderma**, v, 139, n, 1, p, 90-97, 2007.
- BEUTLER, S. J., PEREIRA, M. G., TASSINARI, W. D. S., MENEZES, M. D. D., VALLADARES, G. S., & ANJOS, L. H. C. D. Bulk Density Prediction for Histosols and Soil Horizons with High Organic Matter Content, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v, 41, 2017.
- BOEDT, L. & VERHEYE, W. **Evaluation of profile available water capacity. 1. The conceptual approach**. *Pedologie*, v, 35, p, 55-65, 1985.
- BORTOLINI, D. **Estimativa da retenção e disponibilidade de água em solos de santa Catarina**, 2016. 211 p. Tese (Doutorado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.
- BOSCHI, R. S. **Análise de erro de funções de pedotransferência na estimativa de retenção de água no solo por meio de árvore de decisão**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

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

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Prentice Hall, 14th ed. 965 p. 2008.

BUDIMAN, M., MCBRATNEY, A. B., MENDONÇA-SANTOS, M. D. L., & SANTOS, H. D. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Embrapa Solos, 2003.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP, EESC, v. 1, 131p. 1998.

CAMPELO JUNIOR, J. H.; AZEVEDO, E. C.; CARVALHO ALVES, M. de, MELLO, D. de; ALMEIDA LOBO, F. de; AMORIM, R. S. S. Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão. **Revista agro@mbiente on-line**, v. 8, n. 3, p. 318-326, 2014.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, p. 89-97, 1997.

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**, Viçosa, MG, v. 45, n. 258, p.183-192, 1998.

COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Isoietas Anuais na escala 1:5.000.000**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html> Acesso em: dezembro, 2016.

COSTA, A. da. **Retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina: Avaliação e Geração de Funções de Pedotransferência**, 2012. 423 p. Tese (Doutorado em Manejo do solo), Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Lages SC.

DONAGEMA, G. K., DE CAMPOS, D. B., CALDERANO, S. B., TEIXEIRA, W. G., & VIANA, J. M. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E)**, 2011.

DONATELLI, M., WÖSTEN, J. H. M., & BELOCCHI, G. Methods to evaluate pedotransfer function: Integrated indices for pedotransfer function. In: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (Eds.). **Development of Pedotranfer Function in Soil Hydrology**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, p. 542, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 353p, 2013.

EVANS, R.; CASSEL, D.K.; SNEED, R.E., 1996. **Soil, water, and crop haracteristics important to irrigation scheduling**. Carolina: North Carolina Cooperative Extension Service. 1996.

GOMES, A. S. **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade de solos da Bacia do Solimões, sob floresta tropical amazônica**. 2014. 50 p.: il. Dissertação (Mestrado Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

HENRIQUE M., W., PIM PETEAN, L., BETIOLI JUNIOR, E., TORMENA, A., COUTINHO FIGUEIREDO, G., & PIRES DA SILVA, Á. Método alternativo para quantificação do intervalo hídrico ótimo em laboratório. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2014, vol.38, n.1, pp.158-165. ISSN 1806-9657. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000100015>.

JACOMINE, PKT, **Mapa exploratório-reconhecimento de solos do estado do Piauí**, Convênio EMBRAPA/SNLCS-SUDENE-DRN, 1983.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Ed. da UPF, 2008.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo Vol. 61**. Edusp, 2005.

LIMA, G. S. **Caracterização físico-hídrica do solo do perímetro irrigado pontal sul por funções de pedotransferência**. 2016. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

LOYOLA, J. M. T. and PREVEDELLO, C. L. Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. vol.27, n.5, p, 783-787, 2003. ISSN 1806-9657. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000500002>.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima-doi: 10.4025/actasciagron. v,33i2. 6120. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

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

McBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R.; VERVOORT, R.W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, p. 41-73, 2002.

MEDEIROS, R. M. Variabilidade decadal da precipitação em Microrregiões do Piauí–Brasil. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 34, n. 1, 2017.

NASCIMENTO, D. V. D. **Funções de pedotransferência para estimar a umidade em solos cultivados com cana-de-açúcar na zona da mata de Pernambuco**. 2015. 76 p.: il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife.

NEMES, A.; QUEBEDEAUX, B.; TIMLIN, D. J. Ensemble approach to provide uncertainty estimates of soil bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 6, p. 1938-1945, 2010.

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

PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 63: 1748–1756, 1999.

PÁDUA, E.J. de; GUERRA, A.R.; ZINN, Y.L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.725-736, 2015. DOI: 10.1590/0100683rbc20140028.

- PAULA, G. A. **Modelos de regressão: com apoio computacional**. São Paulo: IME-USP, 2004.
- PEREIRA, L.S.; VALERO, J.A.J.; BUENDÍA, M.R.P.; MARTÍN-BENITO, J.M.T. **El riego e sus tecnologías**. Albacete: CREA-UCLM, p. 296, 2010.
- 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 preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, 2007.
- RAMOS, T. B., GONÇALVES, M. C., MARTINS, J. C., & PEREIRA, L. S. Comparação de diferentes funções de pedotransferência para estimar as propriedades hidráulicas em Portugal. **Solo. Produção Agrária e Sustentabilidade dos Ecossistemas, INIA-V, Oeiras**, p. 29-34, 2014.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of Soil Water Properties. **Transaction of the ASAE**, v. 25, n. 5, p. 1316–1320, 1982.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, p. 211–216, 1988.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 478 p, 2004.
- RIBEIRO, K.D. **Influência da distribuição de vazios na condutividade hidráulica do solo saturado**. 2005. 56 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison, American Society of Agronomy, p.128-152. 1965.
- ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. 2001. 145 p. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.
- SHEIN, E.V.; ARKHANGEL'SKAYA, T.A.S. Pedotransfer functions: state of the art, problems and outlooks. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 39, n. 10, p. 1090-1099, 2006.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E., Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58: 1775-1781, 1994.
- SILVA, A.S.; BRITL, T.L.O.; OLIVEIRA, A.V.; MOTA, A.W. Parâmetros de solo em função da umidade na capacidade de campo em área irrigáveis do trópico semi-árido brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, p. 103-116, 1990.
- SILVA, E. D., CURTI, N., FERREIRA, M. M., VOLPATO, M. M. L., SANTOS, W. J. R. D., & SILVA, S. H. G. Pedotransfer functions for water retention in the main soils from the Brazilian Coastal Plains. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, n. 4, p. 331-338, 2015.
- SOARES, F.C. **Uso de diferentes metodologias na geração de Funções de Pedotransferência para a retenção de água em solos do rio Grande do Sul**, 2013. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS.

SOUZA DE, J. M., BONOMO, R., PIRES, F. R., & BONOMO, D. Z. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 4, 2014.

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

SOUZA, E. D., FERNANDES FILHO, E. I., SCHAEFER, C. E. G. R., BATJES, N. H., SANTOS, G. R. D., & PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin, **Scientia Agricola**, v, 73, n, 6, p, 525-534, 2016.

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

TIETJE, O.; TAPKENHINRICH, M. Evaluation of pedotransfer functions. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p.1088-1095, July/Aug. 1993.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Pedotransfer functions for tropical soils. In: PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. (Eds.). *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. Amsterdam: Elsevier, p. 415–429, 2004.

URACH, FELIPE LAVARDA. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria.

VAN LIER, Q. D. J. Índice da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 95–106, 2000.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. METHODS OF MEASURING FIELD CAPACITY AND PERMANENT WILTING PERCENTAGE OF SOILS. **Soil science**, v. 68, n. 1, p. 75-94, 1949.

VERECKEN, H., DIELS, J., VAN ORSHOVEN, J., FEYEN, J., & BOUMA, J. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 1371–1378, 1992.

VERECKEN, H., WEYNANTS, M., JAVAUX, M., PACHEPSKY, Y., SCHAAP, M. G., & GENUCHTEN, M. T. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 795–820, 2010.

WOSTEN, H.; NEMES, A.; ACUTIS, M. **Functional Evaluation of Pedotransfer Functions**. In: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (Eds.). *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*. 1st. ed. Amsterdam: Elsevier Science, p.371–394, 2004.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, n. 3-4, p. 123–150, 2001.



## APÊNDICE A

**Tabela 10.** Classificação, localização e coordenadas geográficas dos perfis da minitrincheiras da área onde as amostras dos solos foram coletadas para geração das funções de pedotransferência.

Amostra	Classificação Jacomine (1983)	Município/ Localização	Coordenadas GPS em UTM	Textura
1	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 12 km de Guadalupe	-6,90122983418406 -43,5884170979262	Textura média
2	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 5 km de landri Sales	-7,29352704249323 -43,8627976924181	Textura média
3	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 20 km de Bertolínia	-7,55927477963269 -44,057155083865	Textura média
4	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 40 km de Uruçuí	-7,48002413660289 -44,2562672775239	Textura argilosa
5	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 11 km de Uruçuí	-7,37531715072692 -44,5397340226919	Textura argilosa
6	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 72 km de Uruçuí	-7,4781081173569 -44,8973544593901	Textura argilosa
7	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 105 km de Uruçuí	-7,59953331202269 -45,1144112180919	Textura argilosa
8	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 14 km de Ribeiro Gonçalves	-7,68317230045796 -45,1799889653922	Textura muito argilosa
9	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 142 km de Uruçuí	-7,91190697811545 -45,1722481939942	Textura média
10	ARGISSOLOS VERMELHO- AMARELO (PVA)	Distante 41 km de Floriano	-7,08104998804629 -43,1485567800701	Textura arenosa média
11	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 63 km de Bom Jesus	-8,6854614224285 -44,5421615056694	Textura média
12	ARGISSOLOS AMARELOS (PA)	Distante 7,2 Km de Angical do Piauí	-6,13748623989523 -42,7211326081306	Textura média
13	CAMBISSOLO HÁPLIC (CX)	Distante 18,4 Km de Amarante	-6,37312995201513 -42,7950365020342	Textura média
14	LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO (LVA)	Distante 66,5 Km de Oeiras	-6,61103392951191 -42,2503695543856	Textura muito argilosa
15	LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO (LE)	Distante 19,7 Km de Regeneração	-6,18718036450446 -42,5099637173117	Textura argilosa
16	CHERNOSSOLO HÁPLIC (MX)	Distante 13,5 Km de Amarante	-6,20135298930109 -42,8001219034195	Textura argilosa
17	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 19,3 Km de Amarante	-6,15038741379977 -42,7975686918944	Textura média
18	PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS (FT)	Distante 11,1 Km de Amarante	-6,17734788917006 -42,9483348224312	Textura arenosa- média
19	ARGISSOLOS AMARELOS (PA)	Distante 18,9 Km de Palmeiras	-6,01384629495442 -42,9367735795677	Textura média
20	CHERNOSSOLO ARGILÚVICO (MT)	Distante 3 km de Amarante	-6,24671836383641 -42,8236409369856	Textura médio- argilosa

Continuação				
21	CHERNOSSOLO HÁPICO (MX)	Município de Angical	-6,08928669244052 -42,7268530894071	Textura médio-argilosa
22	PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS (FT)	Distante 4,0 Km de BR 343 campo Maio	-4,72669509239495 -42,1352452039719	Textura média
23	PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS (FT)	Distante 27,0 Km de Barras	-4,48860566260239 -42,3124975781704	Textura média
24	PLANOSSOLOS HÁPLICOS (SX)	Distante 18,0 Km de campo Maior-Barras	-4,66134206391871 -42,3089312296361	Textura arenosa-média
25	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS (PVA)	Distante 20,0 Km de Demerval Lobão	-4,7666004113853 -41,9896777812392	Textura médio-argilosa
26	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS (PVA)	Distante 5,0 Km de Barras	-4,30272568948567 -42,2992964833975	Textura médio-argilosa
27	ARGISSOLOS ACINZENTADOS (PAC)	Distante 18,0 Km de Barras- campo Maior	-4,39500080421567 -42,3177813459188	Textura arenosa-média
28	ARGISSOLOS AMARELOS (PA)	Distante 12,0 Km de campo Maior	-4,7666004113853 -41,9896777812392	Textura argilosa
29	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS (PVA)	Distante 23,0 Km de Teresina-Beneditinos	-5,26628849096597 -42,6643852796406	Textura média
30	PLANOSSOLO NÁTRICO (SN)	Distante 20,5 Km de campo Maior-Altos	-4,94568949565292 -42,3110697045923	Textura arenosa-média
31	PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS (FT)	Distante 7,0 Km de Alto longa	-5,19185819663108 -42,1908307168633	Textura média
32	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS (PVA)	Distante 2,0 Km de Batalha	-4,30272568948567 -42,2992964833975	Textura média
33	PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS (FT)	Distante 19,0 Km de campo Maior	-4,91196767427028 -42,0762607455254	Textura média
34	PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS (FT)	Distante 13,0 Km de campo Maior	-4,73403395153583 -42,1068932488561	Textura média
35	PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS (FT)	Distante 10,0 Km de União	-4,49979571625591 -42,8330390620977	Textura médio-argilosa
36	PLINTOSSOLO HÁPLICOS (FX)	Distante 7,0 Km de Miguel Alves	-4,18569747358561 -42,8184509463609	Textura média
37	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ)	Distante 13,0 Km de Miguel Alves	-4,18302046135068 -42,7844516839832	Textura arenosa-média
38	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ)	Distante 24,5 Km de Buriti do Lopes e 9,5 de Parnaíba	-3,01367615308625 -41,7679198112144	Textura arenosa
39	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ)	Distante de 27 de Luís Correia	-2,91731057367676 -41,4822390435087	Textura arenosa
40	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ)	Distante 22,0 Km de Gilbués	-9,684511, -45,449607	Textura arenosa
41	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO (RQ)	Distante 40,0 Km de Santa Filomena	-9,684500 -45,449611 W	
42	LATOSSOLO AMARELO (LA)	Distante 80,0 Km de Santa Filomena	-9,407502 S -45,452584 W	Textura média