**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Funções de pedotransferência em estudos do funcionamento
hídrico do solo da região sudeste do estado do Pará**

João Carlos Medeiros

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração: Solos
e Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2012**

João Carlos Medeiros
Engenheiro Agrônomo

**Funções de pedotransferência em estudos do funcionamento hídrico do solo
da região sudeste do estado do Pará**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MIGUEL COOPER**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração: Solos
e Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2012**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Medeiros, João Carlos

Funções de pedotransferência em estudos do funcionamento hídrico do solo da região sudeste do estado do Pará / João Carlos Medeiros. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2012. 120 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Água no solo - Pará - Sudeste 2. Física do solo 3. Floresta amazônica
4. Uso do solo I. Título

CDD 631.432
M488f

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*À minha querida família: minha companheira Jaqueline,
por tudo que representa nessa caminhada
com seu apoio constante; à Giulia
minha força para continuar;
aos meus pais Albary e
Áuria pelo apoio
e incentivo.*

OFEREÇO

*Ao casal José Cláudio Ribeiro
da Silva e Maria do Espírito
Santo por simbolizar toda uma
luta para conservar a floresta
preservada.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente a DEUS;
- Aos meus orientadores, Dr. Miguel Cooper e Dr. Michel Grimaldi, que aceitaram orientar esse trabalho, apoiando e auxiliando nas atividades realizadas;
- Aos membros do conselho de Pós-Graduação do Programa de Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade;
- Ao Dr. Álvaro Mafra pelo apoio e incentivo para que eu iniciasse no doutorado;
- Ao Dr. Álvaro Pires da Silva pela orientação no início do doutorado e pelo empréstimo dos laboratórios;
- À doutora Jaqueline Dalla Rosa pela ajuda na análise dos dados e redação deste trabalho;
- Ao professor Dr. Yves Coquet pela orientação dos trabalhos na França;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa concedida no início do Doutorado e no exterior (Sanduiche/Exterior- PDEE);
- Ao pesquisador Dr. Jullien Moeys pelo apoio no desenvolvimento das funções de pedotransferência;
- Ao pesquisador Dr. Thierry Desjardins pelo fornecimento dos dados de carbono orgânico do solo;
- Ao laboratorista do IRD Max Sarrazin pela realização das análises laboratoriais;
- Aos estudantes, Sanny Jusley de Souza Araújo, Alice Cardoso e Deise Laiana, que participaram das coletas dos dados de solo;
- Ao Dr. Luiz Roberto Martins Pinto pelo auxílio na realização das análises estatísticas;
- Ao Sr. Deurival, pela grandiosa ajuda nos trabalhos do campo;
- A todos os agricultores das áreas de abrangência do trabalho;
- A todos os colegas da pós-graduação, em especial ao Getúlio, Laura, Raul, Mariana, Selene, Renata M., Renata B., Edison, Sueli, Fabrício e Julius, pelo apoio e companheirismo;
- A todos os funcionários do departamento, em especial à Célia, Marta, Camila, Martinha, Marlene, Sônia, Leandro, Rossi, Jair, Chico e Dorival.
- A todos aqueles, não citados, mas que contribuíram de forma direta ou indireta para realização desta Tese.

*“Meu medo não me silencia, enquanto eu tiver
força para andar vou denunciar todos
aqueles que destroem a floresta”
(José Cláudio Ribeiro da Silva)*

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	21
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	23
1 INTRODUÇÃO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Clima e Amazônia	27
2.2 Dinâmica do uso do solo na Amazônia	28
2.3 Dinâmica da água no solo	30
2.4 Modelagem da água no solo	33
2.5 Funções de pedotransferência	36
2.5.1 Avaliação do desempenho das funções de pedotransferência	40
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Contexto do estudo	43
3.2 Caracterização do meio biofísico da região de estudo	44
3.3 Caracterização das áreas de estudo	46
3.4 Protocolo de amostragem	49
3.5 Métodos de análises	51
3.6 Funções de pedotransferência	53
3.6.1 Seleção das FPT	53
3.6.2 Seleção dos dados	54
3.6.3 Desenvolvimento das FPT	55
3.6.3.1 Técnica de reamostragem Bootstrap	55
3.6.4 Indicadores estatísticos de avaliação das FPT	56
3.6.5 Uso das FPT na predição das CRA	57
3.7 Análise dos componentes principais	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Avaliações das FPT conhecidas	59
4.1.1 Caracterização do conjunto de dados utilizados na avaliação das FPT	59
4.1.2 Avaliação das FPT paramétricas no conjunto total de dados	63
4.1.3 Avaliação das FPT paramétricas na camada superficial (0–10 cm)	71

4.1.4 Avaliação das FPT pontuais.....	77
4.2 Desenvolvimento da FPT para estimar os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980) da camada superficial dos solos estudados.....	82
4.2.1 Dados de entrada nos modelos.....	82
4.2.2 Avaliação das FPT com base na capacidade de estimar os conteúdos de água em diferentes potenciais	86
4.3 Relação entre o meio físico e os atributos do solo	89
4.3.1 Relação entre os parâmetros da CRA, os atributos físicos e químicos do solo, e o meio físico.....	90
4.3.2 Avaliação da variabilidade nos atributos físico-hídricos em função do meio físico.....	93
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
6 CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS	111

RESUMO

Funções de pedotransferência em estudos do funcionamento hídrico do solo da região sudeste do estado do Pará

O entendimento dos processos hídricos do solo, tais como infiltração, drenagem, e disponibilidade de água para as plantas, necessita do conhecimento da relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial, representado pela curva de retenção de água no solo (CRA). No entanto, a determinação da CRA demanda tempo e possui um custo relativo alto. Uma alternativa é sua determinação através de modelos que estimam a CRA a partir de alguns atributos de fácil determinação, chamados funções de pedotransferência (FPT). A finalidade desse trabalho foi quantificar os efeitos da mudança do uso do solo sobre os atributos físicos e hídricos no Sudeste do Estado do Pará. Utilizou-se o banco de dados do Projeto “Serviços ecossistêmicos e sustentabilidade das paisagens agrosilvipastoris da Amazônia Oriental”, para obter dados de textura (areia, silte e argila), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (CO), pH, capacidade de troca de cátions (CTC) e, as vezes, as CRA. Primeiramente, foram avaliadas 16 FPT existentes na literatura; 8 FPT paramétricas, que estimam os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten e 8 FPT pontuais, que estimam a umidade em potenciais específicos de água no solo. Posteriormente, buscando maior capacidade preditiva das FPT, através da técnica de regressão múltipla, desenvolveu-se uma FPT utilizando os atributos do solo mensurados no projeto. As melhores FPT foram utilizadas para estimar os parâmetros do modelo de van Genuchten nos sítios onde não havia CRA medida. Através desta extrapolação, avaliou-se o efeito da mudança de uso do solo sobre a distribuição dos tamanhos de poros, utilizando-se análise de componentes principais (ACP). Dentre as FPT testadas, as que apresentaram melhor resultado foram as FPT propostas por Tomasella et al. (2000), no entanto, a avaliação de desempenho realizada mostrou resultados não satisfatórios. Por outro lado, os resultados apresentados pela FPT desenvolvida neste trabalho alcançaram boa capacidade preditiva dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980). A ACP possibilitou identificar uma grande variabilidade entre os atributos medidos e estimados dos solos. Devido a esta variabilidade, não foram detectadas diferenças marcantes nos atributos dos solos em função do uso. Para isso, faz-se necessário estudos complementares, aumentando a escala e/ou classes de solo.

Palavras-chave: Física do solo; Floresta Amazônica; Uso do solo; Dinâmica da água

ABSTRACT

Pedotransfer functions in soil water functioning studies in the southeastern region of the Pará state

The understanding of soil water attributes, such as infiltration, drainage, solute movement and water availability for plants, needs the knowledge of the relationship between water content and soil matric potential, represented by the soil water retention curve (SWRC). However, the determination of the SWRC demands considerable time and has a relatively high cost. An alternative is to model its determination using pedotransfer functions (PTF) that calculate the SWRC parameters using easily obtainable soil attributes. The aim of this study was to use PTF to quantify the effects of changing land use on soil hydro-physical attributes at three locations in southern Pará. The database obtained in the project "Ecosystem services and sustainable agroforestry landscapes in Eastern Amazonia" was used in order to obtain soil texture data (sand, silt and clay), bulk density (Bd), organic carbon (OC), pH, cation exchange capacity (CEC) and the SWRC. First, 16 PTF found in the literature were evaluated (8 estimating the empirical parameters of the van Genuchten (1980) model and 8 to estimate soil moisture at specific matric potentials). Later, aiming at a greater predictive ability, a PTF was developed using the technique of multiple regression and the soil attributes determined in the project. The best PTF were used to estimate the model parameters of van Genuchten (1980) at the locations where there was no SWRC data. These results were used to determine the changes in pore distribution due to land use using principal component analysis (PCA). These changes were also associated with changes in content of OC and Bd using multivariate analysis. Of the FPT found in the literature the one that showed the best performance was the FPT developed by Tomasella et al. (2000), however, the evaluation performed showed poor results when the data was extrapolated to the locations where no SWRC were determined. The results presented by the FPT developed in this work showed a better efficiency in determining the SWRC in the locations that did not have this information. The PCA analysis performed on this data identified a large variability among the measured and estimated soil attributes. Because of this variability, there were no marked differences in soil attributes depending on land use. For this, more detailed studies are necessary at a increasing scale and/or at the soil class level.

Keywords: Soil physics; Amazon rainforest; Land use; Soil water dynamics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Foto de um conjunto de câmaras (esquerda) e esquema interno da Câmara de Richards (direita/Fonte: Libardi, 2005).....	34
Figura 2 - Exemplo de uma curva de retenção de água no solo	35
Figura 3 - Influência dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980) na CRA. Adaptado de Leong e Rahardjo, (1997).....	36
Figura 4 – Exemplos de solos estudados: (a) Latossolo Vermelho-amarelo (martelo com aproximadamente 20 cm de comprimento); (b) Argissolo Vermelho-amarelo Plíntico; (c) Argissolo Amarelo; (d) Gleissolo.....	45
Figura 5 – Exemplos de tipos de uso do solo estudados. (a) cultura de arroz após a queima da floresta nativa (no segundo plano); (b) Vegetação secundária desenvolvida após abandono de uma pastagem (juquira); (c) pastagem de Brachiaria; (d) erosão numa pastagem de vertente com forte declividade.....	45
Figura 6 - Localização dos sítios de estudo na Amazônia oriental (retângulos vermelhos) Fonte: World Wind, NASA (2006)	46
Figura 7 - Detalhe das três localidades de estudo situadas no Sul e Sudeste do Pará, (Fonte: PRODES-INPE). A=PAE Praia Alta Piranheira (Maçaranduba); B=PA Palmares II (Palmares); C=Travessão 338 Sul (Pacajá)	47
Figura 8 - Representação em boxplot de algumas características do relevo e dos solos das três localidades estudadas. Linhas internas do Box indicam os valores médios; textura da camada de superficial do solo (0 a 10 cm)	48
Figura 9 - Esquema do protocolo geral de amostragem de solos nos sítios de estudo.....	50
Figura 10 - FPT testadas com os dados adquiridos no projeto AMAZ	54
Figura 11 - Classificação textural dos solos utilizados para avaliar as FPT (n=67).....	60
Figura 12 - Representação em Boxplot da textura dos solos utilizados para testar as FPT, n= 67. Linha contínua dentro do Box representa a mediana e a linha pontilhada representa a média	61
Figura 13 - Representação em Boxplot dos valores de densidade e carbono orgânico dos solos utilizados para testar as FPT, n= 67. Linha contínua dentro do Box representa a mediana e a linha pontilhada representa a média.....	63
Figura 14 - Valores de RMSE e índice de confiança dos estimados e medidos das FPT paramétricas testadas para todas as camadas do solo	67

Figura 15 - Conteúdo de água volumétrico, estimado vs medido e resíduo vs estimado de FPT paramétricas, testadas em todas as profundidades estudadas	69
Figura 16 - Valores de RMSE (raiz do erro médio quadrado) e índice de confiança dos estimados e medidos das FPT paramétricas testadas para a camada superficial do solo (0-10 cm)	72
Figura 17 - Conteúdo de água volumétrico, estimado versus medido das FPT paramétricas, testadas nas amostras da primeira camada dos solos.....	76
Figura 18 - Conteúdo de água volumétrico, medido vs estimado e estimado vs resíduo de FPT pontuais, testadas em todas as camadas de solos estudados	81
Figura 19 - Conteúdo de água gravimétrico, medido vs estimado e estimado vs resíduo de FPT pontuais, testadas em todas as camadas de solos estudados	81
Figura 20 - Valores de umidade observados vs estimados através de FPT desenvolvidas para a primeira camada (0-10 cm), determinados através do modelo proposto por van Genuchten (1980) A linha cheia representa a reta 1:1	87
Figura 21 - Comparação entre as FPT desenvolvidas (Estimado) e as FPT propostas por Tomasella et al. (2000) (níveis 3 e 4)	88
Figura 22 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados físicos (Arg, Sil, Are, e Ds) e químicos (CO, pH, CTC) e parâmetros da CRA (θ_s , θ_r , $\ln \alpha$ e n) da camada 0-10 cm dos solos das 3 localidades. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b, com MB=Maçaranduba, PC=Pacajá, PM=Palmares), por tipo de cobertura vegetal (c) e por tipo de solo (d) com classes de solos, A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico.....	91
Figura 23 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das três localidades estudadas. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b) com MB=Maçaranduba, PC=Pacajá, PM=Palmares), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico	95
Figura 24 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das 3 localidades estudadas, após eliminar o efeito da textura do solo. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b com MB=Maçaranduba, PC=Pacajá, BPR=Palmares), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico	97
Figura 25 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) da localidade de Maçaranduba. Círculo de correlações (a) e posições	

dos pontos de observações agrupados por localidade (b), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico	99
Figura 26 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das localidades de Maçaranduba e Pacajá. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico	100
Figura 27 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) da localidade de Palmares. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classe de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo)	101
Figura 28 - ACP normalizadas dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das localidades de Maçaranduba, Maçaranduba e Pacajá, e de Palmares, após eliminar a influência da textura. Círculos de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por tipos de uso do solo (b): 1- Floresta conservada; 2- Floresta explorada; 4- Roça; 5- Perene; 10- Pasto limpo; 11- Pasto com Babaçu; 13- Pasto invadido; 14- Capoeira jovem; 15- Capoeira velha; 16- Capoeira de baixo; 17- Juquira jovem; 18- Juquira velha	103
Figura 29 - Representação em boxplot das classes de porosidade e do conteúdo de argila na camada superficial (0-10 cm) dos solos das três localidades, em função dos tipos de cobertura vegetal: floresta (Flor.); cultivos anuais (Roça) e perenes (Pere.); pastagem (Past.); Capoeira (Capo.); Juquira (Juqu.)	104
Figura 30 - Representação em boxplot das classes de porosidade e do conteúdo em argila na camada superficial (0-10 cm) dos solos de Maçaranduba, em função dos tipos de cobertura vegetal: floresta (Flor.); pastagem (Past.); capoeira (Capo.); juquira (Juqu.)	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções de pedotransferência desenvolvidas para solos do Brasil	39
Tabela 2 - Desempenho de diferentes FPT desenvolvidas para estimar a umidade em diferentes potenciais em alguns solos do Brasil	42
Tabela 3 - Número de observações por classe de solo nas três localidades estudadas.....	49
Tabela 4 - Classificação dos tamanhos de raio de poros usadas no estudo dos efeitos do uso do solo sobre a distribuição de tamanho de poros.....	52
Tabela 5 - Critérios de interpretação dos valores do índice de confiança (IC) propostos por Camargo e Sentelhas (1987).....	57
Tabela 6 - Estatística descritiva dos 67 horizontes (nível detalhado) utilizados para testar as funções de pedotransferência selecionadas na literatura	60
Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Pearson para os 67 horizontes (nível detalhado) utilizados na elaboração das FPT	62
Tabela 8 - FPT testadas para estimar os parâmetros empíricos de van Genuchten (1980)	65
Tabela 9 - Indicadores estatísticos, RMSE, EM, R ² e IC para as FPT testadas nas três profundidades estudadas	66
Tabela 10 - Estatística descritiva da umidade do solo nas três camadas estudadas, medida e estimada por FPT, em três potenciais selecionados	68
Tabela 11 - Indicadores estatísticos, RMSE, EM, R ² e IC para as FPT testadas na primeira profundidade estudada (0-10 cm).....	73
Tabela 12 – Estatística descritiva da umidade calculada em três potenciais de água no solo estimados por FPT paramétricas testadas na camada superficial dos solos estudados.....	74
Tabela 13 - Funções de pedotransferência pontuais, selecionadas para estimar o conteúdo de água em determinados potenciais no conjunto de solos nível detalhado, 3 camadas	77
Tabela 14 - Indicadores estatísticos, RMSE, EM, R ² e IC para as FPT pontuais volumétricas e gravimétricas	78
Tabela 15 - Estatística descritiva da umidade do solo calculada em três potenciais de água estimados por FPT pontuais melhor colocar o número de observações (n=67)	80
Tabela 16 - Estatística descritiva dos dados utilizados no desenvolvimento das FPT para a primeira profundidade (0 - 10 cm), n=36	82
Tabela 17 - Correlação de Pearson entre as variáveis independentes e os parâmetros da CRAS proposta por van Genuchten (1980); n=36.....	83

Tabela 18 - Coeficientes empíricos da FPT desenvolvida com os solos da primeira camada (0 - 10 cm) em todas as localidades	84
Tabela 19 - Índices de avaliação da FPT desenvolvidas com os solos (0-10 cm) em todas as localidades	86
Tabela 20 - Número de observações em cada tipo de cobertura vegetal e de uso do solo identificados nas três localidades estudadas.....	89
Tabela 21 - Número de observações (pontos amostrados) por localidade estudada e classes de solo.....	90
Tabela 22 - Coordenadas das variáveis físicas e químicas do solo (0-10 cm) e dos parâmetros da CRA nos dois primeiros componentes da ACP (Figura 22)	91
Tabela 23 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos dos pontos não detalhados, camada de 0-10 cm dos solos das três localidades, n=135.....	92
Tabela 24 - Análise inter-classes (teste de permutação de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas (ACP da figura 22).....	93
Tabela 25 - Coordenadas dos atributos relacionados à CRA (camada 0-10 cm) nos dois primeiros componentes da ACP (figura 23).....	94
Tabela 26 - Coeficientes de correlação de Pearson para os dados dos pontos não detalhados, camada de 0-10 cm dos solos das três localidades, n=135.....	94
Tabela 27 - Análises inter-classes (testes de permutações de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas (ACP da figura 23 sem controle da textura)	94
Tabela 28 - Coordenadas dos atributos relacionados à CRA (camada 0-10 cm) nos dois primeiros componentes da ACP (figura 24).....	96
Tabela 29 - Análises inter-classes (permutações de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas (ACP da figura 24 com controle da textura)	98
Tabela 30 - Análises inter-classes (testes de permutações de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas separadamente.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Descrição	Unidade
ACP	Análise de componentes principais	---
AF	Areia fina	g kg^{-1}
AG	Areia grossa	g kg^{-1}
AgDis	Água disponível para as plantas	---
AgNdis	Água não disponível	---
Are	Areia	g kg^{-1}
Arg	Argila	g kg^{-1}
CC	Capacidade de campo	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ou kg kg^{-1}
CO	Teor de carbono orgânico no solo	% ou g kg^{-1}
CRA	Curva de retenção de água no solo	---
CTC	Capacidade de troca de cátions	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$
Ds	Densidade do solo	Mg m^{-3}
EM	Erro médio	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ou kg kg^{-1}
FPT	Função de pedotransferência	---
MB	Maçaranduba	---
PC	Pacajá	---
PM	Palmares	---
PMP	Ponto de murcha permanente	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ou kg kg^{-1}
PorBio	Bioporos	---
PorMac	Macroporos	---
PorTot	Porosidade total	---
RMSE	Raiz do erro médio quadrado	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ou kg kg^{-1}
Sil	Silte	g kg^{-1}
U_{eq}	Umidade equivalente	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
w	Umidade gravimétrica do solo	kg kg^{-1}
θ	Umidade volumétrica do solo	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
θ_r	Umidade residual	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
θ_s	Umidade de saturação	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
ψ	Potencial matricial do solo	kPa

1 INTRODUÇÃO

Os últimos relatórios sobre o desmatamento na Amazônia apontam para uma sensível redução dos valores, passando progressivamente de valores anuais em torno de 27.800 km² em 2004 a 6.500 km² em 2010 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, 2011). Entretanto, nas frentes pioneiras, as transformações da paisagem permanecem dominadas pela substituição da floresta por pastagens, geralmente pouco produtivas. Este cenário de mudanças do uso do solo, é consequência da forma de exploração dos recursos naturais existente nestas regiões.

Padrões equivocados de uso da Floresta Amazônica têm levantado preocupações amplamente compartilhadas entre pesquisadores e sociedade civil. É importante examinar algumas dessas preocupações, incluindo alguns desses equívocos a respeito das consequências ambientais, para que se possa avaliar a agricultura pioneira em termos de seu custo ambiental e chances de sustentabilidade.

O solo é um componente essencial do ciclo da água, ele comanda o seu movimento no sistema solo-planta-atmosfera, e controla a disponibilidade de água para as plantas. Portanto, o estudo do comportamento da água no solo, nos diferentes sistemas de manejo utilizados na Amazônia, torna-se fundamental para compreender a função dos serviços prestados pelo solo no controle do ciclo da água.

Os estudos realizados até o momento são insuficientes para um consenso científico em torno do debate sobre a influência da cobertura dos solos da Região Amazônica na regulação do ciclo da água. Para tal consenso, é necessário maior número de estudos que quantifique o comportamento da água nos diferentes tipos de uso do solo existentes na Amazônia. Entretanto, a realização desses estudos é dificultada pela dimensão e condições de acesso a estas áreas.

Para viabilizar estes estudos, as funções de pedotransferência (FPT) são ferramentas úteis, auxiliam nos estudos do comportamento hídrico dos solos, onde, a partir de propriedades do solo de fácil obtenção, como distribuição de tamanho de partículas, carbono orgânico e densidade do solo, determinam-se atributos de difícil obtenção, com custo elevado, alta demanda de tempo e trabalho. Além disso, a alta variabilidade espacial natural observada nos atributos físico-hídricos do solo exige

quantidade elevada de amostras, o que dificulta ou até inviabiliza trabalhos em locais de difícil acesso e de grandes áreas.

No presente trabalho verifica-se a possibilidade da utilização de FPT para estimar os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980), que é utilizado para expressar a capacidade de retenção e armazenamento da água no solo, ao relacionar os conteúdos de água aos diferentes potenciais matriciais. Com isso busca-se o entendimento das alterações ocorridas no espaço poroso do solo decorrentes das mudanças no uso da terra.

Neste contexto as hipóteses deste trabalho são:

- i. o uso e desenvolvimento de FPT auxiliam no entendimento do funcionamento do solo, especialmente em regiões com baixa oferta de dados e, sobretudo de difícil obtenção;
- ii. o desenvolvimento de FPT específicas para a problemática local melhora a predição do funcionamento do solo quando comparado a FPT já existentes.

Os objetivos desse trabalho são:

- i. avaliar a eficiência das FPT existentes em estimar os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten, nos solos das áreas estudadas;
- ii. desenvolver novas FPT utilizando as variáveis preditoras medidas nos solos das áreas estudadas;
- iii. caracterizar o efeito das mudanças no uso do solo sobre a distribuição de tamanhos de poros, utilizando as CRA estimadas a partir da FPT desenvolvida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Clima e Amazônia

A bacia Amazônica é limitada a Oeste pela Cordilheira dos Andes (com elevações de até 6000 m), ao Norte pelo Planalto das Guianas (com picos montanhosos de até 3000 m), ao Sul pelo Planalto Central (altitudes típicas de 1200 m) e a Leste pelo Oceano Atlântico, por onde toda a água captada na bacia escoar para o mar. A área da Amazônia Legal no Brasil é de aproximadamente cinco milhões de km² (INPE, 2004), compreendidos pelos estados do Pará, Amazonas, Rondônia, Roraima, Acre e Amapá e parte dos estados do Tocantins, Mato Grosso e Maranhão.

Esta região possui precipitação anual média em torno de 2300 mm, entretanto, com importantes variações espaciais, entre 1500 a 3000 mm (LI et al., 2008). É caracterizada por duas estações bem distintas que se alternam. A estação chuvosa, com forte atividade convectiva, é compreendida entre novembro a março. O período seco abrange os meses de junho a setembro com precipitações mensais menores de 100 mm. Este comportamento é explicado pelos ciclos anuais da atividade das massas de ar na região (HOREL et al., 1989).

Os estudos recentes sobre as mudanças climáticas na região Amazônica advertem para os riscos de secas mais intensas e frequentes nesta região (COX et al., 2008; MALHI et al., 2008). Estes episódios de seca, como as observadas em 2005 e 2010 têm grande impacto sobre o funcionamento e a sobrevivência da floresta, e sobre a produtividade dos sistemas agrícolas na região (PHILLIPS et al., 2009). O clima é um importante fator que determina a distribuição dos tipos de vegetação que compõem os ecossistemas amazônicos, entretanto, mudanças no tipo de vegetação também podem afetar o clima local e global (SHUKLA, MINTZ, 1982; ENTEKHABI et al., 1996).

Os estudos sobre a interação Amazônia-clima foram beneficiados pelo surgimento de modelos matemáticos que permitem a quantificação dos efeitos de trocas de energia entre as superfícies, continental e oceânica, e a atmosfera. Um dos focos das pesquisas relaciona-se com o impacto da conversão de superfícies florestais em pastagens (DICKINSON, HENDERSON-SALLERS, 1988; LEAN, WARRILOW, 1989; NOBRE et al., 1991). De modo geral, os resultados obtidos

convergem para um aumento da temperatura do ar próximo à superfície (NOBRE et al., 1989), uma redução das precipitações e da evapotranspiração (de 20 a 30% do valor de floresta), e uma estação seca mais prolongada. O aumento de temperatura é causado pela redução da evapotranspiração e do fluxo de calor na superfície do terreno. Uma maior fração da energia solar fica disponível para aquecer a superfície do terreno e o ar logo acima dele. Além disso, a redução da rugosidade da superfície diminui a eficiência dos processos de trocas turbulentas, contribuindo para um aumento de calor na superfície e na camada próxima a ela (NOBRE et al., 1989).

2.2 Dinâmica do uso do solo na Amazônia

Os motivos históricos e atuais para o desmatamento da Floresta Amazônica são diversos e inter-relacionados. Compreendem desde incentivos fiscais (MORAN, 1993), políticas de colonização no passado (ANDERSEN, REIS, 1997; LAURANCE, 2001), as quais desencadearam uma forte migração para Amazônia como válvula de escape para os problemas sociais de outras regiões (SKOLE et al., 1994), além de conflitos fundiários motivados pela ausência de titularidade da terra e pela pressão da reforma agrária (FEARNSIDE, 2003; SOARES-FILHO et al., 2006), até o avanço da exploração madeireira (NEPSTAD et al., 2002), da pecuária (MERTENS et al., 2002; KAIMOWITZ et al., 2004) e o crescimento do agronegócio (LENA, 2005), destacando-se a expansão das culturas de soja sobre áreas de pastagens (ALENCAR et al., 2004). Investimentos em infra-estrutura, sobretudo a abertura de estradas e sua pavimentação, completam esse quadro, (NEPSTAD et al., 2001; CARVALHO et al., 2001; LAURANCE et al., 2001, FEARNSIDE, 2007), posto que promovem a viabilidade econômica da agricultura e da exploração madeireira na Amazônia, com consequente valorização de suas terras.

Uma análise ecológica do uso da terra na Amazônia indica a urgente necessidade de reorientar os processos que estão transformando rapidamente as florestas da região em formas insustentáveis de desenvolvimento (FEARNSIDE, 1990). Esses sistemas não conseguem manter-se de maneira perene e oferecer uma vida melhor a uma população que cresce rapidamente (FEARNSIDE, 2005), além disso, promovem também impactos sobre a biodiversidade regional (GRELLE, 2005; MATHIEU et al., 2005; BARLOW et al., 2010).

Na Amazônia brasileira, a atividade mais comum realizada pelos agricultores, consiste na retirada de grandes árvores para a utilização da madeira, queima da vegetação remanescente para produção de carvão e posterior implantação de pastagens para a pecuária extensiva (FEARNSIDE, 2007). Além disso, verifica-se uma agricultura de subsistência, predominante por pequenos produtores rurais, que introduzem várias formas de cultivo, destacando-se plantas anuais, principalmente de grãos para alimentação, e plantas perenes (frutíferas nativas) (ANDREUX, CERRI, 1989; BUSCHBACHER et al., 1988).

As pastagens são implantadas em duas situações distintas, a primeira é logo após a retirada da floresta, e a segunda, é após as culturas anuais. A tendência hoje nas frentes pioneiras é a redução do número de ciclos de cultivos de plantas anuais, ou seja, a implantação mais rápida das pastagens. Os agricultores utilizam o fogo para o manejo de invasoras e pragas nas pastagens, na época seca (VEIGA et al., 2006).

Para o cultivo das plantas anuais (milho, arroz, mandioca, etc) utiliza-se o sistema corte e queima. Este tipo de uso consiste em cultivar o solo durante dois anos e deixá-lo de três ou mais anos em pousio (FEARNSIDE, 2007). No processo de corte-e-queima, a vegetação remanescente do período de pousio é queimada, e em seguida, as culturas semeadas utilizam os nutrientes liberados através da biomassa queimada. No entanto, apesar desta primeira fertilização através das cinzas, ricas em cátions úteis para as plantas, com o passar dos anos, ocorre redução da fertilidade do solo e diminuição da produtividade das culturas. Esta redução se agrava pela baixa fertilidade natural dos solos da Amazônia (SANCHEZ, 1976). Além disso, a queda na produtividade agrícola poucos anos após o desmatamento tem sido atribuída à redução da fertilidade física do solo pela degradação da sua estrutura, que provoca redução da porosidade e da infiltração de água no solo e reduz o desenvolvimento radicular pelo aumento da resistência do solo (CHAUVEL et al., 1991; GRIMALDI et al., 1993; TEIXEIRA et al., 1996; MULLER et al., 2001).

O horizonte mais superficial dos perfis de solos (horizonte A), além de ser mais influenciado pela atividade biológica, e mais rico em nutrientes, sofre maiores oscilações de temperatura e umidade. Acima do horizonte A podem acumular-se restos orgânicos, com diferentes graus de decomposição (RESENDE et al., 2002). A retirada da vegetação e dos restos orgânicos expõe este horizonte à energia cinética

das gotas da chuva, causando a quebra dos agregados e obstrução dos poros, acarretando na redução da infiltração de água e consequente aumento da erosão (CINTRA et al., 1983; CENTURION, DEMATTÊ, 1985).

As alterações físicas no solo são verificadas logo após o desmatamento e são mais intensas se realizado de forma mecanizada (GRIMALDI et al., 1993). São muitas as fontes de degradação da estrutura dos solos da região, as mais significantes são o pisoteio animal e o cultivo do solo. Tanto o primeiro quanto o segundo compactam os horizontes superficiais causando perturbações na dinâmica hidráulica do solo (BARROS et al., 2004). Portanto, é inevitável que a conversão de florestas em áreas agropecuárias altera o equilíbrio natural existente no sistema, modificando os atributos do solo.

Algumas práticas tradicionais evidenciam a necessidade de uma nova postura a respeito do uso do solo da região Amazônica, uma vez que os efeitos físicos decorrentes assumem um grande impacto na conservação e qualidade do solo (TAVARES FILHO et al., 1999). A retirada da cobertura vegetal natural e a implantação de culturas, aliadas a práticas de manejo inadequadas, promovem o rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio. Este rompimento modifica os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, o que limita sua utilização agrícola e o torna mais suscetível à erosão (CENTURION et al., 2001).

2.3 Dinâmica da água no solo

O estado da água no solo, assim como os demais corpos na natureza, pode ser caracterizado por sua energia, podendo ser este determinado de diferentes formas e quantidades. Após a umidade, o estado de energia da água é o atributo físico mais importante dos solos (REICHARDT, 1990).

Quanto menor a energia do corpo, maior a sua estabilidade, tendo em vista que a lei geral da natureza é de os corpos ocuparem um estado mínimo de energia, por isso, há uma busca constante por estados mais estáveis (de menor energia). A água segue esta lei Universal, portanto, o movimento da água no solo é determinado pelo gradiente de energia potencial da água entre dois pontos, ocorrendo sempre no sentido do maior para o menor estado de energia livre (REICHARDT, TIMM, 2004), podendo ocorrer em todas as direções.

O estado físico da água no solo é definido pela quantidade de água retida na matriz do solo e pela energia necessária para retirá-la. O potencial total da água no solo (Ψ_t) é definido em relação a um estado de referência da água (água pura, livre, a uma temperatura (T_0) e altura (Z_0) definidas, e a pressão atmosférica (P_0)). Ψ_t é a soma das energias causadas por um conjunto de forças, e tem como principais componentes os potenciais: gravitacional (ψ_g), de pressão (ψ_p), matricial (ψ_m) e osmótico (ψ_{os}).

$$\Psi_t = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_{os}$$

O potencial gravitacional é função da altura do ponto considerado no solo em relação a altura Z_0 . O potencial osmótico depende da concentração de solutos na água. Na maioria dos solos o componente osmótico é desprezível, principalmente quando o solo está próximo a capacidade de campo e a concentração salina é insignificante (REICHARDT, 1985). O potencial de pressão é função da pressão da água em relação à pressão atmosférica P_0 . Quando $\psi_p \geq 0$ o solo está saturado com água (lençol freático); Quando $\psi_p < 0$, a água está retida pela matriz do solo (tensão superficial), neste caso, a pressão da água é inferior a pressão atmosférica.

A compreensão da dinâmica da água no solo através do monitoramento dos componentes do potencial da água auxilia nos estudos sobre o funcionamento físico-hídrico do solo. Estes estudos são fundamentais para compreender a dinâmica físico-hídrica no sistema solo-planta-atmosfera e as mudanças que eventualmente possam ocorrer neste sistema pelas alterações nos tipos de uso do solo.

O sistema solo-planta atua no ciclo da água em três níveis:

- i. No controle da infiltração, determinando a fração do volume de água que entra no solo daquela que escoar na superfície;
- ii. No tamanho da reserva de água disponível para a vegetação; esta disponibilidade de água é essencial para o desenvolvimento das plantas e determinante na capacidade da vegetação de enfrentar os episódios de estiagem;
- iii. No controle do fluxo de água para a sub-superfície, que irá recarregar os lençóis freáticos. Esta parte do ciclo da água, onde os fluxos são muito mais lentos do que na superfície, desempenha um papel fundamental na manutenção do regime hidrológico dos cursos de água em períodos secos.

Considerando a existência de uma cobertura vegetal sobre o solo, a chuva é primeiramente interceptada pelo dossel até atingir a superfície do solo, onde parte da água é infiltrada, e parte pode escoar superficialmente. Dependendo da direção do escoamento desta água, ela será contabilizada como entrada ou saída do sistema. A infiltração da água é dependente de diversos fatores, entre eles, destacam-se: a intensidade e duração do evento chuvoso; condições físicas da superfície do solo; distribuição de tamanho dos poros; grau de saturação em água, entre outros (MUSGRAVE, 1955).

A integração entre os processos de infiltração, percolação e redistribuição da água no solo, tem estreita ligação com a absorção de água pelas plantas, devido à distribuição das raízes, e as variações espaciais das propriedades físicas do solo (van DAN, FEDDES, 2000). O movimento da água do solo até a atmosfera, passando pela planta, acontece do solo para as raízes. O fluxo é dependente da concentração de vapor na atmosfera, da diferença de energia entre a água do solo e das raízes, da distribuição das raízes e da resistência imposta ao fluxo da água na interface solo-raiz (HILLEL, 1971; REICHARDT, TIMM, 2004).

Do ponto de vista hidrológico, o solo pode ser entendido como um reservatório, cujo volume de água armazenada pode ser bastante variável no tempo, dependendo de muitos fatores, tanto do clima quanto do tipo e do uso do solo.

A distribuição e tamanho dos poros determinam tanto o fluxo quanto a retenção da água no solo. São dois processos básicos que podem explicar a retenção de água: (1) Capilaridade – ocorre nos poros menores que 30 μm , influenciada pela estrutura do solo e pela textura e (2) Adsorção: ocorrem nas superfícies dos sólidos como filmes presos a elas, sendo mais importante na faixa mais seca do solo e é influenciada pela superfície específica do solo dependendo da textura e da composição mineralógica do solo (HILLEL, 1971; REICHARDT, 1990).

A textura e a estrutura do solo são os principais fatores que interferem na capacidade do solo em reter a água, pois estas definem o tamanho e o arranjo das partículas, e conseqüentemente a distribuição de tamanho de poros (REICHARDT, 1990; SCHEINOST et al., 1997). Outro fator relevante é a composição mineralógica do solo. Alguns argilo-minerais, por exemplo, os 2:1 têm maior propriedade de retenção de água, como as esmectitas, vermiculitas e ilitas, ao contrário da caulinita. Os parâmetros que exercem maior influência sobre a dinâmica

da água no solo são a estrutura, a textura e o teor de matéria orgânica (MONTENEGRO, 1976; BRADY, 1983).

A dinâmica da água no solo é um dos temas centrais da física do solo, seu conhecimento é fundamental para os estudos de sustentabilidade dos sistemas agrícolas (NIELSEN et al., 1972; HILLEL, 1980). A complexidade da organização do solo e dos fenômenos envolvidos na dinâmica da água torna sua quantificação uma tarefa quase impossível sem a utilização de modelos matemáticos (KABAT, 1997).

Pela lei de conservação das massas, onde são computadas as entradas e saídas de água do sistema, podemos contabilizar a variação de umidade dentro do perfil do solo. As principais entradas de água no sistema são a precipitação e/ou irrigação, e pode haver um fluxo ascendente de água no solo (PREVEDELO, 1996). Por outro lado, as principais saídas da água do sistema são: o escoamento superficial (*runoff*), a descida da água no perfil do solo que abastece os lençóis freáticos (BRADY, 1983). Além dessas perdas, a água pode ser evaporada pela superfície do solo ou ser retirada do solo pelas raízes e transpirada pelas folhas do dossel, a soma da evaporação mais a transpiração é a evapotranspiração. No ciclo hidrológico, a evapotranspiração tem papel fundamental, retornando para a atmosfera entre 60 a 80% da precipitação (TATEISH, 1996).

2.4 Modelagem da água no solo

A demanda por estudos que possibilitem o entendimento do comportamento da água no solo é cada vez mais frequente. Além disso, são crescentes os problemas agrícolas e ambientais relacionados ao manejo da água nos sistemas agrícolas. A quantificação da água disponível para as plantas, o movimento de solutos no solo (principalmente em estudos de poluição do solo e dos aquíferos), assim como, os estudos da interação solo-planta-atmosfera, necessitam do conhecimento da curva de retenção de água (CRA).

Existem vários modelos que descrevem a CRA, ou seja, a relação entre o potencial matricial da água no solo com o conteúdo de água retido pelo mesmo (BROOKS, COREY, 1964; CAMPBELL, 1974; van GENUCHTEN, 1980; ARYA, PARIS, 1981; SAXTON et al., 1986). Estas CRA auxiliam como indicadores diretos e indiretos do comportamento de outras propriedades do solo, tais como a distribuição do tamanho de poros, condutividade hidráulica, aeração e a velocidade de infiltração

de água, além de possibilitar a quantificação do conteúdo de água disponível para as plantas (TOPP et al., 1993).

A técnica mais utilizada para determinar a CRA é o princípio da câmara proposta por Richards, (1965), que corresponde a uma câmara de pressão hermeticamente fechada (Figura 1). Esta câmara possui internamente uma placa porosa, cujo tamanho dos poros permite, dentro de certos limites, somente o fluxo de água, e não o de ar. Esta 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 CRA de amostras indeformadas (estrutura preservada), ou deformadas. É necessária a determinação de uma série de umidades correspondentes a vários potenciais matriciais aplicados sucessivamente.

Figura 1 - Foto de um conjunto de câmaras (esquerda) e esquema interno da Câmara de Richards (direita/Fonte: LIBARDI, 2005)

Um dos modelos mais utilizados para o ajuste da CRA é definido pela eq. (1), conhecido como modelo de van Genuchten (1980) (HODNETT, TOMASELLA, 2002), que relaciona a umidade do solo ao valor absoluto do potencial matricial (Ψ) conforme Equação 1.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \psi|^n)^m} \quad (1)$$

A figura 2 mostra uma CRA para um determinado solo. Nesta foram plotados os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980), além disso, observa-

se a “pressão” de entrada de ar, que representa a diferença de pressão entre a água e o ar necessário para drenar o maior poro do solo.

Figura 2 - Exemplo de uma curva de retenção de água no solo

O modelo proposto por van Genuchten (1980) considera um valor residual da umidade (θ_r), ou seja, valor mínimo que é atingido em potencial matricial tendendo ao infinito negativo, e um valor máximo, umidade de saturação (θ_s), atingida com potencial matricial inferior ou igual a zero. Estes dois parâmetros podem ser mensurados ou estimados, já os parâmetros empíricos α , n e m são conhecidos somente por estimativas através de regressões (LIBARDI, 2004).

Os pontos da relação $\theta(\psi)$ são ajustados por um modelo escolhido a partir de critérios relacionados ao tipo de solo e às necessidades do estudo. No caso do modelo de van Genuchten, para valores fixos de n e m , o valor do parâmetro α irá influenciar diretamente no valor da pressão de entrada de ar (Figura 3). Este valor pode ser maior do que a pressão de entrada de ar, contudo, para pequenos valores de m , o parâmetro α pode ser igual a esta pressão (FREDLUND, XING, 1994). Além disso, é possível observar que o parâmetro n controla a inclinação da CRA e que o m controla a inflexão da parte inferior da CRA e a umidade residual da mesma.

O parâmetro n é adimensional e para valores de α e m fixos, ele determina a inclinação da curva no ponto de inflexão da curva. Se o valor de n é grande, a curva possui uma grande inclinação (íngreme), com uma rápida diminuição do teor de água quando o ψ torna-se mais negativo (Figura 3). Se o valor de n é baixo, a mudança no teor de água é muito gradual (HODNETT e TOMASELLA, 2002). Pequenos valores de α , indicam pouca alteração no conteúdo de água com a variação do potencial da água no solo, o que é observado em solos argilosos e/ou desestruturados, ou seja, solos compactados (HODNETT e TOMASELLA, 2002).

Figura 3 – Influência dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980) na CRA. Adaptado de Leong e Rahardjo, (1997)

A determinação da CRA demanda de tempo e custo elevado, em função disso, como alternativa, surgiram nos últimos anos alguns modelos que relacionam a umidade do solo com parâmetros de fácil determinação (textura, D_s , CO do solo, etc.) e estes modelos são conhecidos como Funções de Pedotransferência (BOUMA, 1989).

2.5 Funções de pedotransferência

O termo função de pedotransferência (FPT) foi introduzido por Bouma, (1989) com o objetivo de descrever a relação estatística existente entre os atributos do solo de fácil determinação (distribuição de tamanho de partículas, densidade, carbono orgânico, etc) com propriedades hídricas do solo (retenção de água, condutividade hidráulica, etc). De forma geral, as FPT servem para estimar atributos do solo de difícil determinação através de outros determinados rotineiramente.

Os pioneiros em quantificar e interpretar relações existentes entre as propriedades do solo foram Briggs e Shantz (1912) citado por PACHEPSKY e RAWLS (2004). Após este trabalho, Salter e Williams (1965) foram os primeiros a quantificar a eficiência da composição granulométrica e do carbono orgânico em explicar a quantidade de água disponível no solo. Logo após, Petersen et al. (1968), através de uma regressão múltipla, mostraram maior relação entre a estrutura do solo com a quantidade de água em altos potenciais do que em baixos potenciais (mais negativos). Outros trabalhos surgiram (GUPTA, LARSON, 1979; RAWLS et al., 1982; SAXTON et al., 1986), até que Bouma e van Lanen (1987) introduziram o termo conhecido como “*Pedotransfer function*”, Função de Pedotransferência, abordado de forma mais acessível em Bouma (1989).

Em solos tropicais, Pidgeon (1972) foi o primeiro a relacionar atributos dos solos com comportamento hídrico do solo. Após esse trabalho, surgiram muitos outros (LAL, 1979; AINE, PERIASWAMY, 1985; ARRUDA, 1987; DIJKERMAN et al., 1988; van den BERG et al., 1997; TOMASELLA e HODNETT, 1998 e 2000; BERNOUX et al., 1998; OLIVEIRA et al., 2002; MEDINA et al., 2002; GIAROLA et al., 2002; REICHERT et al., 2009; BARROS, 2010).

As FPT podem ser classificadas em dois tipos: FPT de classe e FPT contínua (WÖSTEN et al., 1995). As primeiras predizem certas propriedades dos solos com referência à classe a qual o solo pertence (por exemplo, Latossolo, Argissolo). As FPT contínuas predizem certas propriedades dos solos como uma função contínua das variáveis medidas. Outro tipo de classificação para FPT foi proposta por Vereecken et al. (2010), que classificaram as FPT em paramétricas, que estimam os parâmetros empíricos da CRA, e pontuais, que estimam o conteúdo de água em diferentes potenciais da água no solo. Os trabalhos publicados nos últimos anos privilegiam as FPT paramétricas (VEREECKEN et al., 2010), para alimentar os modelos matemáticos que descrevem o movimento de água e solutos no solo, assim como as interações solo-planta-atmosfera.

A comparação dos dois tipos de FPT em várias regiões do Brasil mostrou que as FPT pontuais são mais precisas do que as paramétricas (TOMASELLA et al., 2003). Segundo os mesmos autores, a umidade do solo depende de variáveis específicas para cada potencial da água no solo. Essa dependência não se reflete de forma direta nos parâmetros empíricos dos modelos da CRA.

As principais FPT desenvolvidas para solos brasileiros são apresentadas na tabela 1, com os dados de entrada e saída dos modelos. A maioria dessas FPT é pontual. A limitação destas FPT está no fato de não permitir o conhecimento dos parâmetros de ajuste aos modelos tradicionais, que devem ser calculados após a estimativa dos pontos (umidades vs potencial) das CRA.

A utilização de FPT produzidas com solos de determinadas regiões, com distintos climas, podem não ser apropriadas em outras regiões (TOMASELLA et al., 2003). Estas diferenças, quando não consideradas, podem influenciar na qualidade dos valores estimados. Portanto, a escolha de uma FPT adequada é imprescindível, pois impedirá possíveis equívocos.

No Brasil, os pioneiros em relacionar a textura do solo com umidade do solo foram Arruda et al. (1987). Mais tarde, Tomasella e Hodnett (1998) produziram funções para solos da Amazônia, para prever parâmetros de Brooks-Corey usando a textura (três classes: areia, silte, argila), densidade, porosidade e conteúdo de água. Neste estudo, os autores observaram alta correlação entre valores medidos e valores estimados. Utilizando dados de relatórios de levantamentos de solos de várias localidades do Brasil, Tomasella et al. (2000) utilizaram como variáveis preditoras a textura, carbono orgânico, umidade equivalente (umidade no potencial de -33 kPa) e densidade do solo para estimar os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten. Em Pernambuco, Oliveira (2002) desenvolveu FPT que estima umidade do solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP). Neste mesmo ano, Giarola et al. (2002), através de regressões múltiplas, produziram FPT para solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, que relacionam a textura e os teores de óxidos de Fe e Al, com a umidade volumétrica na CC e no PMP. A CRA e a curva de resistência do solo a penetração foram estimadas por Silva et al. (2008) através de FPT. Recentemente, Reichert et al. (2009) produziram FPT para estimar a umidade volumétrica do solo em potenciais específicos (Tabela 1). Devido à grande área do território brasileiro e sua diversidade de tipos de solo e de clima, ainda são escassos os trabalhos que propõe FPT para estimar parâmetros relacionados à dinâmica da água no solo.

Tabela 1 - Funções de pedotransferência desenvolvidas para solos do Brasil

Fonte	Resultados	Variáveis Preditoras	Local
Arruda et al. (1987)	$\theta_{33 \text{ kPa}}$, $\theta_{1500 \text{ kPa}}$	Textura	São Paulo
Tomasella et al. (1998)	Parâmetros do modelo de Brooks-Corey	Textura e carbono orgânico	Amazônia
Tomasella et al. (2000)	Parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten	Textura, densidade do solo, carbono orgânico, umidade equivalente	Brasil
Giarola et al. (2002)	$\theta_{10 \text{ kPa}}$, $\theta_{1500 \text{ kPa}}$	Textura	Rio Grande do Sul e Santa Catarina
Oliveira et al. (2002)	$\theta_{33 \text{ kPa}}$, $\theta_{1500 \text{ kPa}}$	Textura e densidade do solo	Pernambuco
Reichert et al. (2009)	$\theta_6 \text{ kPa}$, $\theta_{10 \text{ kPa}}$, $\theta_{33 \text{ kPa}}$, $\theta_{100 \text{ kPa}}$, $\theta_{500 \text{ kPa}}$, $\theta_{1500 \text{ kPa}}$	Textura, matéria orgânica e densidade do solo e de partícula	Rio Grande do Sul
Barros (2010)	$\theta_{10 \text{ kPa}}$, $\theta_{33 \text{ kPa}}$, $\theta_{1500 \text{ kPa}}$ Parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten	Textura Textura, densidade do solo, carbono orgânico	Solos do Nordeste Brasileiro

As principais técnicas utilizadas para desenvolver FPT estão descritas em Pachepsky and Rawls (2004). E a maior parte dessas equações é baseada em regressões estatísticas (WOSTEN et al., 1997; TOMASELLA et al., 1998, 2000; OLIVEIRA et al., 2002; GIAROLA et al., 2002; CRESSWELL et al. (2006); REICHERT et al., 2009). As regressões estatísticas aplicadas para modelar relações entre duas ou mais variáveis têm três objetivos: (i) especificar um modelo de regressão; (ii) estimar um determinado parâmetro; (iii) estimar a variável dependente a partir de valores das variáveis independentes (VERECKEN e HERSTET, 2004). Segundo esses mesmos autores, o passo mais importante na elaboração de uma FPT é a escolha das variáveis independentes, ou variáveis preditoras. Esta escolha exige um pré-entendimento de quais variáveis independentes podem atuar de forma mais pronunciada na variável dependente, ou variável estimada. Devem-se retirar da análise as variáveis que possuem alta correlação entre si. As técnicas mais aplicadas para selecionar variáveis preditoras são: *stepwise*; *backward elimination*; *forward selection*; e *stagewise* (GUNST e MASON, 1980). Além disso, são conhecidas outras técnicas de seleção de variáveis, menos utilizadas, mas que apresentam eficiência satisfatória, como por exemplo, o pacote do programa estatístico “R” denominado “Leaps” descrito em Schwartz (1978).

Os atributos do solo mais utilizados com variável independente são: textura do solo (frações areia, silte e argila), Ds, e CO. Em alguns casos, as FPT são elaboradas com outros atributos, por exemplo, pH, densidade de partículas e capacidade de troca de cátions (CTC).

Existe uma predominância de FPT para solos de regiões de clima temperado (WOSTEN et al., 1999, 2001; PACHEPSKY, RAWLS, 2004). As diferenças na estrutura e composição mineralógica dos solos levam a diferenças no comportamento físico-hídrico dos solos tropicais quando comparados aos solos de regiões temperadas (RAWLS, PACHEPSKY, 2002; HODNETT, TOMASELLA, 2002). Um fator importante que determina estas diferenças é o baixo teor de silte presente nos solos tropicais (TOMASELLA et al., 2003). Além disso, observa-se uma diferença marcante no comportamento da água entre solos com predomínio de argila 2:1 ou de argila 1:1. Os Latossolos são um exemplo de solos de clima tropical, caracterizados por minerais do tipo 1:1 e apresentando unidades estruturais (micro-agregados) muito diferentes das unidades estruturais formadas em solos com predomínio de minerais do tipo 2:1.

2.5.1 Avaliação do desempenho das funções de pedotransferência

A acurácia de uma estimativa mede a correlação entre os valores estimados e os valores medidos, ou seja, informa o quanto da estimativa obtida está relacionada com o "valor real". Informa também quanto do valor estimado é "bom", ou seja, quanto o valor estimado é "próximo" do valor real, além disso, nos fornece a "confiabilidade" daquela estimativa (VERECKEN et al., 2010).

Muitos trabalhos têm discutido as formas de avaliar as FPT, principalmente em relação a sua precisão, (WÖSTEN et al, 2001; SCHAAP, 2004; DONATELLI et al, 2004). Não há um único índice capaz de avaliar conclusivamente um modelo (BALCI, 1997; SMITH et al., 1997; YANG et al., 2000), portanto, há necessidade de utilização de mais de um índice, para adequada checagem da capacidade preditiva do modelo. Neste sentido, Belocchi et al. (2002) descrevem que são três os elementos relevantes na avaliação de uma FPT: (i) capacidade de produzir resíduos pequenos; (ii) alta correlação entre valores estimados e valores medidos e (iii) ausência de erro sistemático.

Os índices mais utilizados para avaliar FPT, inclusive para os solos do Brasil (Tabela 2) são: erro médio (EM) eq. (2), raiz do erro médio quadrado (RMSE) eq. (3), também apresentado como raiz da diferença média quadrada (RMSD) e o coeficiente de determinação (R^2) eq. (4) (DONATELLI et al., 2004).

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2 / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \quad (4)$$

onde: n representa o número de dados; O_i os valores de umidade observados (medidos), e E_i os valores de umidade estimados (preditos).

O índice RMSE representa o erro total de predição, é a raiz quadrada do erro, conseqüentemente, sempre positivo. O desempenho da FPT aumenta quando o RMSE calculado aproxima-se de zero. Este índice é uma medida frequentemente usada para avaliar modelos. O RMSE é uma boa medida de precisão. As diferenças individuais entre valores estimados e medidos são também chamadas de resíduos, e o RMSE serve para agregá-los em uma única medida da capacidade preditiva da função. A medida mais comum encontrada na literatura para avaliar estatisticamente uma FPT é por meio do RMSE, seus valores oscilam entre 0,02 a 0,11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (WÖSTEN et al., 1995; PACHEPSKY et al., 2004).

Tabela 2 - Desempenho de diferentes FPT desenvolvidas para estimar a umidade em diferentes potenciais em alguns solos do Brasil

Fonte	ψ_m	EM	RMSE	R^2
Arruda et al. (1987)	-33	0,070	0,155	0,03
	-1500	0,115	0,148	0,11
Tomasella et al. (1998)	Média de vários potenciais	0,008	0,062	nc
	-10	-0,043	0,060	0,84
Tomasella et al. (2000)	-33	0,016	0,052	0,79
	-1500	-0,008	0,066	0,60
Giarola et al. (2002)	-10	nc	nc	0,79
	-1500	nc	nc	0,81
Oliveira et al. (2002)	-33	0,056	0,101	0,443
	-1500	0,044	0,101	0,047
Para todas as variáveis dependentes				
Reichert et al. (2009)	-6	nc	0,053	0,67
	-10	nc	0,049	0,67
	-33	nc	0,044	0,62
	-100	nc	0,039	0,64
	-500	nc	0,039	0,56
	-1500	nc	0,039	0,62
	Derivadas da textura do solo			
	-10	nc	nc	0,54
	-33	nc	nc	0,46
	-1500	nc	nc	0,44

ψ_m =potencial matricial; EM=erro médio; RMSE=raiz do erro médio quadrado; e R^2 =coeficiente de determinação; nc=não calculado.

O EM assume valores positivos ou negativos, que indicam a tendência da FPT para subestimar ou superestimar, respectivamente. Representa o quanto do erro total explicado pelo erro sistemático do modelo na regressão. O restante do erro é atribuído à variância do modelo (BAKER, 2008). Quanto mais próximo de zero for o valor de EM, melhor será o desempenho do modelo.

O coeficiente de determinação (R^2) indica quanto da variância da variável estimada é explicada pela variância das variáveis medidas. Um bom modelo de regressão deve ter um RMSE baixo, um R^2 alto e um valor de EM relativo baixo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Contexto do estudo

Este estudo utilizou dados produzidos no Projeto “Serviços ecossistêmicos e sustentabilidade das paisagens agrosilvipastoris da Amazônia Oriental” (projeto CNPq). Este projeto, financiado pela ANR (Agence Nationale de la Recherche, France) e CNPq, nomeado como AMAZ, foi conduzido simultaneamente na Amazônia brasileira e colombiana. Ele analisa as interações entre os processos ecológicos e sócio-econômicos determinantes das transformações atuais das paisagens amazônicas.

As frentes pioneiras do Sul do estado do Pará foram escolhidas para desenvolver este projeto. Após o ano de 1970 (década de 70) esta região se caracteriza por intensa dinâmica econômica, principalmente, pela implantação de infra-estruturas rodoviárias (Trans-Amazônica, etc), instalação de grandes projetos de exploração minerais (Carajás) e hídricos (Tucuruí), além de projetos de desenvolvimento agrários iniciados pelos governos militares. Estas diversas ações atuaram de forma marcante no crescimento demográfico desta região. Muitas famílias de pequenos agricultores migraram do Nordeste do Brasil. A agricultura familiar é um dos atores sociais responsáveis pela transformação dos ecossistemas amazônicos. Esses pequenos produtores tendem a continuar suas migrações após venderem aos grandes fazendeiros de criação de gado as terras por eles desmatadas e transformadas em pastagens pouco produtivas (MUCHAGATA e BROWN, 2003). Portanto, a estabilização das frentes pioneiras é um grande desafio para a redução da taxa de desmatamento, mas também na busca de sistemas mais sustentáveis de produção agrícola. Neste contexto, a finalidade do projeto AMAZ é proporcionar aos agentes locais, ferramentas para a concepção de políticas públicas e sistemas agrícolas que permitam conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação dos recursos naturais.

A obtenção dos dados e suas análises resultaram de uma parceria entre as seguintes instituições: no Brasil (Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA; Universidade Federal do Pará-UFPA; Museu Paraense Emílio Goeldi – MPEG e Universidade de São Paulo-USP (ESALQ)) e na França (Institut de Recherches pour

le Développement-IRD; AgroParisTech e Institut National de Recherche Agronomique-INRA).

3.2 Caracterização do meio biofísico da região de estudo

Segundo a classificação de Köppen-Geiger o clima da região do estudo (sul e sudeste do Estado do Pará), é do tipo equatorial, Aw (KOTTEK et al., 2007). As precipitações médias anuais são de 1700 mm, com uma estação seca bem pronunciada com duração de 4 a 5 meses, de Junho-Julho a Outubro-Novembro. A umidade relativa média é em torno de 80%. A amplitude da temperatura média diurna é quase nula (em torno de 27 °C), a mínima e a máxima são de 21 e 32 °C, respectivamente (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2011).

O relevo é ondulado a forte ondulado, constituído de colinas alongadas com desníveis variando de 20 a 100 metros, desenvolvido sobre rochas cristalinas do escudo Brasileiro (Paleoproterózoico). Existe grande diversidade nos tipos de rocha da região de estudo, com predomínio para rochas magmáticas (granitos, granodioritos) e rochas metamórficas (gnaisses, etc) (BRASIL, 1974; CPRM, 2011).

Quanto aos tipos de solos, as classes que predominam em associações são: Argissolos Vermelho-Amarelo; Argissolos Vermelho-Amarelo Plíntico e Latossolos Amarelo, Latossolos Vermelho-Amarelo, Cambissolos e Gleissolos (Figura 4).

A cobertura vegetal natural da região do estudo inclui: Floresta Ombrófila Densa Submontanha; Florestas Abertas Latifoliada e Mista; Florestas Densas de Submontanha, de Platô e do Vale (SEPOF, 2011a,b).

Figura 4 – Exemplos de solos estudados: (a) Latossolo Vermelho-amarelo (martelo com aproximadamente 20 cm de comprimento); (b) Argissolo Vermelho-amarelo Plíntico; (c) Argissolo Amarelo; (d) Gleissolo

A transformação da paisagem é dominada pela substituição da floresta por pastagens (Figura 5). Entretanto, existe uma diversidade de trajetória e dinâmica do uso da terra, em função de diferentes fatores, com predomínio dos socioeconômicos, (projeto dos agricultores, assistência técnica, acesso a créditos, mão-de-obra, etc) e dos geográficos (acesso aos mercados, infra-estrutura).

Figura 5 – Exemplos de tipos de uso do solo estudados. (a) cultura de arroz após a queima da floresta nativa (no segundo plano); (b) Vegetação secundária desenvolvida após abandono de uma pastagem (juquira); (c) pastagem de Brachiaria; (d) erosão numa pastagem de vertente com forte declividade

3.3 Caracterização das áreas de estudo

O estudo foi realizado na região sul e sudeste do Estado Pará, em três localidades situadas nos municípios de Nova Ipixuna, Parauapebas e Pacajá, (Figura 6 e 7). A escolha dessas localidades deu-se por oferecer uma diversidade de condições, por exemplo: história da ocupação, distância das cidades, infra-estrutura, tamanho dos estabelecimentos agrícolas. As áreas selecionadas foram:

- ✓ No município de Nova Ipixuna: o Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta e Piranheiras, especificamente a localidade de Maçaranduba ($4^{\circ} 36' S$, $49^{\circ} 26' W$); criada em 1994, com o objetivo de exploração agroextrativista, com lotes de 70 ha em média.
- ✓ No município de Parauapebas: o Projeto de Assentamento Palmares II ($5^{\circ} 45' S$, $49^{\circ} 56' W$); criado em 2001, com agricultores pertencentes ao Movimento dos Sem Terra, com lotes de 26 ha em média.
- ✓ No município de Pacajá: o Travessão 338 sul da Rodovia Transamazônica ($3^{\circ} 40' S$, $50^{\circ} 56' W$); criada em 1996, caracterizado por uma agricultura diversificada com plantações de cacau em manchas de Nitossolo, com lotes de 86 ha em média.

Figura 6 - Localização dos sítios de estudo na Amazônia oriental (retângulos vermelhos) Fonte: World Wind, NASA (2006)

Figura 7 - Detalhe das três localidades de estudo situadas no Sul e Sudeste do Pará, (Fonte: PRODES-INPE). A=PAE Praia Alta Piranheira (Maçaranduba); B=PA Palmares II (Palmares); C=Travessão 338 Sul (Pacajá)

As três localidades estudadas possuem diferenças marcantes quanto a declividade, profundidade e textura (Figura 8). Palmares é caracterizada por um relevo mais acidentado e presença mais frequente de Latossolos (Tabela 3), ou seja, solos mais profundos e mais argilosos que nas outras duas localidades (Pacajá e Maçaranduba). Por outro lado, as áreas de Pacajá e Maçaranduba apresentam relevo variando de plano a ondulado com predomínio de solos menos profundos (Cambissolos, Argissolos e Gleissolos (Tabela 3). Estas diferenças entre as localidades se justificam principalmente pela natureza do material de origem, com predominância de granitos em Maçaranduba e Pacajá, e rochas metamórficas mais ricas em ferro na localidade de Palmares.

Figura 8 - Representação em boxplot de algumas características do relevo e dos solos das três localidades estudadas. Linhas internas do Box indicam os valores médios; textura da camada de superficial do solo (0 a 10 cm)

Tabela 3 - Número de observações por classe de solo nas três localidades estudadas

Localidades	Argissolos	Cambissolos	Gleissolos	Latosolos
Maçaranduba	16	9	7	9
Pacajá	10	15	15	4
Palmares	11	14	0	20
<i>Total</i>	<i>37</i>	<i>38</i>	<i>22</i>	<i>33</i>

Os principais tipos de cobertura vegetal encontrados nas localidades estudadas são: florestas, roças, cultivos perenes, pastagens, capoeiras e juquiras. As florestas foram classificadas em floresta conservada, explorada e queimada. As roças são as áreas onde há cultivos de plantas anuais, por exemplo: arroz, milho e feijão, que utilizam na maioria das áreas o sistema corte-e-queima. Os cultivos perenes compõem as áreas cultivadas com cacau, frutíferas, etc. As pastagens foram classificadas em pasto limpo, pasto com babaçu e pasto invadido. As capoeiras são vegetações secundárias, estabelecidas após uma roça, foram classificadas em capoeira jovem e capoeira velha. As juquiras são constituídas de vegetação secundária remanescente após uma pastagem e foram classificadas em juquira jovem e juquira velha.

3.4 Protocolo de amostragem

Em cada uma das três localidades de estudo foram realizadas pesquisas sócio-econômicas em 51 lotes. Com base nestes resultados foi realizada uma tipologia dos lotes em função do seu tamanho, localização (física e topográfica), uso do solo e sistema de produção, a partir do qual foram escolhidos 9 lotes (3 lotes em 3 áreas distintas de cada localidade) onde realizaram-se as amostragens de solo. Em cada um dos 9 lotes foram definidos cinco pontos de amostragem. Estes pontos correspondem a uma categoria de uso do solo cujo histórico de exploração florestal e agrícola foi reconstituído. Os usos foram caracterizados por vários especialistas em biodiversidade e de serviços ecossistêmicos. Esses pontos de amostragem são espaçados uniformemente ao longo de um transecto orientado ao longo da maior diagonal do lote ou ao longo de um eixo norte-sul. A figura 9 mostra um esquema do protocolo de amostragem.

Figura 9 - Esquema do protocolo geral de amostragem de solos nos sítios de estudo

Em função do grau de dificuldade de acesso às localidades e ao tempo disponível para a pesquisa foram definidos dois níveis de amostragem para caracterizar os atributos dos solos nas diversas situações de uso do solo do projeto. Estes níveis são descritos a seguir:

- Nível "pouco detalhado": foram determinados a Ds, textura, conteúdo de CO, pH do solo e CTC em todos os pontos (135) para a camada superficial (0-10 cm).
- Nível "detalhado": foram determinadas as CRA dos solos, a Ds, a textura e o conteúdo de CO em três profundidades (0-5, 10-15 e 40-45 cm) em 27 pontos referentes a um ponto por lote nas três localidades (9 lotes x 3 localidades).

3.5 Métodos de análises

A densidade do solo foi determinada em várias profundidades utilizando anéis volumétricos de 7,3 cm de diâmetro e 5 cm de altura (BLAKE e HARTGE, 1986), em 4 trincheiras abertas por ponto (4 repetições por ponto).

O conteúdo de carbono orgânico do solo foi determinado utilizando-se amostras compostas de cada profundidade das quatro trincheiras abertas por ponto. Após homogeneização, cerca de 1 g de terra fina seca ao ar foi triturado em almofariz e passado em peneira de malha de 0,2 mm. Em seguida, as amostras pesadas foram transferidas individualmente para um pequeno tubo e acondicionadas em um dessecador para retirar possível umidade existente, após procedeu-se a análise via combustão seca.

Nas amostras compostas, a composição granulométrica foi determinada segundo a norma francesa (AFNOR, 1983); utilizou-se como dispersante o pirofosfato de sódio. O pH do solo foi determinado por potenciometria na razão de 1/2,5. A capacidade de troca de cátions (CTC) foi obtida pela soma dos cátions, onde o cálcio e o magnésio foram extraídos com cloreto de potássio, e determinados por titulação com EDTA, os teores de potássio e sódio foram extraídos com solução Mehlich1 (H_2SO_4 e HCl), e determinados por fotometria de chama. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi extraída com acetato de cálcio à pH 7,0, e determinada por titulometria com NaOH $0,05 \text{ mol L}^{-1}$.

Para a determinação da CRA, quatro amostras indeformadas por profundidade foram coletadas com a retirada de anéis de aproximadamente 100 cm^3 de volume (5 cm de diâmetro e 5 cm de altura), no sentido vertical. As amostras foram saturadas com a elevação gradativa de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel. Após a saturação, as amostras foram submetidas a nove potenciais matriciais da água no solo: 0; -1; -3; -6; -10; -33; -100; -300, e -1500 kPa. Mesas de tensão (de 0 a -10 kPa) e câmaras de pressão (-33 a -1500 kPa) descritas em Klute (1986) foram utilizadas. Após estabilização de cada potencial foi efetuada pesagem, e após o equilíbrio e pesagem no último potencial, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 24 horas para a determinação da massa seca.

As CRA médias para cada horizonte caracterizado foram ajustadas no programa RETC, onde se utilizou o modelo proposto por van Genuchten (1980), com o parâmetro $m = 1-1/n$, como sugerido por Mualem (1976). Os valores iniciais para o

ajuste das curvas foram inseridos levando em conta a textura do solo, considerando-se de textura argilosa às amostras com mais de 350 g kg⁻¹ de argila, textura média as amostras com teor de argila entre 150 e 350 g kg⁻¹ e textura arenosa as amostras com teores de argila menores ou iguais a 150 g kg⁻¹.

A água disponível para as plantas (AD) foi calculada pela diferença entre os conteúdos volumétricos de água no solo na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). As umidades nos pontos θ_{CC} e a θ_{PMP} são os conteúdos de água nas tensões de -10 e -1500 kPa, respectivamente.

Para a determinação da distribuição de tamanho de poros utilizou-se a metodologia proposta por Libardi (2005), onde se calcula o volume total de poros numa determinada classe de tamanho através da diferença de umidade volumétrica entre dois valores de potencial matricial da água. O raio equivalente dos poros correspondente a cada potencial foi calculado pela eq. (5). A classificação adotada para determinar as classes de tamanho de poros está apresentada na tabela 4.

$$r = \frac{2\sigma \cdot \cos\alpha}{Da \cdot g \cdot h} \quad (5)$$

Onde: r é o raio de poro equivalente (m), σ é a tensão superficial entre a água e o ar (0,072 N m⁻¹); α é o ângulo de contato entre a água e o poro do solo (0°); Da é a densidade da água (1.000 kg m⁻³); g é a aceleração da gravidade (m s⁻²) e h é o potencial mátrico (m).

Tabela 4 - Classificação dos tamanhos de raio de poros usadas no estudo dos efeitos do uso do solo sobre a distribuição de tamanho de poros

Classe	raio equivalente (μ m)	Interpretação funcional
Bioporos	>48	Elevada drenagem e trocas gasosas
Macroporos	14 a 48	Drenagem e trocas gasosas
Mesoporos	0,098 a 14	Retenção da H ₂ O e disponibilidade para as plantas
Microporos	<0,096	Retenção de H ₂ O não disponível para as plantas

3.6 Funções de pedotransferência

Para o estudo das alterações nos atributos físico-hídricos provocadas pela mudança de uso do solo, duas abordagens foram utilizadas. Primeiramente, testaram-se as FPT existentes na literatura, utilizando dados das três profundidades dos 27 pontos (nível detalhado). Posteriormente, com os dados de solo da camada superficial desses 27 pontos (nível detalhado), onde haviam sido determinados os valores de pH e CTC do solo, produziu-se uma FPT objetivando maior eficiência na capacidade preditiva dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980), utilizados para estimar as CRA dos solos dos 135 pontos de amostragem do nível pouco detalhado.

3.6.1 Seleção das FPT

Foram utilizados dois critérios para selecionar as FPT testadas neste trabalho:

- i. FPT desenvolvidas para solos de clima tropical;
- ii. FPT cujas variáveis preditoras haviam sido determinadas neste estudo.

Os atributos de entrada nas equações foram: frações granulométricas (areia, silte e argila), Ds e CO. Algumas FPT necessitavam de outros atributos, por exemplo, o pH, a CTC (van den BERG, 1997; HODNET et al., 2002), ou a umidade equivalente, que corresponde a umidade volumétrica no potencial -33 kPa (TOMASELLA et al., 2000). Para estas últimas FPT utilizaram-se somente as CRA da profundidade de 0-10 cm, pelo fato que somente nesta camada foi realizada uma caracterização física e química completa.

Com exceção das FPT propostas por Vereecken et al. (1989), todas as FPT selecionadas (Figura 10) foram desenvolvidas para solos de clima tropical. Este critério foi adotado devido às diferenças morfológicas e mineralógicas entre solos de climas tropicais e temperados.

Figura 10 - FPT testadas com os dados adquiridos no projeto AMAZ

3.6.2 Seleção dos dados

Para avaliar a capacidade preditiva das FPT existentes, trabalhou-se a partir de um total de 324 CRA, provenientes de 27 pontos de amostragem em três profundidades e quatro repetições por profundidade. Ao analisar o conjunto das CRA determinadas foram observadas algumas inconsistências que levaram à exclusão de algumas CRA do banco de dados. Os critérios para inclusão das curvas no conjunto de dados utilizados para testar as FTP foram os seguintes:

- ✓ CRA onde a umidade saturada (θ_s) não excede a porosidade total (PorTot);
- ✓ CRA com ausência de aumento da umidade com a redução do potencial entre dois valores de potencial aplicado;
- ✓ CRA que possuíam pelo menos cinco pontos de medidas de umidade e potencial.

Após a aplicação desses critérios aos horizontes dos solos caracterizados, foram calculadas, em cada potencial, as médias das umidades das repetições. Estes valores médios foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980) utilizando o programa RETC.

3.6.3 Desenvolvimento das FPT

O desenvolvimento das FPT neste trabalho utilizou dados da camada superficial (0 a 10 cm) de 27 perfis de solos das três localidades estudadas no projeto AMAZ. Foram incluídos nesta análise 9 perfis da localidade “Projeto de Assentamento Benfica” (5° 16’ S; 49° 50’ W) situada na mesma região. A inclusão desses pontos de amostragem justifica-se pela necessidade do aumento do número de observações uma vez que a metodologia de reamostragem utilizada denominada “Bootstrap” exige pelo menos 30 observações (MOEYS¹). A determinação dos pontos e ajuste dos parâmetros das CRA da nova localidade seguiu os mesmos protocolos laboratoriais e de ajuste das outras localidades.

Para desenvolver as FPT que estimam os parâmetros empíricos do modelo proposto por van Genuchten (1980), utilizaram-se como variáveis preditoras a Ds, CO, frações granulométricas (areia, silte e argila), pH e CTC do solo. A seleção das variáveis preditoras dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) foi realizada no pacote “Leaps” do programa estatístico R (*R project software*: <http://www.r-project.org/>) onde utilizou-se a opção “BIC” (*Bayesian Information Criterion*, Schwartz, 1978) como critério de seleção. A eq. (6) descreve este critério.

$$\text{BIC} = -2 \times \ln(L) + k \times \ln(n) \quad (6)$$

onde: L é a probabilidade do modelo, k é o número de variáveis preditoras selecionadas e n o número de observações.

3.6.3.1 Técnica de reamostragem Bootstrap

Em função do número reduzido de pontos de amostragem (36) para o cálculo dos coeficientes das FPT utilizou-se a técnica de reamostragem conhecido como Bootstrap (SCHAAP et al. 1998). Esta técnica foi usada com o objetivo de aumentar artificialmente o número de dados para gerar maior confiabilidade no desenvolvimento das FPT (MEVIK e WEHRENS, 2007; SCHAAP et al., 1998). O Bootstrap é uma técnica de reamostragem dos dados originais que consiste em sortear, com reposição, os dados pertencentes a uma amostra denominada “amostra

mestra”, de modo a criar uma nova amostra chamada de “amostra Bootstrap” (EFRON, 1986).

No presente estudo as 36 CRA da camada superficial do solo (0 a 10 cm), formaram o conjunto chamado amostra mestre. Com base nesta amostra, foram realizadas 1000 reamostragens aplicando-se a técnica Bootstrap. Para isto, utilizou-se o comando “bootlm” do pacote “bootfun” do programa estatístico R (*R project software*: <http://www.r-project.org/>) que estima os coeficientes do modelo (FPT) e os índices de avaliação utilizando o método dos mínimos quadrados (*ordinary least square regression*) (MOEYS¹).

3.6.4 Indicadores estatísticos de avaliação das FPT

Vários índices foram calculados para avaliar o desempenho tanto das FPT existentes na literatura, quanto das FPT desenvolvidas neste trabalho. Os índices utilizados foram: raiz do erro médio quadrado (RMSE), erro médio (EM), e coeficiente de determinação (R^2), representados pelas eq. (2, 3 e 4) descritas na revisão bibliográfica.

Além disso, empregou-se o índice de confiança (IC) descrito na eq. (7), proposto por Camargo e Sentelhas (1987). Este é o produto do índice de Willmott eq. (8) pelo coeficiente de correlação de Pearson eq. (9).

$$IC = r * w \quad (7)$$

$$w = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2}{[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}|) + \sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}|)]^2} \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{0,5}} \quad (9)$$

onde: n representa o número de observações; O_i os valores observados (medidos), e E_i os valores estimados (preditos). A interpretação do IC deu-se conforme os critérios propostos por Camargo e Sentelhas (1987), descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios de interpretação dos valores do índice de confiança (IC) propostos por Camargo e Sentelhas (1987)

IC	Desempenho do modelo
0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,76	Bom
0,61 a 0,66	Mediano
0,51 a 0,61	Sofrível
0,41 a 0,51	Mau
<0,40	Péssimo

3.6.5 Uso das FPT na predição das CRA

Segundo os critérios acima, foi utilizado a FPT que obteve maior eficiência para estimar os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten nos solos da camada superficial nos 135 pontos amostrados (nível não detalhado). Após esta extrapolação, as alterações ocorridas nos atributos físico-hídricos provocadas pelas mudanças no uso da terra foram analisadas através da análise de componentes principais.

3.7 Análise dos componentes principais

A análise dos componentes principais (ACP) é uma análise estatística multivariada que tem como objetivo explicar as características mais relevantes dos dados a partir de um conjunto reduzido de variáveis obtidas como combinações lineares das variáveis originais. Esta análise é baseada no princípio matemático de decomposição em valores e vetores singulares de uma matriz que permite transformar um conjunto de p variáveis iniciais ($X_1, X_2, \dots, X_p$) para encontrar outro conjunto de variáveis não correlacionadas em combinações lineares, para produzir índices $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ que descrevam toda a variação dos dados (JOHNSON e WICHERN, 1992). Na ACP espera-se que grande parte da explicação da variabilidade das variáveis originais se concentre em poucos componentes Z_i . Desta forma este método analítico reduz o número de variáveis e fornece uma visão privilegiada do conjunto de dados.

Assim, para estudar a relação entre tipos de uso do solo (ou outros fatores) e seus atributos físico-hídricos, e para diferenciar os tipos de uso do solo entre si, a ACP é uma ferramenta apropriada. Utilizou-se para isso uma matriz com as diferentes observações em linhas e as variáveis em colunas. As observações se referem aos diferentes tipos de uso do solo e a outros fatores (por exemplo, classe de solo) e seus respectivos atributos físico-hídricos medidos e estimados. Esta técnica foi utilizada em outros trabalhos nas mais diversas áreas do conhecimento (ANDERSON, et al., 1990; CAMPBELL, MADDEN, 1990; MORA-AGUILERA et al., 1993; MAIA et al., 2009; FIORINI et al., 2010; SILVEIRA et al., 2011). As ACP foram conduzidas com o programa R (R project software: <http://www.r-project.org>) e o pacote adicional “ade4” (DRAY e DUFOUR, 2007).

Para possibilitar melhor compreensão e visualização dos resultados da ACP, utilizaram-se dois gráficos onde estão posicionados no primeiro plano fatorial definido pelos dois primeiros componentes principais Z_1 e Z_2 : (i) as variáveis, representadas como vetores num ‘círculo de correlações’, e (ii) as observações representadas por pontos, agrupados por classes de um fator. Segundo Brocard et al. (2011) esta ferramenta permite a visualização dos dados conforme as seguintes afinidades: a) inter-relação entre as variáveis; b) distância, ou agrupamento entre as observações e tipos de uso do solo (ou outros fatores); e c) inter-relação entre as variáveis e as observações.

Foram também usados testes de permutações de Monte-Carlo, conforme descrito em Cornillon et al., 2010 e Borcard et al. 2011, com o objetivo de quantificar o quanto da variância total dos dados é explicada pelos diferentes fatores, qualitativos (por exemplo, tipo de uso do solo) ou quantitativos (por exemplo, a composição granulométrica do solo).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliações das FPT conhecidas

As FPT selecionadas para serem avaliadas são apresentadas nas tabelas 8 e 13. Para auxiliar na compreensão dos resultados das avaliações das FPT selecionadas, estes foram separados em três tópicos. Primeiramente apresentam-se os resultados da avaliação das FPT que estimam os parâmetros empíricos de van Genuchten (FPT paramétricas) a partir do conjunto total de dados. No segundo tópico, apresentam-se os resultados da avaliação das FPT que estimam os parâmetros empíricos de van Genuchten (FPT paramétricas) a partir dos dados analíticos (Ds, CO, textura, pH e CTC) da camada superficial (0-10 cm). E por último são descritos, para o conjunto total de dados, os resultados das avaliações das FPT pontuais, aquelas que estimam a umidade do solo em um determinado potencial de água no solo. Neste último tópico são apresentados os resultados das FPT que estimam a umidade volumétrica e gravimétrica para os potenciais de -10, -33 e -1500 kPa.

4.1.1 Caracterização do conjunto de dados utilizados na avaliação das FPT

O conjunto de 67 horizontes de solos utilizado para avaliar as FPT caracteriza-se por uma ampla variedade de texturas, variando de muito argilosa a areia franca (Figura 11 e 12), representativa da diversidade dos solos do Sudeste do Pará. Assim como nas frações granulométricas, a variabilidade da densidade e do conteúdo de carbono é elevada (Tabela 6 e Figura 13).

Existem variações em função da profundidade tanto de textura quanto da Ds e conteúdo de CO (Figura 12 e 13). O aumento da Ds e a redução do CO com a profundidade foi observado nas três localidades (Figura 13). Esta evolução pode ser explicada pelo acúmulo de resíduos orgânicos presentes na camada superficial do solo, os quais favorecem a estruturação do solo através da atividade biológica.

Tabela 6 - Estatística descritiva dos 67 horizontes (nível detalhado) utilizados para testar as funções de pedotransferência selecionadas na literatura

Estatísticas	Ds	Arg	Silte	Are	CO	θ_s	θ_r	$\ln \alpha$	n
	$Mg\ m^{-3}$	$g\ kg^{-1}$				$m^3\ m^{-3}$		$\alpha\ em\ cm^{-1}$	-
Média	1,36	39	7,9	53	10,76	0,48	0,10	0,08	1,29
Mínimo	0,98	13	3,4	11	3,16	0,33	0,00	0,01	1,07
Máximo	1,63	70	21	85	23,48	0,63	0,33	0,90	1,62
Desv. Padr.	0,14	17	4,9	20	4,62	0,07	0,11	0,19	0,16

Ds=densidade do solo; Arg=conteúdo de argila; Sil=conteúdo de silte; Are=conteúdo de areia; CO=carbono orgânico; (θ_s e θ_r)=umidade na saturação e residual (ajustadas), respectivamente; ($\ln \alpha$ e n)=parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980)

Figura 11 - Classificação textural dos solos utilizados para avaliar as FPT (n=67)

A localidade Palmares diferencia-se das duas outras localidades por possuir solos em média, mais argilosos (Figura 12), e associados a menores valores de Ds e maiores de CO (Figura 13). A localidade de Pacajá possui o maior gradiente textural entre os horizontes superficiais e os horizontes sub-superficiais (Figura 12). Maçaranduba é caracterizada por maior amplitude dos valores de areia e argila, principalmente nas duas últimas camadas (Figura 12).

Em geral os solos possuem elevados teores de areia, com valor médio de 533 g kg^{-1} (Tabela 6). Geralmente, os solos de textura mais arenosa possuem menor capacidade de armazenar água, principalmente quando possuem estrutura preservada. Neste sentido, os solos utilizados para testar as FPT, possuem em média, uma baixa capacidade de armazenar água.

Os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980) são apresentados na tabela 6. Nota-se elevada amplitude entre os valores, principalmente nos valores das umidades de saturação e residual e nos valores do parâmetro α . Os baixo valor médio de θ_r (Tabela 6) evidenciam a baixa capacidade destes solos em reter água.

Figura 12 - Representação em Boxplot da textura dos solos utilizados para testar as FPT, $n= 67$. Linha contínua dentro do Box representa a mediana e a linha pontilhada representa a média

A análise de correlação de Pearson auxilia na caracterização das correlações existentes entre os atributos utilizados nos testes das FPT. Para o conjunto total de dados (três profundidades nas três localidades) esta análise mostra que entre as frações granulométricas e a D_s ou o CO a correlação é pouco

significativa (Tabela 6). Entretanto há alta correlação negativa entre CO e Ds. A densidade do solo e o conteúdo de CO apresentam correlação negativa e positiva, respectivamente, com a umidade na saturação (θ_s). Os valores da umidade residual (θ_r) foram correlacionados positivamente com os valores de argila.

Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Pearson para os 67 horizontes (nível detalhado) utilizados na elaboração das FPT

	θ_s	θ_r	$\ln\alpha$	n	Ds	CO	Arg	Sil	Are
θ_r	0,15	1							
α	0,31*	-0,24*	1						
n	-0,04	0,71**	-0,27*	1					
Ds	-0,52**	0,11	-0,19	0,18	1				
CO	0,37*	-0,20*	0,36**	-0,40**	-0,72**	1			
Arg	0,06	0,46**	-0,25*	0,09	0,15	-0,30*	1		
Sil	0,05	-0,11	-0,18	-0,15	0,17	-0,22	0,52**	1	
Are	-0,06	-0,40*	0,25*	-0,04	-0,17	0,30*	-0,98**	-0,69**	1

θ_s e θ_r =umidade na saturação e residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), respectivamente; ($\ln\alpha$ e n)=parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980); Ds=densidade do solo (Mg m^{-3}); CO=carbono orgânico do solo (g kg^{-1}); Arg=conteúdo de argila (g kg^{-1}); Sil=conteúdo de silte (g kg^{-1}); Are= conteúdo de areia (g kg^{-1}); ** e * significativo a 1 e 5 %, respectivamente

Figura 13 – Representação em Boxplot dos valores de densidade e carbono orgânico dos solos utilizados para testar as FPT, n= 67. Linha contínua dentro do Box representa a mediana e a linha pontilhada representa a média

4.1.2 Avaliação das FPT paramétricas no conjunto total de dados

As FPT discutidas neste tópico são as FPT paramétricas propostas por Vereecken et al. (1989); Tomasella et al. (2000), níveis 1 a 4 e Barros (2010). Estas funções são apresentadas na tabela 8.

Os indicadores estatísticos referentes ao desempenho das FPT paramétricas avaliadas para o conjunto total de dados são apresentados na tabela 9. A análise comparativa das FPT descritas nos trabalhos de Vereecken et al. (1989), Tomasella et al. (2000) e Barros (2010) mostra que as quatro FPT propostas por Tomasella et al. (2000) apresentam melhor capacidade para estimar os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980). Por outro lado, quando compara-se a FPT proposta por Barros (2010) com a FPT proposta por Vereecken et al. (1989), verifica-se uma pequena vantagem à FPT de Barros.

Uma análise mais detalhada das FPT propostas por Tomasella et al. (2000) mostra que a medida que se acrescentam os níveis das FPT verifica-se para todos os indicadores estatísticos uma redução na capacidade preditiva destas (Tabela 9 e

Figura 14). As FPT que apresentaram melhor desempenho, com índice de confiança “bom”, em oito dos nove potenciais selecionados, foram as FPT N₁ e N₂ (Figura 14). O desempenho destas duas FPT foi bastante semelhante sendo o N₁, que utiliza como variáveis preditoras Ds, argila, silte, areia grossa e fina, e umidade equivalente (considerada como a umidade em -33 kPa), ligeiramente superior ao N₂, cujas variáveis preditoras são iguais aos do N₁ com exceção da substituição da Ds pelo conteúdo de CO. As FPT N₃ e N₄ apresentaram desempenhos pouco satisfatórios com índice de confiabilidade sofrível. Nestas, a umidade equivalente não entra como variável preditora e a Ds e conteúdo de CO são os principais atributos utilizados para modelar a estrutura do solo.

De modo geral, verifica-se que as FPT testadas que utilizam maior número de variáveis para estimar os parâmetros da CRA, possuem maior eficiência (Tabela 8 e 9). Isto pode ser confirmado nas FPT propostas por Tomasella et al. (2000) e na comparação entre as FPT propostas por Barros (2010) e Vereecken et al. (1989).

Tabela 8 - FPT testadas para estimar os parâmetros empíricos de van Genuchten (1980)

Tomasella et al. 2000 - Nível 1 (N₁)

$$\theta_s = (82,19 + (-0,018 \times \text{Sil}) + (23,23 \times \text{Ueq}) + (-28,67 \times \text{Da}) + (0,005 \times \text{AGxSil}) + (-0,003 \times \text{AGxArg}) + (0,003 \times \text{AFxArg}) + (-0,0008 \times \text{AG}^2)) / 100$$

$$\theta_r = (-13,36 + (0,25 \times \text{Sil}) + (0,34 \times \text{Arg}) + (39,91 \times \text{Ueq}) + (7,68 \times \text{Da}) + (-0,005 \times \text{Sil}^2) + (-0,001 \times \text{Arg}^2)) / 100$$

$$\ln \alpha = (264,46 + (1,21 \times \text{Arg}) + (-378,61 \times \text{Ueq}) + (-328,35 \times \text{Da}) + (0,005 \times \text{AGxAF}) + (0,07 \times \text{AGxSil}) + (0,09 \times \text{AFxArg}) + (0,06 \times \text{AG}^2)) / 100$$

$$n = (219,09 + (-152,96 \times \text{Ueq}) + (-0,029 \times \text{AGxSil}) + (-0,04 \times \text{AFxArg}) + (-0,010 \times \text{AG}^2) + (0,003 \times \text{AF}^2)) / 100$$

Tomasella et al. 2000 - Nível 2 (N₂)

$$\theta_s = (41,65 + (57,44 \times \text{Ueq}) + (1,93 \times \text{CO}) + (-0,003 \times \text{AGxAF}) + (0,005 \times \text{AGxSil}) + (-0,005 \times \text{AGxArg}) + (-0,004 \times \text{SilxArg})) / 100$$

$$\theta_r = (-1,67 + (0,28 \times \text{silte}) + (0,26 \times \text{Arg}) + (49,04 \times \text{Ueq}) + (-0,82 \times \text{CO}) + (0,002 \times \text{AFxArg}) + (-0,008 \times \text{Sil}^2)) / 100$$

$$\ln \alpha = (-235,26 + (1,44 \times \text{Arg}) + (216,15 \times \text{Ueq}) + (0,06 \times \text{AGxAF}) + (0,139 \times \text{AGxSilte}) + (0,03 \times \text{AFxArgila}) + (-0,05 \times \text{SilxArg}) + (0,03 \times \text{AG}^2)) / 100$$

$$n = (232,17 + (-168,93 \times \text{Ueq}) + (-0,05 \times \text{AGxSil}) + (-0,05 \times \text{AFxArg}) + (-0,009 \times \text{AG}^2) + (0,02 \times \text{AF}^2)) / 100$$

Tomasella et al. 2000 - Nível 3 (N₃)

$$\theta_s = (91,62 + (-30 \times \text{Da}) + (1,59 \times \text{CO}) + (0,002 \times \text{AGxSil}) + (-0,003 \times \text{AGxArg}) + (-0,002 \times \text{AG}^2 + (-0,001 \times \text{AG})) / 100$$

$$\theta_r = (23,387 + (0,11 \times \text{Arg}) + (-4,79 \times \text{Da}) + (0,005 \times \text{SilxArg}) + (-0,003 \times \text{AG}^2) + (-0,002 \times \text{AF}^2) + (-0,005 \times \text{Sil}^2)) / 100$$

$$\ln \alpha = (205,65 + (-2,56 \times \text{sil}) + (-0,13 \times \text{Arg}) + (-247,49 \times \text{Da}) + (-0,02 \times \text{AGxAF}) + (0,12 \times \text{AFxSil}) + (0,05 \times \text{AFxArg}) + (0,06 \times (\text{AG}^2)) / 100$$

$$n = (168,8 + (-0,03 \times \text{AGxSil}) + (-0,026 \times \text{AFxArg}) + (0,009 \times \text{AF}^2 + (-0,008 \times \text{Sil}^2)) / 100$$

Tomasella et al. 2000 - Nível 4 (N₄)

$$\theta_s = (36,9 + (0,37 \times \text{sil}) + (3,26 \times \text{CO}) + (-0,002 \times \text{AGxArg}) + (0,003 \times \text{AFxArg}) + (-0,003 \times \text{SilxArg}) + (0,003 \times \text{Arg}^2)) / 102$$

$$\theta_r = (15,76 + (0,14 \times \text{Arg}) + (0,005 \times \text{SilxArg}) + (-0,003 \times (\text{AG}^2)) + (-0,002 \times \text{AF}^2) + (-0,005 \times \text{Sil}^2)) / 100$$

$$\ln \alpha = (-237,01 + (3,62 \times \text{AG}) + (0,004 \times \text{AGxSil}) + (0,09 \times \text{AFxArg}) + (0,018 \times (\text{Arg}^2)) / 100$$

$$n = (170,63 + (-0,018 \times \text{AGxSil}) + (-0,031 \times \text{AFxArg}) + (0,009 \times \text{AF}^2 + (-0,008 \times \text{Sil}^2)) / 100$$

Barros (2010)

$$\theta_s = 1 + (-0,00037 \times \text{Da})$$

$$\theta_r = 0,0858 - (0,1671 \times \text{Are}) + 0,3516 \times \text{Arg} + 1,1846 \times \text{MO} + 0,000029 \times \text{Da}$$

$$\alpha = (0,8118 + 0,8861 \times \text{Are} + (-1,1907 \times \text{Arg}) + (-0,001514 \times \text{Da}))$$

$$n = (1,1527 + (0,7427 \times \text{Are}) + (0,4135 \times \text{Sil}) + (-5,5341 \times \text{MO}))$$

Vereecken et al. (1989)

$$\theta_s = 0,803 - 0,283 \times \text{Da} + 0,0013 \times \text{Arg}$$

$$\theta_r = 0,015 + 0,005 \times \text{Arg} + 0,014 \times \text{CO}$$

$$\ln \alpha = -2,486 + 0,025 \times \text{Are} - 0,351 \times \text{Arg}$$

$$\ln n = -0,035 - 0,009 \times \text{Are} - 0,013 \times \text{arg} + 0,015 \times \text{Are}^2$$

van den Berg (1997)

$$\theta_s = (84,1 - 0,206 \times \text{Arg} - 0,322 \times (\text{Are} + \text{Sil})) / 100$$

$$\theta_r = (0,308 \times \text{Arg}) / 100$$

$$\ln \alpha = -0,627$$

$$m = 0,503 - 0,0027 \times (\text{Sil} + \text{Arg}) - 0,066 \times \text{CO} + 0,0094 + \text{CTC}$$

Hodnett et al. (2002)

$$\theta_s = (82,072 + (0,089 \times \text{Arg}) - (31,357 \times \text{Da}) + (0,027 \times \text{CTC}) + (0,517 \times \text{pH}) - (0,0006 \times \text{Are} \times \text{Arg})) / 100$$

$$\theta_r = (23,133 + (-0,172 \times \text{Are}) + (0,211 \times \text{CTC}) + (-0,849 \times \text{pH}) + (0,0012 \times (\text{Arg}^2)) + (0,0029 \times \text{Are} \times \text{Arg})) / 100$$

$$\ln \alpha = (-4,237 - (3,423 \times \text{Sil}) + (4,288 \times \text{CO}) - (0,801 \times \text{CTC}) - (11,07 \times \text{pH}) + (0,027 \times \text{Sil}^2)) / 100$$

$$n = (67,093 + (-0,907 \times \text{Arg}) + (-0,574 \times \text{CO}) + (1,396 \times \text{pH}) + (0,0056 \times (\text{Arg}^2)) / 100$$

Ueq=umidade equivalente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds=densidade do solo (Mg m^{-3}); CO=carbono orgânico do solo (g kg^{-1}); AG=areia grossa (g kg^{-1}); AF=areia fina (g kg^{-1}); Arg=conteúdo de argila (g kg^{-1}), Are=conteúdo de areia (g kg^{-1}); Sil=conteúdo de silte (g kg^{-1}); CTC=capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); pH=valores de pH do solo; θ_s e θ_r =umidade na saturação e residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), respectivamente; ($\ln \alpha$ e n)= parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980)

Tabela 9 - Indicadores estatísticos, RMSE, EM, R² e IC para as FPT testadas nas três profundidades estudadas

	Potencial da água no solo (kPa)									
	0	-1	-3	-6	-10	-33	-100	-300	-1500	Total
<u>Tomasella et al. (2000) - Nível 1</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05
EM (m ³ m ⁻³)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	-0,02	0,01
R ²	0,42	0,47	0,63	0,66	0,66	0,70	0,72	0,74	0,62	0,63
IC	0,64	0,68	0,79	0,81	0,81	0,83	0,84	0,85	0,78	0,78
<u>Tomasella et al. (2000) - Nível 2</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,07	0,05
EM (m ³ m ⁻³)	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	-0,02	-0,04	0,00
R ²	0,42	0,48	0,54	0,58	0,58	0,64	0,68	0,73	0,60	0,58
IC	0,65	0,69	0,73	0,75	0,76	0,80	0,82	0,84	0,77	0,76
<u>Tomasella et al. (2000) - Nível 3</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,05	0,06	0,07
EM (m ³ m ⁻³)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	-0,01	0,02
R ²	0,34	0,27	0,32	0,30	0,27	0,31	0,40	0,62	0,44	0,36
IC	0,58	0,51	0,56	0,55	0,52	0,55	0,63	0,78	0,66	0,59
<u>Tomasella et al. (2000) - Nível 4</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,06	0,07
EM (m ³ m ⁻³)	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	-0,01	0,02
R ²	0,08	0,16	0,23	0,24	0,22	0,26	0,35	0,57	0,41	0,28
IC	0,28	0,40	0,47	0,48	0,47	0,51	0,59	0,74	0,64	0,51
<u>Vereecken et al. (1989)</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,07	0,13	0,14	0,14	0,14	0,12	0,10	0,07	0,08	0,12
EM (m ³ m ⁻³)	-0,01	0,08	0,11	0,12	0,11	0,10	0,07	0,04	0,00	0,07
R ²	0,17	0,00	0,05	0,11	0,11	0,31	0,28	0,78	0,18	0,22
IC	0,35	0,29	0,40	0,42	0,41	0,50	0,38	0,47	0,35	0,40
<u>Barros (2010)</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,08	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,07	0,09	0,08
EM (m ³ m ⁻³)	-0,04	-0,01	-0,03	-0,03	-0,03	0,00	-0,01	0,03	-0,02	-0,02
R ²	0,21	0,25	0,26	0,28	0,26	0,37	0,31	0,51	0,26	0,30
IC	0,35	0,38	0,43	0,46	0,45	0,54	0,53	0,63	0,53	0,48

RMSE=raiz do erro médio quadrado; EM=erro médio; R²=coeficiente de determinação; *IC=índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas (1987), onde IC>0,85=ótimo; IC entre 0,85 e 0,76 = muito bom; IC entre 0,66 e 0,75 = bom; IC entre 0,61 e 0,65 = mediano; IC entre 0,51 e 0,60 = sofrível; IC entre 0,41 e 0,50 = mau; IC<0,40 = péssimo

Figura 14 - Valores de RMSE e índice de confiança dos estimados e medidos das FPT paramétricas testadas para todas as camadas do solo

Os valores dos índices de confiança (IC) apresentados através dos critérios propostos por Camargo e Sentelhas (1997) indicam que as FPT de Tomasella et al. (2000), possuem desempenho “muito bom” para o N_1 e “bom” para o N_2 (Tabela 9). No entanto, para os níveis (N_3 e N_4), o desempenho ficou classificado como sofrível. A FPT de Barros (2010) foi classificada como “mau” ($IC=0,48$). Para a FPT proposta por Vereecken et al. (1989) os valores de IC foram os menores ($IC=0,40$), classificando-a como “péssimo” (Tabela 9).

Na análise estatística descritiva do conteúdo da água no solo em três potencias selecionados (Tabela 10), observa-se que existe uma variabilidade importante na superestimação e subestimação do conteúdo de água nestes potenciais para os diferentes níveis da FPT de Tomasella (2000). Para os potenciais menos negativos os níveis 1 e 2 tiveram melhor desempenho que os níveis 3 e 4. Por outro lado, os níveis 3 e 4 apresentaram melhor desempenho no potencial -1500 kPa. A análise da FPT proposta por Barros (2010) mostra que esta superestima os valores de conteúdo de água em todos os potenciais selecionados, já a FPT de Vereecken et al. (1989) subestima estes valores para os potenciais mais altos e superestima para o potencial de -1500 kPa.

Tabela 10 - Estatística descritiva da umidade do solo nas três camadas estudadas, medida e estimada por FPT, em três potenciais selecionados

FPT	Média	Mediana	Desv. Pad.	Mín	Max	CV
----- -10 kPa -----						
<i>Medido</i>	0,31	0,30	0,07	0,18	0,44	22
Tomasella et al. (2000) - N ₁	0,30	0,30	0,07	0,12	0,40	25
Tomasella et al. (2000) - N ₂	0,30	0,30	0,09	0,13	0,43	29
Tomasella et al. (2000) - N ₃	0,28	0,27	0,07	0,10	0,42	27
Tomasella et al. (2000) - N ₄	0,27	0,26	0,07	0,12	0,43	27
Barros (2010)	0,35	0,37	0,07	0,17	0,45	21
Vereecken et al. (1989)	0,20	0,21	0,07	0,07	0,35	36
----- -33 kPa -----						
<i>Medido</i>	0,27	0,27	0,07	0,13	0,42	26
Tomasella et al. (2000) - N ₁	0,30	0,30	0,07	0,12	0,40	27
Tomasella et al. (2000) - N ₂	0,26	0,26	0,08	0,09	0,39	33
Tomasella et al. (2000) - N ₃	0,23	0,22	0,07	0,08	0,36	30
Tomasella et al. (2000) - N ₄	0,23	0,21	0,07	0,08	0,38	32
Barros (2010)	0,30	0,31	0,09	0,10	0,43	31
Vereecken et al. (1989)	0,19	0,20	0,06	0,07	0,30	34
----- -1500 kPa -----						
<i>Medido</i>	0,17	0,15	0,07	0,05	0,33	31
Tomasella et al. (2000) - N ₁	0,19	0,19	0,06	0,05	0,28	32
Tomasella et al. (2000) - N ₂	0,21	0,22	0,07	0,07	0,32	35
Tomasella et al. (2000) - N ₃	0,18	0,17	0,06	0,07	0,29	33
Tomasella et al. (2000) - N ₄	0,18	0,16	0,07	0,05	0,31	37
Barros (2010)	0,21	0,20	0,11	0,03	0,39	51
Vereecken et al. (1989)	0,18	0,19	0,06	0,07	0,29	33

Desv. Pad. = Desvio padrão; Min = mínimo; Max = máximo; CV = coeficiente de variação

Para complementar as análises realizadas acima, os dados medidos versus estimados foram plotados em um gráfico de dispersão com uma linha 1:1 (Figura 15). Nestes gráficos observa-se que os pontos próximos a linha 1:1 da FPT de Tomasella N₁ confirmam a maior eficiência desta FPT. Entre os níveis 2 e 4 desta FPT, observa-se gradativamente uma maior dispersão dos pontos o que confirma a piora no desempenho destes níveis na predição dos atributos da equação de van Genuchten (1980). As FPT de Barros e Vereecken produziram as maiores dispersões dos pontos em torno da linha 1:1 obtendo o pior desempenho preditivo nas FPT testadas neste tópico.

Figura 15 - Conteúdo de água volumétrico, estimado vs medido e resíduo vs estimado de FPT paramétricas, testadas em todas as profundidades estudadas

A avaliação das FPT para o conjunto total de dados mostrou que as FPT de Tomasella (2000) tiveram melhor desempenho geral que as FPT de Barros (2010) e Vereecken (1989). A melhor capacidade preditiva dos níveis 1 e 2 das FPT de Tomasella (2000), estão em parte, relacionadas com a inclusão do valor da umidade no potencial -33 kPa como variável independente no modelo. No entanto, a determinação deste valor, quando realizada através de amostras indeformadas, com a utilização de anéis volumétricos, é onerosa e demorada, o que dificulta sua utilização como variável de entrada nos modelos. Além disso, para o presente trabalho, este dado só foi determinado nos pontos nível detalhado, ou seja, não havia este dado para todos os pontos (nível não detalhado), eliminando desta forma a possibilidade de utilização destas FPT. Outro ponto que justifica o bom desempenho da FPT proposta por Tomasella et al. (2000) é o fato que foram desenvolvidas com solos de várias regiões do Brasil, e incluíram nesse conjunto de dados vários solos da região Amazônica. O bom desempenho apresentado pelas FPT propostas por Tomasella et al. (2000), também foi verificado em outros

trabalhos. Medina et al. (2002), testaram diversas FPT nos solos de Cuba, onde obtiveram os melhores desempenhos, valores de EM e RMSE de -0,02 e 0,06 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), respectivamente, para as FPT N_3 e N_4 .

O baixo desempenho apresentado pela FPT proposta por Barros (2010) justifica-se pelo fato que estas FPT tinham como objetivo estimar os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten para solos do cerrado brasileiro. Segundo este autor, estes solos possuem geralmente em sua composição, baixo conteúdo de carbono orgânico e argila, em contrapartida, elevados valores de densidade do solo.

Para a FPT proposta por Vereecken et al. (1989), é possível observar uma tendência para superestimar os valores de umidade, principalmente nos potenciais centrais da CRA. Este fato está relacionado com a baixa capacidade da função em estimar os parâmetros de forma da CRA (α e n), responsáveis pela acurácia nos pontos próximos ao ponto de inflexão da CRA. Esta ausência de resultados satisfatórios está relacionada ao fato que estas FPT foram desenvolvidas para diferentes tipos de solos de clima temperado (solos da Bélgica). A baixa capacidade preditiva das FPT desenvolvidas para solos de clima temperado quando utilizadas em solos desenvolvidos em regiões tropicais foi descrito por Tomasella et al. (2003). Estes autores afirmam que é principalmente a diferença no conteúdo de silte entre estes solos que vai afetar o desempenho destas FPT.

4.1.3 Avaliação das FPT paramétricas na camada superficial (0–10 cm)

Neste tópico são apresentadas as FPT propostas por van den Berg (1997), Hodnett et al. (2002) e Tomasella et al. (2000) (Tabela 8). Estas FPT foram testadas com dados da camada superficial do solo (0-10 cm).

Os indicadores estatísticos referentes ao desempenho das FPT testadas para os solos da camada superficial são apresentados na tabela 11. Nota-se que as quatro FPT propostas por Tomasella et al. (2000) (N_1 a N_4), obtiveram melhor desempenho que as FPT de van den Berg (1997) e Hodnett et al. (2002). Além disso, entre as quatro FPT de Tomasella, assim como para o conjunto total de dados, o aumento do nível da FPT reduziu sua capacidade preditiva. Quando se comparam as FPT de van den Berg (1997) e Hodnett et al. (2002), verifica-se que a FPT de Hodnett é melhor em todos os índices de desempenho (Tabela 11).

Uma análise entre as FPT propostas por Tomasella et al. (2000) testadas nos dois conjuntos de dados (total e camada superficial), mostra que em geral as FPT testadas na camada superficial possuem melhor desempenho (Tabelas 9 e 11; Figuras 14 e 16). A função de Tomasella (N_1), testada no conjunto de todas as camadas, foi classificada pelo IC como “muito bom” (Tabela 9). Já esta FPT testada para a camada superficial do solo foi classificada pelo IC como “ótima” (Tabela 11). Essa mesma tendência foi observada para as demais FPT propostas por Tomasella.

Os indicadores de desempenho da FPT proposta por Hodnett et al. (2002), indicam baixa capacidade preditiva dessa. Na média dos potenciais estudados, a FPT proposta por Hodnett et al. (2002) foi classificada como obtendo desempenho mediano (Tabela 11).

A FPT proposta por van den Berg et al. (1997) possui valores de RMSE e EM inferiores aos observados por Hodnett et al. (2002) e muito aquém do considerado ideal para este tipo de estudo. Todos os índices de desempenho calculados indicam baixa capacidade preditiva da FPT, culminando num índice de confiança muito baixo, classificando-a como “péssimo” (Tabela 11). A baixa eficiência da FPT proposta por van den Berg (1997) pode ser atribuída ao fato de ter sido desenvolvida para a classe dos Latossolos (horizontes A, AB e B). Já o conjunto de solos onde esta FPT foi testada possui vários tipos de classes de solos, propiciando grande variabilidade nos atributos usados no modelo, o que incapacita a FPT em estimar os parâmetros da CRA. Neste contexto, Oliveira et al. (2002)

relatam que as FPT possuem maior capacidade preditiva quanto mais homogêneos forem os atributos dos solos que compõem a base de dados e também, mais semelhantes a estes, estiverem os solos que terão seus dados estimados.

Figura 16 - Valores de RMSE (raiz do erro médio quadrado) e índice de confiança dos estimados e medidos das FPT paramétricas testadas para a camada superficial do solo (0-10 cm)

Os resultados da análise descritiva da umidade do solo medida e estimada em três potenciais de água no solo são apresentados na tabela 12. Verifica-se que para os potenciais mais próximos a saturação, todas as FPT subestimam os valores médios de conteúdo de água. Por outro lado, no potencial de -1500 kPa, há superestimação dos valores de umidade estimados pelas três primeiras FPT propostas por Tomasella (N_1 a N_3), e subestimação dos valores pela FPT proposta por van den Berg et al. (1997). Quanto ao CV, verificou-se que para os potenciais de -10 e -33 kPa os valores aumentaram em relação aos valores medidos, já no potencial de -1500 kPa, houve redução dos valores de CV para todas as FPT testadas.

Tabela 11 - Indicadores estatísticos, RMSE, EM, R² e IC para as FPT testadas na primeira profundidade estudada (0-10 cm)

	Potencial da água no solo (kPa)									
	0	-1	-3	-6	-10	-33	-100	-300	-1500	Total
<u>Tomasella et al. (2000) N₁</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	0,04
EM (m ³ m ⁻³)	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00	-0,03	0,01
R ²	0,41	0,55	0,81	0,87	0,87	0,91	0,91	0,91	0,95	0,80
IC	0,62	0,72	0,89	0,92	0,92	0,94	0,93	0,94	0,88	0,86
<u>Tomasella et al. (2000) N₂</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05
EM (m ³ m ⁻³)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	-0,02	-0,05	0,00
R ²	0,31	0,44	0,62	0,68	0,69	0,78	0,82	0,86	0,76	0,66
IC	0,55	0,65	0,77	0,81	0,82	0,87	0,89	0,91	0,85	0,79
<u>Tomasella et al. (2000) N₃</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,06	0,04	0,03	0,07
EM (m ³ m ⁻³)	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,05	0,02	-0,01	0,04
R ²	0,22	0,27	0,48	0,53	0,53	0,59	0,69	0,81	0,73	0,54
IC	0,47	0,51	0,68	0,71	0,71	0,75	0,81	0,89	0,85	0,71
<u>Tomasella et al. (2000) N₄</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,07	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,07	0,04	0,03	0,07
EM (m ³ m ⁻³)	0,04	0,03	0,04	0,06	0,07	0,07	0,05	0,03	0,00	0,04
R ²	0,14	0,29	0,50	0,54	0,53	0,58	0,69	0,82	0,75	0,54
IC	0,37	0,52	0,69	0,72	0,71	0,74	0,81	0,89	0,86	0,70
<u>Hodnett et al. (2002)</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,11	0,15	0,14	0,13	0,12	0,10	0,07	0,04	0,03	0,11
EM (m ³ m ⁻³)	0,09	0,13	0,12	0,11	0,11	0,09	0,06	0,03	-0,01	0,08
R ²	0,25	0,23	0,28	0,36	0,39	0,54	0,70	0,76	0,83	0,48
IC	0,48	0,44	0,48	0,55	0,58	0,70	0,81	0,86	0,90	0,64
<u>van den Berg et al. (1997)</u>										
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,11	0,09	0,08	0,06	0,09
EM (m ³ m ⁻³)	0,00	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,03	0,01	0,04
R ²	0,04	0,08	0,02	0,02	0,05	0,00	0,04	0,11	0,20	0,05
IC	0,17	0,24	0,10	0,08	0,09	0,06	0,20	0,32	0,43	0,17

RMSE= raiz do erro médio quadrado; EM=erro médio; R²= coeficiente de determinação; *IC=índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas (1987), onde IC>0,85=ótimo; IC entre 0,85 e 0,76 = muito bom; IC entre 0,66 e 0,75 = bom; IC entre 0,61 e 0,65 = mediano; IC entre 0,51 e 0,60 = sofrível; IC entre 0,41 e 0,50 = mau; IC<0,40 = péssimo

Tabela 12 – Estatística descritiva da umidade calculada em três potenciais de água no solo estimados por FPT paramétricas testadas na camada superficial dos solos estudados

Modelos	Média	Mediana	Desv. Pad.	Mín	Max	CV
----- -10 kPa -----						
Medido	0,30	0,30	0,07	0,17	0,42	23
Tomasella et al. (2000) - N ₁	0,28	0,27	0,08	0,12	0,39	30
Tomasella et al. (2000) - N ₂	0,28	0,27	0,10	0,13	0,43	34
Tomasella et al. (2000) - N ₃	0,24	0,22	0,06	0,10	0,35	27
Tomasella et al. (2000) - N ₄	0,23	0,22	0,06	0,12	0,34	25
Hodnett et al. (2002)	0,19	0,17	0,07	0,10	0,34	37
van den Berg et al.(1997)	0,24	0,25	0,06	0,11	0,32	24
----- -33 kPa -----						
Medido	0,26	0,26	0,07	0,12	0,39	28
Tomasella et al. (2000) - N ₁	0,23	0,23	0,08	0,09	0,34	34
Tomasella et al. (2000) - N ₂	0,24	0,23	0,09	0,09	0,39	38
Tomasella et al. (2000) - N ₃	0,20	0,18	0,06	0,08	0,30	29
Tomasella et al. (2000) - N ₄	0,19	0,17	0,06	0,08	0,29	30
Hodnett et al. (2002)	0,17	0,15	0,06	0,08	0,31	39
van den Berg et al.(1997)	0,20	0,21	0,06	0,07	0,30	29
----- -1500 kPa -----						
Medido	0,14	0,14	0,06	0,05	0,29	43
Tomasella et al. (2000) - N ₁	0,17	0,16	0,06	0,05	0,27	37
Tomasella et al. (2000) - N ₂	0,19	0,18	0,08	0,07	0,32	41
Tomasella et al. (2000) - N ₃	0,15	0,14	0,05	0,07	0,24	32
Tomasella et al. (2000) - N ₄	0,14	0,13	0,05	0,05	0,23	35
Hodnett et al. (2002)	0,14	0,13	0,05	0,08	0,27	38
van den Berg et al.(1997)	0,13	0,12	0,05	0,05	0,24	36

Desv. Pad. = Desvio padrão; Min = mínimo; Max = máximo; CV = coeficiente de variação

Os valores dos dados medidos ajustados foram plotados em um gráfico de dispersão com linha 1:1 em relação aos valores estimados pelas FPT testadas (Figura 17). Observa-se que o melhor ajuste dos valores estimados pelas FPT de Tomasella (2000) foi para a FPT (N_1). O mesmo foi observado nos testes utilizando o conjunto de solo com as três camadas. Verifica-se também, que a segunda melhor é a FPT (N_2), seguida pelas FPT (N_3 e N_4). Além disso, na tabela 11, é possível observar uma ligeira superestimação dos valores de umidade nos diferentes potenciais estudados apresentados pelas FPT (N_3 e N_4).

As FPT propostas por Hodnett et al. (2002), possuem tendência de subestimar os valores de umidade nos pontos próximos ao potencial de saturação, e superestimar nos pontos próximos ao potencial de -1500 kPa (PMP) (Figura 16). Já para as FPT propostas por van den Berg et al. (1997), a distribuição dos pontos relativos aos valores estimados pela FPT possuem grande dispersão, o que confirma as afirmações anteriores sobre esta FPT (Figura 17).

Verificou-se ainda, que nas FPT proposta por Hodnett et al. (2002) e van den Berg et al. (1997), apesar de adicionar-se ao conjunto das variáveis explicativas a CTC e o pH do solo, estas não apresentam boa capacidade preditiva.

Figura 17 - Conteúdo de água volumétrico, estimado versus medido das FPT paramétricas, testadas nas amostras da primeira camada dos solos

4.1.4 Avaliação das FPT pontuais

Neste tópico são apresentados os resultados de desempenho das FPT pontuais que estimam a umidade volumétrica (FPT volumétricas) propostas por Lal (1979), Aina e Periaswamy (1985), Batjes (1996) e van den Berg et al. (1997) e das FPT pontuais que estimam a umidade gravimétrica (FPT gravimétricas) propostas por Pidgeon (1972), Arruda et al. (1987), Dijkerman et al. (1988) e Oliveira et al. (2002). Estas FPT, testadas no conjunto de solos nível detalhado (três camadas), são apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 - Funções de pedotransferência pontuais, selecionadas para estimar o conteúdo de água em determinados potenciais no conjunto de solos nível detalhado, 3 camadas

FPT Volumétricas	
<u>Lal (1979)</u>	
$\theta_{10} = 0,102 + 0,003 \times \text{Arg}$	
$\theta_{33} = 0,065 + 0,004 \times \text{Arg}$	
$\theta_{1500} = 0,006 + 0,003 \times \text{Arg}$	
<u>Aina e Periaswamy (1985)</u>	
$\theta_{33} = 0,6788 - 0,0055 \times \text{Are} - 0,0013 \times \text{Ds}$	
$\theta_{1500} = 0,00213 + 0,0031 \times \text{Arg}$	
<u>Batjes (1996)</u>	
$\theta_{10} = (0,5266 \times \text{Arg} + 0,3999 \times \text{Sil} + 3,1752 \times \text{CO})/100$	
$\theta_{33} = (0,46 \times \text{Arg} + 0,3045 \times \text{Sil} + 2,0703 \times \text{CO})/100$	
$\theta_{1500} = (0,3624 \times \text{Arg} + 0,117 \times \text{Sil} + 1,6054 \times \text{CO})/100$	
<u>van den Berg et al. (1997)</u>	
$\theta_{33} = 0,1088 + 0,00347 \times \text{Arg} + 0,00211 \times \text{Sil} + 0,01756 \times \text{CO}$	
$\theta_{1500} = 0,00383 + 0,00272 \times \text{Arg} + 0,00212 \times \text{Sil}$	
FPT Gravimétricas	
<u>Pidgeon (1972)</u>	
$W_{10} = (100 \times U_{cc} - 2,54)/91$	
$W_{33} = (100 \times U_{cc} - 3,77)/95$	
$W_{1500} = -0,0419 + 0,0019 \times \text{Sil} + 0,0039 \times \text{Arg} + 0,009 \times \text{CO}$	
<u>Arruda et al. (1987)</u>	
$W_{33} = (3,07439 + 0,629239 \times (\text{Sil} + \text{Arg}) - 0,00343813 \times (\text{Sil} + \text{Arg})^2)/100$	
$W_{1500} = (398,889 \times (\text{Sil} + \text{Arg})/(1308,09 + (\text{Sil} + \text{Arg}))/100$	
<u>Dijkerman et al. (1988)</u>	
$W_{33} = 0,3697 - 0,0035 \times \text{Are}$	
$W_{1500} = 0,0074 + 0,0039 \times \text{Arg}$	
<u>Oliveira et al. (2002)</u>	
$W_{33} = 0,00333 \times \text{Sil} + 0,00387 \times \text{Arg}$	
$W_{1500} = 0,00038 \times \text{Are} + 0,00153 \times \text{Sil} + 0,00341 \times \text{Arg} - 0,030861 \times \text{Da}$	
Arg=conteúdo de argila (g kg^{-1}), Are=conteúdo de areia (g kg^{-1}); Sil=conteúdo de silte (g kg^{-1}); Ds=densidade do solo (Mg m^{-3}); CO=carbono orgânico do solo (g kg^{-1}); CTC=capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$); pH=valor do pH; θ =umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); w=umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); U_{cc} =umidade na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	

A análise do desempenho das FPT testadas indica que a maioria das FPT pontuais possui baixa capacidade para estimar o conteúdo de água nos solos estudados (Tabela 14 e 15).

Para a estimativa da umidade no potencial -10 kPa, todas as FPT testadas apresentaram valores de RMSE acima de $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Tabela 14), considerados elevados para este tipo de estudo. Além disso, o IC das FPT usadas para estimar a umidade neste potencial foram classificados de “mau” a “péssimo”. Resultados semelhantes são observados nas estimativas das umidades nos potenciais de -33 e -1500 kPa (Tabela 14).

Os índices de desempenho indicam que a FPT propostas por van den Berg et al. (1997) que estima a umidade no potencial de -10 kPa é a que possui melhor capacidade preditiva entre as FPT pontuais testadas. Possui os menores valores de RMSE e EM, assim como, o maior IC (Tabela 14). Entretanto, foi classificada como “sofrível”, o que confirma o baixo desempenho para estimar o conteúdo de água no solo. O pior desempenho para estimar o conteúdo de água do solo no potencial -10 kPa foi observado pela FPT de Pidgeon (1972), que apresentou elevados valores de RMSE e EM, com IC classificado como “péssimo”.

Tabela 14 - Indicadores estatísticos, RMSE, EM, R^2 e IC para as FPT pontuais volumétricas e gravimétricas

FPT	----- -10 kPa -----				----- -33 kPa -----				----- -1500 kPa -----			
	RMSE	EM	R^2	IC	RMSE	EM	R^2	IC	RMSE	EM	R^2	IC
<u>FPT Volumétrica</u>												
Lal (1979)	0,12	-0,09	0,05	0,21	0,14	-0,11	0,15	0,38	0,09	-0,05	0,12	0,34
Batjes (1996)	0,10	0,03	0,19	0,44	0,09	-0,02	0,25	0,50	0,07	0,01	0,28	0,55
van den Berg (1997)	0,08	0,03	0,20	0,54	nc	nc	nc	nc	0,07	0,01	0,28	0,53
Oliveira et al. (2002)	nc	nc	nc	nc	0,13	-0,07	0,26	0,46	0,07	0,11	0,30	0,53
<u>FPT Gravimétrica</u>												
Pidgeon (1972)	0,37	-0,34	0,25	0,27	0,39	-0,35	0,27	0,41	0,08	0,04	0,21	0,42
Aina e Periaswamy (1985)	nc	nc	nc	nc	0,19	-0,16	0,09	0,27	0,19	0,09	0,17	0,37
Arruda et al. (1987)	nc	nc	nc	nc	0,07	-0,01	0,13	0,35	0,07	0,08	0,15	0,31
Dijkerman et al. (1988)	nc	nc	nc	nc	0,09	0,05	0,11	0,28	0,08	0,06	0,21	0,37

RMSE=raiz do erro médio quadrado ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); EM=erro médio ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); R^2 =coeficiente de determinação; IC=índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas (1987), onde $\text{IC}>0,85$ =ótimo; IC entre 0,85 e 0,76=muito bom; IC entre 0,66 e 0,75=bom; IC entre 0,61 e 0,65=mediano; IC entre 0,51 e 0,60=sofrível; IC entre 0,41 e 0,50=mau; $\text{IC}<0,40$ =péssimo; nc=não calculado

Para o potencial de -33 kPa, a FPT que apresentou melhor desempenho para estimar o conteúdo de água foi a FPT proposta por Batjes (1996) (Tabela 14). Já o pior desempenho foi observado na FPT apresentada por Aina e Periaswamy (1985), com IC que a caracteriza como desempenho “péssimo”.

Comportamento semelhante ao das estimativas da umidade no potencial de -10 kPa, foi observado para o potencial de -1500 kPa, a FPT com o melhor desempenho foi a proposta por Batjes (1996), no entanto, para este potencial as FPT propostas por van den Berg et al. (1997) e Oliveira et al. (2002), assemelham-se aos resultados apresentados por Batjes (1996) (Tabela 14). Já os piores desempenhos foram verificados pelas FPT propostas por Arruda (1987), seguidas por Lal (1979), Aina e Periaswamy (1985) e Dijkerman et al. (1988).

Algumas FPT superestimam os valores em um determinado potencial e subestimam em outro, como observado para as FPT propostas por Pidgeon (1972) e Aina e Periaswamy (1997) (Figura 19). A FPT proposta por Lal (1979) subestimou os valores de umidade estimados nos três potenciais (Figura 18 e Tabela 15). Nas FPT propostas por Batjes (1996) é possível observar subestimação nos valores para o potencial -33 kPa (Figura 18).

Em geral, as FPT pontuais volumétricas mostraram melhores desempenhos para estimar os conteúdos de água nos potenciais de -10, -33 e -1500 kPa. Entretanto, muito abaixo do que se esperava para possível extrapolação dos pontos estudados. Muitos são os motivos que levam a baixa eficiência de uma FPT. Finke et al. (1996) mostraram que uma das maiores fontes de incerteza de uma FPT é a variabilidade espacial dos atributos dos solos que são repassadas para às FPT.

O desempenho de várias FPT pontuais em um banco de dados de solos de clima tropical compostos de 771 horizontes foi avaliado por Tomasella e Hodnett (2004). Os autores verificaram que algumas FPT possuíam grande dificuldade para estimar o conteúdo de água no solo. Eles atribuíram esta dificuldade a simplicidade de algumas FPT, ou seja, o número limitado de variáveis explicativas pode provocar uma redução da robustez do modelo proposto.

Outro efeito a ser considerado é o tipo de argila presente nos solos, tendo em vista que a mineralogia da fração argila determina a quantidade de água que o solo pode reter (GAISER et al., 2000). Além disso, a mineralogia do solo é um dos fatores responsáveis pela formação dos diferentes tipos de microestrutura que também afeta a capacidade do solo em reter água.

Tabela 15 – Estatística descritiva da umidade do solo calculada em três potenciais de água estimados por FPT pontuais melhor colocar o número de observações (n=67)

FPT	Média	Mediana	Desv. Pad.	Mín	Max	CV
FPT (Volumétricas)						
----- -10 kPa -----						
Medido	0,31	0,30	0,08	0,17	0,53	24
Lal (1979)	0,22	0,21	0,05	0,10	0,31	24
Batjes (1996)	0,28	0,28	0,10	0,11	0,47	36
van den Berg (1997)	0,28	0,28	0,06	0,18	0,4	23
Oliveira et al. (2002)	0,18	0,16	0,08	0,06	0,33	43
----- -33 kPa -----						
Medido	0,27	0,26	0,07	0,12	0,42	27
Lal (1979)	0,16	0,16	0,07	0,01	0,29	43
Batjes (1996)	0,23	0,22	0,09	0,09	0,39	37
van den Berg (1997)	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Oliveira et al. (2002)	nc	nc	nc	nc	nc	nc
----- -1500 kPa -----						
Medido	0,17	0,16	0,08	0,05	0,37	43
Lal (1979)	0,12	0,12	0,05	0,01	0,22	43
Batjes (1996)	0,17	0,17	0,06	0,07	0,29	37
van den Berg (1997)	0,16	0,15	0,05	0,08	0,27	33
Oliveira et al. (2002)	0,17	0,16	0,06	0,08	0,27	33
FPT (Gravimétrica)						
----- -10 kPa -----						
Medido	0,23	0,23	0,07	0,12	0,37	28
Pidgeon (1972)	0,57	0,52	0,18	0,23	1,27	32
Aina e Periaswamy (1985)	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Arruda et al. (1987)	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Dijkerman et al. (1988)	nc	nc	nc	nc	nc	nc
----- -33 kPa -----						
Medido	0,27	0,26	0,07	0,12	0,42	27
Pidgeon (1972)	0,53	0,49	0,17	0,21	1,21	32
Aina e Periaswamy (1985)	0,39	0,36	0,11	0,21	0,62	29
Arruda et al. (1987)	0,24	0,24	0,06	0,12	0,32	24
Dijkerman et al. (1988)	0,19	0,17	0,07	0,07	0,33	38
----- -1500 kPa -----						
Medido	0,18	0,18	0,06	0,07	0,32	35
Pidgeon (1972)	0,14	0,13	0,07	0,02	0,27	52
Aina e Periaswamy (1985)	0,12	0,13	0,05	0,04	0,22	43
Arruda et al. (1987)	0,14	0,13	0,06	0,05	0,25	41
Dijkerman et al. (1988)	0,16	0,16	0,07	0,06	0,28	42

Desv. Pad. = Desvio padrão; Min = mínimo; Max = máximo; CV = coeficiente de variação; nc = não calculado

Figura 18 - Conteúdo de água volumétrico, medido vs estimado e estimado vs resíduo de FPT pontuais, testadas em todas as camadas de solos estudados

Figura 19 - Conteúdo de água gravimétrico, medido vs estimado e estimado vs resíduo de FPT pontuais, testadas em todas as camadas de solos estudados

4.2 Desenvolvimento da FPT para estimar os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980) da camada superficial dos solos estudados

A avaliação realizada nas FPT paramétricas e pontuais conhecidas, não mostrou desempenho satisfatório para estimar os parâmetros do modelo de van Genuchten, para os 135 pontos de amostragem do nível não detalhado. Desta forma, optou-se por desenvolver uma FPT com dados coletados na camada superficial dos 27 pontos do projeto AMAZ somados aos 9 pontos do Projeto de Assentamento Benfica, conforme descrito no material e métodos.

4.2.1 Dados de entrada nos modelos

Os resultados da análise descritiva dos atributos dos solos utilizados para elaborar as FPT são apresentados na tabela 16. Os valores das frações granulométricas possuem grande amplitude entre os valores. Esta diferença entre os valores máximos e mínimos é desejada quando se desenvolve FPT, pois, a maior variabilidade entre os valores das variáveis preditoras aumenta a robustez das FPT produzidas. Tomasella e Hodnett (1998), produzindo FPT para estimar os parâmetros do modelo de Brooks e Corey (1964), encontraram solos com texturas semelhantes as encontrados neste trabalho.

Tabela 16 – Estatística descritiva dos dados utilizados no desenvolvimento das FPT para a primeira profundidade (0 - 10 cm), n=36

Estatísticas	Arg	Sil	Are	Ds	CO	pH	CTC	θ_s	θ_r	$\ln \alpha$	n
	-----g kg ⁻¹ -----			Mg m ⁻³	g kg ⁻¹	--	cmol _c kg ⁻¹	-- m ³ m ⁻³ --		kPa ⁻¹	--
Média	28	12	60	1,3	10,26	5,46	6,82	0,49	0,14	0,11	1,47
Desv. Padr.	15	7	13	0,18	3,40	0,62	1,86	0,07	0,05	0,44	0,07
Máximo	66	30	78	1,65	18,10	6,81	10,26	0,64	0,23	1,04	1,58
Mínimo	8	3	29	0,93	7,70	3,88	3,72	0,37	0,03	-0,91	1,32

Arg=conteúdo de argila; Sil=conteúdo de silte; Are=conteúdo de areia; Ds=densidade do solo; CO=carbono orgânico do solo; pH=valor do pH do solo; CTC=capacidade de troca de cátions; (θ_s e θ_r)=umidade na saturação e residual, respectivamente; ($\ln \alpha$ e n)=parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980); Desv. Padr.=Desvio padrão

Amplitudes semelhantes entre os valores foram observadas para os demais atributos (Ds, CO, pH e CTC) utilizados para elaborar a FPT (Tabela 16). Devido aos elevados conteúdos de areia, o valor médio da umidade no ponto de saturação pode ser considerado elevado, no entanto estes valores são explicados também pelo acúmulo de resíduos orgânicos na camada superficial dos solos nos diferentes tipos de uso (floresta, juquira, capoeira, pastagem).

Na tabela 17 observam-se os valores da correlação entre as variáveis independentes e os conteúdos de água na saturação e residual do conjunto de solos utilizados para desenvolver as FPT. Verifica-se correlação negativa significativa entre θ_s e Ds e conteúdo de areia grossa. Em contrapartida verifica-se correlação positiva entre θ_s e o conteúdo de silte (Tabela 17).

Não há correlação entre os valores de θ_s e as variáveis areia fina, argila, CO, pH e CTC, usadas como variáveis preditoras das FPT a elaborar (Tabela 17). Em contrapartida, verifica-se que a θ_r , possui dependência com quase todas as variáveis preditoras utilizadas. Apresentando correlação negativa com conteúdo de areia grossa, areia fina, Ds e pH do solo, e positiva com o conteúdo de argila, CO e CTC (Tabela 17).

Quanto aos parâmetros de forma do modelo de van Genuchten (n e $\ln\alpha$), verifica-se que o parâmetro empírico n possui correlação significativa com o conteúdo de silte, CO do solo, e com os valores de pH do solo (Tabela 17). Já com os valores de $\ln\alpha$, verifica-se correlação significativa somente com os valores de areia grossa (Tabela 17).

Tabela 17 – Correlação de Pearson entre as variáveis independentes e os parâmetros da CRAS proposta por van Genuchten (1980); $n=36$

	AG	AF	ARG	SILT	Ds	CO	pH	CTC
θ_s	-0,64**	0,21	0,23	0,38*	-0,58**	0,11	-0,18	0,25
θ_r	-0,67**	-0,44**	0,83**	-0,23	-0,77**	0,66**	-0,44**	0,58**
n	0,25	-0,24	0,31	-0,89**	-0,01	0,39*	-0,42*	0,15
$\ln\alpha$	0,45**	-0,24	-0,29	-0,12	0,04	-0,07	-0,04	-0,09

AG = conteúdo de areia grossa (g kg^{-1}); AF = conteúdo de areia fina (g kg^{-1}); ARG = conteúdo de argila (g kg^{-1}); SIL = conteúdo de silte (g kg^{-1}); Ds = densidade do solo (Mg m^{-3}); CO = carbono orgânico do solo (g kg^{-1}); pH = valor do pH; CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$); (θ_s e θ_r) = umidade na saturação e residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente; ($\ln\alpha$ e n) = parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980). ** e * significativo a 1 e 5 %, respectivamente

As FPT desenvolvidas com os dados referentes aos solos descritos acima são apresentadas na tabela 18. São apresentados também os valores dos coeficientes das FPT onde se utilizou como variáveis preditoras, o conteúdo de areia grossa, areia fina, silte, argila, Ds, CO, pH e CTC do solo da camada superficial dos solos estudados (0 a 10 cm). Na mesma tabela são apresentados os resultados das avaliações (validação), realizados pelo procedimento Bootstrap com 1000 reamostragens.

Tabela 18 - Coeficientes empíricos da FPT desenvolvida com os solos da primeira camada (0 - 10 cm) em todas as localidades

	θ_s	θ_r	$\ln\alpha$	n
Intercepto	0,604507	0,755550	0,032399	1,689400
AG	--	-0,007621	0,081406	--
Sil	--	-0,005352	--	--
Ds	-0,295820	-0,056708	-2,459464	--
pH	--	-0,005682	--	--
CTC	--	--	--	-0,000093
AG x AF	-0,000107	--	-0,001635	--
AG x Sil	0,000254	--	--	-0,000258
AG x Arg	0,000107	--	--	--
AF x Sil	-0,000226	--	--	--
AF ²	0,000436	-0,000169	0,002804	0,000093
Arg ²	--	-0,000065	--	--
Sil ²	--	--	--	-0,000077
<u>Validação</u>				
RMSE	0,032	0,016	0,221	0,093
R ²	0,715	0,878	0,492	0,543
EM	0,123	0,126	0,147	0,125

AG=conteúdo de areia grossa (g kg^{-1}); Sil = conteúdo de silte (g kg^{-1}); Ds=densidade do solo (Mg m^{-3}); pH=valor do pH do solo; CTC=capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$); AF=conteúdo de areia fina (g kg^{-1}); Arg=conteúdo de argila (g kg^{-1}); (θ_s e θ_r)=umidade na saturação e residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente; ($\ln\alpha$ e n)=parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980); RMSE=raiz do erro médio quadrado ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); EM=erro médio ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); R²=coeficiente de determinação

Com exceção do CO do solo todas as demais variáveis preditoras foram utilizadas para estimar pelo menos um dos parâmetros empíricos de van Genuchten (Tabela 18). A não utilização do CO para estimar as propriedades hídricas também foi verificada em outros trabalhos (LAL, 1979; DANALATOS et al., 1994). Bauer e Black (1981) mostram que o efeito do CO sobre o comportamento da água no solo é

mais pronunciado em solos arenosos do que em solos argilosos. Por outro lado, a incapacidade do CO em estimar o comportamento da água no solo devido aos baixos teores deste elemento no solo foi discutido por Danalotos et al. (1994).

O procedimento Bootstrap calculou o RMSE para as estimativas dos parâmetros θ_s e θ_r (Tabela 18), estes valores ficaram dentro do intervalo considerados como adequado pela literatura para este tipo de trabalho (TOMASELLA et al, 1998, 2000 e 2002; WÖSTEN et al., 2001; PACHEPSKY et al., 2004; DONATELLI et al., 2004). O coeficiente de determinação (R^2) na estimativa das umidades na saturação (θ_s) e residual (θ_r) possui valores relativamente altos, para este tipo de estudo (Tabela 17).

Na estimativa dos parâmetros de forma ($\ln\alpha$ e n), os valores de RMSE e R^2 indicam baixa capacidade preditiva da FPT criada (Tabela 18). A dificuldade em estimar os parâmetros de forma (n e α), também foi verificada em outros trabalhos, (SCHEINOST et al., 1997; BARROS, 2010), o que pode ser justificado por estes parâmetros dependerem de muitas propriedades com variabilidade espaço-temporal muito acentuada. Numa revisão sobre FPT, Wosten et al. (2001) e Pachepsky et al. 2004 citam que normalmente os resultados das estimativas de n e α são imprecisos.

De maneira geral observa-se uma boa capacidade preditiva das umidades residual e de saturação. Já para estimar os parâmetros empíricos (α e n) a eficiência da FPT é inferior. Minasny (1999) mostra que mesmo com certa imprecisão dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten, pode haver ajustes semelhantes das CRA, mesmo em situações onde os parâmetros possuem algum tipo de incerteza. Isso também foi demonstrado por Wosten e van Genuchten (1988).

Segundo Tomasella et al. (2008), é adequado que mesmo em situações onde se estimam os parâmetros de van Genuchten, faça-se a avaliação da capacidade preditiva das FPT através dos valores do conteúdo de água do solo, medidos e estimados pelas FPT elaboradas, em diferentes potenciais de água no solo. A seguir são apresentados os resultados da avaliação da FPT desenvolvida através da capacidade preditiva dos conteúdos de água em diferentes potenciais.

4.2.2 Avaliação das FPT com base na capacidade de estimar os conteúdos de água em diferentes potenciais

Para aumentar a confiabilidade da avaliação da FPT produzida realizou-se, além da validação realizada pelo procedimento Bootstrap anteriormente apresentada, outro método de avaliação que consiste em comparar os valores de umidade determinados em diferentes potenciais e os estimados pelas FPT desenvolvidas.

Os indicadores estatísticos RMSE, EM, R^2 e o IC, calculados para os valores de umidade medidos e estimados pela FPT desenvolvida são apresentados na tabela 19. Nesta avaliação observam-se resultados melhores que os observados na capacidade preditiva dos parâmetros empíricos de van Genuchten descritos na tabela 18. Resultados semelhantes foram observados por diversos autores (OLIVEIRA, 2002; PERAZA, 2003; PACHEPSKY e RAWLS, 1999).

Tabela 19 - Índices de avaliação da FPT desenvolvidas com os solos (0-10 cm) em todas as localidades

	0	-1	-3	-6	-10	-33	-100	-300	-1500	total
	----- kPa -----									
RMSE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04
EM ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,01	0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	0,01	0,02	-0,03
R^2	0,73	0,72	0,72	0,68	0,69	0,71	0,75	0,75	0,75	0,72
IC	0,74	0,66	0,64	0,64	0,63	0,64	0,64	0,65	0,67	0,66

RMSE=raiz do erro médio quadrado; EM=erro médio; R^2 =coeficiente de determinação; IC=índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas (1987), onde $IC > 0,85$ =ótimo; IC entre 0,85 e 0,76=muito bom; IC entre 0,66 e 0,75=bom; IC entre 0,61 e 0,65=mediano; IC entre 0,51 e 0,60=sofrível; IC entre 0,41 e 0,50=mau; $IC < 0,40$ = péssimo

Observa-se que os valores de RMSE foram menores nos potenciais altos e baixos das CRA, e maiores nos potenciais intermediários (Tabela 19). Este fenômeno é explicado pela melhor capacidade da FPT em estimar os conteúdos de água na saturação e residual, e pior capacidade em estimar os parâmetros responsáveis pela forma das curvas (α e n), os quais interferem em maior grau nos pontos intermediários da CRA. Os valores médios de RMSE ficaram em torno de $0,04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, o que segundo Donatelli et al. (2004) são valores considerados adequados para este tipo de estudo. Valores semelhantes são encontrados em outros trabalhos, como por exemplo, valores RMSE variando de 0,03 a $0,04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$

em FPT desenvolvidas para solos tropicais por Tomasella (2000), e de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ encontrados por Vereecken et al. (1989) em FPT desenvolvidos para diferentes tipos de solos da Bélgica.

O valor médio do resíduo das estimativas, representados por EM, é de $-0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, apresentando uma leve tendência das FPT em superestimar os valores de umidade do solo, principalmente nos potenciais intermediários das CRA (Tabela 19). Este comportamento pode ser verificado visualmente através da figura 20, onde os valores das umidades medidas e estimadas em diferentes potenciais foram plotados num gráfico com linha 1:1.

Este mesmo comportamento foi verificado nos trabalhos de Hodnett et al. (2002) e Tomasella et al. (2003) onde as FPT propostas também subestimaram os valores do conteúdo de água em todas as tensões. Romano e Santini (1997) avaliando as FPT de Vereecken et al. (1989) em solos da Itália, observaram valores semelhantes de EM.

O índice de confiança variou de 0,63 a 0,74 com valor médio de 0,66 (Tabela 18), classifica o desempenho do modelo como “bom”.

Figura 20 – Valores de umidade observados vs estimados através de FPT desenvolvidas para a primeira camada (0-10 cm), determinados através do modelo proposto por van Genuchten (1980) A linha cheia representa a reta 1:1

Três exemplos de CRA da camada de 0-10 cm do solo, retirados ao acaso do conjunto de dados, são apresentadas na figura 21. É possível comparar os valores medidos aos estimados pelas FPT propostas por Tomasella et al (2000), nível 3 (N₃) e nível 4 (N₄) e os estimados pela FPT desenvolvida neste trabalho. Verifica-se que a linha dos valores estimados pela FPT elaborada (estimada) está mais relacionada com os pontos medidos do que as FPT propostas por Tomasella (2000). Desta forma, conclui-se que as FPT propostas neste trabalho apresentam um melhor desempenho que as propostas por Tomasella (N₃ e N₄).

Figura 21 – Comparação entre as FPT desenvolvidas (Estimado) e as FPT propostas por Tomasella et al. (2000) (níveis 3 e 4)

Dentre as FPT testadas, com possibilidade de utilização com os dados existentes no projeto, as melhores foram as FPT propostas por Tomasella et al., (2000) (níveis 3 e 4). No entanto, quando comparadas com a FPT desenvolvida, observou-se melhor desempenho desta. Portanto, para a extrapolação do estudo para os solos do nível não detalhado utilizou-se a FPT desenvolvida neste trabalho.

4.3 Relação entre o meio físico e os atributos do solo

A relação entre o meio físico e os atributos do solo medidos (textura, Ds, CO, pH e CTC) e os estimados, através da FPT desenvolvida neste trabalho, nos 135 pontos da amostragem pouco detalhada será discutido neste tópico. O comportamento destes atributos foi avaliado de acordo à localidade, ao tipo de solo, à cobertura vegetal e ao uso do solo (Tabelas 20 e 21). Primeiramente, estudaram-se as relações entre os parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980) e os atributos físicos e químicos do solo. Finalmente, a variabilidade da distribuição do tamanho de poros e dos reservatórios de água em função das alterações do meio físico foi discutida.

Tabela 20 - Número de observações em cada tipo de cobertura vegetal e de uso do solo identificados nas três localidades estudadas

Cobertura vegetal	Usos do solo	n
Floresta (n=49)	Floresta conservada	15
	Floresta explorada	24
	Floresta queimada	10
Pastagem (n=37)	Pasto limpo	17
	Pasto com babaçu	3
	Pasto invadido	17
Capoeira (n=16)	Capoeira jovem	4
	Capoeira velha	8
	Capoeira de baixio	4
Juquira (n=11)	Juquira jovem	5
	Juquira velha	6
Roça (n=13)	Roça	13
Perene (n=4)	Perene	4

n=número de observações (pontos amostrados)

Tabela 21 - Número de observações (pontos amostrados) por localidade estudada e classes de solo

Localidades	n	Classes de solo	n
Maçaranduba	41	Latossolos	33
Pacajá	44	Argissolos	37
Palmares	45	Cambissolos	38
		Gleissolos	22

n=número de observações

4.3.1 Relação entre os parâmetros da CRA, os atributos físicos e químicos do solo, e o meio físico

A análise de componentes principais (ACP) da matriz de atributos físicos e químicos e de parâmetros da equação de *van Genuchten* separou claramente os pontos de Palmares dos pontos das outras duas localidades, o que é observado pelas posições dos baricentros (Figura 22b). Os tipos de solo aos quais estão relacionados os pontos estiveram igualmente separados nesse primeiro plano fatorial (Figura 22d), observado ao longo do primeiro componente principal, ou seja do eixo 1. As variáveis mais contributivas (Figura 22a e Tabela 22) do eixo 1 (43,8% da inércia, ou seja da variância total) foram a umidade residual θ_r , o conteúdo em argila (Arg) e a CTC no lado positivo do eixo 1; o conteúdo em areia (Are), $\ln\alpha$ e a Ds no lado negativo do eixo 1. As variáveis mais contributivas do eixo 2 (19,8 % da inércia) foram o conteúdo em silte e o pH do lado positivo e o parâmetro n do lado negativo.

Entre estas variáveis mais contributivas, a maioria, (CTC, Ds e $\ln\alpha$) são fortemente associadas à textura do solo (Tabela 23). A textura depende fortemente da rocha mãe. Antes de serem influenciados pelos processos pedogenéticos, os solos de Maçaranduba e Pacajá são desenvolvidos sobre uma rocha granítica, rica em quartzo, diferentemente da formação geológica de Palmares, onde os solos são mais argilosos e mais profundos, com predomínio dos Latossolos. Estas características intrínsecas do solo, ou mais globalmente do meio físico, variam no espaço, porém são pouco influenciadas pelas práticas agrícolas. No entanto, entre estas características, a textura pode interagir, particularmente com a densidade do solo e o conteúdo de carbono, que são sensíveis a mudanças no uso do solo (FELLER e BEARE, 1997).

Figura 22 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados físicos (Arg, Sil, Are, e Ds) e químicos (CO, pH, CTC) e parâmetros da CRA (θ_s , θ_r , $\ln\alpha$ e n) da camada 0-10 cm dos solos das 3 localidades. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b, com MB=Maçaranduba, PC=Pacajá, PM=Palmares), por tipo de cobertura vegetal (c) e por tipo de solo (d) com classes de solos, A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico

Tabela 22 - Coordenadas das variáveis físicas e químicas do solo (0-10 cm) e dos parâmetros da CRA nos dois primeiros componentes da ACP (Figura 22)

Componentes	Variáveis										
	Are	$\ln\alpha$	Ds	n	pH	θ_s	Silt	CO	CTC	Arg	θ_r
1	-0,97	-0,79	-0,66	-0,27	-0,22	0,05	0,20	0,66	0,75	0,87	0,95
2	-0,01	-0,09	0,14	-0,91	0,54	0,23	0,90	-0,02	0,04	-0,40	0,03

Are= conteúdo de areia; Ds=densidade do solo; pH=valor do pH do solo; Arg=conteúdo de argila; Silt=conteúdo de silte; CTC=capacidade de troca de cátions; CO=carbono orgânico do solo; θ_s e θ_r =umidade na saturação e residual, respectivamente; ($\ln\alpha$ e n)=parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980)

Dentre os parâmetros do modelo de van Genuchten, θ_r e $\ln\alpha$ são os que estão mais correlacionados negativamente (Tabela 23). Estes parâmetros se correlacionam muito significativamente com Arg, Are e CTC. O θ_r depende da Arg, CTC e CO (positiva), e da Are e Ds (negativa), enquanto que $\ln\alpha$ depende da Are (positiva), e da Arg e CTC (negativa). Os parâmetros n e θ_s dependem significativamente do conteúdo de silte e da densidade do solo, respectivamente.

Tabela 23 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos dos pontos não detalhados, camada de 0-10 cm dos solos das três localidades, $n=135$

	Arg	Silt	Are	pH	CTC	Ds	CO	θ_s	θ_r	$\ln\alpha$	n
Silt	-0,25**	1,00									
Are	-0,90**	-0,21	1,00								
pH	-0,29**	0,22*	0,20*	1,00							
CTC	0,55**	0,16	-0,63**	-0,01	1,00						
Ds	-0,57**	-0,02	0,58**	0,17	-0,50**	1,00					
CO	0,46**	0,13	-0,52**	-0,16	0,60**	-0,54**	1,00				
θ_s	-0,05	0,08	0,01	0,20*	0,03	-0,40**	0,12	1,00			
θ_r	0,83**	0,19	-0,92*	-0,20*	0,63*	-0,57**	0,52**	0,07	1,00		
$\ln\alpha$	-0,74**	-0,25*	0,86**	0,15	-0,49**	0,14	-0,27*	0,28	-0,80**	1,00	
n	0,12	-0,87**	0,28*	-0,29*	-0,15	0,01	-0,11	-0,17	-0,31*	0,32*	1,00

Arg=conteúdo de argila (g kg^{-1}); Silt=conteúdo de silte (g kg^{-1}); Are= conteúdo de areia (g kg^{-1}); pH= valor do pH do solo; CTC=capacidade de troca de cátions; Ds=densidade do solo (Mg m^{-3}); CO=carbono orgânico do solo (g kg^{-1}); θ_s e θ_r =umidade na saturação e residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), respectivamente; ($\ln\alpha$ e n)=parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980); ** e *: significativo a 1 e 5 %, respectivamente

Os testes de Monte-Carlo conduzidos a partir dessa ACP (Tabela 24) permitiram avaliar a contribuição de vários fatores na variabilidade total dos dados. O fator localidade explicou a maior parte da variabilidade (21,7%). O tipo de solo explicou 12,4% da variabilidade, já a cobertura vegetal explicou 9%. Entretanto, quando se considera uma tipologia mais detalhada representada pelo uso do solo, observa-se maior interferência sobre a variabilidade dos dados, ou seja, os diferentes tipos de uso do solo explicam 23,7% da variabilidade total dos dados.

Tabela 24 - Análise inter-classes (teste de permutação de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas (ACP da figura 22)

Fatores explicativos da variabilidade total	Coefficiente de Monte-Carlo
Localidade	$R^2=0,217^{(a)}$ $p=0,001^{(b)}$
Cobertura vegetal	$R^2=0,092$ $p=0,001$
Uso do solo	$R^2=0,237$ $p=0,001$
Tipo de solo	$R^2=0,124$ $p=0,001$

(a) $R^2 * 100$ =porcentagem de explicação da variabilidade total observada dos dados pelo fator considerado. (b)=probabilidade de erro quando aceitar a influência do fator considerado. Quanto mais baixa ela é, mais significativa é a influência. Influência significativa do fator para $p<0,05$

4.3.2 Avaliação da variabilidade nos atributos físico-hídricos em função do meio físico

Vários atributos físico-hídricos foram calculados a partir das CRA estimadas em cada um dos 135 pontos: porosidade total (θ_s), macroporosidade ($\theta_s - \theta_{-10kPa}$), bioporos ($\theta_s - \theta_{-1kPa}$), água disponível para as plantas ($\theta_{-10kPa} - \theta_{-1500kPa}$) e água não disponível para as plantas ($\theta_{-1500kPa}$).

A ACP da matriz normalizada desses cinco atributos distribuiu ao longo do primeiro componente principal (59,4% da variabilidade total), a macroporosidade (PorMac) e os bioporos (PorBio) no lado negativo, e a água não disponível (Ag.Ndis) do lado positivo (Figura 23a e Tabela 25). As variáveis que mais contribuem para o segundo componente principal, que representa 30,6% do total da variabilidade, foram a porosidade total (PorTot) e a água disponível (Ag.Dis). Os macroporos e os bioporos foram altamente correlacionadas entre si e negativamente correlacionados com a água não disponível. A porosidade total e a água disponível são menos correlacionadas entre si e com os outros atributos (Tabela 26).

O primeiro componente principal separou os pontos referentes a Palmares dos pontos das outras duas localidades (Figura 23b), e também os conjuntos de pontos relacionados com os tipos de solo (Figura 23d). Quanto aos tipos de cobertura vegetal (Figura 23c), não houve uma separação clara entre eles, há uma leve tendência de distinção entre os pontos de roça dos demais tipos de cobertura no segundo componente principal, que é controlado pela porosidade total.

A ACP da matriz de atributos físico-hídricos destacou ainda uma estrutura influenciada pelas características específicas das localidades, notadamente as

características intrínsecas dos solos, explicada mais uma vez pela influência da textura. Neste caso, o fator localidade explicou 15,7% da variabilidade total dos atributos, o tipo de solo 13,8%, o uso do solo 20,9% e cobertura vegetal somente 8%. Entretanto a textura do solo, ou seja a matriz das três frações granulométricas, explicou quase a metade (47,6%) da variabilidade total (Tabela 27), confirmando a forte influência da textura sobre a arquitetura de poros do solo.

Tabelas 25 - Coordenadas dos atributos relacionados à CRA (camada 0-10 cm) nos dois primeiros componentes da ACP (figura 23)

Variáveis	1º componente	2º componente
PorBio	-0,97	0,10
PorMac	-0,95	0,31
PorTot	-0,21	0,95
AgDis	0,57	0,69
AgNdis	0,87	0,22

PorTot=porosidade total, PorMac=macro porosidade, PorBio=bioporos, AgDis=água disponível, AgNdis=água não disponível

Tabela 26 - Coeficientes de correlação de Pearson para os dados dos pontos não detalhados, camada de 0-10 cm dos solos das três localidades, n=135

	PorTot	PorMac	PorBio	AgNdis	AgDis
PorMac	0,49**	1,00			
PorBio	0,31*	0,93**	1,00		
AgNdis	0,12	-0,77**	-0,77**	1,00	
AgDis	0,44**	-0,33*	-0,53**	0,46**	1,00

PorTot=porosidade total, PorMac=macro porosidade, PorBio=bioporos, AgDis=água disponível, AgNdis=água não disponível

Tabela 27 - Análises inter-classes (testes de permutações de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas (ACP da figura 23 sem controle da textura)

Fatores explicativos da variabilidade total	Coeficiente de Monte-Carlo
Localidade	$R^2=0,157^{(a)}$ $p=0,001^{(b)}$
Cobertura vegetal	$R^2=0,084$ $p=0,022$
Uso do solo	$R^2=0,209$ $p=0,001$
Tipo de solo	$R^2=0,138$ $p=0,001$
Textura	$R^2=0,476$ $p=0,01$

(a) $R^2 \cdot 100$ =porcentagem de explicação da variabilidade total observada dos dados pelo fator considerado. (b)=probabilidade de erro quando aceitar a influência do fator considerado. Mais baixa ela é, mais significativo é a influência. Influência significativa do fator para $p<0,05$.

Figura 23 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das três localidades estudadas. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b) com MB=Maçaranduba, PC=Pacajá, PM=Palmares), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico

Com o objetivo de evidenciar melhor o efeito do uso do solo na distribuição dos tamanhos de poros, foi realizada sobre a mesma matriz de dados, uma ACP com controle de uma determinada variável (“PCAVI”: *principal component analysis with respect to instrumental variables*) (LEBRETON et al., 1991; BORCARD et al. 1992). Neste caso, foi realizada uma ACP com controle das variáveis granulométricas (argila, silte e areia), afim de eliminar a influência da textura na variabilidade dos dados. O controle foi eficaz quando se considera a sobreposição no novo plano fatorial dos baricentros dos pontos ligados aos diferentes tipos de solo e, com menor magnitude, às localidades (Figura 24b e 24d). Além disso, é possível

verificar na tabela 29 que esse fator (textura) não explicou mais a variabilidade dos dados.

Um dos efeitos importantes desse controle, para a análise, foi a redução da importância da água não disponível (Ag.Ndis), mais relacionada com a textura do solo. Já a porosidade total (PorTot) foi a que mais contribuiu ao 1º componente da ACP. Para o 2º componente os mais contributivos foram a água disponível (Ag.Dis) e com menor intensidade, os bioporos (Figura 24a e Tabela 28).

A ACP com controle da textura para as três localidades destacou um efeito significativo da cobertura vegetal (11,9%, $p < 0,01$, teste de Monte-Carlo) e do uso do solo (20%), porém a importância desses fatores na explicação da variabilidade dos dados permaneceu relativamente pequena (Tabela 29).

Tabela 28 - Coordenadas dos atributos relacionados à CRA (camada 0-10 cm) nos dois primeiros componentes da ACP (figura 24)

Variáveis	1º componente	2º componente
AgNdis	0,07	0,09
PorBio	0,33	-0,52
AgDis	0,45	0,70
PorMac	0,51	-0,28
PorTot	0,99	0,00

PorMac=macro porosidade, PorBio=bioporos, AgDis=água disponível, AgNdis=água não disponível, PorTot=porosidade total

Apesar da baixa capacidade explicativa da variabilidade dos dados apresentadas pela cobertura vegetal (11,9%), é possível observar, no 2º componente da ACP (figura 24c), que os cultivos perenes e as pastagens posicionaram-se no sentido de maior quantidade de água disponível para as plantas, já as capoeiras e florestas posicionaram-se na direção a maior quantidade de bioporos.

Figura 24 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das 3 localidades estudadas, após eliminar o efeito da textura do solo. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b com MB=Maçaranduba, PC=Pacajá, PM=Palmares), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico

Tabela 29 - Análises inter-classes (permutações de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas (ACP da figura 24 com controle da textura)

Fatores explicativos da variabilidade total	Coeficiente de Monte-Carlo
Localidade	$R^2=0,048^{(a)}$ $P=0,009^{(b)}$
Cobertura Vegetal	$R^2=0,119$ $P=0,001$
Uso do solo	$R^2=0,200$ $P=0,001$
Tipo de solo	$R^2= 0,011$ $P=0,832$

(a) $R^2 * 100$ =porcentagem de explicação da variabilidade total observada dos dados pelo fator considerado. (b)=probabilidade de erro quando aceitar a influência do fator considerado. Mais baixa ela é, mais significativo é a influência. Influência significativa do fator para $p < 0,05$

Para tentar evidenciar melhor as mudanças na evolução da distribuição dos tamanhos de poros, foi seguida a mesma análise aplicada a conjuntos de dados limitados a uma ou duas localidades (no caso de Pacajá e Maçaranduba que possuem o mesmo contexto geológico).

Três ACP normalizadas foram realizadas: com os dados de Maçaranduba (Figura 25), Maçaranduba e Pacajá juntos (Figura 26) e Palmares (Figura 27). Para qualquer que seja a origem dos dados, a redução no número de observações não modifica as variáveis que mais explicam os dois primeiros componentes principais (Figura 25a e 26a). Havendo um comportamento muito semelhante aos observados para o conjunto total dos dados (Figura 23a).

Os resultados dos testes de permutações de Monte-Carlo aplicados aos dados correspondentes estão apresentados na tabela 29. A granulometria continua a explicar em torno da metade da variabilidade total dos dados (Tabela 27). Além disso, não houveram grandes mudanças na ordem de grandeza dos valores de R^2 para os outros fatores considerados, mas em vários casos, a influência do fator tornou-se não significativa, o que pode ser explicado em partes pela redução do número dessas observações. Apenas em Maçaranduba, o uso da terra explicou mais do que nas 3 localidades juntas a variabilidade total dos atributos (Tabelas 27 e 29).

Tabela 30 - Análises inter-classes (testes de permutações de Monte-Carlo) de vários fatores explicativos, considerando os dados das 3 localidades estudadas separadamente

Fatores explicativos da variabilidade total	-- Sem controle da textura --			-- Com controle da textura --		
	MA	MA e PC	PM	MA	MA e PC	PM
Cobertura vegetal	$R^2=0,139$ (a) $P=0,076$ (b)	$R^2=0,098$ $P=0,08$	$R^2=0,185$ $P=0,035$	$R^2=0,266$ $P=0,003$	$R^2=0,154$ $P=0,006$	$R^2=0,122$ $P=0,203$
Uso da terra	$R^2=0,369$ $P=0,007$	$R^2=0,211$ $P=0,027$	$R^2=0,247$ $P=0,069$	$R^2=0,473$ $P=0,001$	$R^2=0,287$ $P=0,004$	$R^2=0,212$ $P=0,122$
Tipo de solo	$R^2=0,187$ $P=0,014$	$R^2=0,123$ $P=0,002$	$R^2=0,068$ $P=0,2$	$R^2=0,103$ $P=0,188$	$R^2=0,028$ $P=0,619$	$R^2=0,049$ $P=0,391$
Granulometria	$R^2=0,435$ $P=0,01$	$R^2=0,464$ $P=0,01$	$R^2=0,536$ $P=0,01$			

(a) $R^2 \cdot 100$ =porcentagem de explicação da variabilidade total observada dos dados pelo fator considerado. (b)=probabilidade de erro quando aceitar a influência do fator considerado. Mais baixa ela é, mais significativo é a influência. Influência significativa do fator para $p < 0,05$. MA=maçaranduba; PC=Pacajá e PM=Palmares

Figura 25 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) da localidade de Maçaranduba. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico

Figura 26 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das localidades de Maçaranduba e Pacajá. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classes de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo, H=solo hidromórfico

Figura 27 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) da localidade de Palmares. Círculo de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por localidade (b), por tipo de cobertura vegetal (c) e por classe de solo (d) A=Argissolo, C=Cambissolo, L=Latossolo)

Para eliminar o efeito importante das frações granulométricas, foram realizadas ACP com controle da textura, para os mesmos jogos de dados (separando as localidades). O tipo de solo não teve mais influência significativa (Tabela 30). Em Palmares nenhum dos fatores considerados no estudo explicou significativamente a variabilidade dos dados, ao contrário de Maçaranduba, e de Maçaranduba e Pacajá (Tabela 30). O uso do solo foi o fator que mais explicou a variabilidade nos atributos da localidade Maçaranduba (47,3%, $p < 0,01$, teste de Monte-Carlo), já a cobertura vegetal explicou 26,6% da variabilidade total.

Os gráficos apresentados na figura 28 confirmam os resultados de testes de permutações. Apenas em Maçaranduba é possível observar separação entre os diferentes conjuntos de observações agrupadas por tipo de uso do solo. Em Maçaranduba, não foram coletados dados em cultivos anuais ou perenes; as pastagens (verde claro) e as capoeiras (marron) se distinguem claramente dos demais tipos de uso do solo, enquanto as florestas e juquiras (verdes mais escuros) estão em posição intermediária no plano fatorial (Figura 28Ab). A orientação dos vetores correspondentes às classes de macroporosidade (Figura 28Aa) indica que essas tendem a ser mais elevadas nas capoeiras, e ao contrário, menores em pastagens (Figura 28Ab). Com menor intensidade, mas com o mesmo comportamento, estão os Bioporos (PorBio), mostrando-se maiores nas capoeiras e menores nas pastagens.

A representação em boxplot das variações dos diferentes atributos, ao longo de uma sequência de transformação da cobertura vegetal, confirma essa tendência mais visível nos dados de Maçaranduba (Figura 30) do que em outros jogos de dados adicionando outras localidades (Figuras 29). Além disso, observa-se grande variabilidade nos conjuntos de dados, representada pela amplitude dos valores (Figura 29 e 30). Esta variabilidade observada nos atributos do solo, torna imperceptível as possíveis alterações provocadas nestes pela mudança de uso do solo, principalmente, quando uma análise estatística convencional é realizada.

Figura 28 - ACP normalizadas dos dados de distribuição da porosidade dos solos (camada 0-10 cm) das localidades de Maçaranduba, Maçaranduba e Pacajá, e de Palmares, após eliminar a influência da textura. Círculos de correlações (a) e posições dos pontos de observações agrupados por tipos de uso do solo (b): 1- Floresta conservada; 2- Floresta explorada; 4- Roça; 5- Perene; 10- Pasto limpo; 11- Pasto com Babaçu; 13- Pasto invadido; 14- Capoeira jovem; 15- Capoeira velha; 16- Capoeira de baixio; 17- Juquira jovem; 18- Juquira velha

Figura 29 - Representação em boxplot das classes de porosidade e do conteúdo de argila na camada superficial (0-10 cm) dos solos das três localidades, em função dos tipos de cobertura vegetal: floresta (Flor.); cultivos anuais (Roça) e perenes (Pere.); pastagem (Past.); Capoeira (Capo.); Juquira (Juqu.)

Figura 30 - Representação em boxplot das classes de porosidade e do conteúdo em argila na camada superficial (0-10 cm) dos solos de Maçaranduba, em função dos tipos de cobertura vegetal: floresta (Flor.); pastagem (Past.); capoeira (Capo.); juquirá (Juqu.)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em estudos de pequenas escala, a quantificação de todos os atributos do solo que representem, de forma confiável, toda a variabilidade apresentada pelo sistema solo, é praticamente impossível. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que possam estimar estes atributos do solo de forma rápida e econômica. Neste contexto, as funções de pedotransferência podem suprir esta importante demanda dos estudos que envolvem a evolução dos processos ocorridos nos solos.

O uso e o desenvolvimento de FPT são técnicas relativamente novas e sua utilização pouco difundida. No entanto, nos últimos anos, é observada uma crescente demanda por estas ferramentas, principalmente para alimentar, com dados físico-hídricos, os modelos de predição que estudam a interação solo-planta-atmosfera. Porém, em alguns casos, a utilização de FPT pode ser complexa e muitas vezes imprecisa, principalmente quando se utiliza uma FPT elaborada com dados de solos de outras regiões, podendo, neste caso, não gerar uma boa estimativa dos atributos físico-hídricos do solo.

A complexidade em estimar a CRA é mais evidente sobre parâmetros empíricos de forma (α e n). Esta complexidade pode ser relacionada ao simples fato de serem parâmetros empíricos, e desta forma, não possuírem relação com a física dos solos. As FPT desenvolvidas neste trabalho também apresentaram baixa capacidade para estimar os parâmetros de forma, principalmente do parâmetro α . No entanto, possuíram maior capacidade preditiva do que as FPT propostas por outros autores e testadas neste trabalho. O uso da FPT desenvolvida permitiu a extrapolação do estudo nos 27 pontos (nível detalhado) para os 135 pontos onde não haviam sido determinadas as CRA. As FPT mostraram-se eficientes na estimativa dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten, possibilitando a estimativa das diferentes classes de tamanhos de poros.

Os resultados evidenciam uma distinção do comportamento do solo nas diferentes regiões estudadas, Palmares possui os solos mais argilosos e mais profundos, Pacajá e Maçaranduba são semelhantes entre si, com predomínio de solos mais rasos e arenosos. Desta forma, observa-se que a textura foi o principal atributo do solo que distinguiu as localidades.

As sucessivas mudanças nos tipos de uso do solo, afetaram a maioria dos atributos do solo medidos. Entretanto, foi observada uma alta variabilidade desses atributos nos diferentes tipos de cobertura vegetal e nas classes mais detalhadas de uso do solo. Esta variabilidade pode ser parcialmente explicada pelas diferenças nas características intrínsecas do solo, especialmente, pela origem geológica, pedológica e pela textura do solo, que interferem com os fatores antrópicos. Além disso, a diversidade das formas, seguidas pelos agricultores, de explorar o meio ambiente, ou seja, as diferentes práticas agropecuárias, ou simplesmente o tempo decorrido desde a instalação dos cultivos ou das pastagens, são fontes de variabilidade dos dados. Todas estas, devem ser consideradas quando objetiva-se reduzir a variabilidade não explicada pelas variações espaciais do meio físico e pelas mudanças do uso do solo.

6 CONCLUSÕES

- ✓ Todas as FPT avaliadas neste trabalho, exceto às propostas por Tomasella et al. (2000) níveis 1 e 2, demonstraram limitada capacidade de aplicação aos solos da região estudada;
- ✓ A FPT desenvolvida permitiu a extrapolação das medidas do nível detalhado para os pontos onde não haviam sido determinadas as CRA;
- ✓ A técnica de regressão múltipla, aplicada aos dados de textura, Ds, CO, CTC e pH, foi eficiente na elaboração de FPT para estimar os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980);
- ✓ A eliminação do efeito textura e a separação do estudo por localidade aumentaram a capacidade do fator uso do solo em explicar a variabilidade dos dados medidos;
- ✓ A grande variabilidade encontrada entre os pontos, nos diversos tipos de uso do solo, impossibilitou maior diferenciação entre os tipos de cobertura vegetal;
- ✓ São necessários estudos complementares para desenvolver FPT mais robustas e para entender melhor os efeitos do manejo do solo (práticas de uso) sobre os atributos físico-hídricos dos solos da região estudada.

REFERÊNCIAS

- AFNOR. **Qualité des sols**. local:editora, 1999. v.2: Analyse granulométrique par sédimentation. Méthode de la pipette. Norma experimental (X 31-107 juillet 1983). p. 57-71.
- AINA, P.O.; PERIASWAMY, S.P. Estimating available waterholding capacity of Western Nigerian soils from soil texture and bulk density using core and sieved samples. **Soil Science**, Baltimore, v. 140, p. 55-58, 1985.
- ALENCAR, A.; NEPSTAD, N; MCGRATH, D; MOUTINHO, P; PACHECO, P; DIAZ, M. D. C. V e FILHO, B. S. **Desmatamento na Amazônia: indo além da emergência crônica**. Manaus, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Ipam), 2004, 89 p.
- ANDERSON, W.F.; BEUTE, M.K.; WYNNE, J.C.; WONGKAEW, S. Statistical procedures for assessment of resistance in a multiple foliar disease complex of peanut. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 80, p. 1451-1459, 1990.
- ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 45 p. 1023-1030, 1981.
- ANDERSEN, L.E.; REIS, E.J. **Deforestation, development and government policy in the brazilian amazon: an econometric analysis**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 1997. p. 1-23. (Working Paper, 513).
- ARRUDA, F.B.; ZULLO JUNIOR, J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, v. 11, p.11-15, 1987.
- BALCI, O. Verification, validation and testing. In: BANKS,J. (Ed.) **the handbook of simulation**. New York: John Wiley, 1997. chap. 10. p. 3-12.
- BAKER, L. Development of class pedotransfer functions of soil water retention. **Geoderma**, Amsterdam, v. 144, p. 225-230, 2008.
- BAUER, A.; BLACK, A.L. Soil carbon, nitrogen, and bulk density comparison in two cropland tillage systems after 25 years and in virgin grassland. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 45, p. 1166-1170, 1981.
- BARROS, A.H.C. **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico**. Piracicaba, SP. 2010. 149p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- BARROS E.; GRIMALDI M.; SARRAZIN M.; CHAUVEL A.; MITJA D.; DESJARDINS T.; LAVELLE P. Soil physical degradation and changes in macrofaunal communities in Central Amazon pasture. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 26, p. 157-168, 2004.

BATJES, N.H. Development of a world data set of soil water retention proprieties using pedotransfer rules. **Geoderma**, Amsterdam, v. 71, p. 31-52, 1996.

BELLOCCHI, G.; ACUTIS, M.; FILA, M.; DONATELLI, M. An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p.1222-1233, 2002.

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

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis – physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison, ASA-SSSA, 1986. p. 363-375.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical Ecology using R**. [s.1]. Springer Sciences, 2011. 306p.

BORCARD D.; LEGENDRE P.; DRAPEAU P. Partialling out the spatial component of ecological variation. **Ecology**, Tempe, Arizona, v. 73, p. 1045-1055, 1992.

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

BOUMA, J.; van LANEN, J.A.J. Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities. In: . BEEK, K.J. citar todos et al. (Ed.). **Quantified land evaluation** .Netherlands. :ITC Publ. Enschede, 1987. p.106-110. (Earth Science Publications,6)

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 6 ed. São Paulo:Biblioteca Universitária Freitas Bastos.1983. 647p.

BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Projeto RADAM**. Folha SB.22. Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins, geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: 1974. (Levantamentos de Recursos Naturais).

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. New York:Robert E. Krieger Publishing, 1976. 482p.

BRIGGS, L.J.; SHANTZ, H.L. The Wilting coefficient and its indirect measurement. **Botanical Gazette**, Chicago, v. 53, p. 20-37, 1912.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins: Colorado State University, Civil Engineering Department, 1964. 27p.

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

CAMPBELL, G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, Baltimore, v. 117, p. 311-314, 1974.

CAMPBELL, C.L.; MADDEN, L.V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: John Wiley, 1990. 532 p.

CARVALHO, G.; BARROS, A.C.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D. Sensitive Development Could Protect Amazonia Instead of Destroying It. **Nature**, London, n. 409, p.131, 2001.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 263-266, 1985.

CENTURION, J.F.; CARDOSO, J.P.; NATALE, W. Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, p. 254-258, 2001.

CHAUVEL, A.; GRIMALDI, M.; TESSIER, D. Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation: An example from the central Amazon basin, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 38, p. 259-271, 1991.

CINTRA, F.D.L.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, p. 323-327, 1983.

CORNILLON, P.A.; GUYADER A.; HUSSON, F.; JEGOU, N.; JOSSE J.; KLOAREG M.; MATZNER-LOBER, E.; ROUVIERE, L. **Statistique avec R**. 2ème édition augmentée., Presses Universitaires de Rennes. 2010. 274p.

COX, P.M.; HARRIS, P.P.; HUNTINGFORD, C.; BETTS, R.A.; COLLINS, M.; JONES, C.D.; JUPP, T.E.; MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Increase risk of Amazonian Drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature**, London, v. 453, p. 212-16, 2008.

CRESSWELL, H.P.; COQUET, Y.; BRUAND, A.; MCKENZIE, N.J. The transferability of Australian pedotransfer functions for predicting water retention characteristics of French soils. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 22, p. 62-70, 2006.

DANALATOS, N.G.; KOSMAS, C.S.; DRIESSEN, P.M.; YASSOGLOU, N. Estimation of the draining soil moisture characteristics from standard data as recorded in soil surveys. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, p. 155-165, 1994.

DICKINSON, R.E.; KENNEDY, P. Modeling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parameterizations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 114, p. 439-462, 1988.

DIJKERMAN, J.C. An Ustult-Aquult-Tropept Catena in Sierra Leone, West Africa, II. Land Qualities and Land. **Geoderma**, Amsterdam, v. 42, p. 29-49, 1988.

DONATELLI, M.; ACUTIS, M.; NEMES, A.; WOSTEN, H. Methods to Evaluate Pedotransfer Functions, in **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology**, chap.20. In: PACHEPSKY Y.A. E RAWLS W.J.(Ed.), Elsevier, Amsterdam, 2004. p. 357-410.

DRAY, S.; DUFOUR, A.B. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. **Journal of Statistical Software**, [s.1], v.22, p.1-20, 2007.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. **Statistical Science**, Hayward, v.1, p. 55-77, 1986.

ENTEKHABI, D.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; CASTELLI, F. Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 184, p. 3-17, 1996.

FEARNSIDE, P.M. **A Floresta Amazônica nas mudanças globais**. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), 2003. 134 p.

FEARNSIDE, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and consequences. **Conservation Biology**, Boston, v. 19, p. 680-688, 2005.

FEARNSIDE, P.M. Brazil's Cuiabá-Santarém (BR-163) Highway: The Environmental Cost of Paving a Soybean Corridor Through the Amazon. **Environmental Management**, [s.1], v. 39, p. 601-614, 2007.

FELLER C, BEARE MH. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.

FINKE, P.A.; WÖSTEN, J.H.M.; JONES, J.H.M.; JANSEN, M.J.W. Effects of uncertainty in major input variables on simulated functional soil behaviours. **Hydrological Process**, [s.1], v. 10, p. 661-669, 1996.

FIORINI, C.V.A.; DERLY J.H.S.; SILVA F.F.; MIZUBUTI E.S.G.; ALVES D.P.; CARDOSO T.S. Clustering of progress curves of late blight for tomato genotypes from interspecific crosses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 1095-1101, 2010.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 31, p. 533-546, 1994.

GABRIEL, K.R. The Biplots graphic display of matrices with application to principal component analysis. **Biometrika**, London, v. 58, p. 453-467, 1971.

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

GIAROLLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, v. 26, p. 885-893, 2002.

GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, p. 1633-1635, 1979.

GUNST, R.F.; MASON, R.L. **Regression analysis and its application**. New York :Marcel Dekker, 1980. 402 p.

GRELLE, C.E.V. Predicting extinction of mammals in the Brazilian Amazon. **Oryx**, Oxford, v. 39, p. 347-350, 2005.

GRIMALDI, M.; SARRAZIN, M.; CHAUVEL, A; LUIZAO, F.; NUNES, N; RODRIGUEZ, M. R.L.; AMBLARD, P.; TESSIER, D. Effets de la déforestation et des cultures sur la structure des sols argileux d'Amazonie brésilienne. **Cahiers Orstom**, Paris, v. 2, p. 36-47, 1993.

HILLEL, D. **Soil and water**: Physical principles and processes. New York:Academic Press, 1971. 288p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413p.

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

HOREL, J.D.; HAHMANN, A.N.; GEISLER, J.E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. **Journal of Climate**, Boston, v. 2, p. 1388 -1403, 1989.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 19 Nov. 2011.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Deforestation in Brazilian Amazonian**. São José dos Campos, 2004. 4 p.

Intituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) 2011. **Desmatamento na Amazônia Legal**. Disponível em: http://www.inpe.br/noticias/busca_noticias_res.php. Acesso em: 30 out.2011.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jarsey: Prentice-Hall, 1992. 642 p.

KABAT, P.; HUTJES, R.W.A.; FEDDES, R.A. The scaling characteristics of soil parameters: From plot scale heterogeneity to sub grid parameterization. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.190, p. 363-396, 1997.

KAIMOWITZ, D.; MERTENS, B.; WUNDER, S.; PACHECO, P. **"Hamburger Connection Fuels Amazon Destruction"**. Bangor, Indonesia, Center for International Forest Research. 2004. Disponível em: http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf_files/media/Amazon.pdf. Acesso em: 10 nov. 2011.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis – physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: ASA–SSSA, 1986. p.635-660.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México:Fondo de Cultura Econômica. 1948. 479p.

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

LAURANCE, W.F.; COCHRANE, M.A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P.M.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S.; FERNANDES, T. "The Future of The Brazilian Amazon". **Science**, New York, v. 291, p. 438-439, 2001,

LEAN, J.; WARRILOW, D.A. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. **Nature**, London, v. 342, p. 411-413, 1989.

LEBRETON J.D.; SABATIER R.; BANCO G.; BACOU A.M. Principal component and correspondence analyses with respect to instrumental variables: an overview of their role in studies of structure - activity and species environment relationships. In: DEVILLERS. J.; KARCHER, W. **Applied multivariate analysis in SAR and Environmental studies**. Berlin: Springer Verlag, 1991. p. 85-114.

LÉNA, P. Préface, In ALBALADEJO, C.; ARNAULD SARTRE, X. (Dir.), **L'Amazonie brésilienne et le développement durable. Expériences et enjeux en milieu rural**. Paris: L'Harmattan, 2005. 287p. (Collection Amérique Latine)

LEONG, E.C.; RAHARDJO, H. Review of soil water characteristic curve equations. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 123, p. 1106-1117, 1997.

LI, W.; RONG, F.; ROBINSON, J.; NEGRON, I.; FERNANDES, K. Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences**, London, v. 363, p. 1767-1772, 2008.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.

LUCKNER, L.; van GENUCHTEN, M.Th.; NIELSEN, D.R. A consistent set of parametric models for the two phase flow of immiscible fluids in the subsurface. **Water Resources Research**, Washington, v. 25, p. 2187-2193, 1989.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R.A.; KILEEN, T.J.; LI, W.; NOBRE, C.A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, New York, v. 319, p. 169-172, 2008.

MATHIEU, J.; ROSSI, J.P.; MORA, P.; LAVELLE, P.; MARTINS, P.F.D.; ROULAND, C.; GRIMALDI, M. Recovery of soil macrofauna communities after forest clearance in Eastern Amazonia, Brazil. **Conservation Biology**, Boston, v. 19, p. 1598-1605, 2005.

MEDINA, H.; TARAWALLY, M.; VALLE, A.; RUIZ, M.E. Estimating Soil Water Retention Curve in Rhodic Ferralsols From Basic Soil Data. **Geoderma**, Amsterdam, v. 108, p. 277– 285, 2002.

MERTENS, B.; POCCARD-CHAPUIS, R.; PIKETTY, M.G.; LACQUES, A.E.; VENTURIERI, A. "Crossing Spatial Analyses and Livestock Economics to Understand Deforestation Processes in the Brazilian Amazon: The Case of São Félix do Xingu in South Pará". **Agricultural Economics**, Amsterdam, v. 27, p. 269-294, 2002,

MEVIK, B.H.; WEHRENS, R. The pls Package: Principal Component and Partial Least Squares Regression in R. **Journal of Statistical Software**, 18, [s.1], 1-24, 2007.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B.; BRISTOW, K. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, Amsterdam, v. 93, p. 225-253, 1999.

¹MOEYS, J. Mensagem recebida por <medeiros.jc@gmail.com> em: 19 Abril, 2011.

MONTENEGRO, J. **Características físicas e fator de erodibilidade de solos de depressão central do Rio Grande do Sul**. 1976. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1976.

MORA-AGUILERA, G.D.; NIETO-ANGEL, D.T.; CAMPBELL, C.L. Development of a prediction model for papaya rings pot in Veracruz, Mexico. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 77, p. 1205-1211, 1993.

MORAN, E.F. "Deforestation and Land Use in the Brazilian amazon". **Human Ecology**, New York, v. 21, p. 1-21, 1993.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research** Washington, v. 12, p. 513-522, 1976.

MUCHAGATA, M.; BROWN, K. Cows, colonists and trees: rethinking cattle and environmental degradation in Brazilian Amazonia. **Agricultural Systems**, Essex, v. 76, p. 797-816, 2003.

MULLER, M.M.L.; GUIMARÃES, M.F.; DESJARDINS, T.; MARTINS P.F.S. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 1409-1418, 2001.

MUSGRAVE, G.W. **How much of the rain enters in the soils**. Department of Agriculture, Washington, USA. The yearbook of agriculture. 1955. p.151-159.

NIELSEN, D.R.; JACKSON, R.D.; CARY, J.W.; EVANS, D.D. **Soil Water**. Madison: ASA-SSSA, 1972. 175p.

NEPSTAD, D.; CARVALHO, G.; BARROS, A C.; ALENCAR, A.; CAPOBIANCO, J.; BISHOP, J.; MOUTINHO, P.; LEFEBVRE, P.; SILVA, U. "Road Paving, Fire Regime

Feedbacks, and the Future of Amazon Forests". **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 55, p. 1-13, 2001.

NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; ALENCAR, A.; BARROS, A.C.; CARVALHO, G.; SANTILLI, M.; VERA DIAZ, M. "Frontier Governance in Amazonia". **Science**, New York, v. 295, p. 629-631, 2002.

NOBRE, C.A.; SELLERS, P.J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climatic change. **Journal of Climatology**, Washington, v. 4, p. 957-988, 1991.

OLIVEIRA L.B.; RIBEIRO, M.R.; JACOMINE P.K.T.; RODRIGUES, J.V.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 Solo**, Viçosa, v. 26, p. 315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 63, p. 1748-1756, 1999.

_____. **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. 498 p. (Developments in Soil Science, 30).

PERAZA, J.E.S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003. 118p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

PIDGEON, J.D. The measurement and prediction of available water capacity of Ferrallitic soils in Uganda. **European Journal of Soil Science**, Oxford, UK, v. 23, p. 431-441, 1972.

PHILLIPS O.L.; ARAGÃO L.; LEWIS S.L. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, New York, v. 323, p. 1344-1347, 2009.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-Discovery, 1996. 446p.

QUESADA, C.A.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M. Chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis, **Biogeosciences Discussions**, [s.1], v.6, p.3923-3992, 2009.

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

RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A. Using field topographic to estimate soil water retention. **Soil Science**, Baltimore, v.167, p. 423-435, 2002.

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

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Fundação Cargill, 1985. 466 p.

_____. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Ed. Manole, 1990. p.27-65.

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; URACH, F.L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention under availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1547-1560, 2009.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.B. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 2002. 338p.

ROMANO, N.; SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 202, p. 137-157, 1997.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. I A critical comparison for determining the available water capacity and moisture characteristics curve of a soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 16, p. 1-15, 1965.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J.; ROMBERGER, J.S.; PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 50, p.1031-1036, 1986.

SCHAAP M.G.; LEIJ F.J. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 765-77, 1998.

SCHAAP, M.G. Graphic user interfaces for pedotransfer functions. In: PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. **Development of Pedotransfer functions in Soil Hydrology**. Amsterdam, 2004. p. 349-356.

SCHEINOST, A.; SINOWSKI, W.; AUERSWAD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape. I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 129-143, 1997.

SEPOF: Secretaria de Estado de Planejamento, Orçamento e Finanças. **Estatísticas Municipais Paraense**: Pacajá. Belém, Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará, 2011. 44p.

SEPOF: Secretaria de Estado de Planejamento , Orçamento e Finanças. **Estatísticas Municipais Paraense**: Parauapebas. Belém, Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará, 2011. 41p.

SHUKLA, J.; MINTZ, Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. **Science**, New York, v. 215, p. 1498-1501, 1982.

SILVA, A.P; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 11-19, 2008.

SILVEIRA, F.G.; FONSECA, F.; SILVA P.L.S.C.; MALHADO, C.H.M.; MUNIZ, J.A. Cluster analysis applied to nonlinear regression models selection to growth curves of crossed lambs. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, p. 692-698, 2011.

SKOLE, D.L.; CHOMENTOWSKI, W.H.; SALAS, W.A.; NOBRE, A.D. "Physical and Human Dimensions of Deforestation in Amazonia". **BioScience**, Washington, v. 44, p. 314-322, 1994.

SMITH, P.; SMITH, J.U.; POWLSON, D.S. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 81, p. 153-225, 1997.

SOARES-FILHO, B.S.; NEPSTAD, D.C.; CURRAN, L.M.; CERQUEIRA, G.C.; GARCIA, R.A.; AZEVEDO-RAMOS, C.; VOLL, E.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, London, v. 440, p. 520-523, 2006.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**, Hayward, v.6, p. 461-464, 1978.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C; BALBINO, L.C.; NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 393-399, 1999.

TATEISH, R.; AHN, C.H. Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, [s.1], v. 51, p. 208-215, 1996.

TEIXEIRA, W.G.; PEREIRA, E.G.; CRUZ, L.A.; BUENO, N. Influência do uso nas características físico- químicas de um Latossolo Amarelo, textura muito argilosa, Manaus, AM. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 12., 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Sociedade Latino-Americana de Ciência do Solo, 1996. 1 CD-ROM.

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

TOMASELLA, J.; HOODNETT, M.G. Pedotransfer functions for tropical soils. In: PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam, 2004. p. 415-430.

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

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

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; BALL, B.C.; CARTER, M.R. Soil water desorption curves. In: CARTER, M.R., ed. **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p.569-579.

VAN DAN, J. C.; FEDDES, R. A. Simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with Richards' equation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 233, p. 72-85, 2000.

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

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

van GENUCHTEN, M.Th.; LEIJ, F.J.; LUND, L.J. (Ed.). **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. Riverside: University of California, 1992. 290p.

VEIGA, J.B. Formação e manutenção de pastagem. In: VEIGA, J.B. (Ed.). **Sistemas de produção: criação de gado leiteiro na Zona Bragantina**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. p. 59-65.

VEREecken, H.; FEYEN, J.; MAES, J. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. **Soil Science**, Baltimore, v. 148, p. 389-403, 1989.

VEREecken H.; HERBST M. Statistical regression. In: (PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. (Ed.). **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology Developments in Soil Science**, Amsterdam, v. 30, p. 3-18, 2004.

VEREecken, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y., SCHAAP, M.G.; van GENUCHTEN M.Th. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: a review. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 9, p.1-26, 2010.

YANG, J.; GREENWOOD, D.J.; ROWELL, D.L.; WADSWORTH, G.A.; BURNS, I.G. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N_{ABLE}. **Agricultural Systems**, Essex, v. 64, p. 37-53, 2000.

WÖSTEN, J.H.M. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier, 1997. p. 221-245.

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

WÖSTEN, J.H.M.; FINKE, P.A.; JANSEN, M.J.W.; Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 66, p. 227-237, 1995.

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

WÖSTEN, J.H.M.; A. LILLY, A.; NEMES, A.; BAS C.L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 90, p. 169-185, 1999.